STRATEGIA ITALIANA PER LE TECNOLOGIE QUANTISTICHE

Gruppo di lavoro	
Tommaso Calarco	Università di Bologna – coordinatore
Sanzio Bassini	CINECA
Daniele Binosi	ECT*-Fondazione Bruno Kessler
Edoardo Bompiani	Ministero delle Imprese e del Made in Italy
Diego Brasioli	Ministero degli Affari esteri e della Cooperazione Internazionale
Raffaello Bronzini	Ministero dell'Università e della Ricerca
Davide Calonico	Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica
Valentina Cardinale	Ministero dell'Università e della Ricerca
Massimo Carnelos	Ministero degli Affari esteri e della Cooperazione Internazionale
Francesco Saverio Cataliotti	CNR- INO
Fabrizio Ciarlo	Ministero delle Imprese e del Made in Italy
Roberto Cimino	Ministero dell'Università e della Ricerca
Camilla Chiodi	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Alessandra D'Ambrosio	Ministero delle Imprese e del Made in Italy
Luca De Angelis	Ministero delle Imprese e del Made in Italy
Paolo De Natale	CNR-INO
Elisa Ercolessi	Università di Bologna
Francesca Galli	Ministero dell'Università e della Ricerca
Pasquale Guadagno	Ministero della Difesa
Bruno Levat	Ministero della Difesa
Liviana Lotti	Agenzia per la Cybersicurezza Nazionale
Stefano Luvini	Ministero delle Imprese e del Made in Italy
Chiara Macchiavello	Università di Pavia
Emanuele Nastri	Ministero delle Imprese e del Made in Italy
Luca Nicoletti	Agenzia per la Cybersicurezza Nazionale
Elisabetta Paladino	Università di Catania
Gioacchino Massimo Palma	Università di Palermo
Michela Pellegatta	Ministero dell'Università e della Ricerca
Vincenzo Pullez	Ministero della Difesa

Gruppo di lavoro

Serafino Sorrenti	Dipartimento per la Trasformazione Digitale della Presidenza del Consiglio dei Ministri
Costanza Toninelli	CNR-INO
Melissa Valentino	Ministero dell'Università e della Ricerca
Valeria Vinci	Ministero delle Imprese e del Made in Italy
Antonio Zoccoli	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

INDICE CONTENUTI

PREFAZIONE **7**

1. EXECUTIVE SUMMARY **13**

2. IL CONTESTO ITALIANO **17**

2.1 Le tecnologie quantistiche: settori e sinergie 17

2.2 L'ecosistema italiano delle tecnologie quantistiche 31

2.3 Il posizionamento dell'Italia a livello Internazionale 43

3. LINEE DI AZIONE FUTURE **46**

3.1 Direzioni di sviluppo scientifico 46

3.2 Raccomandazioni strategiche 52

4. QUADRO DEI FINANZIAMENTI **64**

5. GOVERNANCE, INCLUSI SVILUPPI LEGISLATIVI **67**

PREFAZIONE

In un mondo in continua trasformazione, attraversato da grandi sfide geopolitiche, le tecnologie quantistiche rappresentano un ponte tra il passato e il futuro della ricerca. Nuove opportunità di studio e sviluppo, innovazioni destinate a rivoluzionare il nostro modo di vivere e fare impresa: stiamo già oggi scrivendo uno dei capitoli più entusiasmanti della nostra storia.

Il 2025 è l'anno internazionale della scienza e della tecnologia quantistica. Una data non casuale: 100 anni fa nasceva la meccanica quantistica. Da allora, l'importanza di queste tecnologie è cresciuta in maniera esponenziale, tanto da essere considerate vitali per il progresso sociale ed economico di tutti i Paesi. E questo in considerazione delle loro potenziali applicazioni in ambiti strategici come la salute, la comunicazione, l'energia, la sostenibilità ambientale.

L'Italia si inserisce in questo contesto da protagonista. Le tecnologie quantistiche sono già una realtà della nostra ricerca, di base e applicata. E un obiettivo delle nostre imprese e della formazione a tutti i livelli.

Per questo abbiamo deciso di dotarci di una Strategia nazionale, italiana, per le tecnologie quantistiche. L'industria e la ricerca nel nostro Paese stanno già raggiungendo, grazie soprattutto alla preparazione dei nostri imprenditori, dei nostri ricercatori e di tutti i lavoratori del settore, degli ottimi posizionamenti a livello internazionale. Il PNRR ha rappresentato una fondamentale tappa verso la creazione di un ecosistema forte, che sviluppi sinergie solide tra il mondo imprenditoriale, il mondo accademico e le comunità territoriali. Ma non basta. Abbiamo avvertito la necessità di armonizzare tutte le iniziative già in campo. Ed anche per questo, gli ultimi anni hanno visto un incremento dei finanziamenti pubblici destinati alla ricerca, di base e applicata, nell'ambito delle tecnologie quantistiche.

L'Italia ha, quindi, tutte le carte in regola per posizionarsi a livello internazionale come leader del settore, a partire dai punti di forza che già caratterizzano il nostro ecosistema nazionale. La nostra è una visione di lungo termine. Un ambizioso impegno da parte del Governo che ha deciso di puntare sul supporto della rivoluzione quantistica.

Con la definizione di questa Strategia abbiamo dato anche una risposta ai nostri stakeholders e ai tanti partner internazionali impegnati insieme a noi nello sviluppo delle tecnologie quantistiche. Attraverso l'individuazione di questa linea comune vogliamo guidare gli investimenti degli investitori pubblici e privati, e capitalizzare così l'enorme patrimonio scientifico che ci caratterizza.

E soprattutto, la Strategia sarà un supporto per tutto il Governo italiano nello sviluppo di solide collaborazioni internazionali e nella individuazione delle migliori soluzioni a problemi globali in ambito economico, della ricerca e della formazione, della sicurezza nazionale.

Non un lavoro solitario, ma il frutto di un lungo e fruttuoso lavoro di cooperazione. Tutti hanno offerto il loro contributo nella definizione del documento finale: un gruppo di lavoro ha riunito insieme esperti scientifici di altissimo spessore e i rappresentanti dei Ministeri e delle Agenzie coinvolti nello sviluppo delle tecnologie quantistiche. C'è poi stata una attenta consultazione di tutte le industrie e un fruttuoso dialogo con la comunità scientifica. Infine abbiamo voluto tenere una consultazione pubblica per ricevere ulteriori suggerimenti e coinvolgere tutti gli stakeholder nella elaborazione di uno strumento di policy con una visione strategica che guarda al futuro del nostro Paese in tutte le sue dimensioni.

Collaborazione è stata la parola chiave. Tra il Governo, le imprese, le istituzioni accademiche, il mondo della ricerca e il mondo del lavoro, per massimizzare il potenziale delle tecnologie quantistiche. E proprio su questa collaborazione si baserà l'attuazione della Strategia, nella piena consapevolezza che un ecosistema solido potrà attrarre investimenti importanti e renderà l'Italia più forte e competitiva a livello internazionale.

Glossario

Circuito quantistico – Sequenza di gate quantistici che formano un algoritmo quantistico per processare un registro di qubits.

Computazione quantistica adiabatica – Architettura di quantum computing basata su un processo di transizione da uno stato ad alta sovrapposizione a uno stato finale che rappresenta la soluzione del problema.

Computazione quantistica basata sulle misure – Architettura di quantum computing che parte da uno stato entangled a molti qubits e prosegue misurando progressivamente i qubits fino alla misura del registro finale.

Computazione quantistica digitale – Architettura di quantum computing basata sull'applicazione di un circuito quantistico a un registro di qubit.

Decoerenza – Perdita delle proprietà quantistiche di un sistema a causa di interazioni con l'ambiente, che porta il qubit a comportarsi come un bit classico.

Entanglement – Fenomeno in cui due o più qubit diventano correlati in modo tale che lo stato di uno dipende dallo stato dell'altro, indipendentemente dalla distanza che li separa.

Errori quantistici – Errori dovuti alla decoerenza o a imperfezioni nei dispositivi quantistici, che richiedono correzione degli errori quantistici (QEC, Quantum Error Correction).

FTQC (Fault Tolerant Quantum Computing) – Utilizza tecniche di correzione degli errori quantistici (QEC) per correggere gli errori a un tasso più rapido di quanti ne avvengano, permettendo operazioni affidabili su larga scala.

Gate quantistico – Operazione che manipola lo stato di uno o più qubit, simile alle porte logiche nei computer classici.

Misurazione quantistica – Processo che collassa la sovrapposizione di un qubit in uno stato definito (0 o 1), distruggendo l'informazione quantistica.

NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) – Generazione attuale di computer quantistici, con un numero limitato di qubit e suscettibili agli errori.

Precisione quantistica - Caratteristica desiderata di un processo o di una trasformazione effettuata su un sistema quantistico, quantificata dalle fluttuazioni delle quantità misurabili di interesse, o della loro stima.

Quantum Annealing – Algoritmo di quantum computing che impiega un computer quantistico adiabatico per problemi di ottimizzazione.

Qubit – Unità base dell'informazione quantistica, analoga al bit classico, ma capace di trovarsi in più stati contemporaneamente grazie alla sovrapposizione.

Sovrapposizione – Proprietà per cui un qubit può trovarsi in una combinazione di più stati (0 e 1) contemporaneamente, fino a quando non viene misurato.

Teletrasporto quantistico – Tecnica per trasferire l'informazione quantistica di un qubit a un altro, sfruttando l'entanglement.

Tempo di coerenza – Periodo in cui un qubit mantiene il suo stato quantistico prima che la decoerenza lo distrugga.

Vantaggio quantistico – Capacità, da parte di un computer quantistico, di eseguire un calcolo che sarebbe impossibile (o impraticabile) per un computer classico

Lista delle Abbreviazioni

ACN	Agenzia Nazionale per la Cybersicurezza
CdC	Centri di Competenza
CEN	Comitato europeo per la standardizzazione
CENELEC	Comitato europeo di standardizzazione elettrotecnica
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
CTE	Case delle Tecnologie Emergenti
DTD	Dipartimento per la Trasformazione Digitale
EMN-Q	Network di Metrologia Europea per le Tecnologie Quantistiche
EPR	Enti Pubblici di Ricerca
EuroHPC-JU	Impresa comune per il calcolo europeo ad alte prestazioni
EuroQCI	Infrastruttura Europea per le Comunicazioni Quantistiche
EuroQMTI	European Quantum Metrology and Testing Initiative
FGTQ	Focus Group on Quantum Technologies
FTQC	Fault Tolerant Quantum Computing
HPC	High Performance Computing
HPC-QCS	High Performance Computer and Quantum Simulator hybrid
ICSC	Centro Nazionale di Ricerca in HPC, Big Data and Quantum Computing
INFN	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
KPI	Key Performance Indicators
MAECI	Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale
ML	Machine Learning
MIMIT	Ministero delle Imprese e del Made in Italy
MUR	Ministero dell'Università e della Ricerca
NISQ	Noisy Intermediate Scale Quantum
NQIA	National Quantum Initiative Act
NQSTI	National Quantum Science and Technology Institute
NSB	Organismi Nazionali di Standardizzazione (National Standardization Body)

Lista delle Abbreviazioni

NV	Azoto-Vacanza (Nitrogen-Vacancy)
PIC	Circuiti Integrati Fotonici
PMI	Piccole e Medie Imprese
PNRR	Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza
PoC	Proof of Concept
PRIN	Progetti di Rilevante Interesse Nazionale
QEC	Quantum Error Correction
QKD	Distribuzione Quantistica di Chiavi (Quantum Key Distribution)
QML	Quantum Machine Learning
QPU	Unità di Elaborazione Quantistica
RTO	Enti di Ricerca e Tecnologia (Research and Technology Organization)
SDK	Piattaforme di Sviluppo del Codice Quantistico (Software Development Kit)
SDO	Organizzazioni di Sviluppo degli Standard
SI	Sistema Internazionale
SRIA	Agenda Strategica per la Ricerca e l'Industria
STEM	Science, Technology, Engineering and Mathematics
TQ	Tecnologie Quantistiche
TRL	Technology Readiness Level

1. EXECUTIVE SUMMARY

Le tecnologie quantistiche (TQ) rappresentano una leva strategica per la competitività, la sovranità tecnologica e la sicurezza nazionale. È questo il motivo per cui la competizione globale nel settore è notevolmente aumentata, attirando un'attenzione sempre maggiore e stimolando un incremento degli investimenti sia pubblici che privati.

A livello europeo, dal lancio della European Quantum Technology Flagship nel 2018 sono stati compiuti progressi significativi nel settore, con la promozione di iniziative come l'infrastruttura europea per le comunicazioni quantistiche (EuroQCI) e l'Impresa comune per il calcolo europeo ad alte prestazioni (EuroHPC-JU), fino ad arrivare alla recente pubblicazione della Comunicazione "Competitiveness Compass for the EU"[1], che, nel delineare l'agenda della Commissione Europea per il rafforzamento della competitività in un'ottica di technology foresight, individua le TQ come una delle aree di attività previste nei prossimi mesi. Alla menzionata comunicazione si è aggiunta la pubblicazione della strategia europea sulle TQ a inizio luglio 2025[2] , che sarà seguita da una successiva proposta di Quantum Act, nella quale verranno allineati i programmi UE e nazionali e supportati gli investimenti in infrastrutture paneuropee di calcolo quantistico, comunicazione e rilevamento.

Considerata l'importanza crescente delle TQ e la loro rilevanza, il Governo si è impegnato ad elaborare, al pari di altri Stati ed in linea con gli ambiziosi obiettivi europei, la presente strategia nazionale, che possa mettere a sistema le risorse esistenti e disponibili per valorizzare i risultati emersi e continuare a investire sui punti di forza identificati, così da capitalizzare le opportunità e rafforzare il ruolo dell'Italia nel contesto europeo ed internazionale. L'affermazione di un ecosistema nazionale (di ricerca e industriale) nelle TQ passa anche dalla cooperazione e dai rapporti internazionali, che devono essere condotti nel quadro degli indirizzi fondamentali della politica estera e di sicurezza e delle alleanze del Paese.

La strategia è stata redatta da un Gruppo di Lavoro composto da esperti della comunità scientifica e da rappresentanti del Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR), del Dipartimento per la Trasformazione Digitale (DTD) della Presidenza del Consiglio dei Ministri, dell'Agenzia Nazionale per la Cybersicurezza (ACN), del Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT), del Ministero della Difesa, del Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale (MAECI) al fine di rappresentare debitamente gli interessi dei diversi stakeholder pubblici e privati.

L'analisi dell'ecosistema italiano ha evidenziato un panorama dinamico e in crescita. L'Italia dispone di una forte competenza accademica e industriale, con istituti di ricerca e aziende attive in tutti i pilastri delle TQ. Dal punto di vista industriale, le TQ relative alla comunicazione e alla sensoristica presentano gradi di maturità tecnologica (TRL) più elevati, mentre il settore del calcolo e della simulazione necessita di accesso alle infrastrutture.

I finanziamenti pubblici del MUR nelle TQ, pari a 228,9 milioni € (2021-2024), hanno rappresentato un primo passo importante per lo sviluppo dell'ecosistema italiano, ma risultano inferiori rispetto a quelli stanziati dai principali Stati Membri dell'Unione Europea e da altri concorrenti internazionali. La presenza di start-up nel settore, inoltre, rimane limitata rispetto a paesi come Stati Uniti, Regno Unito, Francia e Germania.

In questi anni il MIMIT ha avviato progettualità su varie tecnologie emergenti, tra

[1] Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, "A Competitiveness Compass For The EU", 29.01.2025, COM(2025) 30 final.

[2] Communication from the Commission to the European Parliament and the Council, "Quantum Europe Strategy: Quantum Europe in a Changing World", 2.7.2025 COM(2025) 363 final.

cui quelle quantistiche all'interno di proprie strutture come le Case delle Tecnologie Emergenti (CTE) ed i Centri di Competenza (CdC) distribuiti sul territorio nazionale, con l'obiettivo di sviluppare start up e convergenze con aziende.

Dato lo stato dell'arte, per rafforzare il posizionamento dell'Italia sono state individuate azioni mirate a potenziare la ricerca e l'innovazione, migliorare l'accesso alle infrastrutture e stimolare investimenti privati. Oltre al finanziamento della ricerca di base, la creazione di reti di collaborazione tra pubblico e privato è ritenuta cruciale per promuovere la ricerca applicata ed il trasferimento tecnologico, mentre la valorizzazione di laboratori nazionali in cui aziende e istituzioni di ricerca possano lavorare congiuntamente permetterà di sviluppare nuove soluzioni industriali. Inoltre, la creazione di programmi di formazione avanzati e di dottorati industriali contribuirà alla crescita della forza lavoro specializzata, un aspetto essenziale per l'espansione del settore. È parimenti importante il sostegno all'internazionalizzazione degli operatori italiani delle TQ e la promozione internazionale degli ecosistemi nazionali (attrazione talenti e capitali esteri), per il tramite della diplomazia economica.

Sul fronte delle applicazioni industriali, l'Italia deve favorire la nascita e crescita di start-up e incentivare investimenti nelle TQ, favorendo la mobilizzazione di capitali privati, con interventi che facciano crescere, in modo particolare, i volumi del venture deep-tech e la nascita di fondi growth per contenere il fenomeno del companies flight. La standardizzazione e la certificazione delle TQ rappresentano un altro elemento chiave, poiché garantiscono la sicurezza e l'interoperabilità delle soluzioni sviluppate, rafforzando la competitività delle imprese italiane a livello globale.

L'implementazione di tali misure richiede dunque l'elaborazione di una struttura di governance efficace a supporto all'innovazione nelle TQ. L'ultima parte della strategia si concentra quindi nel delineare alcuni suggerimenti strategici per un modello di governance.

L'Italia ha l'opportunità di posizionarsi come un attore di rilievo nel panorama delle TQ, ma ciò richiede una visione strategica chiara e un impegno costante per sostenere la ricerca e l'innovazione, la promozione internazionale e la tutela della sicurezza nei settori delle tecnologie critiche, in modo particolare nei segmenti più vulnerabili al trasferimento illecito o indesiderato di competenze e conoscenze di valore strategico. Il percorso delineato in questo documento offre una roadmap per consolidare il ruolo del Paese nelle TQ e garantire un futuro tecnologico sicuro e competitivo. Investire in queste tecnologie significa non solo cogliere un'opportunità di crescita economica e industriale, ma anche rafforzare la sicurezza nazionale e contribuire al progresso scientifico globale.

I prossimi anni saranno decisivi: chi guiderà lo sviluppo industriale e scientifico delle TQ dominerà i settori della comunicazione sicura, dell'intelligenza artificiale, della simulazione di materiali complessi e del calcolo ad alte prestazioni.

Con questa Strategia, l'Italia intende colmare il divario con i Paesi più avanzati, rafforzare la propria autonomia in settori chiave, e generare nuove filiere industriali e occupazione qualificata.

La strategia si fonda su quattro assi prioritari:

- ✓ **Sviluppo scientifico e industriale** nei cinque pilastri delle TQ (calcolo, simulazione, comunicazione, sensoristica, scienza di base);
- ✓ **Costruzione di un ecosistema nazionale integrato,** capace di generare valore lungo l'intera catena: ricerca, trasferimento tecnologico, industria, formazione;
- ✓ **Internazionalizzazione e sicurezza:** posizionamento attivo nei programmi UE e tutela delle tecnologie critiche;
- ✓ **Governance e misurabilità**: strumenti concreti per coordinare, valutare e aggiornare le azioni strategiche.

L’Italia dispone di eccellenze scientifiche, ma soffre di frammentazione, debole presenza industriale e sottoinvestimento rispetto ai principali competitor. Il presente documento delinea un percorso operativo per:

- ✓ attrarre e trattenere talenti,
- ✓ rafforzare le infrastrutture di test, certificazione e prototipazione,
- ✓ sviluppare una rete di poli di competenza su scala nazionale,
- ✓ favorire lo scale-up delle startup deep-tech italiane,
- ✓ attivare strumenti di monitoraggio, KPI e valutazione d’impatto.

Questa strategia è un primo passo. La sua efficacia dipenderà dalla capacità di attuare rapidamente le azioni proposte, con visione, investimenti mirati e una governance stabile.

L’Italia ha l’opportunità di essere protagonista della seconda rivoluzione quantistica.

2. IL CONTESTO ITALIANO

2.1 LE TECNOLOGIE QUANTISTICHE: SETTORI E SINERGIE

Questa prima parte della strategia fornisce una panoramica tecnica delle TQ, approfondendo le loro caratteristiche e gli ambiti di applicazione per individuare le linee di sviluppo più promettenti nel campo della ricerca[3].

Le TQ 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 e l'entanglement. Questa nuova fase promette di trasformare ulteriormente la tecnologia.

Con le loro applicazioni rivoluzionarie e trasversali, le TQ necessitano di un approccio lungimirante, per massimizzare lo sviluppo economico, garantire l'indipendenza tecnologica e rafforzare la sicurezza nazionale. Questo approccio va focalizzato sui principali ambiti identificati come pilastri nella strategia europea:

- ✓ **Il Calcolo Quantistico** mira a sviluppare dispositivi e protocolli capaci di superare o accelerare i computer classici esistenti, offrendo vantaggi come la risoluzione più rapida per alcune classi di problemi, un consumo energetico ridotto, e potenzialmente una maggiore precisione e costi inferiori. Le sue applicazioni spaziano dalla logistica alla distribuzione dell'energia, dalla diagnostica medica alle previsioni idrologiche o dei cambiamenti climatici, con la potenzialità di contribuire anche al miglioramento delle tecniche di apprendimento automatico e intelligenza artificiale. Tuttavia, la sua potenza solleva anche preoccupazioni sulla vulnerabilità dei sistemi crittografici esistenti, rendendo essenziale o sviluppo di hardware sicuro e protocolli avanzati per la crittografia.
- ✓ **La Simulazione Quantistica** ha lo scopo di sviluppare dispositivi capaci di emulare specifici sistemi a livello atomico, offrendo maggiore semplicità rispetto ai computer quantistici universali. Oltre a importanti ricadute sulle conoscenze scientifiche fondamentali, le sue applicazioni sono molteplici e includono lo sviluppo di nuovi materiali, la progettazione di celle solari e batterie di nuova generazione, il design di nuove molecole e biomolecole, con applicazioni negli ambiti della meccanica, della chimica e della farmacologia, tanto in contesti civili quanto in quelli militari.

[3] Parte delle sezioni 2.1, 2.1.6, 2.1.7 è tratta dal Report "Ecosistema industriale italiano delle tecnologie quantistiche. Analisi dei risultati della consultazione pubblica condotta dal Ministero delle imprese e del Made in Italy" redatto dal MIMIT - Direzione Generale per le nuove tecnologie abilitanti in collaborazione con l'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano. La versione integrale del Report è disponibile al seguente link: https://www.mimit.gov.it/images/stories/digitale/Ecosistema_industriale_italiano_delle_tecnologie_quantistiche.pdf

- ✓ **La Comunicazione Quantistica** promette livelli di confidenzialità senza precedenti nelle comunicazioni punto-punto, sia per uso civile che militare. In uno scenario futuro, per resistere agli attacchi portati dai computer quantistici, si dovranno complementare due approcci: uno algoritmico, basato su protocolli post-quantistici e hardware classico, l'altro fisico, basato su sistemi di Distribuzione Quantistica delle Chiavi (QKD). La creazione di nuove reti di trasmissione ad hardware quantistico potrà poi evolvere verso una rete in grado di scambiare risorse quantistiche fra dispositivi consentendo applicazioni come la sensoristica ed il calcolo distribuito.
- ✓ **La Sensoristica Quantistica** sfrutta le proprietà della materia e della radiazione quantistica per raggiungere sensibilità e precisione senza precedenti. I sensori quantistici trovano applicazioni in tutti i domini operativi, sia in ambito civile che militare. A titolo esemplificativo, alcune possibili applicazioni includono: orologi atomici quantistici per un posizionamento estremamente preciso; gravimetri capaci di monitorare i movimenti tettonici o identificare strutture sotterranee; magnetometri a pompaggio ottico per identificare oggetti nascosti o depositi minerari, anomalie di campo magnetico terrestre attraverso mappature da piattaforme mobili, misurare e fornire immagini dei campi biomagnetici (ad esempio quelli generati da cervello, cuore e muscoli); microscopia quantistica; dispositivi e rivelatori per applicazioni in ricerca di base.

Le TQ rappresentano, dunque, una leva strategica fondamentale per il progresso scientifico, economico e di sicurezza dell'Italia.

Le attuali sfide globali – sociali, politiche ed economiche – evidenziano l'importanza delle tecnologie emergenti e dirompenti, come quelle quantistiche, capaci di integrare e in alcuni casi superare i metodi classici per affrontare prove complesse e interconnesse in tutti i domini operativi: terra, mare, aria, cyber e spazio. In questo scenario, è dunque imprescindibile adottare un approccio prospettico e previsionale, in grado di: i) valutarne l'impatto, identificando con lungimiranza opportunità e rischi, e ii) attuare una strategia adeguata a promuoverne e gestirne lo sviluppo, mantenendo un vantaggio strategico. Solo in tal modo le TQ potranno diventare una risorsa fondamentale per il Sistema Paese, contribuendo al progresso scientifico, all'innovazione tecnologica e imprenditoriale, alla creazione delle industrie del futuro, e alla sicurezza nazionale.

Per questo motivo, è fondamentale orientare lo sviluppo delle TQ in modo responsabile, bilanciando attentamente i rischi e le opportunità che esse comportano. Va considerata l'opportunità di far leva sulle tecnologie più avanzate esistenti per gestire l'accelerazione all'innovazione nel transitorio. Allo stesso tempo 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.

Attraverso una pianificazione integrata, fondata sull'analisi previsionale e aggiornata periodicamente, questa strategia mira a massimizzare i benefici delle TQ ed a minimizzarne i rischi. Il suo scopo è contribuire a un futuro sostenibile, sicuro e tecnologicamente competitivo per l'intero Sistema Paese.

2.1.1 Scienza quantistica di base

Importanza della scienza di base

La scienza quantistica di base – tutt'ora in evoluzione – costituisce il fondamento su cui si sviluppano le TQ. Le scoperte di oggi assicurano le tecnologie di domani.

Investire nella ricerca fondamentale è cruciale per il progresso delle TQ e per risolvere quei problemi che impediscono un pieno sviluppo delle stesse, come la scalabilità e la decoerenza. In particolare, la scienza di base supporta il

miglioramento delle prestazioni delle piattaforme fisiche, tra cui quelle basate su sistemi fotonici, qubit di spin, qubit superconduttori, molecole, atomi e ioni. Inoltre, favorisce lo sviluppo di nuovi approcci alla computazione, comunicazione e sensoristica attraverso lo studio del ruolo delle risorse quantistiche fondamentali. Consente anche l'ottimizzazione di piattaforme innovative, come sistemi meccanici e opto-meccanici, eccitazioni elettroniche topologiche e qubit molecolari. Non solo: la scienza di base è la principale leva per incentivare studenti talentuosi allo studio delle TQ e permette di formare scienziati e ingegneri quantistici in grado di rispondere alle esigenze dell'industria emergente.

Scienza di base per l'ampliamento dei confini della meccanica quantistica per le tecnologie quantistiche

I principali ambiti della ricerca di base con ricadute industriali ad oggi sono: la decoerenza quantistica, la termodinamica quantistica, la materia condensata, la gravità quantistica e i fondamenti della meccanica quantistica. Un esempio consiste nel migliorare la gestione della decoerenza, al fine di utilizzare i computer quantistici per studiare sistemi complessi, esplorare i limiti della meccanica quantistica e approfondire i suoi principi fondamentali – tutti passaggi cruciali per sviluppare e potenziare le TQ. Un ulteriore esempio è dato dall'ottimizzazione delle risorse energetiche guidata dai principi della termodinamica quantistica, che rafforza il legame tra l'irreversibilità delle misure quantistiche e il loro costo in termini di risorse entropiche. Questo approccio permette di individuare un numero limitato di parametri rilevanti e usarli per aumentare la precisione o l'efficienza dei processi di interesse.

Scienza di base per la teoria dell'informazione quantistica

Un altro versante è la teoria dell'informazione quantistica. Questa trae grande beneficio dalla ricerca di base, che risulta essenziale per comprendere le proprietà degli algoritmi quantistici e sviluppare software capaci di risolvere problemi reali sui computer quantistici. Le principali aree di studio includono l'analisi della complessità degli algoritmi quantistici per individuare vantaggi autentici, la teoria della complessità quantistica per dimostrare e stabilire tali vantaggi, la teoria dell'informazione quantistica che esamina le proprietà dell'informazione negli stati quantistici, la caratterizzazione e l'emulazione di algoritmi quantistici complessi e delle strutture di entanglement generati da essi. Queste ricerche sono fondamentali per migliorare le prestazioni dei protocolli di comunicazione quantistica e sfruttare appieno le potenzialità dei computer quantistici rispetto ai sistemi classici.

2.1.2 Calcolo quantistico

Il calcolo quantistico sfrutta i principi della meccanica quantistica per eseguire operazioni di calcolo in modo più efficiente rispetto ai computer classici.

Il calcolo quantistico è un sistema computazionale basato sulla manipolazione attiva degli stati quantistici della materia per l'elaborazione di informazioni. Esso 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.

Dispositivi Noisy Intermediate Scale Quantum (NISQ)

L'attuale generazione di dispositivi quantistici opera nel regime Noisy Intermediate Scale Quantum (NISQ), caratterizzato dalla presenza di qubit rumorosi e dall'assenza di meccanismi completi per la correzione degli errori quantistici (Quantum Error Correction, QEC). Una delle principali sfide nei prossimi anni sarà quella di stabilire se ed in che modo sia possibile ottenere vantaggi quantistici utilizzando tali dispositivi. È stato ad esempio dimostrato che dispositivi NISQ con più di 100 qubit con il supporto di algoritmi per la mitigazione degli errori permettono di migliorare alcuni calcoli effettuati con algoritmi a forza bruta eseguiti su supercomputer classici. Queste pubblicazioni hanno aperto la fase che viene chiamata di “quantum utility” e prelude al raggiungimento del vantaggio quantistico. A lungo termine, l'obiettivo è sviluppare computer quantistici a tolleranza di errore (Fault Tolerant Quantum Computation, FTQC) capaci di eseguire calcoli complessi con errori minimi. Ciò include la possibilità di interconnettere i computer quantistici, consentendo lo scambio di informazioni quantistiche e l'eventuale sviluppo di un internet quantistico. Il regime NISQ rappresenta un motore fondamentale per l’avanzamento tecnologico dei dispositivi quantistici, dei loro sistemi di controllo e del software quantistico, gettando le fondamenta per la precisione e la scalabilità necessarie per la FTQC.

Fault Tolerant Quantum Computing (FTQC)

I qubit sono estremamente sensibili ai fattori ambientali, richiedendo il funzionamento in ambienti altamente controllati. Il raggiungimento della FTQC dipende da una drastica riduzione dei tassi di errore, resa possibile attraverso la QEC, in cui più qubit fisici imperfetti vengono raggruppati in qubit logici in cui eventuali errori possono essere rilevati e corretti. Tuttavia, ciò introduce un significativo overhead hardware, poiché per creare un singolo qubit logico è necessario un gran numero di qubit fisici. Per affrontare questa sfida verso una computazione quantistica robusta e scalabile, è essenziale: i) progettare nuovi tipi di qubit con caratteristiche migliorate; ii) sviluppare architetture di chip ottimizzate per la correzione degli errori; e iii) implementare codici QEC avanzati per ridurre al minimo le risorse hardware richieste.

L'obiettivo primario è creare dispositivi di calcolo quantistico che superino o accelerino i computer classici esistenti nella risoluzione di specifici problemi industriali, scientifici e tecnologici. Questo “vantaggio quantistico” può manifestarsi in varie forme: maggiore rapidità, maggiore precisione, migliore efficienza energetica, riduzione dei costi operativi, o una combinazione di tali benefici. In particolare, trova crescente rilievo l’utilizzo di algoritmi di quantum machine learning (QML), con potenziali vantaggi nei settori della classificazione di dati, dell’ottimizzazione e dell’elaborazione di segnali. Sebbene l’impatto complessivo del calcolo quantistico sia ancora in fase di valutazione, è altamente probabile che questa tecnologia superi i computer classici in alcune aree di interesse, pur mantenendo una relazione di complementarità e competizione con essi.

Applicazioni del calcolo quantistico

Le applicazioni del calcolo quantistico includono la crittografia, la simulazione, l'ottimizzazione e l'intelligenza artificiale. I computer quantistici potrebbero rendere meno sicuri i metodi di protezione attuali, spingendo a sviluppare nuovi protocolli di sicurezza. Nella simulazione, questi computer possono modellare materiali e molecole complessi, accelerando la scoperta di farmaci e nuovi materiali. Per l'ottimizzazione, gli algoritmi quantistici permettono di risolvere in modo più efficiente problemi complessi in settori come la scienza di base, la logistica e la finanza, eventualmente in sinergia con l’utilizzo di software che sfruttino risorse computazionali classiche. Infine, nell'intelligenza artificiale, il calcolo quantistico può velocizzare l'addestramento dei modelli, migliorando applicazioni avanzate come veicoli autonomi e diagnostica medica. Questi progressi promettono di trasformare vari ambiti, rendendo le tecnologie più rapide e potenti.

L'apprendimento automatico (Machine Learning, ML) – una branca dell'intelligenza artificiale – può beneficiare notevolmente dal calcolo quantistico. L’integrazione di algoritmi quantistici con metodi tradizionali di ML permette di migliorare tecniche come le macchine a vettori di supporto per la classificazione dei dati, l'apprendimento per rinforzo quantistico e le macchine

di Boltzmann quantistiche. Queste applicazioni avanzate trovano impiego in settori come la scienza di base, la diagnosi medica basata su immagini, la previsione dei cambiamenti climatici e le previsioni idrologiche, offrendo risultati più accurati ed efficienti.

Sfide scientifiche, tecnologiche e industriali

Lo sviluppo di computer quantistici coinvolge più livelli di tecnologia, noti collettivamente come stack di calcolo quantistico. La costruzione su larga scala di sistemi FTQC richiede l'integrazione di milioni di qubit ad alta fedeltà. Il funzionamento ottimale dei computer quantistici dipende dunque da un'efficace caratterizzazione, ottimizzazione e controllo dei qubit. Ciò comporta la misurazione delle proprietà dei qubit, il contrasto delle derive nelle prestazioni e la regolazione fine dei segnali di controllo per ottenere la massima fedeltà. Con la scalabilità dei sistemi quantistici, il consumo energetico, l'ingombro fisico e la robustezza devono migliorare, rendendo necessaria l'integrazione dell'elettronica di controllo vicino ai qubit talvolta in ambienti criogenici. Il superamento delle sfide necessarie per passare dalla scala NISQ alla scala FTQC richiede una collaborazione attiva tra l'industria e gli istituti di ricerca, favorendo cicli di feedback rapidi e la co-progettazione dell'intero stack di elaborazione. Questo stack integra le unità di elaborazione quantistica (QPU) con l'infrastruttura per l'alloggiamento, la schermatura, l'instradamento del segnale, l'elettronica di controllo, il firmware ed il software.

La costruzione di computer quantistici si basa su diverse tecnologie per i qubit, ciascuna con i propri vantaggi e sfide. I qubit superconduttori sono tra i più avanzati, offrendo flessibilità, scalabilità e elevata velocità nell'esecuzione dei calcoli, ma richiedendo condizioni particolari per mantenere la loro efficienza. Quelli a base di semiconduttori, come quelli in silicio, promettono una grande scalabilità grazie alla tecnologia già consolidata. Gli ioni intrappolati e gli atomi neutri garantiscono alta precisione e lunghi tempi di funzionamento. I fotoni sono ideali per comunicazioni a lungo raggio, mentre i qubit realizzati con centri di colore offrono potenziale per operazioni a temperatura ambiente. I sistemi ibridi, che combinano diverse tecnologie, offrono maggiore flessibilità ma sono più complessi da gestire. Un esempio sono i materiali bidimensionali (2D) da integrare direttamente su piattaforme come quella del silicio. Indipendentemente dalla tecnologia scelta, è essenziale sviluppare materiali di alta qualità, metodi di fabbricazione efficienti, ambienti di raffreddamento avanzati e soluzioni di integrazione hardware-software. Inoltre, è importante migliorare il controllo dei qubit, ridurre il consumo energetico e integrare i computer quantistici con i supercomputer tradizionali per sfruttare al meglio le loro potenzialità. Questi progressi richiedono una stretta collaborazione tra industria e ricerca per superare le sfide e realizzare computer quantistici su larga scala.

Lo sviluppo del software stack completo, dai controller di basso livello, ai compilatori dedicati a ciascuna piattaforma e software di alto livello per applicazioni dedicate, sarà fondamentale per il futuro sviluppo del settore sia per la ricerca di base che per le applicazioni industriali.

2.1.3 Simulazione quantistica

I simulatori quantistici sono dispositivi specializzati che imitano il comportamento di sistemi quantistici complessi, rendendo più semplice lo studio di tali sistemi rispetto ai computer quantistici universali. Questi simulatori sono progettati per risolvere problemi specifici seguendo le leggi dei sistemi che emulano. Anche se non possono eseguire calcoli generali, si prevede che riusciranno a risolvere certe tipologie di problemi prima dei computer quantistici digitali, grazie a requisiti meno rigorosi per la qualità dei qubit. Esistono diversi tipi di simulatori quantistici: i) i simulatori digitali, che utilizzano sequenze di porte quantistiche per approssimare la dinamica quantistica; ii) i simulatori analogici, che replicano il comportamento di sistemi reali in condizioni controllate; iii) i dispositivi euristici, che offrono soluzioni approssimate per

problemi di ottimizzazione, combinando componenti classici e quantistici. In parallelo, si sta sviluppando anche il concetto di processi “quantum inspired”, dove un sistema quantistico viene emulato su una architettura classica, ad esempio nel simulated quantum annealing. Questi strumenti sono particolarmente utili per applicazioni specifiche, come la simulazione di reti complesse nel settore industriale.

Applicazioni della simulazione quantistica

Le applicazioni della simulazione quantistica sono numerose e riguardano sia ambiti civili che militari, suddividendosi principalmente in due aree: la simulazione di sistemi quantistici complessi e l'ottimizzazione. I simulatori quantistici possono modellare molecole e materiali difficili da analizzare con i computer tradizionali, favorendo innovazioni nei settori automobilistico, chimico, petrolifero, fotovoltaico e farmaceutico, oltre a supportare la ricerca fondamentale in fisica e biologia. Per quanto riguarda l'ottimizzazione, la simulazione quantistica può risolvere problemi complessi come la gestione del traffico veicolare, il commercio energetico e l'ottimizzazione delle catene di approvvigionamento, generando anche benefici per settori come la finanza, le assicurazioni, i trasporti, la logistica, la cybersecurity, la produzione e la sanità.

Sfide scientifiche, tecnologiche e industriali

Lo sviluppo della simulazione quantistica si trova ad affrontare diverse sfide scientifiche, tecnologiche e industriali su diversi livelli del sistema. Una simulazione quantistica efficace richiede un controllo preciso dei qubit e la loro programmabilità. I simulatori quantistici digitali hanno requisiti di controllo dei qubit simili a quelli dei computer quantistici, ma con una certa flessibilità a seconda del problema. I simulatori quantistici analogici, invece, richiedono un'elevata precisione nel controllo per preparare e pilotare accuratamente le dinamiche quantistiche, anche se non necessariamente a livello di singolo qubit.

Aumentare la scala delle piattaforme di simulazione quantistica è fondamentale per ampliare il loro campo di applicazione, in particolare nella progettazione dei materiali, nella chimica quantistica e nei problemi di ottimizzazione. Lo sviluppo, inoltre, della programmabilità per approcci non basati sui qubit è essenziale per rendere queste piattaforme più versatili e per supportare applicazioni rilevanti per l'industria.

Stabilire benchmark e protocolli di verifica per le operazioni quantistiche analogiche è cruciale per far scalare i simulatori quantistici oltre i 1000 qubit, migliorando la loro capacità di affrontare e risolvere problemi quantistici complessi.

2.1.4 Comunicazione quantistica

La comunicazione quantistica sfrutta stati e risorse quantistiche per lo sviluppo di nuovi protocolli di comunicazione con caratteristiche radicalmente nuove che spaziano dalla sicurezza fisica alla capacità di rete senza precedenti. La sicurezza nelle comunicazioni quantistiche, siano esse civili o militari, è intrinsecamente garantita, poiché si basa sull'impossibilità fisica di clonare le informazioni quantistiche: 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.

Parallelamente, i protocolli quantistici consentono di implementare nuovi metodi di trasmissione capaci di incrementare il volume di dati trasmessi per unità di tempo ben oltre gli attuali limiti tecnologici. In prospettiva, le reti di comunicazione quantistica evolveranno verso l'internet quantistico, un’infrastruttura in grado di connettere computer e sensori quantistici per

risolvere complessi problemi di ottimizzazione, distribuire l'entanglement quantistico tra nodi remoti, sincronizzare dispositivi con una precisione temporale senza precedenti, ed abilitare nuove funzionalità oggi impensabili.

Applicazioni della comunicazione quantistica

La sicurezza delle comunicazioni è un aspetto cruciale per consumatori, imprese e governi. L'avvento dei computer quantistici minaccia la solidità dei protocolli crittografici tradizionali, spingendo alla ricerca di nuove soluzioni. Da un lato, la crittografia post-quantistica si basa su algoritmi progettati per resistere agli attacchi di computer quantistici, pur continuando ad essere implementabile su hardware convenzionali. Questi algoritmi garantiscono la sicurezza dei dati sensibili e preservano la privacy degli utenti anche in un contesto tecnologico in evoluzione. Dall'altro, la comunicazione quantistica, già disponibile sul mercato, sfrutta i principi della meccanica quantistica per garantire una sicurezza intrinseca nelle trasmissioni. Tecnologie come la QKD offrono protezione contro intercettazioni e sabotaggi, rafforzando l'integrità delle infrastrutture di rete. L'integrazione di queste soluzioni nelle strategie di sicurezza informatica permette di contrastare le minacce emergenti e di rafforzare la resilienza delle infrastrutture digitali. Inoltre, investire in tecnologie di comunicazione quantistica e crittografia avanzata contribuisce a rafforzare l'indipendenza tecnologica europea, migliorando le catene di approvvigionamento e promuovendo l'innovazione nel settore della sicurezza delle comunicazioni.

Sfide scientifiche, tecnologiche, industriali

Lo sviluppo delle reti quantistiche affronta sfide scientifiche, tecnologiche e industriali, richiedendo componenti avanzati come rilevatori di fotoni singoli ed emettitori di luce quantistica, oltre a software efficienti e protocolli di crittografia quantistica. È essenziale migliorare la stabilità e la sicurezza dei sistemi quantistici, affrontando problemi come la decoerenza e la perdita di informazioni. La collaborazione tra fisici, ingegneri e informatici, supportata da finanziamenti governativi, è fondamentale per trasformare le teorie in applicazioni pratiche. Le attività di comunicazione quantistica si suddividono in tre aree principali: i) reti di comunicazione sicure tramite QKD; ii) comunicazione quantistica a lunga distanza con ripetitori quantistici e reti satellitari; iii) condivisione dell'entanglement per applicazioni in settori come sanità, difesa, agricoltura, energia, finanza e logistica. Questi progressi mirano a rivoluzionare la comunicazione e l'elaborazione dei dati, creando reti quantistiche sicure e robuste con ampie applicazioni pratiche.

2.1.5 Metrologia e sensoristica quantistica

Le tecnologie quantistiche in metrologia, sensoristica e imaging sfruttano le proprietà quantistiche avanzate per consentire precisione e sensibilità senza precedenti nelle misure. Queste tecnologie usano fenomeni quantistici come la sovrapposizione, l'entanglement e la coerenza per fornire misure precise, sensibili e robuste in un ampio spettro di applicazioni, come, per esempio, la diagnostica medica e dei materiali, la navigazione di alta precisione e il monitoraggio ambientale. I sensori quantistici non solo sono più sensibili di quelli classici, ma forniscono anche nuove capacità e migliorano le condizioni operative, aumentano la sostenibilità delle tecnologie utilizzate, possono ridurre o eliminare il bisogno di tarature regolari quando basati su costanti fisiche della natura.

La metrologia quantistica, inoltre, fornisce le basi per la definizione e la disseminazione delle unità di misura del Sistema Internazionale (SI) e si basa su dispositivi quantistici altamente riproducibili e basati su costanti fisiche fondamentali, come orologi atomici, standard elettrici quantistici e altri strumenti che sfruttano fenomeni quantistici per ottenere una precisione di misura senza precedenti.

Applicazioni della metrologia e del sensing quantistico

I sensori quantistici trovano applicazione in vari ambiti civili e militari grazie alla loro elevata sensibilità e precisione. In campo biologico, permettono di rilevare attività metaboliche a livello cellulare e sviluppare tecniche di imaging avanzate per studiare batteri e virus. Nella sensoristica a radiofrequenza e nei controlli non distruttivi, offrono una risoluzione spaziale superiore e un'analisi precisa dei campi elettromagnetici. I gravimetri quantistici e gli orologi atomici sono utilizzati per monitorare minime variazioni gravitazionali, utili in idrologia, vulcanologia e nell'esplorazione delle risorse. I sensori quantistici sono utilizzati anche per lo studio delle interazioni fondamentali, in particolare per la rivelazione della materia oscura leggera e delle onde gravitazionali ad alta frequenza. In posizionamento, navigazione e timing, gli orologi atomici migliorano la precisione dei sistemi di navigazione e rendono i sistemi più resistenti ad attacchi come spoofing e jamming. Infine, con la crescita del mercato quantistico, è sempre più necessario sviluppare standard e servizi di test accurati per la caratterizzazione e la convalida dei dispositivi quantistici, garantendo affidabilità e sicurezza nelle loro applicazioni.

Sfide scientifiche, tecnologiche e industriali

Le tecnologie di sensoristica quantistica utilizzano diverse piattaforme fisiche, ognuna con i propri vantaggi e le proprie sfide. Ad esempio, atomi e ioni ultrafreddi offrono grande sensibilità per applicazioni come gravimetria e orologi atomici, ma richiedono complessi sistemi di raffreddamento. Una soluzione più pratica è attualmente fornita da vapori di atomi caldi, confinati in celle miniaturizzate. Oscillatori nano-meccanici e sistemi opto-meccanici possono misurare forza e massa con alta precisione, ma sono sensibili al rumore termico. I circuiti superconduttori permettono di creare magnetometri avanzati e radar quantistici, ma necessitano di temperature molto basse. I centri azoto-vacanza (Nitrogen-Vacancy, NV) nel diamante funzionano a temperatura ambiente e sono ideali per l'imaging biologico come sensori di campo magnetico, elettrico e di temperatura (anche per applicazioni biologiche), ma la produzione dei materiali è complessa. A questo scopo anche altri centri di colore in diamante, in altre matrici cristalline o in materiali 2D, e i quantum dots vengono studiati per le loro potenziali applicazioni nell'imaging e nella sensoristica. Altri sensori, come i quantum dot e gli stati non classici della luce, offrono applicazioni innovative in rilevamento e imaging, ed in alcuni casi sono già ampiamente utilizzati (ad esempio nell'interferometria per la rivelazione di onde gravitazionali) ma possono e devono migliorare la loro efficienza e affidabilità.

Inoltre, è fondamentale integrare e miniaturizzare questi sensori per applicazioni pratiche, supportati da tecnologie abilitanti come fotonica avanzata, laser sofisticati e sistemi criogenici efficienti. Questi progressi permetteranno di utilizzare i sensori quantistici in vari settori, migliorando la precisione e l'affidabilità delle misurazioni in ambiti civili e militari.

Sviluppi comuni a tutte le piattaforme

Per sfruttare appieno il potenziale del sensing quantistico, è necessario affrontare diverse sfide fondamentali. Innanzitutto, è essenziale controllare e proteggere i sistemi quantistici, garantendo che possano operare in ambienti rumorosi, preparandoli e manipolandoli con precisione. Questo richiede collaborazioni interdisciplinari con campi come la fisica fondamentale, la teoria del controllo e l'elaborazione dei segnali per migliorare sensibilità e risoluzione. Inoltre, la miniaturizzazione e il packaging dei sensori quantistici devono progredire grazie a tecnologie avanzate come la criogenia e la fotonica, permettendo la diffusione di questi sensori in applicazioni pratiche. Parallelamente, l'infrastruttura metrologica deve evolversi per supportare la progettazione, la fabbricazione e la misurazione dei dispositivi quantistici, richiedendo una rete globale di laboratori.

specializzati per testare e standardizzare questi sensori. È inoltre necessario sviluppare supporto metrologico specifico per le tecnologie quantistiche, come

l'interferometria, i protocolli di comunicazione e la crittografia, e creare standard di riferimento per garantire l'affidabilità e la precisione delle misure. Questi sforzi combinati sono cruciali per rendere i sensori quantistici affidabili, integrabili e standardizzati, facilitando la loro adozione in vari settori del sistema paese.

Scenario di metrologia e rilevamento quantistico

La metrologia e il sensing quantistico in Europa sono fondamentali nell'iniziativa Quantum Flagship on Quantum Technologies, che promuove il trasferimento tecnologico nel settore delle TQ. Dal 2024, inoltre, l'infrastruttura europea di misura e test per dispositivi quantistici (EuroQMTI) supporta l'industria e gli stakeholder europei. In ambito europeo, l'Italia è attivamente coinvolta nei progetti di sperimentazione di linee pilota, concentrandosi sulla fabbricazione di sensori micro-strutturati. Parallelamente, il mercato dei sensori quantistici richiede urgentemente standardizzazione e certificazione, guidate dall'High Level Forum europeo mediante la definizione di un work-stream specifico (WS16), per garantire la comparabilità e la fiducia nei dispositivi. Allo stesso tempo, il Network di Metrologia Europea per le TQ (EMN-Q) coordina gli Istituti Nazionali di Metrologia per rafforzare la competitività europea.

In Italia, la ricerca sui sensori ed i dispositivi di imaging quantistico è vivace, utilizzando diverse piattaforme come atomi, fotoni, semiconduttori, superconduttori, e sistemi di spin e partecipando attivamente agli organismi internazionali di standardizzazione.

2.1.6 Sinergie tra tecnologie quantistiche

Le sinergie tra i pilastri sono fondamentali per sfruttare appieno le potenzialità delle TQ. Da un lato, alcuni dispositivi hardware, come la fibra ottica e le sorgenti a singolo fotone, sono comuni tra le diverse filiere e quindi diventa 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:

- ✓ **Calcolo/Simulazione e Comunicazione**: 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;
- ✓ **Calcolo/Simulazione e Sensoristica**: 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;
- ✓ **Comunicazione e Sensoristica**: 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 il calcolo quantistico, la comunicazione e la sensoristica 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.

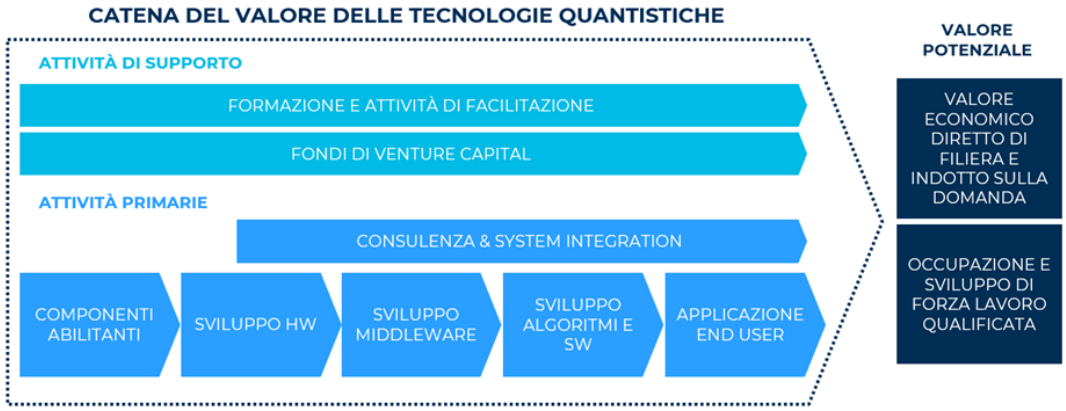
2.1.7 Tecnologie abilitanti e catena del valore

La catena del valore delle TQ

La catena del valore delle TQ 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 TQ.

FIGURA 1

Catena del valore delle tecnologie quantistiche
Fonte: Osservatorio Quantum Computing e Communication, Politecnico di Milano



La catena del valore è composta anzitutto da una serie di attività primarie che concorrono allo sviluppo dello stack tecnologico delle TQ, dalla creazione dei componenti di base fino alle applicazioni finali. Ciascuna di queste attività può essere associata 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 TQ 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 profondo, 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 calcolo quantistico fotonico. Sistemi di confinamento per le piattaforme atomiche e laser stabilizzati in frequenza sono altri componenti essenziali.
- ✓ **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, 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 la 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, compilatori e transpilers, così come interfacce per la gestione del dispositivo e sistemi di integrazione tra elementi classici e quantistici che implementino protocolli di ottimizzazione tramite controllo ottimale, intelligenza artificiale e inferenza bayesiana. Infine, lo sviluppo di digital twin basati su tecniche approssimate quantum inspired permetterà, come per qualunque altra tecnologia avanzata, l'accelerazione del loro sviluppo tecnologico.
- ✓ **Società di sviluppo degli algoritmi e del software**: per trarre vantaggio dalle TQ, 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 riformulazione di problemi computazionali in chiave quantistica e la riscrittura del codice sono attività necessarie ad abilitare l'utilizzo pratico di questi nuovi computer.
- ✓ **Aziende utilizzatrici e applicazione end-user**: l'applicazione end-user 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 calcolo quantistico possibili 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.

Introduzione all'ingegneria e alle tecnologie abilitanti

Per garantire l'applicabilità delle TQ hardware – i dispositivi quantistici – nel mondo reale, il sistema quantistico deve essere integrato con tecnologie esistenti o modificati di altri sistemi hardware, come ad esempio dispositivi per basse temperature, alto vuoto o microchip, che consentano di interfacciare le TQ con il mondo classico, per renderle fruibili.

Lo sviluppo di queste tecnologie abilitanti richiede un approccio trasversale che coinvolge tutti i pilastri delle TQ e richiede lo sviluppo ed il controllo dell'intera catena di fornitura.

Le principali aree di interesse per lo sviluppo delle TQ includono la produzione, il test e il packaging su larga scala, che richiedono infrastrutture industriali avanzate per la micro e nano-fabbricazione, l'integrazione di dispositivi quantistici e classici, e l'ottimizzazione di processi come la gestione termica e la schermatura. È essenziale anche disporre di una vasta gamma di dispositivi e componenti, come circuiti fotonici ed elettronici, apparecchiature di controllo a basso rumore e refrigeratori criogenici, garantendo al contempo l'accesso sostenibile alle licenze per le piccole e medie imprese (PMI). Inoltre, le interfacce di controllo e lettura devono essere ottimizzate per operazioni quantistiche ad alta fedeltà, permettendo di identificare e rispettare i limiti di prestazione dei dispositivi. Questi elementi sono fondamentali per sostenere e proteggere la crescita dell'industria quantistica nazionale.

Circuiti elettronici e integrazione

Lo sviluppo delle tecnologie dei chip classici è cruciale per il progresso delle TQ. A proposito, risultano necessarie diverse azioni, tra cui l'approccio "More than Moore" che integra funzionalità e materiali avanzati, come il diamante, nei processi di produzione dei chip. È essenziale inoltre sviluppare soluzioni di packaging specifiche capaci di gestire un'alta densità di componenti, dispositivi criogenici e interfacce ad alto vuoto, utilizzando tecniche avanzate 2D e 3D. Infine, è fondamentale implementare misure affidabili per testare e convalidare le prestazioni dei materiali e dei qubit mediante tecniche spettroscopiche on-chip e protocolli di misura armonizzati. Queste azioni garantiranno

l'integrazione efficace delle TQ nei sistemi e nelle applicazioni reali.

Criogenia e integrazione criogenica

La maggior parte delle TQ richiede temperature estremamente basse, supportate da potenti sistemi di raffreddamento, con alcune piattaforme che necessitano di temperature inferiori a 4K e altre ancora meno di 1K. Per mantenere queste tecnologie competitive ed efficienti, è essenziale migliorare continuamente i sistemi di raffreddamento e integrare meglio tutti i componenti. I refrigeratori specifici per i qubit sono fondamentali non solo per il calcolo quantistico, ma anche per i dispositivi che utilizzano luce speciale, e con l'aumento del numero di qubit cresce la necessità di raffreddamenti più potenti e su larga scala. Inoltre, è importante posizionare vicino ai chip quantistici l'elettronica di controllo per garantire un controllo più efficiente e facilitare l'espansione dei circuiti quantistici, sviluppando nuovi tipi di chip di controllo che funzionano a basse temperature, migliorando così la velocità e l'efficienza nella lettura dei qubit. Questi progressi sono cruciali per far progredire le TQ e renderle più accessibili e performanti.

Fotonica e integrazione fotonica

I laser, le sorgenti di fotoni e i rivelatori sono componenti chiave per le TQ. È importante sviluppare circuiti integrati fotonici e guide d'onda per creare dispositivi avanzati. I laser devono essere precisi e compatti per controllare particelle come atomi e ioni, essenziali per applicazioni come gli orologi quantistici. Le sorgenti e i rivelatori di fotoni sono fondamentali per la comunicazione sicura e il calcolo quantistico, richiedendo miglioramenti nell'efficienza e nella riduzione del rumore. Inoltre, i circuiti integrati fotonici devono essere scalabili e a basso costo, con particolare attenzione al loro utilizzo in ambienti a basse temperature. Questi progressi sono vitali per rendere le TQ più efficaci e accessibili.

Catene di approvvigionamento e componenti critici

Lo sviluppo di catene di approvvigionamento solide e sicure è fondamentale per il successo delle TQ. Attualmente, la fornitura di componenti è ancora in crescita, principalmente gestita da PMI o spin-off universitari. In questo contesto, il Governo può svolgere un ruolo chiave colmando le lacune e creando condizioni favorevoli per supportare i fornitori europei di hardware e software quantistico. È essenziale garantire una fornitura sicura di componenti critici come refrigeratori, sistemi laser e componenti ottici, monitorando continuamente le catene di approvvigionamento per evitare interruzioni. Inoltre, il Governo può favorire la crescita del mercato e mantenere relazioni commerciali stabili con paesi dell'UE e non UE like-minded, ad esempio attraverso regolamentazioni mirate che impediscano acquisizioni straniere ostili di aziende che sviluppano tecnologie critiche nell'Unione Europea.

Iniziative europee in corso

Le principali iniziative europee atte a sviluppare le tecnologie abilitanti delle TQ includono Qu-Pilot, Qu-Test e le Joint Undertaking. Qu-Pilot, parte della Quantum Flagship, sviluppa linee pilota per integrare la progettazione e la produzione di chip quantistici, favorendo la crescita dell'industria quantistica europea e la produzione industriale sostenibile. Qu-Test, una rete di banchi di prova europei, offre servizi di test e convalida per garantire una catena di approvvigionamento affidabile e promuovere standard tecnologici. Inoltre, le Joint Undertaking finanziano progetti collaborativi su larga scala, come ESCEL MATQu, che si concentra su componenti e materiali per il calcolo quantistico superconduttivo, sostenendo l'innovazione e lo sviluppo nel settore.

Chips Act e Tecnologie Quantistiche

Il Chips Act, in linea con l'Agenda Strategica per la Ricerca e l'Industria (SRIA), mira a sviluppare anche chip specifici per le TQ su diverse piattaforme, integrando tecnologie classiche avanzate come quelle abilitanti. È fondamentale coordinare l'industria dei chip, le fonderie e le infrastrutture quantistiche per creare una catena di strumenti integrata che comprenda

progettazione, fabbricazione e librerie modulari per fotonica, criogenia ed elettronica per sistemi basati su superconduttori. Lo sviluppo dei chip quantistici prevede la creazione di librerie di progettazione innovative tramite strumenti di Electronic Design Automation, il potenziamento delle capacità italiane di nanofabbricazione attraverso l'iniziativa Qu-Pilot e la collaborazione con fonderie industriali, nonché investimenti in strutture di test avanzate e la definizione di standard per garantire la qualità e l'affidabilità dei dispositivi quantistici.

2.1.8 Standardizzazione

La standardizzazione delle TQ è essenziale per strutturare e accelerare la loro adozione sul mercato, garantendo affidabilità, coerenza e interoperabilità con infrastrutture, sistemi e componenti esistenti. La standardizzazione va oltre i requisiti di certificazione per comprendere aspetti fondamentali come vocabolario, terminologia, parametri di qualità, modelli, protocolli di scambio e altro ancora. Data la notevole influenza di altri Paesi sugli organismi di standardizzazione internazionali, è fondamentale che l'Europa adotti un approccio proattivo nello sviluppo di standard e parametri propri, prevenendo le potenziali insidie dovute al doversi conformare a standard stranieri che potrebbero svantaggiare le TQ europee.

Lo sviluppo di standard a livello europeo facilita inoltre la creazione di una voce europea unificata e forte nelle discussioni internazionali, superando l'approccio frammentario che potrebbe emergere se i singoli Stati Membri dell'UE tentassero di stabilire il consenso in modo indipendente. All'interno dello Spazio economico europeo, i forti legami sociali, culturali, scientifici ed economici consentono una più rapida creazione del consenso rispetto al livello internazionale.

Una componente fondamentale di una standardizzazione efficace è la definizione di parametri di riferimento, indispensabili per fornire misure oggettive nella valutazione dei progressi, prestazioni e capacità delle TQ. Tali parametri consentono agli utenti di prendere decisioni informate quando valutano le varie soluzioni quantistiche a disposizione. Accademia e industria identificano questi parametri, insieme alle infrastrutture di misura, come aspetti prioritari della standardizzazione.

Progetti come Qu-Test, finanziato dall'UE, rispondono a tali esigenze sviluppando banchi di prova federati per le TQ, garantendo alle aziende strutture di misura adeguate per supportare il benchmarking e la conformità agli standard. Inoltre, nel marzo 2023, il Comitato europeo per la standardizzazione (CEN) ed il Comitato europeo di standardizzazione elettrotecnica (CENELEC) hanno istituito un nuovo comitato congiunto, il JTC22, sulle TQ. Questo comitato si basa sul lavoro del Focus Group on Quantum Technologies (FGTQ), che ha presentato una roadmap sulla standardizzazione delle TQ in Europa all'inizio del 2023. La roadmap del FGTQ è la prima del suo genere a livello globale e identifica le esigenze di standardizzazione in tutti gli aspetti delle TQ, fornendone una classificazione completa ed evidenziandone l'interdipendenza degli sforzi di standardizzazione in corso e futuri. La roadmap è concepita come un documento in evoluzione, che riflette sia i progressi tecnologici che i progressi nella standardizzazione.

Il JTC22 ha il compito di standardizzare le TQ, comprese le tecnologie abilitanti, i sottosistemi, le piattaforme e le applicazioni in settori quali la metrologia quantistica, il rilevamento, l'imaging avanzato, il calcolo quantistico, la simulazione, la comunicazione e la crittografia. Il comitato è organizzato in quattro gruppi di lavoro, uno incentrato sulla strategia e tre su settori specifici. Tra i membri figurano esperti dei produttori di TQ e del mondo accademico di tutta Europa. Il JTC22 lavorerà anche per identificare ed eventualmente adottare standard internazionali pertinenti di organizzazioni come ISO, IEC e ITU-T, assicurando che il consenso europeo sia rappresentato nelle discussioni sulla standardizzazione internazionale.

Inoltre, diversi organismi nazionali di standardizzazione (National Standardization Body, NSB) hanno istituito comitati speculari al JTC22, consentendo loro di valutare e partecipare agli sforzi di standardizzazione a livello europeo e internazionale. L'ISO/-IEC JTC1, un comitato congiunto per le tecnologie digitali, aveva istituito un gruppo di lavoro sull'informatica quantistica. Dal 2024 tale gruppo di lavoro è stato sostituito dall'IEC/ISO JTC3, che si occupa di tutte le TQ. Anche altre organizzazioni, come l'IEEE, hanno iniziato a lavorare sulle TQ. L'Europa deve garantire che il suo consenso sulle TQ, sviluppato da FGTQ, JTC22 ed ETSI, sia rappresentato in queste discussioni internazionali.

Per contribuire efficacemente agli sforzi di standardizzazione, è fondamentale che gli esperti di tutte le parti interessate, compresi i produttori, le start-up, le università, partecipino attivamente ai comitati pertinenti. Una sfida importante nei prossimi anni sarà quella di garantire una partecipazione sufficiente di esperti nei comitati al lavoro degli organismi di standardizzazione internazionale, anche tramite la partecipazione nei comitati specchio degli organismi di normazione nazionale.

2.1.9 Benchmarking

I benchmark nelle TQ servono come riferimenti accettati che forniscono misure oggettive per valutare le prestazioni e le capacità dei dispositivi in fase di test. Questi benchmark sono fondamentali per stimolare la collaborazione, la concorrenza e gli investimenti nelle TQ.

Il benchmarking nel campo del calcolo quantistico, della simulazione quantistica, della sensoristica e metrologia quantistica, e della comunicazione quantistica implica lo sviluppo di strumenti di misurazione specifici che supportino l'intera catena del valore tecnologico. Ciò include la progettazione tecnologica, la definizione di casi d'uso, il monitoraggio dei programmi di ricerca, la regolamentazione, la strutturazione del mercato e l'implementazione negli appalti pubblici.

La necessità di disporre di parametri di riferimento per le TQ è particolarmente pressante a causa della natura emergente del settore, della diversità delle tecnologie in fase di esplorazione e della forte concorrenza internazionale. Test e valutazioni affidabili ed indipendenti sono essenziali per verificare le prestazioni e promuovere una comprensione condivisa delle capacità tecnologiche. È necessario progettare benchmark oggettivi e affidabili che tengano conto delle varie piattaforme hardware, delle loro proprietà fisiche, delle applicazioni, dei livelli di preparazione e della potenziale rapida evoluzione.

Attualmente i benchmark sono considerati a diversi livelli, seguendo approcci complementari. A livello di componenti hardware, essi si concentrano sulla caratterizzazione delle proprietà fisiche fondamentali, particolarmente rilevanti per i produttori di dispositivi. A livello di sistema, i benchmark considerano le prestazioni e capacità tenendo conto del sistema quantistico nel suo complesso, mentre a livello di applicazione, i benchmark risultano particolarmente interessanti per gli utenti finali, poiché consentono di valutare i vantaggi pratici delle TQ in contesti reali.

Sono state lanciate diverse iniziative internazionali per sviluppare benchmark per il calcolo e la simulazione quantistica, tra cui le iniziative di IBM (Quantum Volume, CLOPS), Super.tech (SupermarQ), QED-C, US DARPA, US DOE (Sandia National Labs) e UC Berkeley.

In Europa sono state avviate diverse iniziative di benchmarking, principalmente orientate alle applicazioni, in vari Stati Membri. Il progetto Horizon Europe Qu-Test, che riunisce enti di ricerca e tecnologia (Research and Technology Organization, RTO) e istituti nazionali di metrologia, sta lavorando alla caratterizzazione e al collaudo armonizzati di componenti e sottosistemi quantistici. Sebbene la maggior parte delle attuali iniziative di benchmarking

orientate alle applicazioni siano nazionali, vi è una forte volontà di collaborazione tra i progetti, per garantire la complementarità ed evitare la duplicazione degli sforzi.

2.2 L'ECOSISTEMA ITALIANO DELLE TECNOLOGIE QUANTISTICHE

2.2.1 Ecosistema industriale italiano

In Italia, il settore industriale delle TQ è ancora emergente ma in crescita, trainato innanzitutto dagli investimenti pubblici nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) che hanno favorito la creazione di una rete di ricerca e sviluppo e stimolato la crescita del settore privato. Tuttavia, i fondi stanziati in Italia rimangono significativamente inferiori rispetto a quelli stanziati dal Regno Unito, dalla Germania, dalla Francia (cfr. par. 2.3). Ciò significa che, pur potendo ancora giocare un ruolo importante, l'ecosistema nazionale è in fase embrionale e il Paese si trova in ritardo nella corsa globale alle TQ, ma ha iniziato a muoversi nella giusta direzione[4].

Al fine di mappare lo scenario industriale italiano, il MIMIT ha realizzato, in collaborazione con l'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano, una consultazione pubblica che ha coinvolto 52 stakeholder del settore, che rappresentano almeno 180 FTE[5] nell'ambito delle TQ. È emerso un ecosistema variegato e composto da aziende dell'offerta e della domanda, fondi di venture capital e facilitatori, associazioni di categoria e fondazioni, come riportato nella Figura 2.

FIGURA 2

Distribuzione della tipologia di organizzazione partecipante alla consultazione MIMIT sulle TQ

Fonte: Elaborazione dati MIMIT-Osservatorio quantum computing & communication del Politecnico di Milano

[4] Parte delle sezione 2.2.1 è tratta dal Report "Ecosistema industriale italiano delle tecnologie quantistiche. Analisi dei risultati della consultazione pubblica condotta dal Ministero delle imprese e del Made in Italy" redatto dal MIMIT - Direzione Generale per le nuove tecnologie abilitanti in collaborazione con l'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano. La versione integrale del Report è disponibile al seguente link: https://www.mimit.gov.it/images/stories/digitale/Ecosistema_industriale_italiano_delle_tecnologie_quantistiche.pdf

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

Analizzando le 46 aziende consultate (escludendo quindi fondi di venture capital e associazioni di categoria), l'ecosistema si compone di:

- ✓ grandi attori italiani dei settori ICT, Aerospazio e Difesa e della componentistica come system integrator, società di consulenza e telco provider, che stanno differenziando la propria value proposition nel campo delle TQ: ad esempio, lo sviluppo di algoritmi quantistici, i sensori quantistici per imaging e navigazione, la creazione di librerie e la commercializzazione di prodotti di comunicazione quantum-safe;
- ✓ grandi attori internazionali del settore dell'informatica posizionati prevalentemente sullo sviluppo di hardware e middleware per il calcolo quantistico, che hanno interessi commerciali sul mercato italiano;
- ✓ aziende e startup native del settore delle TQ, nate oltreoceano o in altri Paesi europei, che stanno guardando con interesse al mercato italiano come potenzialità industriale;
- ✓ aziende e startup italiane native del settore che operano prevalentemente nello sviluppo di software quantistici per la computazione e hardware, middleware e software per le comunicazioni quantistiche e per i sensori quantistici;
- ✓ grandi aziende italiane potenziali utilizzatrici della tecnologia prevalentemente in ambito finanziario, assicurativo, energetico e chimico-farmaceutico.

Spostando il focus in ambito geografico, emerge una distribuzione territoriale che rispecchia quella dei centri di ricerca nelle TQ (Figura 3), così come evidenziato anche nel paragrafo 2.2.2 nella Figura 11. Ciò è dovuto allo stato non ancora maturo della tecnologia, che richiede un significativo avanzamento scientifico per raggiungere la piena applicabilità industriale.

FIGURA 3

Distribuzione territoriale dei partecipanti alla consultazione MIMIT sulle TQ

Fonte: Elaborazione dati MIMIT-Osservatorio quantum computing & communication del Politecnico di Milano

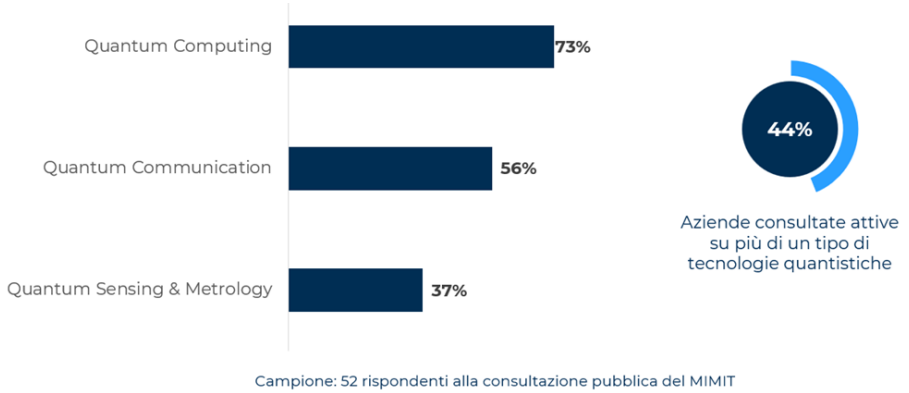
La spinta principale al settore è da attribuirsi ai finanziamenti pubblici, mentre il settore privato si ferma a soli 12,5 milioni € stanziati tra il 2023 ed il 2024 attraverso fondi di venture capital. A tal proposito si segnala la recente costituzione del fondo di Cassa Depositi e Prestiti Venture Capital Sgr, ammontante a un miliardo di euro e destinato a tecnologie deep tech quali intelligenza artificiale, cyber e quantum.

Rispetto alle diverse tipologie di TQ (Figura 4), il campione è variegato e presente trasversalmente in tutti i campi seppur con una prevalenza sul calcolo quantistico.

FIGURA 4

Distribuzione dei pilastri quantistici sviluppati dalle imprese

Fonte: Elaborazione dati MIMIT-Osservatorio quantum computing & communication del Politecnico di Milano



Campione: 52 rispondenti alla consultazione pubblica del MIMIT

Calcolo quantistico

Le consultazioni evidenziano come il mercato del calcolo quantistico sia ancora in una fase embrionale. L'Italia si distingue per l'eccellenza nella componentistica, in particolare nella fotonica, ma registra un ritardo nello sviluppo di startup di rilievo internazionale. Sebbene alcune startup stiano orientando i propri sforzi verso una futura creazione di hardware, attualmente sono ancora rare le aziende che offrono una soluzione interamente italiana. Questa scarsità potrebbe rappresentare un limite per la realizzazione di prodotti finali interamente nazionali nel lungo termine, rendendo necessario nel breve termine l'adozione sia di politiche di sostegno finalizzate allo sviluppo di iniziative nazionali sia di politiche di approvvigionamento che stimolino l'innovazione senza imporre restrizioni. Infatti, la maggior parte delle imprese e delle startup italiane si concentra principalmente su software e applicazioni, con un ampio potenziale di sviluppo di servizi a valore aggiunto per l'industria. 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 capitali privati.

Tra gli ostacoli oggi segnalati in questo campo, le consultazioni evidenziano i tempi di attesa prolungati per l'accesso alle infrastrutture, i tempi di inattività molto lunghi dei laboratori e l'indisponibilità dei nuovi sistemi di calcolo quantistico recentemente completati all'estero per l'utilizzo da parte delle imprese. 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.

Comunicazione quantistica

Secondo quanto emerge dalle consultazioni, la comunicazione quantistica è un settore in cui l'Italia eccelle per presenza di startup e sperimentazioni riconosciute a livello internazionale.

Dal punto di vista dalla catena del valore, la produzione delle tecnologie di comunicazione quantistica in Italia fa leva su componenti elettroniche assemblate all'estero poiché non esistono una filiera nazionale e strutture di produzione europee.

A livello di dispositivi hardware quantistici per la comunicazione quantistica, l'Italia presenta startup, riconosciute a livello internazionale, che producono sistemi di QKD, già commercializzabili e integrabili in reti esistenti. Tuttavia, dal punto di vista tecnico, viene segnalato che le tecnologie attuali hanno ancora problematiche sul lungo raggio (chilometraggio) e costano significativamente di più rispetto alle tecnologie tradizionali. A livello software, sono già disponibili degli algoritmi provati 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. QKD e Post-Quantum Cryptography possono essere tecnologie complementari e integrate in un unico prodotto. La complessità maggiore risiede nell'aggiornamento degli attuali sistemi di crittografia e delle attuali infrastrutture di rete.

L'ostacolo principale allo sviluppo del settore è oggi rappresentato dalla limitata presenza di standardizzazione e certificazione delle tecnologie, che rallenta la loro diffusione capillare in una generale mancanza di consapevolezza da parte delle aziende della domanda.

Metrologia e sensoristica quantistica

Nella metrologia e sensoristica quantistica, 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, ad esempio, laser e controllo automatico, rappresenta un'opportunità significativa.

Guardando alla catena del valore, l'approvvigionamento di componenti fa spesso riferimento all'estero. Anche in questo caso, la mancanza di fonderie europee che lavorino per conto terzi rappresenta un limite nello sviluppo del settore. Dal punto di vista dell'hardware, l'ecosistema italiano sta lavorando da un lato con nuove iniziative imprenditoriali, dall'altro con aziende della filiera tradizionale, che si stanno attivando per la realizzazione di sensori quantistici. Nell'ambito del software, alcune aziende stanno lavorando con l'obiettivo di integrare i sensori quantistici in contesti reali e interconnetterli con le tecnologie spaziali.

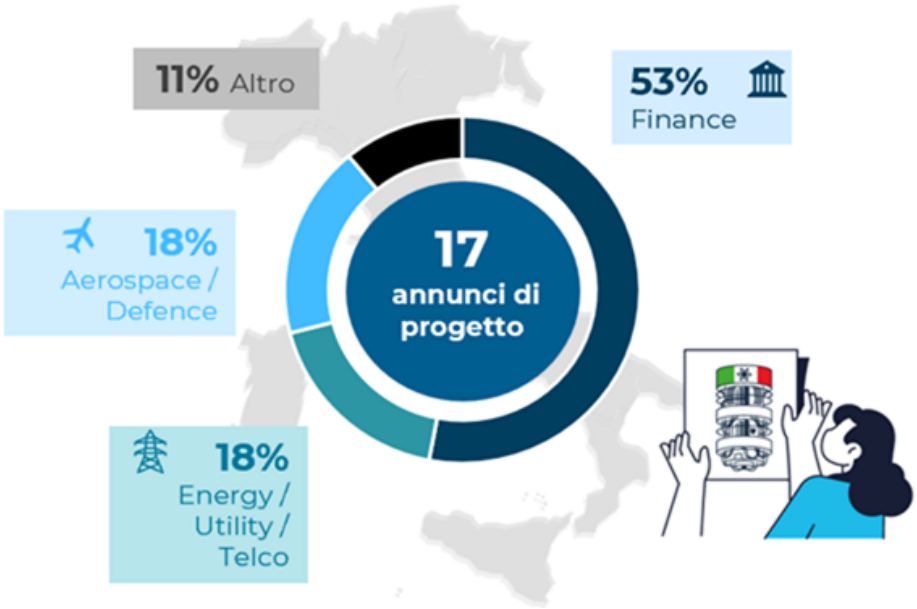
L'interesse attuale per queste tecnologie comprende diversi settori, tra i quali la difesa, il settore medicale, il settore automobilistico, l'aerospazio, le telecomunicazioni, l'energia, la geofisica e l'industria manifatturiera avanzata. La principale sfida per sviluppare il potenziale della sensoristica quantistica riguarda la capacità di costruire infrastrutture sopra a queste tecnologie e integrarle con quelle di calcolo/simulazione e comunicazione.

In merito alle aziende utenti interessate all'uso delle TQ, nello specifico calcolo e comunicazione, la situazione italiana è in linea con quella internazionale, caratterizzata da poche grandi aziende che investono per rendersi precursori di queste tecnologie. Tra i settori di interesse, la maggioranza è rappresentata dalla finanza, seguita da energia, utility & telco e aerospazio & difesa (Figura 5).

FIGURA 5

Annunci di progetto pubblici di calcolo quantistico e comunicazione quantistica in Italia per settore

Fonte: Elaborazione dati MIMIT-Osservatorio quantum computing & communication del Politecnico di Milano



Nel corso delle consultazioni è altresì emerso un tema trasversale ai diversi pilastri delle TQ: le aziende hanno bisogno di accedere a strutture sofisticate per convalidare le proprie soluzioni e dimostrare la redditività commerciale delle TQ. Tuttavia, la natura sperimentale delle TQ, unita ai notevoli requisiti di capitale necessari per svilupparle e ai lunghi orizzonti di pianificazione, possono rappresentare ostacoli significativi agli investimenti del settore privato, soprattutto nello sviluppo delle infrastrutture. Sebbene l'Italia disponga di diverse infrastrutture in seno agli istituti di ricerca, queste sono utilizzate

principalmente a scopi di ricerca con accesso limitato all'industria. Le principali istituzioni europee offrono strutture avanzate con capacità superiori rispetto a quelle nazionali, ma barriere finanziarie e amministrative ne limitano l'accesso alle imprese italiane.

Si genera così un'inefficienza di mercato che richiede un intervento pubblico accanto al settore privato, al fine di creare economie di scala e sinergie, in particolare per: fornire infrastrutture avanzate accessibili in grado di supportare le aziende nello sviluppo di prototipi e nella convalida delle soluzioni tecnologiche; creare un contesto favorevole per catalizzare i loro investimenti nel settore; promuovere la collaborazione pubblico-privato, incentivando sinergie che accelerino il progresso tecnologico e industriale.

La disponibilità di strutture specializzate per la produzione e la prototipazione, dotate di strumentazioni all'avanguardia e personale qualificato è essenziale per affrontare queste sfide. È quindi emersa la necessità di costruire una rete di infrastrutture con l'obiettivo di creare canali di accesso semplificati per le aziende interessate a sviluppare e testare prototipi e di migliorare il coordinamento tra le infrastrutture italiane e quelle europee. Un esempio di tale rete è rappresentato a livello europeo dal programma Qu-Pilot, un progetto di Horizon Europe che sta costruendo un catalogo digitale per prodotti e servizi tecnici certificati relativi alle TQ.

Come approfondito nella sezione "Raccomandazioni industria" (par. 3.2.7), per massimizzare il potenziale di queste infrastrutture, si profilano quindi due approcci complementari: i) la creazione di una rete integrata di infrastrutture di ricerca e di prototipazione, comprendente le camere pulite, i laboratori e le strutture specializzate; ii) lo sviluppo di una domanda indirizzata dall'industria per guidare l'evoluzione di questa rete e adattarla alle esigenze di prototipazione delle TQ.

2.2.2 Ecosistema italiano della ricerca

L'Italia vanta un solido e diffuso tessuto di ricerca, capace di competere a livello internazionale. Il Paese possiede un'estesa rete di gruppi di ricerca e laboratori distribuiti in numerose istituzioni, tra cui enti pubblici di ricerca (EPR) nazionali (Consiglio Nazionale delle Ricerche - CNR, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica - INRIM, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - INFN, Istituto Italiano di Tecnologia - IIT, Agenzia Spaziale Italiana - ASI, CINECA, Istituto Nazionale di Astrofisica - INAF), affiancati da numerosi centri di ricerca e laboratori universitari. All'interno di queste istituzioni, spesso in collaborazione fra loro, vi sono diverse infrastrutture di fabbricazione e sviluppo per micro e nano-elettronica, optoelettronica e fotonica, sensoristica atomica, oltre ad un'importante base industriale in tecniche del vuoto e criogenia.

Tanto emerge da una indagine capillare condotta dal MUR e supportata da un questionario sottoposto alla comunità scientifica nazionale, al quale hanno risposto più di 130 ricercatori e gruppi di ricerca.

Nel solo settore delle TQ il MUR ha investito 228,9 milioni € di finanziamenti pubblici in iniziative di ricerca sulle TQ tra il 2021 e il 2024.

A completare il quadro, si evidenzia che anche alcune regioni e province autonome hanno intrapreso azioni tese alla valorizzazione sul territorio della ricerca nell'ambito delle TQ, con impegni finanziari anche cospicui e con fondi europei, che riguardano in prevalenza la messa in rete di infrastrutture e la promozione delle collaborazioni tra il settore pubblico e le aziende.

Per quanto concerne, più nel dettaglio, i finanziamenti erogati dal MUR, la maggior parte dei fondi proviene dal PNRR (86%), mentre il restante 14% da altre fonti di finanziamento.

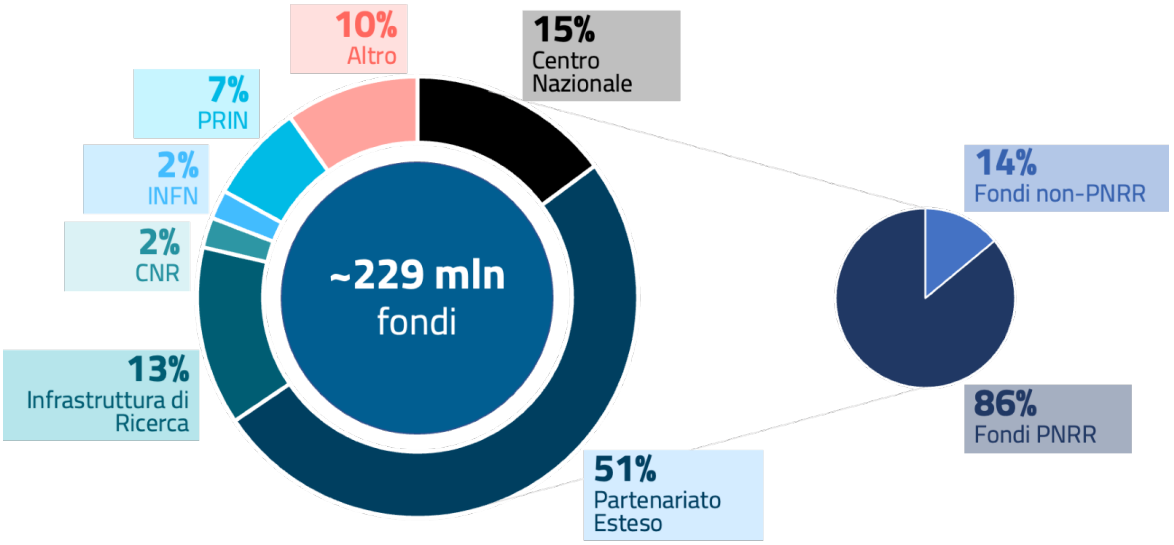
Il PNRR ha avuto un ruolo cruciale nello sviluppo di tre iniziative chiave per la crescita di un solido ecosistema: il Partenariato esteso NQSTI - National Quantum Science and Technology Institute, che ha assorbito poco più della metà dei fondi totali, seguito dal Centro nazionale HPC, Big Data and Quantum

Computing e l'Infrastruttura di ricerca Integrated Infrastructure Initiative in Photonic and Quantum Sciences che insieme rappresentano quasi il 30%.

La parte restante (circa il 20%) è suddiviso tra i cosiddetti Progetti di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN; 7%), i progetti gestiti all'interno del CNR e dell'INFN (in totale, 4%), e altri progetti (10%). Diversi ecosistemi dell'innovazione, finanziati mediante il PNRR, hanno avviato progetti di ricerca e sviluppo relativi alle TQ (Figura 6).

FIGURA 6

Finanziamento pubblico per progetti di TQ (2021-2024) (risorse nazionali e fondi di recupero gestiti dal MUR).
Fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca



Se si considera il numero di progetti invece dell'ammontare dei fondi, queste percentuali cambiano significativamente (Figura 7). In questo caso, infatti, i PRIN rappresentano il 64% di tutti i progetti di tecnologia quantistica, mentre INFN e CNR coprono rispettivamente il 15% ed il 3%, con il restante 18% distribuito tra altri progetti.

FIGURA 7

Numero di progetti
Fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca

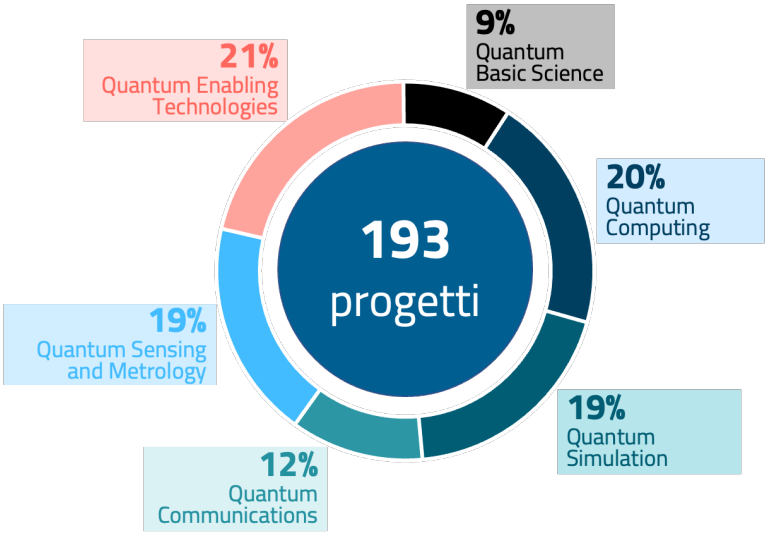
I progetti sulle TQ possono essere raggruppati nei sei pilastri descritti nella prima parte:

- ✓ Calcolo Quantistico;
- ✓ Simulazione Quantistica;
- ✓ Comunicazione Quantistica;
- ✓ Metrologia e Sensoristica Quantistica;
- ✓ Ingegneria e Tecnologie Abilitanti;
- ✓ Scienza di Base e Meccanica Quantistica.

La distribuzione dei progetti tra i pilastri è generalmente uniforme, con un numero inferiore di progetti dedicati alla comunicazione quantistica e, soprattutto, alla ricerca quantistica di base (Figura 8).

FIGURA 8

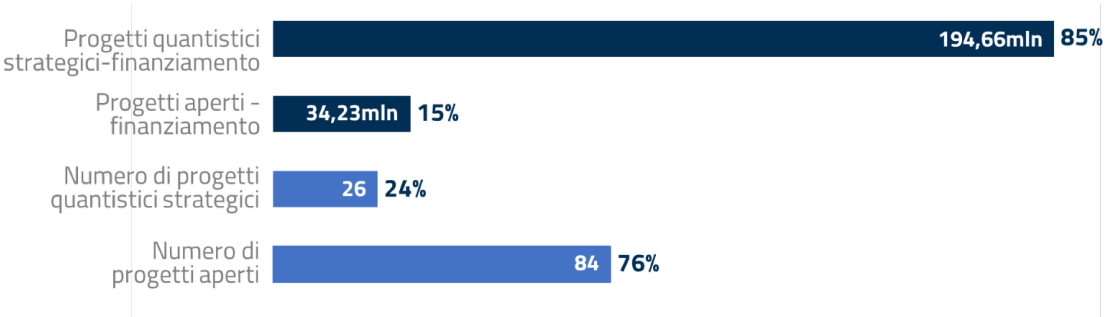
Percentuali di progetti per pilastro
Fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca



Analizzando i finanziamenti sulla base del tipo di iniziativa, emerge che i progetti strategici dedicati alle TQ (85% dei fondi) costituiscono la maggior parte, trainati dal Centro nazionale, dal Partenariato esteso e dall'Infrastruttura di ricerca. I programmi competitivi aperti ad altre tematiche costituiscono, invece, solo il 15% (Figura 9).

FIGURA 9

Progetti quantistici strategici vs progetti aperti
Fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca



Tuttavia, se si osserva il numero di progetti, la situazione si inverte: il 76% dei progetti è finanziato attraverso procedure competitive, grazie al forte contributo del PRIN.

All'interno dei PRIN, circa due terzi dei Principal Investigator provengono dal sistema universitario, mentre il 17% dal CNR (Figura 10), evidenziando una forte collaborazione tra università e centri di ricerca nella promozione delle TQ.

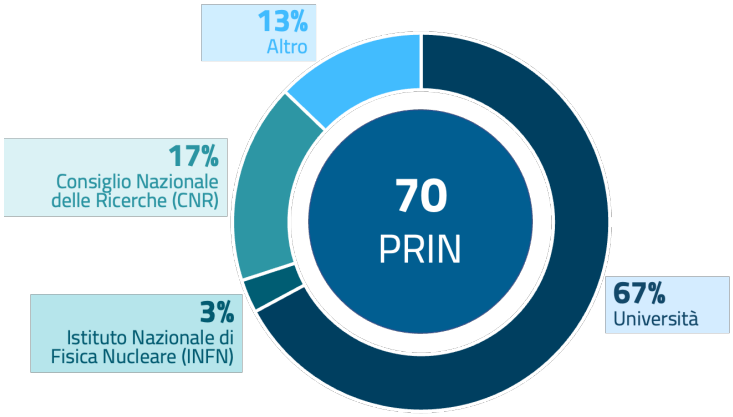


FIGURA 10

Affiliazione dei Principal Investigator dei PRIN
Fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca

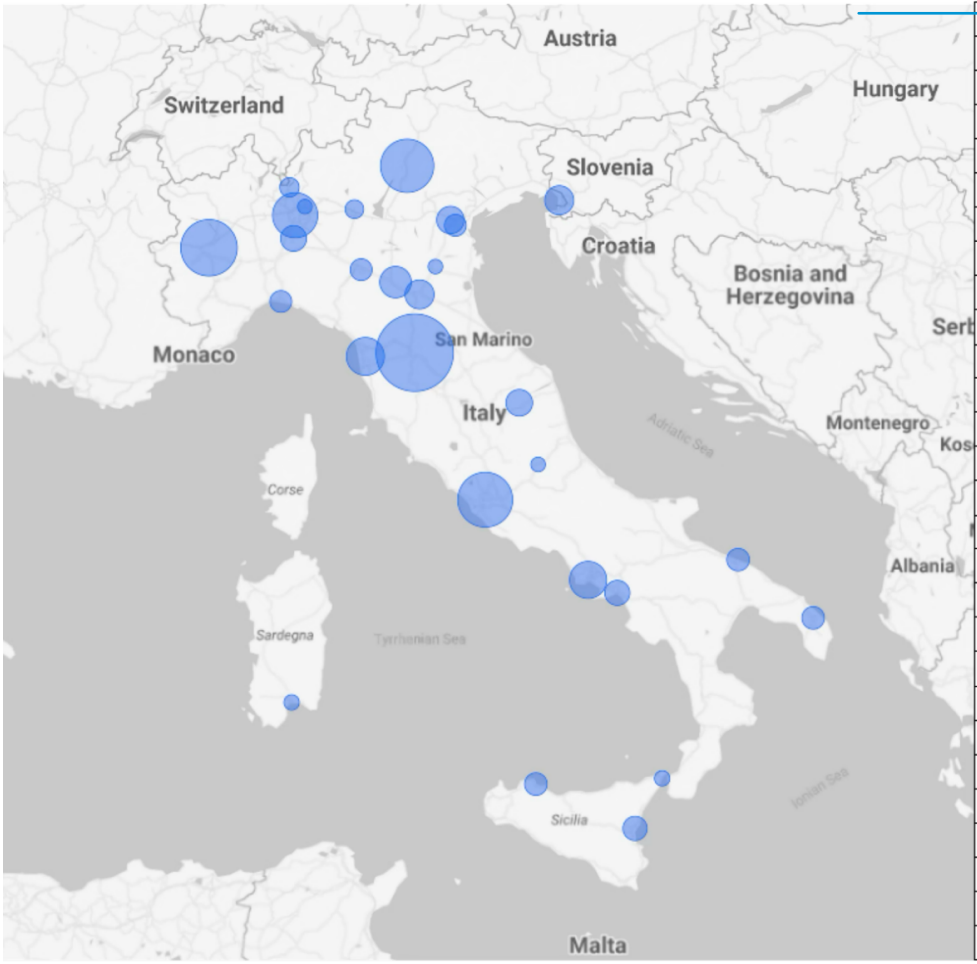
Le istituzioni italiane partecipano anche a 68 progetti di ricerca quantistica finanziati dal programma Horizon Europe, ricevendo complessivamente circa 62 milioni di euro, e a 3 progetti finanziati dal programma Digital Europe, ricevendo circa 8,1 milioni di €[6].

Il panorama della ricerca italiana sulle TQ è stato analizzato anche attraverso un'indagine capillare, condotta tramite la compilazione di un questionario che ha raccolto più di 130 risposte da università ed enti di ricerca. Il risultato principale è illustrato graficamente nella Figura 11, in cui le sfere situate in corrispondenza delle città italiane sono rappresentate con una dimensione proporzionale al numero di personale permanente e di ricercatori a tempo determinato impiegati nel settore delle TQ nel settore pubblico.

L'analisi evidenzia una distribuzione geografica ampia dello sforzo di ricerca, che coinvolge l'intero territorio nazionale. Emerge anche l'esistenza

FIGURA 11

Il personale di università ed enti di ricerca pubblici impegnato nelle scienze e tecnologie quantistiche in Italia (la dimensione dei cerchi è proporzionale all'impegno del personale)
Fonte: Ministero dell'Università e della Ricerca



Agrate Brianza	2
Bari	12
Bologna	20
Brescia	7
Cagliari	3
Camerino	17
Catania	14
Como	8
Ferrara	2
Firenze	80
Genova	11
L'Aquila	2
Lecce	12
Legnaro	11
Messina	3
Milano	40
Modena	23
Napoli	30
Padova	18
Palermo	12
Parma	11
Pavia	16
Pisa	31
Roma	52
Salerno	15
Torino	54
Trento	50
Trieste	20

[6] Dati aggiornati a gennaio 2025

Case delle Tecnologie Emergenti (CTE)

Finanziate mediante il "Programma di supporto alle tecnologie emergenti 5G", le CTE sono veri e propri centri di ricerca, sperimentazione e trasferimento tecnologico, che perseguono progetti orientati all'impiego delle tecnologie emergenti anche a supporto di reti di nuova generazione. Essi sono dei presidi diffusi sul territorio (13 CTE in 12 Regioni) che, seguendo un modello hub and spoke, puntano ad essere un punto di riferimento per l'Ecosistema dell'Innovazione locale. Ciascuna CTE opera con un partenariato vario, composto dal Comune di riferimento (capofila), enti di ricerca pubblici e privati, università e partner industriali. L'obiettivo è quello di proporre e sviluppare soluzioni innovative applicabili a realtà come start-up e PMI su tutto il territorio nazionale, anche grazie ad azioni di accelerazione, puntando a:

- ✓ perseguire la creazione e lo sviluppo di soluzioni innovative mediante l'integrazione tra reti 5G e tecnologie emergenti;
- ✓ creare percorsi di accelerazione e incubazione per start-up e PMI innovative;
- ✓ supportare il trasferimento tecnologico da realtà più innovative come start-up verso i soggetti che sono interessati ad applicare le innovazioni (es. imprese e Pubbliche Amministrazioni).

Parte dei finanziamenti del MIMIT sono stati investiti dalle CTE nell'ambito delle TQ per lo sviluppo di laboratori ed infrastrutture tecnologiche, l'attivazione di percorsi didattici/formativi sul tema, il reclutamento e supporto di startup e PMI interessate allo sviluppo di soluzioni innovative basate su TQ, l'organizzazione di seminari ed eventi di promozione sul territorio. La distribuzione dei progetti tra i pilastri delle TQ oggi è più pronunciata verso la comunicazione, dove si sono concentrati i maggiori investimenti, anche se ci sono attività nel calcolo attraverso partnership industriali, favorendo molto lo sviluppo di pacchetti per la formazione di competenze rivolti alle imprese.

Gli investimenti fatti ed i risultati raggiunti dalle singole CTE su progettualità legate alle TQ sono stati messi a sistema per la realizzazione di una rete di CTE operanti in tale ambito. Questo modello organizzativo mira a raccordare i vari ecosistemi regionali delle TQ sotto un'unica governance nazionale centralizzata più robusta, che beneficia comunque della distribuzione delle competenze e delle risorse su tutto il territorio.

di cluster di ricerca concentrati in alcune aree specifiche.

2.2.3 Trasferimento tecnologico

Le TQ rappresentano un cambiamento di paradigma fondamentale per l'informatica, la crittografia e la modellazione scientifica. Una leadership precoce in questo settore determinerà la supremazia tecnologica globale nei prossimi decenni. Per questo motivo, la politica dell'innovazione e i piani di investimento sono stati considerati prioritari nella stesura di questa strategia, ma ancora più importante è che tali investimenti siano rafforzati e agevolati durante la sua attuazione.

Attualmente l'Europa, Italia compresa, è in ritardo rispetto a Stati Uniti e Cina nello sviluppo delle TQ. Negli Stati Uniti, ad esempio, il National Quantum Initiative Act (NQIA) ha quasi raddoppiato i finanziamenti federali per la ricerca e sviluppo nelle TQ, raggiungendo oltre 900 milioni $ all'anno tra il 2019 e il 2022. Questo investimento pubblico ha catalizzato ulteriori 6 miliardi di dollari di investimenti privati in ricerca e sviluppo, rafforzando una robusta industria nazionale.

In Europa, la frammentazione tra gli Stati Membri rischia di marginalizzare tecnologicamente il continente; tuttavia, la corsa alle TQ è ancora agli inizi, e questo rappresenta un'opportunità per agire con decisione e colmare il divario.

Il MUR e il MIMIT hanno messo in atto iniziative per il trasferimento tecnologico attraverso significativi investimenti in centri per il trasferimento tecnologico come le Case delle Tecnologie Emergenti (CTE) ed i Centri di Competenza (CdC), distribuiti sul territorio nazionale, con l'obiettivo di sviluppare start up e convergenze con aziende. Questo investimento ha dato per la prima volta agli Enti Locali (Comuni) la possibilità di essere diretti coordinatori e beneficiari di innovazione tecnologica, sfruttando la grande conoscenza di ciascuno del proprio territorio e delle sue esigenze. Esso ha costituito un veicolo ad alto

potenziale nella formazione di reti di collaborazione tra pubblico e privato. Per rendere più efficace ed impattante la loro azione, su alcune tematiche – tra cui le TQ –, le CTE hanno creato reti di collaborazione e coinvestimento, che hanno prodotto un uso condiviso di infrastrutture, call comuni per startup e PMI, e la condivisione di percorsi formativi comuni.

Data la fase iniziale del TRL delle TQ, queste iniziative hanno comprensibilmente mantenuto finora un approccio piuttosto destrutturato e intermittente nei confronti dell'industria analizzata. Tuttavia, poiché le TQ continuano a dimostrare uno sviluppo sostanziale e un crescente potenziale di mercato, vi è ora l'opportunità di espandere questi programmi per affrontare il settore quantistico in modo più strutturato.

Inoltre, in base alle consultazioni con le parti interessate, l'attuale allocazione delle risorse infrastrutturali sembra favorire fortemente le iniziative di ricerca pura rispetto ai progetti di trasferimento tecnologico, creando un vuoto nella pipeline di commercializzazione. Appare quindi fondamentale garantire l'accessibilità alle infrastrutture per l'industria quantistica. Questo adattamento strategico dei meccanismi di trasferimento tecnologico esistenti aiuterebbe a massimizzare il valore degli investimenti attuali, sostenendo al contempo il crescente ecosistema italiano delle TQ.

Guardando a queste iniziative, è quindi chiaro che il settore pubblico dovrà individuare e incentivare forti partnership con il settore privato, sia per rafforzare lo sviluppo tecnologico, sia per favorire la catena di valore e di fornitura intorno alle TQ. Le iniziative dovranno abbracciare l'intera catena del valore dell'innovazione, dalla ricerca (a partire dalla formazione avanzata attraverso dottorati) allo scale-up e alla diffusione su larga scala delle TQ. Una rete d'innovazione ben strutturata e fortemente ancorata alle esigenze dei territori sarà fondamentale per attivare solide collaborazioni e partnership con centri di ricerca e sperimentazione, volte alla creazione di startup e al trasferimento tecnologico verso le PMI, gli incubatori, gli acceleratori, i venture builder e capitali di rischio, con l'obiettivo non solo di far emergere nuove tecnologie, ma anche di fornire finanziamenti adeguati e accesso agli utenti finali o ai fornitori di tecnologie, chiudendo così il cerchio tra innovazione, applicazione pratica e adozione industriale.

Da questo punto di vista è fondamentale favorire la nascita e la crescita di start-up deep tech, che - proprio in considerazione della loro elevata predisposizione al rischio - abbiano un ruolo chiave (soprattutto quando sono spin off universitari e di centri di ricerca) nello sperimentare e sviluppare tecnologie di frontiera come le TQ. Tali imprese rappresentano veri building block di una futura, robusta industria quantistica nazionale. È pertanto importante che le misure pubbliche (politiche di agevolazione, misure amministrative, burocrazia) vadano ad agevolare la nascita, la crescita e lo scaling up di queste aziende, salvaguardando quanto possibile la sicurezza e la protezione delle conoscenze e competenze che vi si sviluppano.

In tale quadro è anche cruciale un'azione di sostegno all'internazionalizzazione e alla promozione del Sistema Paese, politica fondamentale per la crescita e il rafforzamento delle imprese di settore e la costituzione di una robusta filiera nazionale lungo l'intero stack tecnologico. Le iniziative di Diplomazia economica del MAECI e Agenzia-ICE, concordate in sede di Cabina di Regia per l'Internazionalizzazione (tra le quali, le partecipazioni a fiere internazionali, i Business Forum e le Missioni di settore, le attività dei Centri di Innovazione italiana all'estero, ecc.), andrebbero anche orientate a favore di soggetti che sviluppano tecnologie abilitanti, tra cui le TQ. Tali azioni promozionali di sistema hanno la finalità di sostenere la crescita e lo scale-up di campioni nazionali, nonché la promozione all'estero degli ecosistemi nazionali nei quali si fa ricerca e trasferimento tecnologico in tali settori, in modo da favorire l'attrazione di imprese estere, talenti e capitali internazionali.

L'obiettivo finale è quindi quello di rafforzare l'autonomia strategica dell'Italia e, di riflesso, dell'Europa nel settore digitale, promuovendo lo sviluppo su larga

scala delle TQ e favorendo partnership capaci di colmare il divario tra ricerca e investimenti.

2.2.4 Sistema della formazione superiore e della formazione professionale

Sfide e opportunità

Il rapido sviluppo delle TQ sta aprendo nuove opportunità sia nelle scienze fondamentali che in quelle applicate. Per sfruttare appieno il potenziale delle TQ, è necessaria un'ampia comunità scientifica in grado di lavorare all'intersezione di varie discipline, tra cui fisica, chimica, matematica, informatica e ingegneria. Questa necessità è condivisa sia dalla comunità accademica che da quella industriale, all'interno delle quali l'interesse per le TQ è in costante crescita.

Con la loro evoluzione, le TQ sono destinate a diventare un importante fattore economico nel settore delle tecnologie avanzate, creando numerose opportunità lavorative e ponendo rilevanti sfide sociali. La crescita dei posti di lavoro prevista in questo settore richiederà nuova forza lavoro altamente qualificata, preparata sia per il mercato attuale che per le esigenze future.

Un adeguato sviluppo delle competenze risulta quindi essenziale per l'avanzamento del settore delle TQ. Occorre quindi investire fortemente nella formazione dei ricercatori e dei lavoratori, sia all'interno delle università e dei centri di ricerca che nel contesto industriale, e anticipare ed affrontare proattivamente i cambiamenti previsti nel mercato del lavoro italiano. Man mano che le TQ penetrano i vari settori industriali, la formazione potrà essere sviluppata attraverso uno stretto coordinamento tra tutte le parti interessate. La sfida consiste nel formare personale altamente qualificato con competenze interdisciplinari fondamentali per un settore così avanzato e in rapida evoluzione.

Proprio la distribuzione geografica delle comunità accademiche e industriali (Figure 3 e 11) suggerisce che è possibile promuovere programmi di formazione su tutto il territorio nazionale. L'implementazione dovrebbe considerare le risorse disponibili a livello accademico e quelle legate ai piani produttivi che caratterizzano i diversi territori, basandosi anche sulle collaborazioni esistenti con le istituzioni locali (ad es. le regioni).

Panorama del sistema della formazione attuale

Lauree di I livello. Le lauree di I livello possono offrire una solida introduzione ai concetti fondamentali delle scienze e delle TQ, in grado di rendere gli studenti consapevoli dei possibili sviluppi della loro carriera di studio e professionale, anche se non sono sufficienti a fornire le competenze specifiche e di alto livello richieste in tali settori. Attualmente, i fondamenti della fisica quantistica sono insegnati in modo completo solo all'interno della classe di laurea L-30 (Scienze e Tecnologie Fisiche), con alcuni corsi introduttivi di base offerti anche in altri programmi STEM, come ad esempio in Chimica (L-27) e Ingegneria (L-8 Fisica/Elettronica/Energia/Informazione).

Lauree magistrali. La grande maggioranza dei programmi magistrali di Fisica (LM-17) è organizzata in indirizzi e curricula strettamente legati alle discipline tradizionali della fisica, come la fisica teorica, nucleare e sub-nucleare, della materia condensata, o applicata. Attualmente, diversi corsi di laurea magistrale in Fisica includono anche un curriculum in Scienze e Tecnologie Quantistiche. Esistono inoltre diversi programmi STEM che offrono corsi specifici su questi temi. Tuttavia, programmi interamente strutturati in questo ambito restano un'eccezione, mentre in Europa sono già attivi o in fase di sviluppo più di 40 master specializzati in "Tecnologie Quantistiche" e "Ingegneria Quantistica".

Dottorati di ricerca. A livello di dottorato di ricerca, anche grazie ai finanziamenti PNRR, si è assistito negli ultimi anni ad un incremento delle posizioni di dottorato incentrate su temi di TQ, che hanno fornito un notevole

impulso verso la formazione di personale specializzato e qualificato.

Master professionalizzanti. Negli ultimi anni sono stati attivati in Italia alcuni master professionali nell'ambito delle TQ, che non sono tuttavia ancora diffusi e in grado di soddisfare, per numerosità, la crescita dei posti di lavoro prevista nel settore.

2.2.5 Comunicazione e sensibilizzazione

Un potenziale ostacolo per sostenere gli sforzi dell'Italia nello sviluppo delle TQ è la mancanza di interesse e consapevolezza da parte della società. Il sostegno pubblico è fondamentale per continuare a finanziare la ricerca quantistica, reclutare forza lavoro e promuovere l'adozione delle TQ emergenti.

In Italia si sono già svolte numerose iniziative di sensibilizzazione, tra cui l'evento pubblico "Italian Quantum Weeks", ospitato in numerose città italiane attivamente impegnate nella ricerca nelle TQ. Analogamente, un intenso programma di sensibilizzazione è stato condotto dal Partenariato Esteso NQSTI. Tuttavia, per garantire un impatto a lungo termine, queste misure dovrebbero essere ampliate nei prossimi anni, con l'obiettivo di generare un'alfabetizzazione quantistica diffusa.

La consapevolezza delle TQ è fondamentale per il futuro dell'istruzione e della formazione. È necessaria non solo per stimolare l'interesse dei futuri professionisti nel settore, ma anche per informare e orientare i decisori politici e favorire l'accettazione sociale delle tecnologie emergenti. Sebbene i programmi di formazione avanzata possano soddisfare le esigenze immediate, la futura forza lavoro nelle TQ sarà costituita dagli attuali studenti delle scuole superiori. Pertanto, esporre gli studenti alle TQ durante il loro percorso educativo è essenziale per ispirare le future generazioni di esperti. È quindi necessario un impegno coordinato per coinvolgere insegnanti e scuole, offrendo loro strumenti e risorse per integrare i fondamenti delle TQ nei programmi scolastici.

Parallelamente, la crescente integrazione delle TQ nelle imprese crea la domanda di una forza lavoro specializzata. Sebbene la crescita iniziale sia sostenuta dai primi investitori e dagli early adopters, l'adozione su scala più ampia dipende dalla velocità con cui la consapevolezza dei percorsi di monetizzazione si diffonderà in tutti i settori industriali. Linee guida trasparenti e basate sulla ricerca, insieme a programmi di formazione per i decisori aziendali, saranno fondamentali per aiutare le organizzazioni a valutare, valorizzare e adottare le TQ. Le aziende che scelgono di adottare per prime le TQ svolgono un ruolo fondamentale nella maturazione dell'ecosistema industriale e della catena di sviluppo. È quindi fondamentale riconoscere e sostenere il loro contributo, che può fornire incentivi e risorse per accelerare la maturazione del settore e incoraggiare ulteriori investimenti.

2.3 IL POSIZIONAMENTO DELL'ITALIA A LIVELLO INTERNAZIONALE

La crescita del settore industriale delle TQ in Italia, generata grazie alla spinta fornita dai fondi PNRR, si fonda su basi solide[7]. L'Italia vanta infatti alcune eccellenze nell'ambito della ricerca accademica, collocandosi al settimo posto mondiale con oltre 4.200 pubblicazioni nel campo del calcolo quantistico[8].

Sul fronte finanziamenti, invece, la posizione italiana risulta in ritardo, in uno scenario guidato da diverse nazioni che hanno investito ingenti quantità di capitale su lunghi periodi di tempo (Figura 12). Quattordici paesi hanno inoltre già pubblicato una strategia nazionale per coordinare le attività necessarie al proprio sviluppo tecnologico.

FIGURA 12

Rappresentazione dei finanziamenti pubblici internazionali
Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano

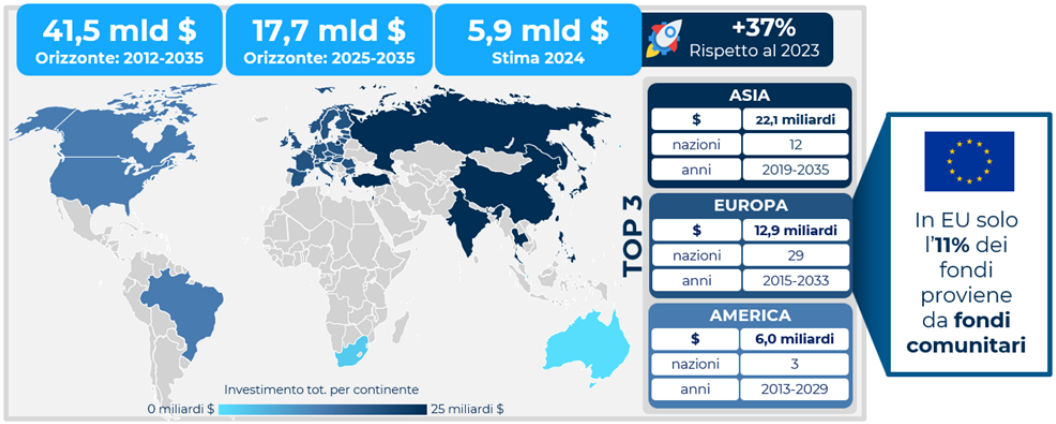


TABELLA 1

Finanziamenti pubblici per le tecnologie quantistiche dei principali paesi europei (in milioni di euro) calcolati al 2024
Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano

Puntando la lente sul continente europeo, i principali investitori risultano essere il Regno Unito, la Germania e la Francia, con l'Olanda poco distante (Tabella 1). Rispetto a questi leader europei, l'Italia, con 228,9 mln €, ha margini di miglioramento in termini di quantità di fondi stanziati, orizzonte temporale e definizione di un programma strategico.

Paese	Finanziamenti pubblici (mln €)
Regno Unito	4.122
Germania	3.030
Francia	1.800
Paesi Bassi	1.100
Danimarca	179
Austria	140
Spagna	98
Finlandia	34

[7] Parte delle sezioni 2.3 e 2.3.1 è tratta dal Report "Ecosistema industriale italiano delle tecnologie quantistiche. Analisi dei risultati della consultazione pubblica condotta dal Ministero delle imprese e del Made in Italy" redatto dal MIMIT - Direzione Generale per le nuove tecnologie abilitanti in collaborazione con l'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano. La versione integrale del Report è disponibile al seguente link: https://www.mimit.gov.it/images/stories/digitale/Ecosistema_industriale_italiano_delle_tecnologie_quantistiche.pdf

[8] Fonte: Scopus (pubblicazioni sul Quantum Computing dal 1980 ad oggi).

Il limitato finanziamento pubblico nel settore e l'assenza, finora, di un programma strategico ha avuto ripercussioni anche nello sviluppo del settore privato, in termini di numero di aziende native e fondi di venture capital raccolti. Come rappresentato nella Tabella 2, c'è una presenza esigua di startup native nel nostro paese, ma la distanza rispetto ad altri leader europei risulta colmabile.

TABELLA 2

Numero di aziende native di TQ per Paese nel 2024
Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano

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

2.3.1 Punti di forza, debolezza, opportunità e rischi

Sulla base di quanto emerso dalla mappatura effettuata a valle della consultazione pubblica degli stakeholder industriali, della ricognizione dei fondi stanziati in ambito accademico italiano, nonché del posizionamento dell'Italia a livello internazionale, sono stati individuati di seguito alcuni punti di forza, debolezza, opportunità e rischi.

Punti di forza

- ✓ Distribuzione geografica sul territorio nazionale di università ed enti di ricerca che si occupano di TQ e ne favoriscono l'industrializzazione;
- ✓ Presenza di un ecosistema delle TQ ben strutturato, con punte di eccellenza consolidate in alcune piattaforme quantistiche quali atomi neutri, fotoni e superconduttori;
- ✓ Ottime capacità di ricerca e trasferimento tecnologico nella metrologia e sensoristica quantistica;
- ✓ Esistenza di una filiera, dalla ricerca all'impresa, riconosciuta a livello internazionale nelle tecnologie legate alla comunicazione quantistica;
- ✓ Presenza di capacità di ricerca e startup nel campo del calcolo quantistico a livello software;
- ✓ Presenza di alcune grandi aziende della domanda che stanno già investendo sulle TQ;
- ✓ 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;
- ✓ Presenza di infrastrutture pubbliche per processi di open innovation in calcolo e comunicazione quantistici già disponibili per lo sviluppo di test bed, use case e Proof of Concept (PoC) all'interno di soggetti pubblici che operano al consolidamento di collaborazioni pubblico-privato.

Punti di debolezza

- ✓ Ritardo, ad oggi, nello sviluppo di un hardware quantistico italiano competitivo per il calcolo quantistico;
- ✓ Necessità ingente di capitali per lo sviluppo di hardware quantistico;
- ✓ Necessità di disegnare politiche incentivanti più allineate alle esigenze del settore (per rapidità delle procedure, entità dei finanziamenti, tempi di ritorno degli investimenti);
- ✓ Mancanza di un tavolo di coordinamento tra filiera industriale, ricerca e istituzioni;
- ✓ Stato della filiera dell'offerta ancora embrionale rispetto ad altri Paesi europei;
- ✓ Scarsa competitività del mercato del lavoro in ambito deep-tech;
- ✓ Scarso allineamento dei fondi di venture capital italiani con le reali necessità delle imprese che operano nelle TQ;
- ✓ Assenza di fondi growth per sostenere le scale-up e contenere il fenomeno di acquisizioni estere che portano al trasferimento di aziende e di competenze;
- ✓ Mancanza di infrastrutture: assenza di fonderie italiane e di un'adeguata diffusione della fibra necessaria per QKD;
- ✓ Consapevolezza non diffusa in merito alle potenzialità delle TQ e alle minacce sul fronte della cybersecurity;
- ✓ Mancanza di standardizzazione e linee guida governative su quantum e post-quantum security;
- ✓ Inefficacia del sistema di procurement governativo che non permette lo stimolo della domanda nella sperimentazione.

Opportunità

- ✓ Opportunità di sviluppo nei diversi campi di ricerca aperti, con notevoli potenzialità;
- ✓ Attenzione europea alle TQ come arena tecnologica in cui instaurare una leadership;
- ✓ Rafforzamento della partecipazione italiana ai progetti europei che permettono di realizzare investimenti e avere accesso alle infrastrutture;
- ✓ Elevate potenzialità formative per giovani ricercatori e opportunità di acquisire nuove competenze nell'ambito delle TQ per il mercato del lavoro;
- ✓ Fase di mercato precompetitiva che richiede collaborazione tra settore privato pubblico anche tenendo conto delle vocazioni dei territori e della loro capacità di fare networking;
- ✓ Valore economico potenzialmente elevato derivante dall'utilizzo delle TQ 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;
- ✓ Rischio di frenare la filiera del software per via del limitato sviluppo e accesso all'hardware;
- ✓ Rischio di ridurre le potenzialità di sviluppo di un hardware nazionale in caso di eccessiva dipendenza da macchinari esteri;
- ✓ Dati a rischio a causa dei futuri attacchi di cybersicurezza realizzati mediante le TQ: “harvest now, decrypt later”

3. LINEE DI AZIONE FUTURE

3.1 DIREZIONI DI SVILUPPO SCIENTIFICO

3.1.1 Scienza quantistica di base

Obiettivo OSc-1	**Mantenimento e rafforzamento del ruolo dell'Italia nella ricerca di base nello scenario europeo e mondiale**

Linee di azione

a) Approfondire la comprensione dei fenomeni alla base dei sistemi e dei dispositivi quantistici esistenti (esperimenti e teoria);

b) Progettare nuove architetture per applicazioni di informazione quantistica, tra cui qubit, memorie, protocolli e algoritmi, e sviluppare architetture quantistiche scalabili e ibride;

c) Ottimizzare le misure quantistiche sfruttando risorse o protocolli alternativi, con vantaggi rispetto agli approcci classici;

d) Sviluppare strategie per estendere e proteggere l'entanglement e il trasferimento di stati quantistici;

e) Progettare interfacce efficienti sia tra qubit che tra piattaforme fisiche diverse, promuovendo l'interoperabilità tra tecnologie eterogenee;

f) Sviluppare metodi per la ricostruzione e la stima di stati quantistici complessi e/o canali quantistici, assieme alla certificazione delle loro proprietà;

g) Approfondire la comprensione delle risorse quantistiche (quantificazione di entanglement, non-località di Bell, ecc.) e sviluppare teorie delle risorse per l'informazione quantistica;

h) Progettare task di informazione quantistica efficienti e indipendenti dal dispositivo.

3.1.2 Calcolo quantistico

Obiettivo OSc-2	**Raggiungimento di uno stadio di comprovato vantaggio quantistico rispetto al calcolo classico**

Linee di azione

a) Migliorare la qualità dell'hardware e delle interfacce e sviluppare tecniche di mitigazione e correzione degli errori per raggiungere la transizione dal regime NISQ al regime FTQC e consentire l'integrazione con sistemi di calcolo ad alte prestazioni e di comunicazione classica e quantistica;

b) Identificare algoritmi e casi d'uso per verificare il vantaggio quantistico rispetto al calcolo classico;

c) Sviluppare algoritmi ibridi quantistici – classici ed esplorare forme di intelligenza artificiale e di apprendimento automatico quantistici;

d) Sviluppare algoritmi quantum inspired per esplorare i reali limiti del calcolo classico, definire benchmarking delle prestazioni dei calcolatori quantistici e permettere applicazioni industriali nel breve periodo per preparare l'ecosistema italiano all'avvento di queste nuove tecnologie;

e) Promuovere il trasferimento di conoscenze e le sinergie tra il nostro Paese, l'ecosistema High Performance Computer and Quantum Simulator hybrid (HPC-QCS) europeo esistente, i programmi di Digital/Horizon Europe e le varie iniziative quantistiche adottate degli Stati Membri;

f) Facilitare l'accesso alle risorse di calcolo quantistico già esistenti e fornite via cloud da aziende produttrici o da fornitori di servizi in Europa.

3.1.3 Simulazione quantistica

Obiettivo OSc-3A	**Sviluppo di hardware dedicato alla simulazione quantistica**

Linee di azione

a) Dimostrazione di applicazioni di simulazione quantistica che comportino *quantum utility* o *quantum speed-up*.

Obiettivo OSc-3B	**Implementazione di algoritmi quantistici efficienti per problemi di ottimizzazione complessi**

Linee di azione

a) Sviluppare strategie per affrontare problemi complessi di ottimizzazione in specifiche piattaforme di simulazione quantistica con comprovati vantaggi quantistici;

b) Promuovere l'adozione di architetture ibride quantistico-classiche e facilitare l'accesso a simulatori quantistici avanzati per affrontare applicazioni rilevanti per il settore industriale;

c) Analizzare le performance del HPC(CPU+GPU) classico nella risoluzione di problemi di ottimizzazione che fanno leva su algoritmi *quantum inspired*.

3.1.4 Comunicazione quantistica

Obiettivo OSc-4A	**Realizzazione di reti di comunicazione quantistica sicure e integrate** *Sviluppare le reti di comunicazione quantistica, rendere quantum-ready e quantum-resilient le attuali reti di comunicazione ed integrare la comunicazione quantistica sicura nelle reti classiche*

Linee di azione

a) Completare la dorsale quantistica italiana e collegarla a EuroQCI integrando comunicazioni quantistiche satellitari, connessioni transfrontaliere in fibra ottica e reti metropolitane;

b) Definire una roadmap per EuroQCI e la dorsale quantistica italiana, valorizzando in particolare le risorse presenti a livello locale;

c) Progettare architetture e protocolli per reti quantistiche nella prospettiva di uno stack protocollare quantistico, con il duplice obiettivo: i) rispondere ad esigenze pratiche riducendo i requisiti hardware richiesti, ii) massimizzare l'interplay/interoperabilità tra infrastruttura classica di comunicazione ed infrastruttura quantistica, abilitando la coesistenza tra traffico classico e traffico quantistico e/o integrando i protocolli quantistici e lo stack protocollare classico;

d) Affiancare la crittografia post-quantum alle primitive quantistiche, insieme a toolkit software specifici per integrare le comunicazioni quantistiche in reti sicure, in attuazione della misura #22 del Piano di Implementazione della Strategia Nazionale di Cybersicurezza che promuove l'uso della crittografia avanzata sin dalla fase di progettazione;

e) Implementare la crittografia post-quantistica all'interno delle infrastrutture di rete tradizionali, garantendo la protezione dei dati attraverso algoritmi resistenti agli attacchi quantistici; promuovere quindi l'adozione di standard internazionali per la crittografia post-quantistica, supportando la certificazione e la conformità delle soluzioni sviluppate per reti ottiche, elettriche e radio;

f) Favorire la rapida piena attivazione del Centro nazionale di crittografia, quale centro di riferimento nazionale per tutti gli aspetti della crittografia in ambito non classificato;

g) Dettagliare alcune delle possibili applicazioni industriali di rilevanza strategica delle reti quantistiche, ad esempio in cybersecurity, IoT, telecomunicazioni avanzate.

Obiettivo OSc-4B	**Estensione delle comunicazioni quantistiche sicure su lunghe distanze**

Linee di azione

a) Sviluppare ripetitori quantistici veloci e affidabili per estendere la portata della comunicazione insieme a switch e hub necessari per l'instradamento dinamico dei segnali nella rete;

b) Migliorare componenti chiave come sorgenti e rivelatori;

c) Migliorare i canali quantistici, le sia fibre ottiche che i collegamenti nello spazio libero, ottimizzandoli per ridurre le perdite e garantire alta fedeltà di trasmissione;

a) Realizzare reti capaci di integrare tecnologie terrestri, satellitari e nello spazio libero per estendere la copertura geografica della rete.

Obiettivo OSc-4C	**Abilitazione delle reti quantistiche per lo scambio diretto di risorse quantistiche (quantum internet)** *Abilitare la creazione di reti quantistiche in grado di scambiare direttamente risorse quantistiche per permettere l'elaborazione quantistica distribuita, l'accesso sicuro a risorse quantistiche remote e l'installazione di reti di sensori quantistici*

Linee di azione

a) Sviluppare interfacce quantistiche robuste e affidabili per collegare i dispositivi quantistici a una rete quantistica e trasferire in modo efficiente le informazioni quantistiche dai qubit volanti ai dispositivi quantistici specifici;

b) Progettare architetture di reti quantistiche e relativi protocolli quantistici che rispondano ad esigenze pratiche riducendo i requisiti hardware richiesti.

Obiettivo OSc-4D	**Consolidamento della sicurezza delle soluzioni di comunicazione quantistica** *Consolidare l'analisi delle security proof delle soluzioni di Comunicazione Quantistica (es. QKD) esistenti*

Linee di azione

a) Sviluppare argomenti per contrastare le critiche sollevate da numerose Agenzie di Sicurezza Nazionali (es. Position Paper on Quantum Key Distribution by French Cybersecurity Agency, German BSI, Netherlands NLNCSA, Swedish NCSA – 2024; US NSA - 2023; UK NSA - 2024);

b) Definire protocolli di certificazione di sicurezza condivisi a livello nazionale ed internazionale per l'adozione anche nel settore Difesa e per Informazioni Classificate.

3.1.5 Metrologia e sensoristica quantistica

Obiettivo OSc-5A	**Sviluppo delle capacità di test e certificazione delle tecnologie e dei sensori quantistici nell'ambito della strategia comunitaria European Quantum Metrology and Testing Initiative (EuroQMTI)**

Linee di azione

a) Ampliare le competenze di testing per le TQ, che si configurano spesso come nuove, innovative e interdisciplinari. Queste competenze, inoltre, si interfacciano con lo sviluppo parallelo della standardizzazione delle tecnologie;

b) Favorire la possibilità di testing di terze parti pubbliche per gruppi di ricerca e industrie, in modo da elevare il grado di maturazione tecnologica dei sensori senza gravare interamente sugli sviluppatori a basso TRL, così accelerando l'adozione industriale;

c) Sviluppare un Centro Nazionale per il test e la certificazione delle tecnologie e dei sensori quantistici che sia protagonista nell'iniziativa EuroQMTI.

Obiettivo OSc-5B	**Sostegno alle infrastrutture di ricerca che sviluppano sensori quantistici, con prototipazione e sperimentazione, per accelerare il trasferimento tecnologico e l'implementazione industriale**

Linee di azione

a) Sviluppare le infrastrutture a supporto della sensoristica in termini di integrazione di tecnologie abilitanti – come le tecnologie di vuoto e di elettronica di controllo –, con il fine di supportare una logica di filiera per lo sviluppo di dispositivi completi e non solo componenti o dimostrazioni di fattibilità;

b) Sviluppare le infrastrutture a supporto della miniaturizzazione dei sensori quantistici, vista come una tendenza tecnologica dominante in Europa e a livello globale.

Obiettivo OSc-5C	**Indirizzamento della ricerca e sviluppo di sensori quantistici strategici per l'industria nazionale** *Indirizzare gli sviluppi scientifici dei sensori quantistici che sono considerati strategici dall'industria italiana, attraverso la ricognizione delle competenze presenti nel Paese, per piattaforme e per classi di sensori. Favorire inoltre lo sviluppo di nuovi sensori che possano garantire le basi di un più alto valore aggiunto valorizzando la realizzazione a più bassa maturità tecnologica*

Linee di azione

a) Sostenere la rete di ricerca che offre soluzioni a bassa maturità tecnologica nei settori di sensoristica su cui l'Italia può esprimere un contributo industriale significativo in termini di investimenti propri e di mercato oppure di utenti istituzionali, in particolare l'aerospazio, il biotecnologico, la filiera energetica e quella digitale;

b) Favorire il trasferimento tecnologico attraverso misure mirate allo sviluppo della sensoristica quantistica nei settori aerospazio e biotecnologico, e in ogni altro settore dove sia stato evidenziato un livello di investimento industriale significativo.

3.1.6 Tecnologie abilitanti

Obiettivo OSc-6A	**Controllo delle piattaforme tecnologiche selezionate, per una riduzione significativa della dipendenza da materiali e tecnologie non UE**

Linee di azione

a) Promuovere una collaborazione tra tutti gli attori significativi: università, centri di ricerca, start-up, aziende medio-grandi e il comparto Difesa e Sicurezza. Tale collaborazione deve abbracciare tutti i TRL per accelerare l'innovazione in un contesto tecnologico senza precedenti.

b) Fornire informazioni dettagliate alle associazioni industriali e pianificare investimenti pubblici mirati per indirizzare gli sforzi industriali verso tappe tecnologiche ben definite. Parallelamente, gli investimenti pubblici dovrebbero favorire la creazione di start-up che rappresentano lo strumento più efficiente per accelerare il trasferimento tecnologico.

c) Predisporre misure specifiche per garantire la formazione di personale altamente qualificato, con una strategia ben pianificata in grado da una parte di attrarre risorse chiave e dall'altra di contrastare la fuga di talenti, attraverso: incentivi e agevolazioni più mirate, maggiore disponibilità di risorse per la ricerca, trasparenza per le opportunità e le progressioni di carriera, minore burocrazia.

d) Stimolare la crescita del mercato e garantire relazioni commerciali stabili con i Paesi dell'UE e non UE like-minded per i componenti critici. A tale riguardo vanno rafforzati gli strumenti per lo screening degli investimenti esteri e di quelli outbound e per l'attrazione e il mantenimento delle risorse umane chiave. È necessario altresì contenere acquisizioni straniere ostili di produttori di tecnologie critiche nell'UE e contrastare il fenomeno del trasferimento illecito o indesiderato di competenze e conoscenze di valore strategico.

e) Monitorare le catene di fornitura nel tempo per salvaguardare la posizione dell'Italia e alleviare potenziali colli di bottiglia. È essenziale garantire l'accesso sicuro a componenti critici, come criostati a diluizione, sistemi laser, componenti ottici ed elettronici, e sistemi criogenici o ad alto vuoto.

Obiettivo OSc-6B	**Sviluppo, integrazione e caratterizzazione di componenti per la realizzazione di dispositivi quantistici**

Linee di azione

a) Sviluppare metodi affidabili per quantificare, controllare ed ottimizzare le proprietà dei materiali e comprenderne l'impatto sui dispositivi quantistici e sulle loro prestazioni.

b) Assicurare la disponibilità delle componenti essenziali e dei dispositivi necessari per la realizzazione di prodotti quantistici e garantire un accesso economico alle licenze relative all'uso di dispositivi e componenti essenziali per le startup e le PMI dell'UE, cruciale per consentire e proteggere la crescita dell'industria quantistica dell'UE.

c) Sviluppare infrastrutture di ricerca avanzate e supportare finanziariamente la capacità produttiva italiana, colmando il divario tra le grandi fonderie e le PMI. L'estensione delle TQ allo spettro infrarosso e il miglioramento delle sorgenti di fotoni singoli sono vitali per applicazioni come la distribuzione di chiavi quantistiche e il calcolo distribuito. La stabilizzazione della frequenza laser e l'uso di circuiti integrati fotonici (PIC) necessitano di ulteriore sviluppo, in particolare per l'imballaggio criogenico.

d) Sviluppare infrastrutture criogeniche ottimizzate per grandi circuiti quantistici, la co-locazione dell'elettronica di controllo di alto livello con i chip quantistici, lo sviluppo di chip di controllo classici che funzionano a temperature criogeniche (ad esempio, crio-CMOS) e la fabbricazione di chip di controllo superconduttori veloci.

e) Integrare componenti elettronici, magnetici, fotonici, a microonde e superconduttori in processi di produzione completi per soddisfare i requisiti delle applicazioni quantistiche complesse.

3.1.7 Standardizzazione

Obiettivo OSc-7	**Coordinamento e collaborazione** *Promozione di una strategia efficace e inclusiva per la standardizzazione delle TQ, incentivando la partecipazione dell'industria e della ricerca, sviluppando strumenti di supporto accessibili e razionalizzando il coordinamento a livello europeo per evitare duplicazioni e massimizzare l'impatto*

Linee di azione

a) Stabilire incentivi per coinvolgere l'industria nazionale, i rappresentanti accademici e gli esperti di quantistica nel JTC22 e in altre organizzazioni di sviluppo degli standard (SDO). Promuovere i contributi dei borsisti di EuroHPC ed EuroQCI alle attività di sviluppo degli standard del JTC22;

b) Supportare il gruppo strategico JTC22 nella creazione di un documento dinamico e di facile utilizzo che illustri gli standard esistenti ed emergenti e fornisca informazioni aggiornate sulle attività di standardizzazione quantistica globale;

c) Assegnare al gruppo strategico del JTC22 il compito di supervisionare e unificare le iniziative di standardizzazione della tecnologia quantistica a livello europeo, evitando duplicazioni. Incoraggiare altre iniziative di standardizzazione ad allinearsi e contribuire alla strategia del JTC22.

3.1.8 Benchmarking

Obiettivo OSc-8A	**Coordinamento e collaborazione** *Creazione di un ecosistema europeo strutturato e collaborativo per il benchmarking delle TQ e la loro integrazione in sistemi classici di supercalcolo, favorendo il coordinamento tra le iniziative e l'integrazione tra ricerca e industria*

Linee di azione

a) Promuovere la creazione di un unico forum di coordinamento per le iniziative europee di benchmarking;

b) Incoraggiare l'interazione e lo scambio tra le attività di standardizzazione e benchmarking.

Obiettivo OSc-8B	**Strumenti e infrastrutture** *Fornire risorse e accesso a infrastrutture chiave per sviluppare metodologie di benchmarking affidabili, quantitative e oggettive a livello europeo*

Linee di azione

a) Sviluppare un programma a livello europeo per sostenere la ricerca e lo sviluppo con un approccio interdisciplinare, integrando le università e l'industria a fini di benchmarking;

b) Facilitare l'accesso alle macchine sia classiche che quantistiche che stiano state acquistate o realizzate con fondi pubblici nazionali o europei (per esempio, supercomputer EuroHPC e macchine quantistiche annesse) per lo sviluppo e il collaudo dei benchmark, per sostenere la creazione di benchmark quantitativi e oggettivi.

3.2 RACCOMANDAZIONI STRATEGICHE

3.2.1 Ricerca

Obiettivo OSt-1A	**Rafforzamento dell'ecosistema della ricerca e dell'innovazione** *Realizzazione di un ecosistema di ricerca e innovazione efficiente e sinergico, che faciliti il coordinamento delle infrastrutture, il trasferimento tecnologico e la collaborazione tra pubblico e privato per accelerare la commercializzazione delle TQ e "fondere" la cultura di ricerca e quella dell'innovazione*

Linee di azione

a) Favorire la partecipazione alle attività da parte di ricercatori provenienti da altre realtà sia pubbliche (enti di ricerca, pubblica amministrazione) che private (aziende), attraverso:

   i) Una maggiore cooperazione nei laboratori di ricerca universitari fra personale di provenienza sia pubblica che privata;

   ii) L'accesso aperto alle infrastrutture di ricerca degli Enti da parte di personale di provenienza sia pubblica che privata;

iii) La costituzione di laboratori congiunti pubblico-privati con obiettivi specifici e concreti per portare sul mercato i risultati della ricerca, anche in sinergia con strutture pubbliche che operano nei settori della valorizzazione della ricerca e del trasferimento tecnologico verso il mondo delle imprese. Tutte queste strutture saranno collaborative per costituzione, ma necessariamente localizzate sul territorio.

b) Elaborare degli strumenti che favoriscano un più rapido trasferimento tecnologico verso partner industriali, con la relativa commercializzazione dei prodotti della ricerca, anche attraverso la standardizzazione dei processi per la valorizzazione dei risultati della ricerca, adottando, quando disponibili, best practice internazionali (in linea con OSt-2A).

Obiettivo OSt-1B	**Coordinamento dei finanziamenti della ricerca** *Individuazione di opportune e adeguate fonti di finanziamento pubblico – soprattutto successivamente alla cessazione dei finanziamenti PNRR – e gestione efficiente di tali risorse pubbliche assieme a quelle private*

Linee di azione

a) Evitare dispersioni e sovrapposizioni tra finanziamenti pubblici, garantendo una rapida focalizzazione delle risorse sui pilastri prioritari, sulle eccellenze tecnologiche consolidate e sui progetti più promettenti, in linea con le priorità del Governo sulle tecnologie critiche essenziali per il perseguimento degli obiettivi di autonomia strategica;

b) Rafforzare il legame tra la ricerca pubblica e le imprese, attraverso finanziamenti dedicati e la messa a disposizione di infrastrutture quantistiche, con conseguente ricaduta positiva degli investimenti pubblici nella ricerca sul sistema produttivo;

c) Realizzare un quadro amministrativo e finanziario trasparente ed accessibile che risponda alle esigenze delle imprese, facilitando il loro accesso ai finanziamenti per ricerca e sviluppo e rafforzando il partenariato pubblico-privato per accelerare l'innovazione;

d) Snellire e semplificare le procedure amministrative, per garantire una riduzione dei tempi tra stanziamento, impegno ed erogazione dei fondi, mantenendo al contempo un'accurata selezione dei progetti basata sulla qualità;

e) Promuovere un raccordo strutturato con iniziative delle regioni e degli enti locali, per favorire la sinergia istituzionale nell'ambito degli ecosistemi territoriali;

f) Superare gli attuali deficit legati alla gestione dei finanziamenti alla ricerca, assicurando una maggiore efficacia dei processi di spesa, pubblica e privata, e garantendo la continuità dei fondi disponibili e la possibilità di programmazione della ricerca nel medio-lungo termine.

Obiettivo OSt-1C	**Attrattività della ricerca e internazionalizzazione** *Promozione di iniziative interministeriali e interagenzia volte a incentivare la circolazione dei talenti non solo a livello europeo e internazionale, ma anche all'interno dei confini nazionali, con un approccio sistemico e con un'attenzione al divario di genere, contrastando i fenomeni che generano ambienti sfavorevoli o degradanti*

Linee di azione

a) Predisporre un "pacchetto attrattività" per le discipline STEM, con particolare riguardo alle TQ, che affianchi e complementi le misure già esistenti per agevolare il reclutamento di ricercatori dall'estero[9];

b) Creare un Manifesto per l'attrazione dei talenti nelle filiere produttive nazionali, predisposto in collaborazione con diversi stakeholder, al fine di indirizzare e favorire le azioni per l'attrazione, la permanenza e la valorizzazione dei talenti. Tale manifesto potrebbe anche contenere buone pratiche e linee guida per università ed enti di ricerca al fine di monitorare l'attuazione delle politiche per l'attrazione dei talenti;

c) Stanziare fondi dedicati alla valorizzazione della diversità e inclusione nella comunità scientifica, anche mediante misure di supporto per contrastare il fenomeno dell'abbandono della carriera di ricerca da parte delle donne, piuttosto comune nelle discipline STEM, che aumenta il divario di genere in ogni fase della carriera (il cosiddetto "leaky pipeline");

d) Garantire un sinergico coordinamento delle azioni sopracitate con le iniziative di Diplomazia economica e di promozione del Sistema Paese (internazionalizzazione imprese e promozione dei territori) introdotte dal MAECI, che fanno anche leva su Agenzia-ICE, la rete diplomatica-consolare e quella degli Addetti scientifici.

3.2.2 Trasferimento tecnologico

Obiettivo OSt-2A	**Ecosistema Collaborativo per l'Innovazione Quantistica** *Promozione della crescita di un ecosistema quantistico solido e dinamico attraverso reti di collaborazione pubblico-private, programmi di incubazione e accesso alle infrastrutture (in linea con OSt-1A)*

Linee di azione

a) Costruire reti collaborative per l'innovazione, formate da partner pubblici e privati affidabili, che includano la grande impresa come motore di innovazione ed eccellenza tecnologica e attraverso le quali start-up, spin-off e nuove iniziative imprenditoriali possano testare, convalidare e valutare le loro proposte attraverso programmi di incubazione e accelerazione;

b) Favorire l'accesso regolamentato a infrastrutture chiave condivise per consentire a tutte le tipologie di partner industriali, comprese le PMI, di avvicinarsi al settore delle TQ, sviluppando prodotti e servizi;

c) Promuovere sinergie tra gli attori pubblici e privati, rafforzando le partnership e puntando all'accesso a grandi finanziamenti, per garantire il successo delle TQ e per sostenere la crescita di un ecosistema competitivo.

[9] Il MUR ha messo a punto una serie di iniziative, anche con il sostegno dei fondi PNRR, quali il sistema delle chiamate dirette, gli incentivi premiali e le misure relative a decontribuzioni, per attrarre in Italia sia ricercatori italiani attualmente all'estero che studiosi stranieri, e premiare i ricercatori delle università italiane impegnati in progetti di particolare rilievo.

Obiettivo OSt-2B	**Strumenti finanziari e incentivi per la crescita** *Creazione di strumenti economici e finanziari mirati per accelerare la crescita del settore quantistico, facilitando il trasferimento tecnologico e stimolando l'innovazione*

Linee di azione

a) Creare strumenti finanziari dedicati per aiutare sia attori pubblici che privati nella loro crescita e migliorare il trasferimento tecnologico;

b) Lanciare programmi di premi di incentivazione, in collaborazione con centri di ricerca e sperimentazione, per la creazione di start-up ed il trasferimento tecnologico verso PMI, fondazioni, istituti di ricerca e partner industriali al fine di stimolare l'innovazione nelle applicazioni delle TQ. Questi premi fungerebbero da catalizzatori per l'identificazione di nuovi casi d'uso, incoraggiando al contempo la formazione di nuove start-up. Questo approccio si è dimostrato efficace in altri settori ad alta tecnologia e potrebbe accelerare in modo significativo l'innovazione quantistica in Italia;

c) Stabilire un programma di trasferimento tecnologico coordinato, che unisca gli sforzi tra le diverse istituzioni coinvolte, garantendo un'allocazione efficiente delle risorse e semplificando lo sviluppo dell'industria. Un'iniziativa congiunta di questo tipo, che unisce competenze e risorse, consentirebbe di affrontare meglio le sfide e le opportunità uniche del settore quantistico;

d) Rafforzare la filiera venture nazionale, favorendo il lancio di fondi deep tech e verticali specializzati nelle diverse fasi del ciclo di crescita delle aziende, con attese di ritorni sul capitale più lunghe rispetto a fondi venture più tradizionali (patient capital), proponendo forme di ibridazione pubblico-privato e/o garanzie statali tali da ridurre il rischio intrinseco all'investimento in tecnologie particolarmente avanzate;

e) Favorire l'istituzione di fondi large/growth in grado trattenere quanto più possibile in Italia scale-up nazionali, lavorando nel contempo a progetti europei per aumentare i volumi dei mercati privati di finanziamento;

f) Favorire l'accesso di start-up e scale-up italiane a programmi di accelerazione internazionali dedicati quali DIANA e fondi deep tech tipo EIC e NATO Innovation Fund.

Obiettivo OSt-2C	**Sviluppo delle competenze e partnership strategiche** *Potenziare la formazione di competenze tecniche e manageriali necessarie per il funzionamento delle TQ e rafforzare la collaborazione tra governo e industria per favorirne l'adozione e la commercializzazione*

Linee di azione

a) Sviluppare partenariati strutturati per l'innovazione tra governo e industria per agevolare l'adozione delle TQ, sostenendo sia aziende consolidate che investono nelle applicazioni quantistiche che le start-up emergenti che investono nella loro crescita. Tali collaborazioni contribuirebbero a colmare il divario tra ricerca e commercializzazione, promuovendo al contempo un ecosistema quantistico nazionale più solido e dinamico.

3.2.3 Sistema della formazione superiore e della formazione professionale

Obiettivo OSt-3A	**Formazione superiore di primo e secondo livello** *Supporto all'orientamento dei giovani e potenziamento delle TQ nella formazione di base, mediante l'istituzione di percorsi formativi accademici interdisciplinari basati su un approccio trasversale*

Linee di azione

a) Favorire l'integrazione di curricula specifici dedicati alle Scienze e Tecnologie Quantistiche all'interno del corso magistrale in Fisica (LM-17), ed eventualmente Ingegneria elettronica (LM-29) e Ingegneria informatica (LM-32), che possano coprire in modo trasversale i diversi aspetti teorici, sperimentali e applicativi delle scienze e TQ;

b) Creare nuovi corsi di laurea (ad esempio in "Quantum Engineering") con un forte impianto interdisciplinare rispetto ai corsi di studio STEM tradizionali;

c) Promuovere internship e tesi di laurea magistrale presso aziende, startup, altri atenei e centri di ricerca operanti nel campo delle TQ per permettere agli studenti di acquisire esperienza sul campo e favorire un trasferimento di conoscenze e competenze che rafforzi l'ecosistema della ricerca e dell'innovazione;

d) Favorire l'istituzione di programmi congiunti tra varie università e la partecipazione al programma Erasmus italiano, per favorire la creazione di un ecosistema formativo nazionale distribuito sul territorio e permettere agli studenti di beneficiare delle competenze di diversi atenei nel campo delle TQ.

Obiettivo OSt-3B	**Formazione superiore di terzo livello** *Potenziamento dei percorsi formativi di alto livello in grado di valorizzare la distribuzione geografica delle università, dei centri di ricerca e delle risorse industriali, nonché la varietà di potenziali direzioni di ricerca in Scienze e Tecnologie Quantistiche, pur mantenendo i programmi legati agli specifici contesti accademici ed economici*

Linee di azione

a) Istituire dottorati consortili, mediante consorzi tematici, ad esempio dedicati ai diversi pilastri delle TQ, che sfruttino le competenze complementari di diverse istituzioni accademiche;

b) Potenziare i dottorati industriali, che coinvolgono industrie e start-up per la formazione della forza lavoro professionale già impiegata nelle aziende;

c) Favorire programmi di dottorato interdipartimentali all'interno di un'unica istituzione accademica per la ricerca teorica e applicata su aspetti interdisciplinari delle TQ (ad esempio la già citata "Quantum Engineering");

d) Promuovere schemi di finanziamento delle iniziative di alta formazione dedicati, cofinanziati da MUR, MIMIT, aziende private, enti di ricerca ed enti locali.

Obiettivo OSt-3C	**Formazione e aggiornamento della forza lavoro per le industrie** *Promozione di nuovi programmi specifici di formazione e aggiornamento altamente qualificati, rivolti sia a giovani ricercatori che a professionisti che già lavorano nelle aziende e che hanno bisogno di acquisire competenze altamente specializzate (in linea con OSt-5E)*

Linee di azione

a) Istituire corsi di Master di secondo livello su tematiche specialistiche in stretta collaborazione con centri di ricerca e aziende locali dove i partecipanti dovrebbero svolgere stage;

b) Favorire l'offerta di percorsi di upskilling e reskilling, modulari e flessibili, da parte delle aziende per il proprio personale.

3.2.4 Comunicazione e sensibilizzazione

Obiettivo OSt-4	**Sensibilizzazione diffusa, consapevolezza e ampio accesso alle TQ** *Alfabetizzazione quantistica diffusa nella società per garantire ampio accesso al campo delle TQ, incremento della consapevolezza dei giovani in merito alle potenzialità delle TQ e promozione di un coinvolgimento sempre più ampio dei vari settori industriali interessati per integrare le TQ nelle aziende e maturare un ecosistema globale*

Linee di azione

a) Consolidare ed ampliare misure di sensibilizzazione per il grande pubblico, promuovendo eventi di divulgazione che coinvolgano la società nel suo complesso;

b) Promuovere l'organizzazione di eventi divulgativi e/o formativi nelle scuole secondarie, agendo a livello capillare sul territorio, per esporre i giovani studenti ai principi di base delle TQ e per far conoscere le TQ e le loro potenzialità ai docenti delle scuole;

c) Promuovere l'organizzazione di iniziative di orientamento scolastico nelle scuole secondarie, anche con il coinvolgimento del settore privato che opera nel settore delle TQ, per mostrare agli studenti le opportunità offerte attualmente sia dal mondo del lavoro, attraverso percorsi di specializzazione, che dal mondo accademico degli studi universitari, attraverso i percorsi di laurea.

d) Promuovere programmi informativi dedicati alle TQ rivolti ai decisori aziendali per favorire l'integrazione di queste tecnologie nelle aziende, favorendo un coinvolgimento sempre più ampio dei vari settori industriali interessati;

e) Realizzare azioni di informazione per imprese, enti locali, associazioni di categoria, centri di formazione professionale e servizi per il lavoro accreditati, università, centri di ricerca e altri soggetti dell'ecosistema della ricerca e dell'innovazione, per valorizzare la loro capacità di attrarre, accogliere e valorizzare talenti ad elevata specializzazione.

3.2.5 Industria[10]

Obiettivo OSt-5A	**Sostegno alla creazione di meccanismi di confronto permanente degli attori dell'ecosistema italiano sulle TQ** *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 la complementarità tra iniziative a livello locale e nazionale*

Linee di azione

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, avrebbe 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 (cfr. anche cap. 5).

Obiettivo OSt-5B	**Finanziamento per la creazione di un ecosistema pubblico-privato strutturato e maturo** *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 (in raccordo con OSt-1A e OSt-1B)*

Linee di azione

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.

Obiettivo OSt-5C	**Promozione di industrializzazione e imprenditorialità sulle tecnologie quantistiche a livello nazionale** *Favorire la creazione di una filiera nazionale delle TQ in grado di: (i) promuovere la nascita di start-up 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*

Linee di azione

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 (ad es.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;

b) Creare occasioni di match making tra fondi di venture capital o di corporate venture capital con il tessuto di start-up nazionali, favorendo anche la collaborazione tra iniziative istituzionali e venture capital privati;

[10] Parte di questa sezione è tratta dal Report "Ecosistema industriale italiano delle tecnologie quantistiche. Analisi dei risultati della consultazione pubblica condotta dal Ministero delle imprese e del Made in Italy" redatto dal MIMIT - Direzione Generale per le nuove tecnologie abilitanti in collaborazione con l'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano. La versione integrale del Report è disponibile al seguente link: https://www.mimit.gov.it/images/stories/digitale/Ecosistema_industriale_italiano_delle_tecnologie_quantistiche.pdf

c) Relazionare la strategia industriale per le TQ con quella relativa ad altre filiere critiche a cui quest'ultima è fortemente correlata, come quella dell'Intelligenza Artificiale;

d) Sviluppare un'analisi della struttura dell'offerta vs domanda e coinvolgere anche i soggetti della "domanda", di ogni dimensione, in modo da confrontarsi sull'evolversi delle esigenze e delle opportunità di sviluppo dei progetti nei diversi settori economici e dibatterne le ricadute operative sulla produttività della filiera e sui diversi settori di applicazione.

Obiettivo OSt-5D	**Garanzia di accesso a tecnologie e infrastrutture quantistiche critiche al Sistema Paese** *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*

Linee di azione

a) Nel breve termine:

   i) realizzare una mappatura delle infrastrutture industriali e dei laboratori specializzati presenti sul territorio, inclusi i centri di ricerca e sperimentazione per la creazione di start-up ed il trasferimento tecnologico verso le PMI, e dei Centri di Competenza, con l'obiettivo di definire piani di finanziamento anche di lungo termine;

   ii) implementare politiche di manutenzione e di accesso per garantire un pieno sfruttamento del sistema italiano delle strutture esistenti oltre l'orizzonte temporale del PNRR (già dalla seconda metà del 2025);

   iii) garantire l'accesso alle migliori infrastrutture tecnologiche quantistiche a livello europeo, facendo leva anche sull'utilizzo di servizi Cloud, per accelerare la sperimentazione e promuovere lo sviluppo di soluzioni software innovative. Questo si potrebbe realizzare sviluppando programmi dedicati volti a ridurre ostacoli finanziari e burocratici e migliorare il coordinamento tra le infrastrutture italiane e quelle europee, massimizzando le sinergie;

   iv) Integrare le TQ con altre filiere strategiche nazionali, come l'AI e la space economy;

   v) adottare un piano di investimenti, sin da subito, in attività in assessment in sicurezza; in relazione, ad esempio, agli impatti potenzialmente provenienti dalle reti già sviluppate nel contesto internazionale.

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 nuove infrastrutture quantistiche a livello nazionale, riducendo la dipendenza da infrastrutture critiche estere e garantendo autonomia tecnologica strategica;

d) Coordinare gli investimenti italiani in infrastrutture con quelli realizzati dalle istituzioni europee, anche rafforzando le partnership con gli altri Stati membri dell'UE, garantendo una presenza attiva italiana nelle iniziative strategiche europee.

Obiettivo OSt-5E	**Sviluppo di una forza lavoro qualificata e creare un mercato attrattivo per talenti nazionali ed esteri** *Sviluppare talenti sulle TQ a livello nazionale, rafforzando la filiera industriale del settore e creando un mercato del lavoro attrattivo*

Linee di azione

a) In coordinamento tra MIMIT e MUR, finanziare dottorati e post-doc in collaborazione pubblico-privato lavorando con i domini industriali più rilevanti;

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 TQ. 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, proponendo trattamenti economici competitivi, maggiore disponibilità di fondi per la ricerca, minori carichi burocratici e scorrimenti di carriera più veloci e ispirati a criteri meritocratici. In tale quadro vanno valorizzate le misure esistenti per l'attrazione di professionalità dall'estero, come le agevolazioni fiscali e le varie tipologie di visti per i cittadini non comunitari (tenendo conto in particolare dei talenti provenienti dai Paesi in Via di Sviluppo).

Obiettivo OSt-5F	**Definizione dei programmi di disseminazione di conoscenza e aumento della consapevolezza su opportunità e rischi nelle imprese utilizzatrici** *Garantire che le imprese italiane potenziali utilizzatrici delle TQ ne conoscano opportunità e rischi per mantenere il tessuto economico competitivo (in linea con OSt-4)*

Linee di azione

a) Creare dei programmi di disseminazione ed eventi che aumentino la consapevolezza delle opportunità e dei rischi legati alle TQ, 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 TQ, in modo da favorirne l'adozione nelle aziende utilizzatrici.

Obiettivo OSt-5G	**Promozione della cooperazione internazionale nell'ambito delle politiche industriali e di ricerca applicata sulle tecnologie quantistiche** *Garantire la competitività europea nell'ecosistema internazionale delle TQ e valorizzare gli sforzi nazionali all'interno di una politica sovranazionale*

Linee di azione

a) Assicurare il monitoraggio e l'aggiornamento della strategia nazionale da parte degli istituti di governance come indicato nel OSt-5, linea d'azione a);

b) Stipulare accordi bilaterali per uno sviluppo sinergico del settore, per la normativa e per la standardizzazione tecnologica;

c) Garantire una rappresentanza italiana nei tavoli decisionali sovranazionali.

3.2.8 Quadro di sintesi delle linee di azione future

Direzioni di sviluppo scientifico	
Scienza quantistica di base	OSc-1: Mantenimento e rafforzamento del ruolo dell'Italia nella ricerca di base nello scenario europeo e mondiale
Calcolo quantistico	OSc-2: Raggiungimento di uno stadio di comprovato vantaggio quantistico rispetto al calcolo classico
Simulazione quantistica	OSc-3A: Sviluppo di hardware dedicato alla simulazione quantistica
	OSc-3B: Implementazione di algoritmi quantistici efficienti per problemi di ottimizzazione complessi
Comunicazione quantistica	OSc-4A: Realizzazione di reti di comunicazione quantistica sicure e integrate
	Osc-4B: Estensione delle comunicazioni quantistiche sicure su lunghe distanze
	Osc-4C: Abilitazione delle reti quantistiche per lo scambio diretto di risorse quantistiche (quantum internet)
	Osc-4D: Consolidamento della sicurezza delle soluzioni di comunicazione quantistica
Metrologia e sensoristica quantistica	OSc-5A: Sviluppo delle capacità di test e certificazione delle tecnologie e dei sensori quantistici nell'ambito della strategia comunitaria EuroQMTI
	OSc-5B: Sostegno alle infrastrutture di ricerca che sviluppano sensori quantistici, con prototipazione e sperimentazione, per accelerare il trasferimento tecnologico e l'implementazione industriale
	OSc-5C: Indirizzamento della ricerca e sviluppo di sensori quantistici strategici per l'industria nazionale
Tecnologie abilitanti	OSc-6A: Garantire il pieno controllo delle piattaforme tecnologiche selezionate, riducendo significativamente la dipendenza da materiali e tecnologie non UE
	OSc-6B: Sviluppo, integrazione e caratterizzazione di componenti per la realizzazione di dispositivi quantistici
Standardizzazione	OSc-7: Coordinamento e collaborazione
Benchmarking	OSc-8A: Coordinamento e collaborazione
	OSc-8B: Strumenti e infrastrutture
Raccomandazioni strategiche	
Ricerca	OSt-1A: Rafforzamento dell'ecosistema della ricerca e dell'innovazione
	OSt-1B: Coordinamento dei finanziamenti della ricerca
	OSt-1C: Attrattività della ricerca e internazionalizzazione
Trasferimento tecnologico	OSt-2A: Ecosistema Collaborativo per l'Innovazione Quantistica
	OSt-2B: Strumenti Finanziari e Incentivi per la Crescita
	OSt-2C: Sviluppo delle competenze e partnership strategiche
Il sistema della formazione superiore e della formazione professionale	OSt-3A: Formazione superiore di primo e secondo livello
	OSt-3B: Formazione superiore di terzo livello
	OSt-3C: Formazione e aggiornamento della forza lavoro per le industrie
Comunicazione e sensibilizzazione	OSt-4: Sensibilizzazione diffusa, consapevolezza e ampio accesso alle TQ
Industria	OSt-5A: Sostegno alla creazione di meccanismi di confronto permanente degli attori dell'ecosistema italiano sulle TQ
	OSt-5B: Finanziamento per la creazione di un ecosistema pubblico-privato strutturato e maturo
	OSt-5C: Promozione di industrializzazione e imprenditorialità sulle tecnologie quantistiche a livello nazionale
	OSt-5D: Garanzia di accesso a tecnologie e infrastrutture quantistiche critiche al sistema paese
	OSt-5E: Sviluppo di una forza lavoro qualificata e creare un mercato attrattivo per talenti nazionali ed esteri
	OSt-5F: Definizione dei programmi di disseminazione di conoscenza e aumento della consapevolezza su opportunità e rischi nelle imprese utilizzatrici
	OSt-5G: Promozione della cooperazione internazionale nell'ambito delle politiche industriali e di ricerca applicata sulle tecnologie quantistiche

Per orientare il processo decisionale su quali azioni promuovere, monitorare o eventualmente ritarare in un contesto di risorse limitate e complessità elevata, la progettazione esecutiva delle attività andrà riferita ad una griglia di valutazione che aiuti a distinguere gli obiettivi strutturali di lungo periodo da quelli immediatamente attuabili, rafforzando la coerenza tra visione strategica e operatività. Questo sarà inoltre un supporto essenziale per comunicare in modo chiaro e trasparente le priorità ai diversi stakeholder coinvolti (governo, industria, ricerca, territori).

La valutazione di ciascun Obiettivo Strategico (OSt) andrà svolta secondo tre criteri fondamentali:

- ✓ **Rilevanza**: centralità dell'obiettivo per il successo della strategia nazionale sulle TQ;
- ✓ **Urgenza**: necessità di intervento immediato per cogliere opportunità o prevenire criticità;
- ✓ **Impatto**: potenziale trasformativo dell'obiettivo sull'ecosistema italiano delle tecnologie quantistiche.

3.2.9 Monitoraggio, Key Performance Indicators e valutazione di impatto

Per garantire l'efficace attuazione della Strategia Italiana per le Tecnologie Quantistiche e assicurare che gli investimenti producano risultati concreti, sarà realizzato un sistema nazionale di monitoraggio e valutazione periodica, integrato nella Governance istituita per l'attuazione della Strategia, coordinato dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR), in collaborazione con il MIMIT e i principali stakeholder pubblici e privati.

Key Performance Indicators (KPI)

Verranno, conseguentemente, definiti e monitorati indicatori chiave di performance per ciascuna area di intervento strategico, tra cui:

- ✓ **Ricerca**
  - Numero di pubblicazioni scientifiche peer-reviewed in ambito TQ;
  - Numero di progetti finanziati con TRL > 4;
  - Percentuale di progetti di ricerca che evolvono in prototipi dimostrabili.
- ✓ **Trasferimento tecnologico**
  - Numero di brevetti depositati e licenze attivate in ambito TQ;
  - Numero di collaborazioni attive pubblico-private;
  - Numero di startup deep-tech attivate o accelerate.
- ✓ **Formazione e competenze**
  - Numero di laureati e dottorati in discipline legate alle TQ;
  - Numero di master professionalizzanti attivati;
  - Tasso di occupazione in ambiti correlati entro 12 mesi dal titolo.
- ✓ **Industria e investimenti**
  - Volume di investimenti privati attivati (co-investimento, venture capital);
  - Aumento del numero di imprese coinvolte nella filiera quantistica nazionale;
  - Numero di progetti pilota conclusi con successo.

Sarà pubblicata annualmente una roadmap operativa che includerà milestone e timeline verificabili.

Valutazione d'Impatto e Cicli di Revisione

Ogni 24 mesi, una valutazione d'impatto indipendente sarà commissionata a soggetti terzi (es. ANVUR, CNR, gruppi misti accademia-industria) per verificare:

- ✓ La coerenza tra risultati ottenuti e obiettivi dichiarati;
- ✓ L'efficienza e l'efficacia dei meccanismi di governance;
- ✓ Le criticità emerse nell'attuazione della strategia.

I risultati di ciascun ciclo saranno pubblici e utilizzati per aggiornare la strategia secondo il principio di adattività strategica.

4. QUADRO DEI FINANZIAMENTI

Come evidenziato nella sezione 2.3, l'Italia ha elevate possibilità di sviluppo nel settore delle tecnologie quantistiche, grazie all'eccellenza della ricerca e alle potenzialità del settore industriale. Il Paese sconta, invece, un notevole ritardo nell'ambito dei finanziamenti pubblici, rispetto ad uno scenario internazionale guidato da quei Paesi che hanno programmato ingenti investimenti su lunghi periodi di tempo.

A livello europeo, l'impegno complessivo per le attività legate alle tecnologie quantistiche è di circa 9,5 miliardi €, comprensivi di risorse comunitarie e contributi degli Stati Membri. Considerato l'ambizioso obiettivo dell'Unione Europea di trasformarsi in una vera e propria quantum valley, nella prospettiva del miglioramento della competitività, è da attendersi che, a seguito della pubblicazione della Strategia europea per le tecnologie quantistiche, nell'ambito del Quantum Act si prevedano ulteriori stanziamenti per stimolare lo sviluppo del settore.

Il primo motore della rivoluzione quantistica sono i governi, che stanno investendo miliardi di euro in ricerca pubblica con orizzonti di lungo termine, consapevoli dell'enorme impatto sulla competitività economica e sulla sicurezza nazionale.

Un'analisi delle strategie quantum di alcuni paesi europei mette in luce che gli investimenti annunciati in riferimento al relativo arco temporale di programmata implementazione (cfr. Tabella n. 4) sono cospicui. L'impulso dei fondi pubblici sta creando un ecosistema che integra anche il settore privato: da un lato, startup e aziende dell'offerta impegnate nello sviluppo tecnologico; dall'altro, imprese della domanda che sperimentano oggi per assicurarsi un vantaggio competitivo domani.

TABELLA 3

Investimenti previsti nelle strategie nazionali

Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano

Paese	Budget	Durata	Anno di avvio
Austria	107 mln €	5 anni	2021
Danimarca	150 mln €	4 anni	2023
Francia	1,8 mld €	5 anni	2021
Germania	2,5 mld €	5 anni	2021
Paesi Bassi	615 mln €	7 anni	2021
Regno Unito	2,5 mld £ ca. 3 mld €	10 anni	2023
Svizzera	10+82,1 mln CHF ca. 97 mln €	5 anni	2023
Spagna	808 mln €	5 anni	2025

Nel quadriennio 2021-2024 anche l'Italia ha realizzato una serie di interventi nel settore delle TQ, investendo circa 229 mln € nell'ambito delle tecnologie quantistiche, di cui l'86% per i progetti PNRR. A tali finanziamenti possiamo sommare quelli stanziati per le infrastrutture EuroQCI e EuroHPC (circa 70 mln €).

La mappatura dell'ecosistema e i dati emersi dalle consultazioni del settore privato evidenziano che i fondi dedicati alle tecnologie quantistiche nell'ambito dei progetti PNRR hanno generato un significativo effetto leva, catalizzando investimenti privati e stimolando lo sviluppo di competenze. Le iniziative finanziate hanno permesso di sviluppare una virtuosa sinergia tra mondo

accademico e imprenditoriale e sulle attività di trasferimento tecnologico, nel contesto degli spoke PNRR. Per consolidare e ampliare questi risultati, sarebbe tuttavia fondamentale proseguire lungo questa traiettoria con misure mirate.

Dall'analisi condotta dagli esperti scientifici del gruppo di lavoro emerge infatti che, per potersi collocare nel solco dei Paesi a più alto tasso di sviluppo tecnologico ed incrementare attrattività e competitività a beneficio dell'intero ecosistema, l'Italia avrebbe bisogno di programmare un volume di finanziamenti nel settore di circa 200 milioni all'anno, per un periodo di cinque anni (in aggiunta a quanto già investito). Tale ammontare rappresenterebbe lo 0,01% del PIL, una quota prossima a quella già programmata dalla Francia e dalla Germania (cfr. Tabella n. 4).

L'investimento consentirebbe, inoltre, di dare adeguata attuazione alla Strategia, rafforzando e implementando gli sforzi condotti sino ad ora dall'intera filiera del valore, la cui qualità è internazionalmente riconosciuta.

Ove, tuttavia, l'opzione fosse di dare semplicemente continuità ai fondi finora spesi nei progetti già avviati e finanziati dal PNRR, ciò non consentirebbe lo sviluppo di ambizioni commisurate alle potenzialità del sistema Paese, come dettagliate nella Strategia, e porterebbe ad una perdita di competitività in uno scenario globale impegnato ad accelerare lo sviluppo del settore.

Dal punto di vista finanziario, questo obiettivo potrebbe essere raggiunto attraverso due principali direttrici di intervento:

1. Nuovi investimenti pubblici affiancati da misure strutturali, volte ad esempio a supportare il trasferimento tecnologico e a rafforzare l'impatto e la sostenibilità delle infrastrutture nel lungo termine, anche favorendo l'accesso delle imprese alle infrastrutture di calcolo;
2. Massimizzazione dell'effetto leva generato dal PNRR, attraverso strumenti mirati a stimolare ulteriormente la partecipazione degli investitori privati e a creare un contesto favorevole alla crescita del settore.

Quanto al primo punto, come chiaramente emerge dalla Strategia, la quantità di investimenti non è, da sola, in grado di fornire adeguato sostegno allo sviluppo delle tecnologie quantistiche, essendo necessario indirizzare gli stessi per rafforzare ulteriormente i punti di forza che l'analisi dei dati ha mostrato, intervenire sui punti di debolezza mitigandone i relativi rischi e dare attuazione alle linee di sviluppo delineate nella terza parte del testo.

Pertanto, al fine di garantire un adeguato equilibrio tra innovazione tecnologica, supporto imprenditoriale e sviluppo delle competenze scientifiche, gli investimenti pubblici, in linea con l'analisi riportata in questo documento e nel quadro della strategia europea, dovrebbero essere ripartiti secondo le seguenti percentuali:

- ✓ Il 20% destinato a investimenti in equity e supporto alle imprese;
- ✓ Il 30% a finanziare le infrastrutture a disposizione del mondo produttivo per lo sviluppo di tecnologie quantistiche e dei corrispondenti casi d'uso[11];
- ✓ Il 15% per lo sviluppo di quantum chips;
- ✓ Il 35% alla ricerca.

Nel programmare la strategia di finanziamento che accompagnerà gli stanziamenti pubblici sarà particolarmente importante tenere conto delle raccomandazioni strategiche delineate nel testo. Va sottolineato in particolare che la quota qui proposta per la ricerca corrisponde ai finanziamenti finora erogati con il PNRR, e rappresenta quindi il volume complessivo minimo necessario per evitare una regressione nelle capacità scientifiche dell'Italia, da accompagnarsi con un incremento degli investimenti sugli altri versanti dell'ecosistema quantistico nazionale.

[11] Si tratta dello sviluppo nazionale delle infrastrutture di Quantum Communication (EuroQCI), Quantum Computing and Simulation (EuroQCS), come pure di Quantum Sensing and Metrology.

Quanto al secondo punto, come anche emerso nel corso delle consultazioni del settore privato, i fondi di venture capital italiani (inferiori, per masse gestite, rispetto anche a paesi europei più piccoli) incontrano difficoltà a raccogliere capitali da investitori istituzionali (fondi pensione, casse di previdenza, assicurazioni, ma anche family offices e altri operatori informali del mercato dei capitali privati). Tali difficoltà sono maggiori per quei gestori di capitali di ventura che operano nei settori cosiddetti deep-tech come le tecnologie quantistiche, i cui tempi di sviluppo, realizzazione e commercializzazione dei relativi prodotti sono più lunghi rispetto ad altre tecnologie. Tempi più lunghi e maggiori incertezza sui rendimenti rendono indispensabile disporre di capitali più "pazienti" (a titolo di esempio, la durata del NATO Innovation Fund è di 15 anni). Per mobilitare in misura superiore tali risorse finanziarie private da destinare a fondi di venture operanti nel deep-tech appare pertanto indispensabile rafforzare ulteriormente gli strumenti e incentivi che operano da leva (come, ad esempio, gli sgravi fiscali) o introdurre forme di de-risking.

Per limitare il livello di rischio e le perdite sul portafoglio, un'ipotesi potrebbe essere quella di introdurre delle "garanzie" di natura pubblica (ad esempio tramite SACE), ovvero strumenti assicurativi a garanzia di parte dell'investimento qualificato, da parte di un fondo istituzionale (Limited Partner), in quote o azioni di Fondi per il Venture Capital deep-tech residente nel territorio dello Stato (o quello di Stati membri dell'Unione europea o di Stati aderenti all'Accordo sullo Spazio economico europeo, sempre che l'investimento del gestore sia in startup operanti prevalentemente in Italia).

Un plafond di garanzie pubbliche del valore di 100 milioni € (a copertura del 20% di ogni singolo investimento in un fondo VC) corrisponderebbe a un effetto leva significativo.

5. GOVERNANCE, INCLUSI SVILUPPI LEGISLATIVI

Quadro di sintesi

Come emerso dall'analisi condotta sin qui, l'Italia deve valorizzare le competenze scientifiche di elevato profilo presenti nel Paese al fine di consolidarne il ruolo di leadership europea e stabilire una propria capacità indipendente per lo sviluppo, la produzione e la distribuzione delle TQ. Questo processo deve essere guidato anche dai valori fondamentali della sicurezza nazionale, al fine di creare un ecosistema tecnologico virtuoso e resiliente, capace di fronteggiare i rischi emergenti e di garantire la salvaguardia degli interessi strategici del Paese. Le azioni di cooperazione internazionale della presente strategia sono congruenti con le scelte fondamentali di politica estera e di sicurezza, i cui pilastri sono l'appartenenza alla UE, alla NATO e alle Nazioni Unite, i rapporti transatlantici e con i paesi like-minded, le alleanze e il rispetto dei diritti umani, la pace e la sicurezza internazionale.

Per raggiungere questi obiettivi, è necessario incentivare la ricerca scientifica, di base ed applicata, e colmare l'attuale divario con la produzione su larga scala, realizzando così un ecosistema capace di dare vita ad un ampio ventaglio di applicazioni scientifiche ed industriali. È altresì essenziale che l'ecosistema sia strutturato per rafforzare la resilienza tecnologica, contribuendo alla sicurezza nazionale e collettiva; pertanto, le raccomandazioni settoriali devono tradursi in azioni ed opportunità all'interno di un ecosistema dell'innovazione ben strutturato, a garanzia del coinvolgimento e coordinamento di tutti gli attori interessati.

Emerge infatti con chiarezza a livello internazionale l'importanza di coinvolgere, nella governance dello sviluppo delle TQ, tutti gli stakeholder considerati rilevanti lungo l'intera catena del valore della ricerca e dell'industria:

- ✓ **Governo, istituzioni nazionali e Regioni:** sono i principali stakeholder in qualsiasi programma di governance, per il ruolo di guida regolatorio e di policy-making a livello nazionale ed internazionale. In particolare:
  - **Il Governo**, oltre ad elaborare una condivisa Strategia nazionale, svolge un ruolo fondamentale nell'identificazione delle aree di finanziamento dell'innovazione prioritarie per il Paese, nell'indirizzare le sfide di policy e nel facilitare la nascita e lo sviluppo di ecosistemi locali;
  - **Il Comparto Difesa e Sicurezza** assicura che le TQ rispondano alle esigenze strategiche di sicurezza nazionale;
  - **Il Ministero degli Affari Esteri e di Cooperazione Internazionale** assicura che le azioni di cooperazione internazionali siano coerenti con le scelte di politica estera del Paese;
  - **Le Regioni** assicurano il coordinamento e lo sviluppo degli ecosistemi territoriali.
- ✓ **Università ed enti di ricerca**: lo sviluppo delle TQ dipende in larga parte dalle attività di ricerca avanzata e formazione condotte da università ed enti pubblici di ricerca (EPR), e dal relativo finanziamento, pubblico e privato.
- ✓ **Aziende ed enti privati**: svolgono un ruolo importante nello sviluppo, l'innovazione, e la commercializzazione delle TQ. Le aziende tecnologiche, comprese le grandi imprese, sono spesso motori di innovazione, ad esempio nel campo dell'hardware e del software quantistico. Parallelamente, PMI, start-up e spin-off giocano un ruolo importante nel tradurre le scoperte accademiche in prodotti e servizi commerciali.

- ✓ **Individui, consumatori, e società nel suo insieme**: gli individui, in qualità di futuri professionisti e ricercatori, sono cruciali per alimentare il sistema delle competenze necessarie allo sviluppo del settore; i consumatori favoriscono l'accettazione e l'adozione delle tecnologie emergenti. La fiducia del pubblico nei confronti delle TQ, alimentata dalla trasparenza e dalla consapevolezza dei benefici e dei rischi associati, è essenziale per creare mercati sostenibili e dinamici. Infine, la società nel suo complesso beneficia delle applicazioni delle TQ, ma ne condivide anche le responsabilità etiche, sociali e ambientali.

Per istituire una forma stabile di coordinamento tra tutti gli stakeholder è necessario ripensare i tradizionali meccanismi di collaborazione interistituzionale, al fine di creare un ecosistema che sia in grado di tradurre rapidamente obiettivi e traguardi della Strategia Nazionale in azioni concrete. Come detto, tale collaborazione deve garantire un'attenzione particolare agli aspetti di sicurezza, al fine di prevenire usi impropri delle tecnologie e, al contempo, garantire un approccio sicuro e responsabile al progresso tecnologico.

Le iniziative avviate con i progetti PNRR rappresentano un punto di riferimento per la costruzione di questo ecosistema coordinato. In particolare, il Partenariato Esteso NQSTI, il Centro Nazionale di Ricerca in HPC, Big Data and Quantum Computing (ICSC) – con lo spoke 10 dedicato al Quantum Computing – e l'Infrastruttura di Ricerca I-PHOQS hanno posto solide basi per nuove forme di collaborazione. Questi progetti hanno permesso di raggiungere elevati livelli di ricerca e sviluppo tecnologico, mettendo in rete in modo stabile università, EPR, imprese e attori territoriali, creando così un'infrastruttura collaborativa senza precedenti.

Quanto già realizzato deve ora essere consolidato e ulteriormente sviluppato, valorizzando così il progresso raggiunto grazie all'ingente investimento del PNRR nel settore, e garantendo, con un approccio di lungo termine, la sostenibilità e la crescita futura delle TQ.

Come dimostra la mappatura condotta ai fini della stesura della Strategia nazionale, questo settore emergente richiede forti sinergie tra gli stakeholder con un duplice obiettivo:

- ✓ In primo luogo, coordinare le iniziative multilivello che coinvolgono la ricerca, l'industria ed il settore Difesa, partendo dal livello locale per arrivare fino a quello internazionale e favorendo i meccanismi di trasferimento tecnologico.
- ✓ In secondo luogo, creare una forte collaborazione tra stakeholder per identificare le aree strategiche di finanziamento e coordinarle con un approccio basato sul technology foresight, al fine di rafforzare l'impatto degli investimenti pubblici e privati sull'ecosistema, massimizzandone i risultati e favorendo l'allineamento delle priorità strategiche.

Coordinamento e collaborazione rappresentano i presupposti fondamentali per garantire il coinvolgimento attivo di tutti gli attori interessati al processo decisionale. Al tempo stesso, questi presupposti consentono di strutturare l'attuazione dei progetti e programmi in modo coerente con le esigenze di tutti i partecipanti. Pertanto, incoraggiare la collaborazione tra istituti di ricerca, mondo accademico, industria ed enti governativi per favorire lo scambio di strategie, risorse e conoscenze sarà fondamentale per garantire il successo e la sostenibilità dell'ecosistema.

Principi

Quanto precede può essere tradotto nei seguenti principi guida per la costruzione di un ecosistema dell'innovazione sulle TQ guidato da una governance condivisa:

- ✓ **Coinvolgimento completo degli stakeholder**: identificazione di tutti gli stakeholder e analisi approfondita dei loro ruoli, interessi, esigenze e responsabilità;

- ✓ **Integrazione della sicurezza nazionale e gestione proattiva del rischio**: armonizzazione dello sviluppo delle TQ con gli aspetti di sicurezza nazionale, identificando e valutando i rischi connessi a potenziali usi impropri di tali tecnologie e adottando misure per la salvaguardia degli interessi nazionali;
- ✓ **Processo decisionale inclusivo**: equilibrio tra processi top-down e bottom-up per facilitare un processo decisionale inclusivo;
- ✓ **Meccanismi di finanziamento chiari**: pianificazione e differenziazione degli strumenti di finanziamento, rendendoli veloci e flessibili, con call regolari e dai tempi di valutazione certi e dichiarati;
- ✓ **Struttura ottimale**: bilanciamento dei compiti assegnati alle strutture di governance a vari livelli;
- ✓ **Equilibrio di genere**: valorizzazione della parità di genere, garantendo una adeguata presenza femminile in tutti gli organi decisionali e comitati di selezione e l'elaborazione di misure che agevolino un ambiente favorevole alla valorizzazione del talento e al benessere di tutti e tutte;
- ✓ **Coordinamento interministeriale**: valorizzazione dell'inclusione di rappresentanti delle diverse amministrazioni coinvolte (MUR, MIMIT, Ministero della Difesa, MAECI, DTD e ACN) al fine di favorire sia un dialogo costruttivo tra le istituzioni e con gli stakeholder che l'individuazione di un centro unico di rappresentanza dei diversi interessi degli stakeholder italiani nei consessi europei;
- ✓ **Processi snelli e agilità decisionale**: bilanciamento del coinvolgimento degli stakeholder e dell'agilità decisionale ed attuativa. Le caratteristiche del settore e la rapida evoluzione tecnologica richiedono sistemi che non ingessino le procedure;
- ✓ **Valorizzazione delle strutture esistenti**: facilitare il più possibile la costruzione di un solido ecosistema che consenta di coordinare in modo integrato il perseguimento degli obiettivi fissati dalla Strategia. L'identificazione e il coinvolgimento di strutture esistenti con competenze specifiche nel settore appaiono di particolare importanza: le fondazioni già costituite e le organizzazioni coinvolte nelle attività PNRR in tema di scienze e TQ possono, infatti, fornire un contributo prezioso per assicurare rilevanza nelle decisioni strategiche e nell'attuazione.

Raccomandazioni

Per raggiungere gli obiettivi fissati dalla Strategia, l'Italia deve dunque creare un ambiente condiviso per attingere alle competenze di tutti gli stakeholder, lungo l'intera catena del valore dell'innovazione: dai ricercatori alle aziende e agli utenti finali, passando per le amministrazioni pubbliche e i decisori politici.

In linea con quanto si sta delineando nel contesto internazionale, anche l'Italia deve dunque dotarsi di un luogo di confronto strategico che velocizzi i processi decisionali senza appesantirli, eviti le frammentazioni, mantenga nel lungo periodo una stabilità organizzativa propedeutica al monitoraggio del conseguimento degli obiettivi e sia in grado di assicurare il coordinamento multilivello tra gli stakeholders.

Una efficiente struttura di governance dovrebbe:

- ✓ Coordinare le politiche pubbliche nel settore, anche alla luce delle iniziative europee, al fine di sviluppare le capacità tecnologiche nazionali attraverso il sostegno alla ricerca e all'innovazione;
- ✓ Assicurare il coordinamento con le strutture e le iniziative esistenti;
- ✓ Monitorare l'attuazione della strategia nazionale e predisporne un aggiornamento con cadenza almeno triennale;

- ✓ Assicurare che la ricerca e l'innovazione siano orientate anche a sostenere e rafforzare la sicurezza nazionale, contribuendo all'individuazione, valutazione e gestione dei rischi emergenti;
- ✓ Fornire una piattaforma per discussioni e negoziati su finanziamenti e investimenti per rafforzare le attività di ricerca, sviluppo e commercializzazione nel settore delle TQ;
- ✓ Garantire una distribuzione equa, trasparente e celere dei finanziamenti pubblici, anche tenuto conto dell'importanza di interventi ed azioni rapidi ed efficaci, volti a ridurre velocemente il gap con i paesi pari;
- ✓ Promuovere la competitività industriale;
- ✓ Salvaguardare i diritti di proprietà intellettuale;
- ✓ Garantire una condotta responsabile e sicura della ricerca e dello sviluppo della scienza e della tecnologia quantistica;
- ✓ Garantire l'equilibrio di genere e sostenere le politiche a favore della diversità e della inclusione;
- ✓ Sostenere e promuovere la formazione e la mobilità di una forza lavoro diversificata e qualificata in Italia e nell'UE, per stimolare l'innovazione e la crescita, anche attraendo e trattenendo i talenti e promuovendo l'istruzione e la formazione nella scienza e nelle TQ.

Al fine di consentire il rapido ed efficace avvio dell'attuazione della Strategia Nazionale sulle tecnologie quantistiche in un contesto tecnologico e geopolitico in rapida evoluzione, si suggerisce di procedere per fasi, come segue:

Nel breve periodo, per bilanciare il coinvolgimento degli stakeholder con l'esigenza di agilità decisionale ed attuativa, si propone di istituire un "Comitato permanente per le Tecnologie Quantistiche", con le seguenti caratteristiche:

- ✓ Composizione: rappresentanti di MIMIT, MUR, Ministero della Difesa, MAECI, ACN e DTD, esperti espressione della comunità scientifica ed attori rilevanti sul piano imprenditoriale.
- ✓ Collocazione: presso il MUR alla luce del suo ruolo centrale nell'ecosistema della ricerca nazionale e nel coordinamento di iniziative PNRR, pur assicurando il coinvolgimento degli altri ministeri.

Tale struttura bilancerebbe rapidità e semplicità procedurale con coordinamento efficace in fase di attuazione. Infine, il Comitato proposto sembra essere adatto a portare avanti la missione istituzionale per lo sviluppo delle TQ.

Nel medio periodo, al fine di consolidare la struttura di governance e dare maggiore stabilità di lungo periodo al coordinamento tra gli stakeholder, si potrebbe istituire un modello di governance mutuato dal Polo Nazionale della dimensione Subacquea, concepito come un innovativo modello di Sistema Paese, volto ad aggregare le eccellenze italiane - pubbliche e private - coinvolte nello sviluppo scientifico, nella formazione, nell'innovazione tecnologica e nel trasferimento tecnologico nel settore e organizzato secondo un'articolazione multilivello che preveda:

- ✓ Un comitato di livello politico: responsabile per la definizione degli indirizzi strategici per l'attuazione della Strategia Nazionale;
- ✓ Un Comitato di Direzione Strategica: composto da rappresentanti istituzionali, accademici e industriali, per garantire la supervisione e la coerenza con gli obiettivi nazionali;
- ✓ Una Struttura Operativa: per la gestione amministrativa degli eventuali bandi, l'erogazione di eventuali finanziamenti e la realizzazione di attività di trasferimento tecnologico.

Il Polo Nazionale della Quantistica, così composto, avrebbe l'obiettivo di favorire l'attrazione di un numero significativo di investimenti, valorizzare la ricerca e la formazione e creare nuove opportunità occupazionali, realizzando il potenziale della Strategia nazionale.

Nel medio e/o lungo periodo, il modello di governance potrebbe essere integrato da una specifica Fondazione Quantum – da individuarsi tra le fondazioni attualmente esistenti nel settore delle tecnologie, o di nuova costituzione – avente quale missione istituzionale quella di facilitare la convergenza tra investimenti pubblici e investimenti privati, a rafforzamento dell'ecosistema istituito.

Estensione operativa della governance: monitoraggio, valutazione e trasparenza

Per garantire che la governance delle tecnologie quantistiche non si limiti alla definizione degli assetti istituzionali, ma assuma un carattere realmente attuativo, è prevista l'istituzione di una Unità di Monitoraggio e Valutazione Strategica (UMVS), incardinata presso il Polo Nazionale della Quantistica o strutturalmente connessa ad esso con il compito di:

- ✓ Raccogliere dati sugli avanzamenti dei progetti e delle azioni strategiche;
- ✓ Monitorare in modo continuo un set di indicatori chiave di performance (KPI), validati con gli stakeholder;
- ✓ Verificare il raggiungimento di milestone triennali e l'allineamento agli obiettivi nazionali ed europei;
- ✓ Formulare proposte di aggiornamento annuale o triennale della strategia.

In parallelo, ogni struttura del modello di governance (politica, strategica e operativa) sarà chiamata a dotarsi di obiettivi misurabili e di strumenti di rendicontazione trasparente. In particolare, il Comitato di Direzione Strategica coordinerà la redazione del Rapporto annuale sull'attuazione della Strategia Quantistica, che includerà:

- ✓ Una sintesi dei risultati ottenuti;
- ✓ Un confronto con gli altri Paesi europei leader nel settore;
- ✓ Eventuali proposte di riallineamento delle priorità.

Per rafforzare il radicamento territoriale e la coerenza con le esigenze delle imprese e dei centri di ricerca, sarà istituita una Conferenza nazionale annuale sulle tecnologie quantistiche, che coinvolgerà Regioni, università, centri pubblici e privati, imprese e rappresentanti della società civile. La conferenza sarà sede di consultazione, raccolta feedback, promozione dei risultati e co-progettazione di iniziative interistituzionali.

Infine, al fine di proteggere l'autonomia tecnologica del Paese, ciascuna componente della governance sarà chiamata a contribuire alla redazione di un Piano di Gestione dei Rischi Strategici, che includa:

- ✓ La mappatura delle dipendenze critiche da fornitori e infrastrutture estere;
- ✓ Il monitoraggio della mobilità dei talenti e della proprietà intellettuale;
- ✓ La definizione di contromisure in caso di crisi geopolitiche o interruzioni nella catena del valore.

Questo sistema integrato di governance, misurazione e adattamento consentirà alla strategia di evolversi in modo dinamico, garantendo impatto, accountability e sostenibilità nel lungo periodo.

Il Sistema Paese è ad oggi presente in molti consessi internazionali, in primis a livello europeo ma non solo, in cui procede in maniera spedita nella definizione di politiche condivise e nella predisposizione di attività e investimenti congiunti a supporto sia della comunità scientifica che imprenditoriale in un'ottica di autonomia strategica e sovranità tecnologica. La predisposizione di una strategia nazionale per le TQ, così come la definizione di una governance che permetta di coordinare in modo stabile e duraturo l'attività dei diversi stakeholder coinvolti permetterà all'Italia di agire in maniera ancora più forte e proattiva sia a livello bilaterale che multilaterale.