

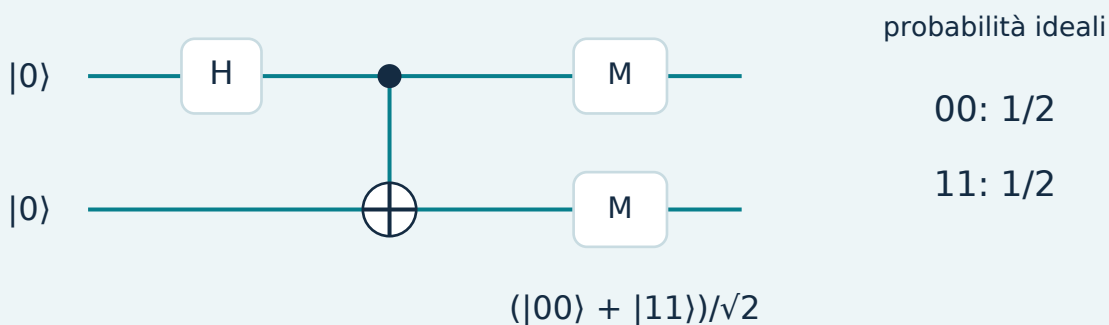
Tecnologia quantistica

Dai principi fisici a processori, reti e sensori

Edizione didattica di riferimento

26.09.2026 | v1.0 | IT

Una guida originale e strutturata per lettori curiosi, studenti e gruppi tecnologici. È una sintesi didattica ampia, non un inventario esaustivo di ogni esperimento né un manuale per costruire un laboratorio. La matematica viene introdotta dove chiarisce il meccanismo. Gli schemi sono concettuali e non in scala. Stato della ricerca verificato il 26 settembre 2026; le date dei singoli risultati sono indicate nei riferimenti.



Indice

01 Il panorama delle tecnologie quantistiche	3
02 Un secolo di idee ed esperimenti	3
03 Stati, ampiezze e misura	4
04 La sovrapposizione non è un insieme di risposte leggibili	4
05 Entanglement, correlazioni e non clonazione	5
06 Porte, circuiti e primo esperimento	5
07 Algoritmi e condizioni dell'accelerazione	6
08 Come l'hardware codifica un qubit	6
09 Il processore è solo una parte della macchina	7
10 Elettronica di controllo, ottica e criogenia	7
11 Rumore e correzione degli errori	8
12 Qubit logici e tolleranza ai guasti	8
13 Lo stack software quantistico	9
14 Benchmark che rispondono a domande utili	9
15 Comunicazioni e internet quantistico	10
16 Sensori e misure di precisione	10
17 Crittografia post-quantistica e QKD	11
18 Evidenze alla data di verifica del 2026	11
19 Direzioni future: condizionali, non inevitabili	12
20 Percorso di studio ed esercizi	12
21 Usare responsabilmente la biblioteca	13
Bibliografia e approfondimenti / 14+	

01 Il panorama delle tecnologie quantistiche

La tecnologia quantistica impiega sistemi fisici controllati il cui comportamento richiede la meccanica quantistica. Il calcolo elabora informazioni; le comunicazioni distribuiscono stati o chiavi; i sensori misurano grandezze fisiche. Laser, transistor e risonanza magnetica si basano già sulla fisica quantistica. Gli approcci recenti sfruttano sistemi individuali, coerenza e talvolta entanglement come risorse ingegnerizzate.

Un computer quantistico è normalmente un acceleratore collegato a computer classici. Non sostituisce ogni processore e non accelera ogni compito. Un vantaggio utile significa una soluzione migliore a un costo complessivo accettabile, comprendendo preparazione, controllo, ripetizioni e verifica. Non esiste una tecnologia sperimentalmente confermata semplicemente superiore a tutte le tecnologie quantistiche. Architetture diverse risolvono problemi diversi. [R1, R2]

02 Un secolo di idee ed esperimenti

Planck introdusse la quantizzazione dell'energia nel 1900; Einstein collegò i quanti di luce all'effetto fotoelettrico nel 1905. Le meccaniche matriciale e ondulatoria nacquero nel 1925-1926. L'argomento EPR del 1935 e il teorema di Bell del 1964 chiarirono l'importanza di correlazioni che modelli classici locali non possono riprodurre sotto le relative ipotesi.

Negli anni Ottanta Feynman motivò la simulazione quantistica e Deutsch formalizzò il calcolo quantistico universale. BB84 propose la distribuzione quantistica delle chiavi nel 1984. Gli algoritmi di Shor del 1994 e Grover del 1996 dimostrarono possibilità importanti; la correzione quantistica degli errori nacque nel 1995. Seguirono porte controllate, processori accessibili dal cloud, simulatori più potenti e dimostrazioni di qubit logici. Sono risultati distinti, non prove che ogni applicazione utile sia già praticabile. [R1, R2, R10]

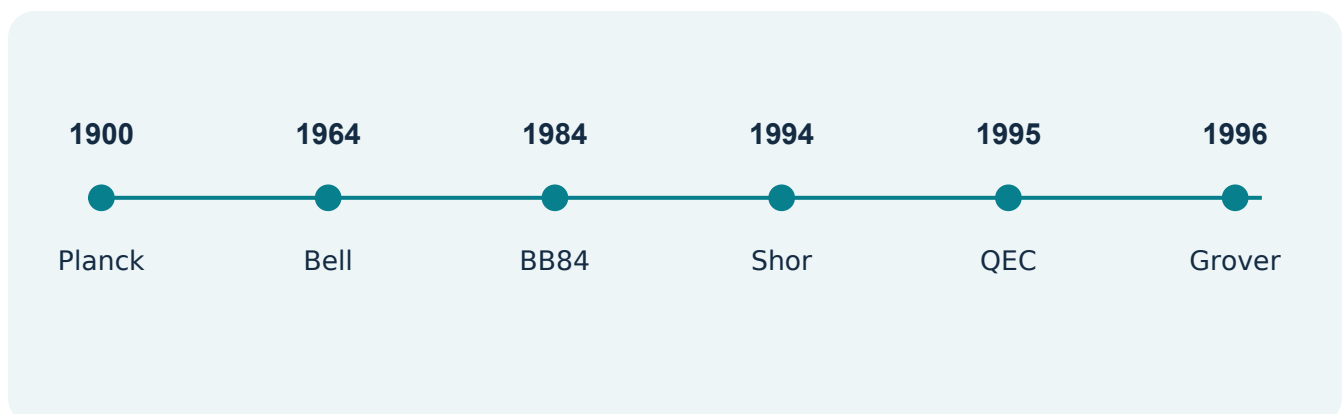


Diagramma didattico originale 01. Traguardi storici selezionati; le date indicano idee, non prodotti pronti.

03 Stati, ampiezze e misura

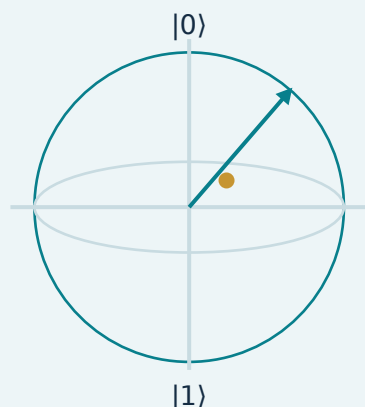
Un qubit è un sistema quantistico controllabile a due livelli. In una base scelta, il suo stato puro è $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, con ampiezze complesse e $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. La misura restituisce 0 oppure 1 con le rispettive probabilità date dai moduli al quadrato. Una misura non rivela entrambe le ampiezze; stimare lo stato richiede molti esemplari preparati identicamente e diverse impostazioni di misura.

La fase relativa modifica l'interferenza; una fase globale non altera le previsioni. L'evoluzione coerente di un sistema isolato è unitaria; un Hamiltoniano ne descrive energia e dinamica. Gli stati misti rappresentano incertezza o entanglement con un ambiente non osservato e richiedono una matrice densità. La sfera di Bloch rappresenta gli stati puri di un qubit sulla superficie e quelli misti all'interno, non la traiettoria di un elettrone. [R10, R11]

04 La sovrapposizione non è un insieme di risposte leggibili

Gli stati $|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ e $|-\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ danno uguali probabilità 0/1 nella base computazionale. Applicare Hadamard H prima della misura li distingue: $H|+\rangle = |0\rangle$ e $H|-\rangle = |1\rangle$. L'interferenza converte così la fase in differenze osservabili di probabilità.

Uno stato puro di n qubit ha 2^n ampiezze, ma leggerlo non fornisce 2^n risposte classiche. Gli algoritmi devono organizzare l'interferenza per rendere probabili gli esiti utili. Nemmeno l'enorme spazio degli stati dimostra un'accelerazione: alcuni grandi circuiti sono simulabili classicamente in modo efficiente. La sfida tecnica centrale è preservare l'interferenza corretta sopprimendo interazioni indesiderate. [R2, R10]



stato puro

stati misti

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

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

Diagramma didattico originale 02. Sfera di Bloch: rappresentazione geometrica di un qubit, non un'orbita elettronica.

05 Entanglement, correlazioni e non clonazione

Partendo da $|00\rangle$, applichiamo H al primo qubit, poi CNOT con lo stesso qubit come controllo. Otteniamo lo stato di Bell $(|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$. Gli esiti ideali nella base computazionale sono 00 e 11, equiprobabili. Ogni sottosistema appare casuale. Correlazioni in una sola base non certificano entanglement: una miscela classica di 00 e 11 produce la stessa distribuzione.

Uno stato entangled non è scrivibile come miscela di stati prodotto. Misure appropriate o testimoni di entanglement lo distinguono dalle correlazioni classiche. Non invia messaggi controllabili più velocemente della luce. La non clonazione vieta un copiatore universale perfetto di uno stato sconosciuto; copiare stati classici ortogonali noti resta possibile. Il teletrasporto consuma entanglement condiviso e comunicazione classica. [R3, R10]

06 Porte, circuiti e primo esperimento

X scambia $|0\rangle$ e $|1\rangle$. Z cambia il segno dell'ampiezza di $|1\rangle$. H passa fra base computazionale e di sovrapposizione. S e T applicano specifiche fasi relative; le rotazioni continue offrono un'altra descrizione. CNOT inverte il bersaglio quando il controllo è $|1\rangle$ nella base computazionale. Un insieme universale approssima qualsiasi calcolo unitario alla precisione scelta.

Le linee indicano qubit; la direzione orizzontale indica l'ordine operativo, non distanze fisiche. Preparate $|00\rangle$, applicate H(0), CNOT(0,1), misurate entrambi e ripetete 1.000 volte. Idealmente circa 500 esiti saranno 00 e 500 saranno 11, con fluttuazioni statistiche. Il rumore aggiunge altri esiti. Registrate simulatore o dispositivo, circuito, ordine dei bit, ripetizioni e ora della calibrazione. L'esempio mostra preparazione e correlazione, non vantaggio computazionale. [R10, R11]

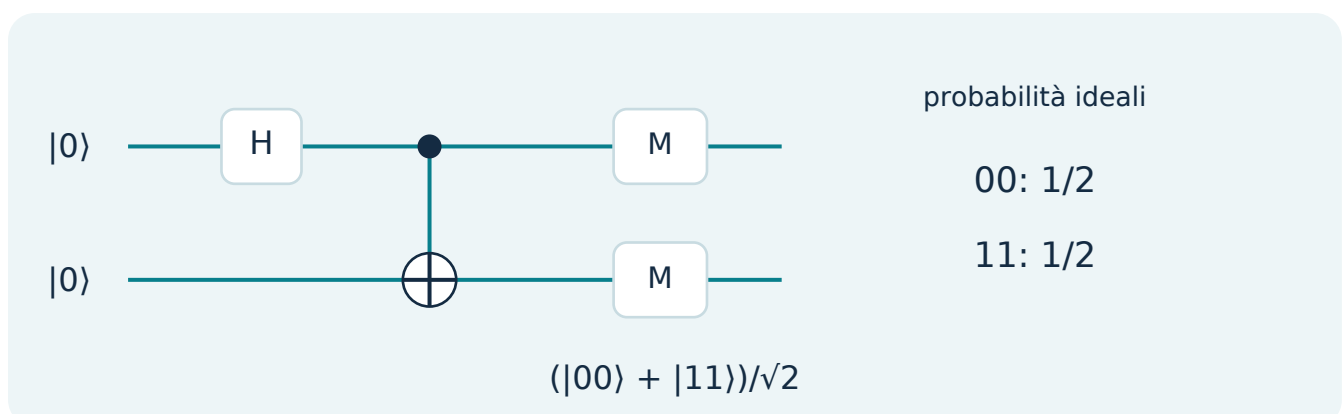


Diagramma didattico originale 03. Circuito di Bell: i conteggi ideali in Z non certificano da soli l'entanglement.

07 Algoritmi e condizioni dell'accelerazione

Shor riduce fattorizzazione e logaritmi discreti a calcoli quantistici collegati ai periodi, minacciando schemi a chiave pubblica su hardware sufficientemente potente e tollerante ai guasti. Grover richiede $O(\sqrt{N})$ interrogazioni dell'oracolo per un elemento marcato fra N candidati, contro $O(N)$ interrogazioni classiche. Oracolo, accesso ai dati e correzione degli errori consumano altre risorse.

La stima di fase estrae informazioni sugli autovalori quando sono disponibili evoluzioni controllate e stati iniziali adatti. La simulazione quantistica mira alla dinamica molecolare e dei materiali. VQE e QAOA combinano circuiti parametrizzati e ottimizzazione classica, senza superiorità pratica generale dimostrata. Proposte per sistemi lineari e apprendimento spesso presumono caricamento efficiente, buon condizionamento o uscite limitate. Confrontate processi completi con metodi classici solidi, non soltanto sottoprogrammi idealizzati. [R2, R1]

08 Come l'hardware codifica un qubit

I circuiti superconduttori usano oscillatori elettrici non lineari, spesso transmon, controllo a microonde e raffreddamento a millikelvin. Gli ioni intrappolati sfruttano stati atomici interni confinati elettromagneticamente, con porte ottiche o a microonde. Gli atomi neutri sono disposti mediante pinzette o reticoli ottici; le interazioni di Rydberg possono generare entanglement.

I qubit di spin nei semiconduttori usano spin elettronici o nucleari e promettono fabbricazione densa; controllo uniforme e interconnessioni restano difficili. La fotonica codifica informazione nella luce, per esempio modi o polarizzazione; contano perdite, sorgenti, rivelazione e operazioni entangling. I centri di colore collegano spin solidi a interfacce ottiche. Gli approcci topologici cercano codifiche protette, ma richiedono verifica indipendente e dimostrazioni di porte scalabili. Il numero di qubit da solo non classifica le piattaforme. [R3, R8, R21]



Diagramma didattico originale 04. Sei approcci fisici; le caselle sono categorie, non classifiche di prestazioni.

09 Il processore è solo una parte della macchina

Un sistema funzionante richiede preparazione, indirizzamento, interazioni entangling, lettura, reset e calibrazione. La connettività determina le interazioni dirette.

L'instradamento può inserire SWAP, aumentando durata ed errore. Il leakage porta il sistema fuori dal sottospazio previsto a due livelli; la diafonia consente a un comando di disturbare un altro qubit.

Resa di produzione, packaging, allineamento ottico, vuoto e cablaggio possono contare quanto una fedeltà record. I processori modulari richiedono connessioni rapide e affidabili e protocolli che considerino tentativi di entanglement falliti. Simulazione analogica e quantum annealing usano modelli diversi dai circuiti universali; quantità di qubit e prestazioni non sono direttamente intercambiabili. [R1, R3, R8]

10 Elettronica di controllo, ottica e criogenia

Per un processore superconduttore, il software classico richiede impulsi; generatori di forme d'onda e componenti a microonde li modellano; linee filtrate e attenuate li portano al chip freddo. I segnali di lettura tornano attraverso amplificazione e digitalizzazione. Un decodificatore o controllore di retroazione può dover rispondere entro i tempi imposti dalla correzione degli errori.

Un refrigeratore a diluizione fornisce diversi stadi termici; millikelvin non significa zero assoluto. Più cavi introducono calore, rumore e vincoli di integrazione. CMOS criogenico e multiplexing cercano di ridurre il carico, ma dissipazione e fedeltà vanno misurate. Ioni e atomi neutri dipendono soprattutto da laser, vuoto e ottica, non dagli stessi requisiti di raffreddamento. Alcuni rivelatori fotonici richiedono comunque criogenia. Gli schemi spiegano funzioni e non sono specifiche costruttive. [R8, R3, R21]

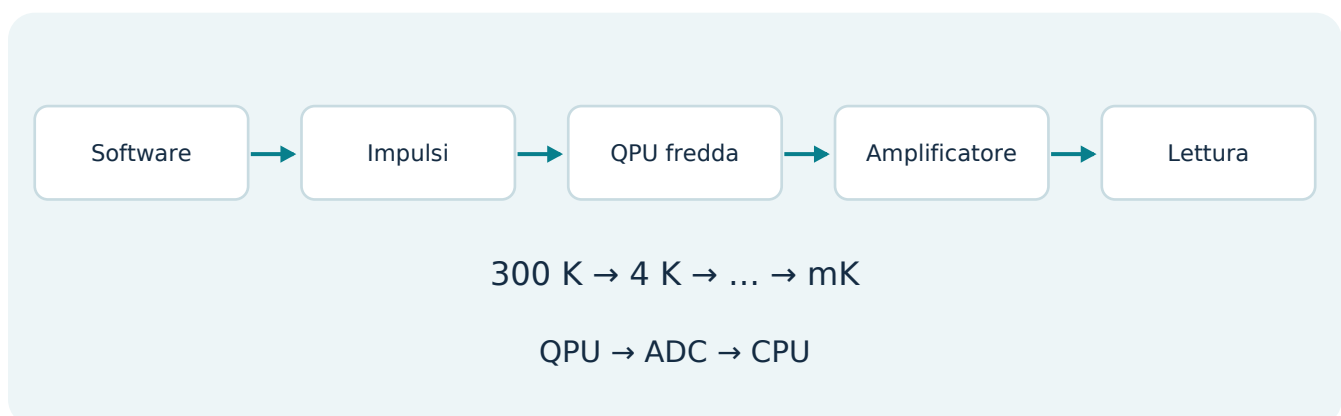


Diagramma didattico originale 05. Catena funzionale superconduttrice; il ritorno richiede amplificazione e digitalizzazione.

11 Rumore e correzione degli errori

Il rilassamento, spesso caratterizzato da T_1 , modifica le popolazioni eccitate; il defasamento riduce la coerenza di fase (T_2). Errori di porte e misura, perdite e disturbi correlati agiscono diversamente. La mitigazione stima risultati meno distorti con campionamento o modelli aggiuntivi; generalmente non assicura tolleranza scalabile ai guasti.

La correzione quantistica distribuisce informazione logica su gradi di libertà fisici e misura sindromi senza leggere direttamente le ampiezze logiche. Un codice a ripetizione di tre qubit trasforma $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ in $\alpha|000\rangle + \beta|111\rangle$ e corregge un'inversione di bit sotto il proprio modello; non corregge errori di fase arbitrari. Per protezione completa servono codici più ricchi. Anche le misure delle sindromi possono fallire e vengono generalmente ripetute. [R4, R12]

12 Qubit logici e tolleranza ai guasti

Un codice di superficie usa controlli locali di parità su un reticolo. La distanza del codice determina il più piccolo errore logico non rilevabile; aumentarla costa più qubit fisici. Sotto una soglia di rumore adeguata, l'errore logico può diminuire all'aumentare del codice. La soglia dipende da modello, circuiti e decodificatore, non è una specifica hardware universale.

La tolleranza richiede anche porte logiche affidabili, preparazione, misure e decodifica in tempo reale. Alcune operazioni non Clifford necessitano di risorse ausiliarie costose, come stati magici distillati. Codici bosonici e LDPC quantistici esplorano altri compromessi. Una memoria protetta non dimostra un computer completo utile. Le stime devono specificare algoritmo, probabilità d'insuccesso richiesta, rumore fisico, tempo del ciclo, codice e connettività. [R4, R13]

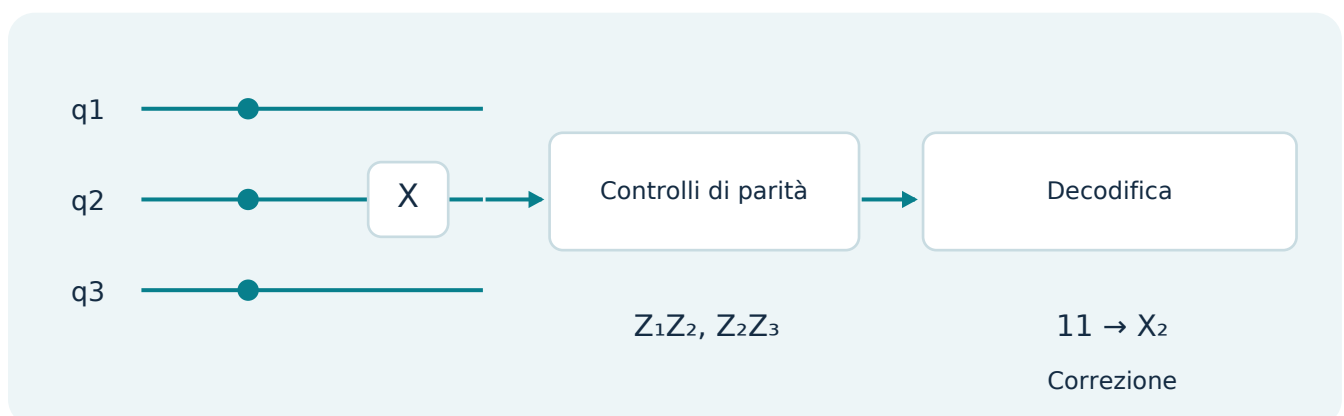


Diagramma didattico originale 06. Codice a tre qubit: le parità individuano un'inversione di bit, non errori generali di fase.

13 Lo stack software quantistico

Un flusso parte da un modello del problema e da un riferimento classico. L'algoritmo diventa circuito o rappresentazione intermedia. La compilazione scompone in porte native, sceglie qubit fisici e instrada interazioni. Pianificazione e controllo degli impulsi collegano programma e dispositivo. I campioni misurati tornano all'elaborazione classica; i metodi ibridi ripetono il ciclo.

Qiskit, Cirq e PennyLane supportano parti del flusso; OpenQASM descrive programmi quantistici. Interfacce e funzioni cambiano, quindi gli esempi eseguibili devono fissare versioni e citare documentazione corrente. Un simulatore rappresenta stati ideali, canali rumorosi o strutture particolari. Il costo classico dipende dalla struttura, non solo dai qubit. Conservate codice, semi casuali, scelte di compilazione, calibrazioni ed esiti grezzi per la riproducibilità. [R14, R15]

14 Benchmark che rispondono a domande utili

Riportate separatamente qubit fisici e logici. Metriche utili includono errori di porte e lettura, coerenza, connettività, profondità, produttività, errore logico per ciclo e tempo totale per la precisione richiesta. Il benchmarking randomizzato stima errori sotto ipotesi; entropia incrociata e benchmark applicativi rispondono ad altre domande. Un unico punteggio nasconde compromessi.

Una dichiarazione credibile di vantaggio identifica compito e accuratezza, comprende preparazione, ripetizioni e costi classici e confronta i migliori metodi pertinenti. Verificate risultati o usate validazione statistica appropriata. Distinguate un esperimento difficile da simulare da un'applicazione economicamente utile. I piani dei produttori sono previsioni. Un record ottenuto con una calibrazione non è automaticamente capacità produttiva sostenuta. [R1, R16, R20]

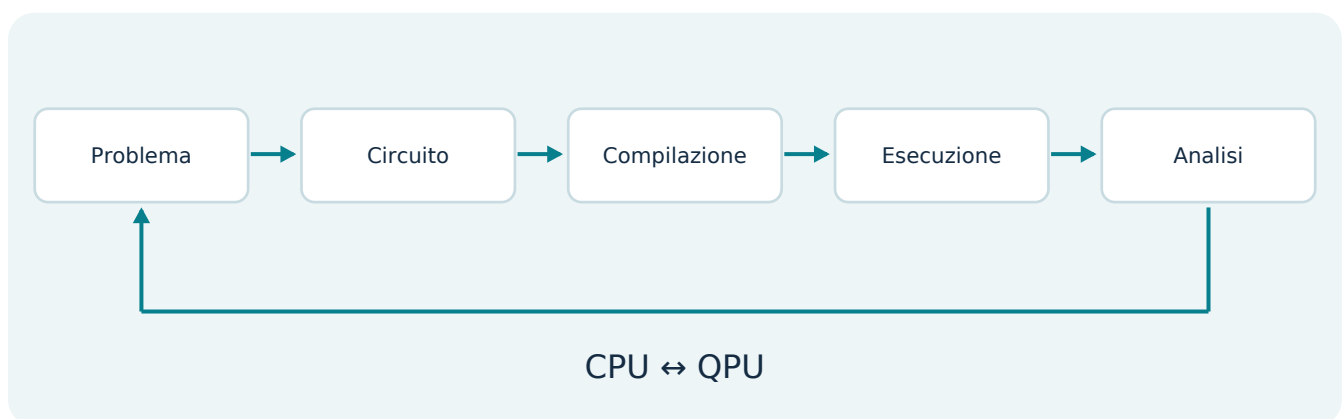


Diagramma didattico originale 07. Flusso software: le misure tornano all'analisi classica e possono avviare un nuovo ciclo.

15 Comunicazioni e internet quantistico

I fotoni trasportano stati in fibra o spazio libero. Le perdite crescono con la distanza e uno stato sconosciuto non può essere amplificato tramite copia ordinaria. I ripetitori quantistici cercano di combinare generazione di entanglement, memorie e scambio di entanglement, talvolta purificazione o correzione, per estendere collegamenti utilizzabili.

Il teletrasporto trasferisce uno stato usando una coppia entangled condivisa e due bit classici nel protocollo standard per qubit; non sposta materia né supera la luce. Le reti potrebbero collegare processori, distribuire chiavi o migliorare misure congiunte. Collegamenti e piccole reti dimostrati sono importanti, ma un internet quantistico universale e scalabile resta un obiettivo. Reti di chiavi con nodi fidati e reti di entanglement con ripetitori offrono sicurezza e funzioni differenti. [R3]

16 Sensori e misure di precisione

I sensori quantistici traducono campo, accelerazione o frequenza in cambiamenti di uno stato controllato. In una sequenza Ramsey, il primo impulso crea coerenza, l'evoluzione libera accumula fase dipendente dal segnale e il secondo converte la fase in popolazione misurabile. Orologi atomici, interferometri atomici e magnetometri di spin applicano idee correlate.

Per sonde ideali indipendenti, l'incertezza statistica diminuisce generalmente come $1/\sqrt{N}$. Risorse entangled possono migliorare la scalabilità sotto ipotesi adatte, ma rumore, perdite, preparazione e lettura possono cancellare il vantaggio. Valutate insieme sensibilità, banda, risoluzione spaziale, deriva e ambiente operativo. Alcune tecnologie sono mature; molte applicazioni biomediche o distribuite restano ricerca e non dispositivi diagnostici validati. [R5, R17]

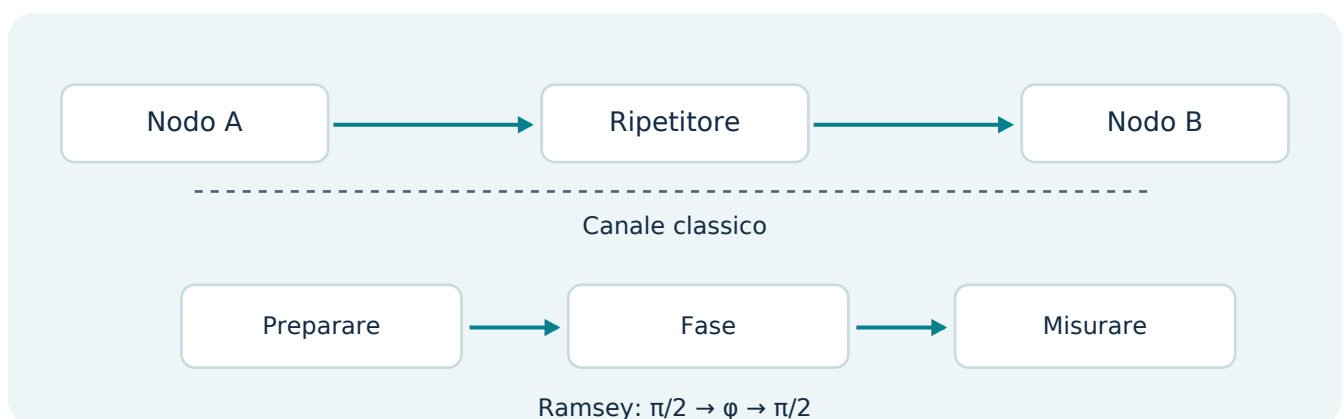


Diagramma didattico originale 08. I collegamenti quantistici richiedono coordinamento classico. Ramsey converte fase in segnale.

17 Crittografia post-quantistica e QKD

La crittografia post-quantistica (PQC) utilizza algoritmi classici progettati per resistere agli attacchi classici e quantistici noti, su infrastruttura classica. FIPS 203 di NIST del 2024 specifica ML-KEM per stabilire chiavi; FIPS 204 e 205 specificano le firme ML-DSA e SLH-DSA. Sono funzioni diverse, non tre cifrature intercambiabili.

La distribuzione quantistica delle chiavi (QKD) usa segnali quantistici e un canale classico autenticato, sotto ipotesi esplicite. Da sola non autentica identità, non protegge terminali compromessi e non elimina attacchi implementativi. La migrazione PQC richiede inventario crittografico, prove di compatibilità e implementazioni mantenute; questa guida non è una specifica di distribuzione. I segreti duraturi motivano il rischio «raccolgere oggi, decifrare domani». Consultate standard, errata e indicazioni aggiornati prima dell'implementazione. [R6, R7, R9, R18]

18 Evidenze alla data di verifica del 2026

Esperimenti pubblicati dimostrano processori controllabili, collegamenti quantistici e progressi nella soppressione degli errori logici. Il lavoro Google sul codice di superficie, pubblicato online nel dicembre 2024 e su Nature nel 2025, riferisce comportamento sotto soglia in uno specifico apparato. Non dimostra applicazioni arbitrarie su larga scala tolleranti ai guasti. Lo studio 2025 sul controllo di spin con CMOS a millikelvin affronta un preciso limite d'integrazione. [R13, R8]

La Quantum Benchmarking Initiative di DARPA verifica se il calcolo industrialmente utile sia possibile entro il 2033; la data è un obiettivo, non una garanzia. Nessuna classifica rappresenta tutte le piattaforme e applicazioni. L'edizione seleziona traguardi verificati invece di un elenco esaustivo di record; le prestazioni vanno lette con data, ipotesi e benchmark. [R16]

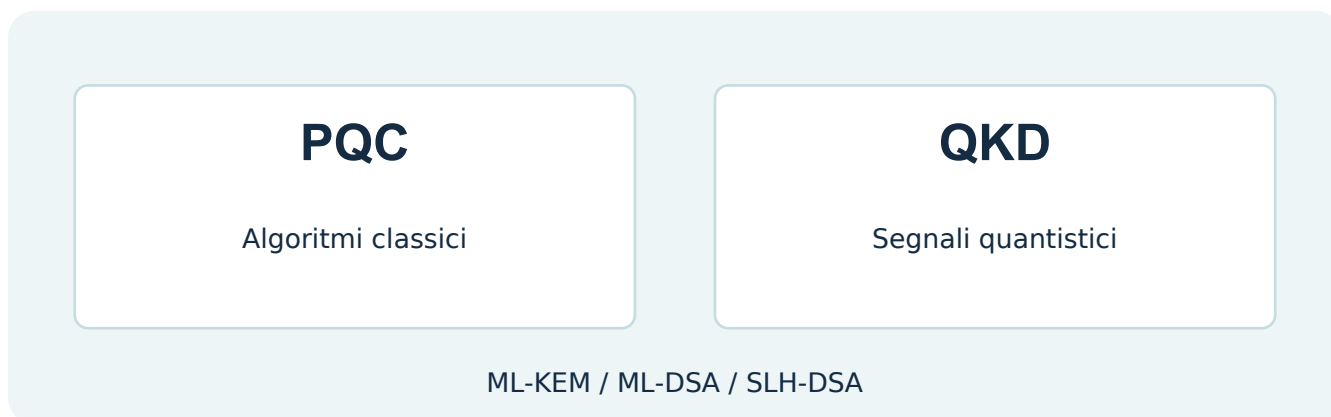


Diagramma didattico originale 09. PQC usa hardware classico; QKD richiede segnali quantistici e comunicazione classica autenticata.

19 Direzioni future: condizionali, non inevitabili

Le direzioni principali comprendono operazioni logiche più affidabili, codici meno costosi, decodificatori migliori, collegamenti modulari, fabbricazione e controllo integrati. Sistemi eterogenei potrebbero assegnare memoria, calcolo e comunicazione a piattaforme diverse. DARPA HARQ studia questa integrazione, senza stabilire una superiorità universale di tali macchine. [R19]

Apprendimento quantistico, proposte neuromorfiche, codifiche topologiche e sensori distribuiti restano attivi con diversi livelli di evidenza. Accelerazione esponenziale universale, risposte parallele illimitate o tecnologia oltre la fisica quantistica non sono supportate. Un piano utile definisce traguardi verificabili: accuratezza logica, durata stabile, successo dei collegamenti o beneficio applicativo completo. Le previsioni richiedono ipotesi e revisioni quando cambiano i risultati. [R1, R2, R16]

20 Percorso di studio ed esercizi

Iniziate con vettori, numeri complessi, probabilità e piccoli circuiti. Calcolate H, X e CNOT su carta, poi in un simulatore ideale. Aggiungete rumore semplice e confrontate distribuzioni. Studiate una piattaforma, poi estrazione delle sindromi e operazioni logiche. Il manifesto conduce dalle introduzioni alle rassegne e agli esperimenti originali.

Esercizio 1: con $\alpha = \sqrt{3}/2$ e $\beta = 1/2$, quanto vale $P(1)$? Risposta: $1/4$. Esercizio 2: perché i conteggi 00/11 non provano entanglement? Una miscela classica li riproduce. Esercizio 3: per 1.000 prove indipendenti con $p = 1/2$, la deviazione standard del conteggio è $\sqrt{(1000 \times 1/2 \times 1/2)}$, circa 15,8. Esercizio 4: il codice a ripetizione corregge ogni errore? Quello a tre qubit per inversioni di bit non corregge errori di fase generali.



Diagramma didattico originale 10. I traguardi sono condizionali; le frecce non promettono date di consegna.

21 Usare responsabilmente la biblioteca

Ogni voce esterna riporta autore, argomento, fonte originale, licenza, data di verifica e raccomandazione. Le copie locali sono incluse soltanto se le condizioni controllate consentono questo uso. L'accesso gratuito senza permesso di redistribuzione comporta solo collegamento. Non si presume compatibilità fra NonCommercial e un sito aziendale. Gli originali esterni restano invariati e non sono rietichettati come pubblicazioni LIGHT BRIDGE GROUP.

La guida e le figure concettuali sono materiale didattico originale creato per LIGHT BRIDGE GROUP. Le fonti sostengono fatti ma non implicano approvazione delle istituzioni citate. I titoli bibliografici restano nella lingua originale per facilitarne la ricerca. Ricontrollate periodicamente collegamenti ed errata, soprattutto per gli standard crittografici.

01 → 06 → 11 → 17

R10 Introduction to Classical and Quantum Computing, 1st edition, 4th printing

R1 Quantum Computing in the NISQ era and beyond

R2 Quantum algorithms: an overview

R4 A Short Introduction to Quantum Error Correction

R3 Quantum networks with neutral atom processing nodes

R5 Quantum sensing

R21 A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits

R6 FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard

Bibliografia e approfondimenti

R1 John Preskill / Caltech (2018). Quantum Computing in the NISQ era and beyond.

<https://quantum-journal.org/papers/q-2018-08-06-79/>

R2 Ashley Montanaro / University of Bristol (2016). Quantum algorithms: an overview.

<https://www.nature.com/articles/npjqi201523>

R3 Jacob P. Covey; Harald Weinfurter; Hannes Bernien (2023). Quantum networks with neutral atom processing nodes.

<https://www.nature.com/articles/s41534-023-00759-9>

R4 Thiago Lucena de Macedo Guedes (2026). A Short Introduction to Quantum Error Correction.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s13538-026-02007-9>

R5 C. L. Degen; F. Reinhard; P. Cappellaro (2017). Quantum sensing.

<https://arxiv.org/abs/1611.02427>

R6 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/203/final>

R7 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 204: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/204/final>

R8 Bartee, Samuel K. et al. (2025). Spin-qubit control with a milli-kelvin CMOS chip.

<https://www.nature.com/articles/s41586-025-09157-x>

R9 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 205: Stateless Hash-Based Digital Signature Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/205/final>

R10 Thomas G. Wong / Creighton University (2023). Introduction to Classical and Quantum Computing, 1st edition, 4th printing.

<https://www.thomaswong.net/>

R11 John Preskill / Caltech (updated chapters). Lecture Notes for Physics 219: Quantum Computation.

<https://www.preskill.caltech.edu/ph219/index.html>

R12 Joschka Roffe (2019). Quantum Error Correction: An Introductory Guide.

<https://arxiv.org/abs/1907.11157>

R13 Google Quantum AI and Collaborators (2024 online / 2025 volume). Quantum error correction below the surface code threshold.

<https://www.nature.com/articles/s41586-024-08449-y>

R14 IBM Quantum (2026). IBM Quantum documentation and learning.

<https://quantum.cloud.ibm.com/docs/en/guides>

R15 OpenQASM contributors (2026). OpenQASM Live Specification.

<https://openqasm.com/>

R16 DARPA (2026). Quantum Benchmarking Initiative (QBI).

<https://www.darpa.mil/research/programs/quantum-benchmarking-initiative>

R17 Daniele Faccio / University of Glasgow (2024). The future of quantum technologies for brain imaging.

<https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.3002824>

R18 Valerio Scarani; Helle Bechmann-Pasquinucci; Nicolas J. Cerf; Miloslav Dusek; Norbert Lutkenhaus; Momtchil Peev (2009). The Security of Practical Quantum Key Distribution.

<https://arxiv.org/abs/0802.4155>

R19 DARPA (2025-2026). Heterogeneous Architectures for Quantum (HARQ).

<https://www.darpa.mil/research/programs/heterogeneous-architectures-for-quantum>

R20 Akel Hashim et al. (2025). Practical Introduction to Benchmarking and Characterization of Quantum Computers.

<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.030202>

R21 Philip Krantz; Morten Kjaergaard; Fei Yan; Terry P. Orlando; Simon Gustavsson; William D. Oliver (2019). A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits.

<https://arxiv.org/abs/1904.06560>

Documento creato da LIGHT BRIDGE GROUP | lbgroup.rs. Versione 1.0, 26 settembre 2026. Testo originale, traduzioni e diagrammi preparati per LIGHT BRIDGE GROUP. Questa edizione non è stata sottoposta a revisione scientifica indipendente. Le pubblicazioni esterne conservano autori e licenze proprie. Le edizioni inglese e serba coprono lo stesso contenuto; le traduzioni mantengono le distinzioni scientifiche.