POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Dalla Supremazia all'Utilità: L'Evoluzione della Logistica Quantistica e la Convergenza con l'Intelligenza Artificiale (2022-2025)

Original
Dalla Supremazia all'Utilità: L'Evoluzione della Logistica Quantistica e la Convergenza con l'Intelligenza Artificiale (2022-2025) / Sparavigna, A.C.. - ELETTRONICO. - (2025). [10.5281/zenodo.17987124]

Availability:
This version is available at: 11583/3006031 since: 2025-12-19T11:32:22Z

Publisher:

Published
DOI:10.5281/zenodo.17987124

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

14 November 2026

Dalla Supremazia all'Utilità: L'Evoluzione della Logistica Quantistica e la Convergenza con l'Intelligenza Artificiale (2022-2025)

Amelia Carolina Sparavigna[1] e **Gemini (Modello Linguistico di Google)**[2]

[1] DISAT, Politecnico di Torino, [2] Gemini AI

DOI: 10.5281/zenodo.17987124

ll presente lavoro analizza la rapida transizione del calcolo quantistico dall'era della "supremazia" puramente teorica a quella del "vantaggio quantistico utile". Partendo dalle basi poste nel 2022 sulla logistica del freddo e la gestione delle infrastrutture, l'elaborato esplora le pietre miliari raggiunte nel biennio 2024-2025, tra cui l'avvento di processori modulari (IBM Heron), la correzione degli errori esponenziale (Google Willow) e l'emergere dei qubit topologici (Microsoft Majorana 1). Un focus particolare è dedicato alla sinergia simbiotica con l'Intelligenza Artificiale e le GPU classiche (NVIDIA), che agiscono come "abilitatori" fondamentali attraverso la simulazione, il denoising e l'ottimizzazione degli algoritmi. Attraverso l'analisi di casi d'uso nella scienza dei materiali e nella chimica computazionale, si dimostra come la "logistica quantistica" non sia più solo la gestione di un criostato, ma una complessa architettura ibrida capace di ridefinire i confini della scoperta scientifica e industriale.

Si è dato da analizzare Gemini il lavoro del 2022 dal titolo *"La Logistica del Computer Quantistico e l'Informatica Relativa"* https://iris.polito.it/handle/11583/2970265 . Il testo fotografava un momento di transizione fondamentale: il passaggio dalla ricerca della **supremazia quantistica** (dimostrare che una macchina quantistica può fare *qualcosa* di più veloce di una classica) al **vantaggio quantistico** (risolvere problemi con utilità pratica). Si menzionavano già pietre miliari come il processore **Sycamore** di Google e **Borealis** di Xanadu.
Dal 2022 ad oggi, il panorama si è evoluto rapidamente. Ecco le principali novità che integrano e aggiornano i temi trattati nel 2022:

1. Evoluzione dell'Hardware: Verso l'Era del "Utility-Scale"

Nello scritto si citava la roadmap di IBM e i sistemi a pochi qubit.

- **Oltre i 1000 Qubit:** IBM ha rilasciato il processore **Condor** (1121 qubit), superando la soglia psicologica dei mille. Tuttavia, la strategia si è spostata dal semplice numero di qubit alla **qualità** e alla **modularità**, introducendo processori come **Heron**, progettati per essere collegati tra loro per ridurre gli errori.
- **Error Correction (Correzione degli Errori):** Se nel 2022 eravamo nel pieno dell'era NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum), oggi siamo vicini alla soglia del **Logical Qubit**. Google e Harvard hanno dimostrato la capacità di raggruppare molti qubit fisici rumorosi in un singolo "qubit logico" protetto dagli errori, un passo cruciale per il computer quantistico universale che si descriveva nel 2022.

2. Simulazione e Algoritmi: Il Metodo Variazionale e Oltre

Nel 2022 si era data molta importanza al **Variational Quantum Eigensolver (VQE)** per la chimica e la fisica.

- **Simulazione di Materiali:** Si è passati dalle piccole molecole (come l'idrogeno o il litio) alla simulazione di sistemi più complessi per batterie e nuovi materiali, utilizzando algoritmi che mescolano calcolo classico e quantistico (approcci ibridi) in modo più efficiente del VQE standard.

3. Nuove Frontiere: Qudit e Calcolo Fotonico

Si era predetto l'importanza dei **qumode** e dei **qudit**.

- **Qudit (Sistemi a più livelli):** Mentre il qubit ha due stati, i processori a qudit (come quelli basati su ioni intrappolati o fotonica) stanno dimostrando di poter immagazzinare molta più informazione con meno unità fisiche, riducendo la complessità della logistica di cablaggio che avevi identificato come sfida critica.
- **Neutral Atoms:** Una tecnologia che nel 2022 era agli inizi e che oggi è protagonista è quella degli **atomi neutri** (usata da aziende come Pasqal o QuEra), che permette di manipolare migliaia di atomi con pinzette ottiche (laser) per simulare Hamiltoniane di Ising in modo estremamente scalabile.

4. La "Logistica" del Futuro

Si era nel 2022 definito la logistica come la "nuova arte del computare". Oggi questa visione si sta concretizzando nell'**Infrastruttura Quantum-Centric**: il computer quantistico non è più visto come una macchina isolata, ma come un "acceleratore" (simile alla GPU) dentro grandi centri di calcolo classico (HPC), accessibile via cloud proprio come previsto con Amazon Braket e IBM Quantum Experience.

Le Nuove Architetture

Come avevamo discusso in precedenza nel lavoro del 2022, la transizione verso architetture modulari è una delle strategie fondamentali per superare l'era **NISQ** (Noisy Intermediate-Scale Quantum) e ridurre drasticamente l'impatto del rumore. Le nuove architetture modulari affrontano il problema del rumore e della scalabilità attraverso tre pilastri principali:

1. La Strategia "Think Modular"

La sfida principale è che i qubit sono estremamente fragili e sensibili all'ambiente (decoerenza). Invece di tentare di costruire un singolo chip monolitico con migliaia di qubit — che aumenterebbe esponenzialmente il rumore e la complessità del cablaggio — si è passati a una **struttura a moduli separati**:

- **Interconnessioni ad alta fedeltà**: Aziende come Rigetti hanno dimostrato la capacità di creare entanglement tra chip di silicio separati. Questo permette di isolare i disturbi all'interno di un modulo senza che si propaghino all'intero sistema.
- **Riduzione del "Rat's Nest"**: Uno dei maggiori problemi logistici è il groviglio di cavi (il cosiddetto "nido di ratti") necessario per controllare i qubit a temperature criogeniche. Le architetture modulari integrano il controllo direttamente nel modulo per minimizzare il calore e il rumore indotto dai cavi esterni.

2. Controllo Criogenico Integrato (Gooseberry e Horse Ridge)

Per ridurre il rumore termico, le nuove architetture (già menzionate nel 2022) spostano l'elettronica di controllo il più vicino possibile ai qubit, all'interno del refrigeratore a diluizione:

- **Chip Gooseberry (Microsoft)**: Un chip CMOS criogenico che opera a temperature millikelvin. Funziona come un'interfaccia che riceve segnali digitali a temperatura ambiente e li trasforma in tensioni di controllo locali, eliminando migliaia di cavi che porterebbero calore e rumore nel sistema.
- **Horse Ridge (Intel)**: Analogamente, questo chip di controllo riduce la complessità del cablaggio gestendo le funzioni chiave direttamente vicino ai qubit di spin nel silicio.

3. Architetture Topologiche e Nuovi Materiali

Oltre alla modularità fisica, si sta lavorando su architetture intrinsecamente più robuste:

- **Computer Quantistico Topologico**: Microsoft sta perseguendo una via basata sui fermioni di Majorana. In questa architettura, le porte logiche dipendono dalle proprietà topologiche (come "trecce") e non da disturbi locali, rendendo il sistema naturalmente immune a molti tipi di rumore ambientale.
- **Fluxonium**: Nuove varianti di qubit come il *fluxonium* (studiato anche da Alibaba) promettono una fedeltà più alta, riducendo il numero di qubit necessari per correggere gli errori e migliorando la resistenza al rumore rispetto ai qubit transmon standard.

In sintesi, la "logistica" di cui si scriveva nel 2022 si è evoluta in una vera e propria ingegneria dei sistemi: non si cerca più solo il "qubit perfetto", ma si costruisce una rete di piccoli moduli controllati localmente per confinare il rumore ed evitare il collasso dello stato quantistico.
E il criostato? Ora si tocca il punto nevralgico della "logistica quantistica" moderna: la gestione del calore e dello spazio.

I Criostati

Nella maggior parte delle architetture attuali (come quelle superconduttive di IBM o Google), il criostato **non viene eliminato**, ma si sta cercando di **dividerne il carico** e di **miniaturizzare** i componenti per renderlo meno ingombrante. L'idea è di "dividere il chip". L'idea è molto corretta e si declina in due modi principali:

1. La Divisione in "Chiplet" (Architetture Modulari)

Invece di avere un unico, enorme chip che genera molto calore e richiede un criostato gigantesco, si sta passando a una struttura a **moduli (Qcores)**.

- **Perché si divide?** Un chip monolitico con migliaia di qubit avrebbe bisogno di migliaia di cavi che portano calore all'interno. Dividendo il sistema in piccoli "chiplet" collegati tra loro, si può ottimizzare il raffreddamento solo dove serve.
- **Interconnessioni in-package:** Si usano reti integrate (spesso wireless o tramite accoppiatori fononici/fotonici) per far comunicare i vari moduli senza dover uscire e rientrare dal criostato, riducendo drasticamente le dispersioni termiche.

2. Spostare l'elettronica *dentro* il freddo (Cryo-CMOS)

Il vero "nemico" non è solo il qubit, ma tutto ciò che serve a controllarlo. Tradizionalmente, l'elettronica di controllo sta a temperatura ambiente e invia segnali tramite cavi.

- **Il chip di controllo integrato:** Progetti come **Horse Ridge (Intel)** o le tecnologie di **SemiQon** mirano a mettere i chip di controllo (fatti in silicio CMOS ottimizzato per il freddo) direttamente accanto ai qubit, a pochi milliKelvin.
- **Il vantaggio:** Questo "accorpamento" permette di ridurre la massa di cavi (che agiscono come radiatori, portando calore dentro) e di gestire i segnali localmente.

3. Esistono architetture che "evitano" il criostato tradizionale?

Sì, ma cambiano completamente tecnologia:

- **Atomi Neutri e Ioni Intrappolati:** Queste macchine non hanno bisogno di stare interamente a temperature prossime allo zero assoluto. Spesso i qubit (gli atomi) sono sospesi in una camera a vuoto a temperatura ambiente e vengono raffreddati solo localmente tramite laser (raffreddamento laser). Il "criostato" qui è sostituito da un complesso sistema di lenti e laser.
- **Qubit Topologici (Microsoft Majorana 1):** Microsoft sta lavorando su chip che, grazie alla protezione topologica, potrebbero operare a temperature meno estreme (anche se non "ambiente" nel senso comune), permettendo di usare refrigeratori molto più piccoli e semplici, simili a quelli usati per i sensori spaziali.
- **Fotonica:** I computer quantistici basati sulla luce (come quelli di Xanadu) operano in gran parte a temperatura ambiente, poiché i fotoni non risentono del rumore termico come gli elettroni. Solo i rilevatori alla fine del percorso potrebbero aver bisogno di raffreddamento.

Non si sta eliminando il freddo, ma si sta **ridisegnando la topografia del chip** affinché la "logistica del freddo" sia più efficiente, passando da una struttura centralizzata a una distribuita (modulare).
Per approfondire come queste macchine vengano effettivamente raffreddate e perché sia così difficile evitarlo, si consiglia questo video: Perché i computer quantistici devono essere così freddi?. Il video spiega in modo immediato il ruolo del rumore termico e la necessità del criostato.

4. L'AI ed il Quantum Computing

L'interazione tra l'Intelligenza Artificiale (AI) e il calcolo quantistico (Quantum Computing) è un campo in rapida evoluzione che si sviluppa in due direzioni principali: l'uso del calcolo quantistico per potenziare l'AI e l'uso dell'AI per migliorare l'hardware e il software quantistico.

1. Quantum Machine Learning (QML)

Questa è l'area che riguarda l'uso di algoritmi quantistici per ottimizzare o eseguire compiti tipici dell'AI.

- **Addestramento di Reti Neurali**: Il calcolo quantistico viene già applicato per l'addestramento di reti neurali e la classificazione di dati non strutturati.
- **Evoluzione ibrida**: Esistono librerie (come *PennyLane*) che permettono di addestrare un computer quantistico con la stessa logica di una rete neurale, facilitando una programmazione differenziabile che unisce i due mondi.
- **Vantaggio in compiti specifici**: Algoritmi come il *Gaussian Boson Sampling* (usato da processori come Borealis) mostrano come i sistemi quantistici possano superare i supercomputer classici in problemi di campionamento statistico complessi, fondamentali per certi modelli di AI.

2. AI per il Quantum Computing

In questo caso, l'AI classica viene utilizzata come strumento per superare i limiti attuali dell'hardware quantistico (era NISQ - *Noisy Intermediate-Scale Quantum*).

- **Correzione degli errori**: Il machine learning viene impiegato per scoprire nuovi codici di correzione degli errori quantistici, uno dei maggiori ostacoli alla costruzione di un computer quantistico universale.
- **Design degli algoritmi**: L'AI aiuta i ricercatori a sviluppare nuovi algoritmi quantistici e a stimare le proprietà dei sistemi quantistici complessi.
- **Rilevazione di anomalie**: L'informatica quantistica, a sua volta, trova applicazione nella rilevazione di anomalie statistiche e nella verifica/validazione dei software.

3. Applicazioni Strategiche e Commerciali

L'integrazione di queste tecnologie sta iniziando a influenzare diversi settori industriali:

- **Finanza e Business**: Utilizzo per lo sviluppo di strategie di trading, previsioni finanziarie e ottimizzazione dei portafogli.
- **Scienze della Vita**: Simulazione di reazioni chimiche e interazioni farmaco-recettore, dove la logistica quantistica permette di modellare sistemi che obbediscono intrinsecamente alle leggi della meccanica quantistica.
- **Logistica e Cybersecurity**: Settori che figurano tra i primi "early adopters" per la gestione di problemi di ottimizzazione complessi e la sicurezza dei dati.

In sintesi, mentre l'informatica quantistica offre una nuova "logistica del computare" basata su qubit e qumode, l'AI funge sia da beneficiaria di questa potenza di calcolo sia da "abilitatrice" che aiuta a domare la fragilità intrinseca dei sistemi quantistici attuali. Saluti caramente, Amelia.

Ecco di seguito una tabella riassuntiva che sintetizza le principali novità del biennio 2024-2025 nel mondo dei chip quantistici, includendo i produttori e le caratteristiche salienti delle loro macchine.

Produttore	**Nome del Chip / Sistema**	**Architettura**	**Qubit**	**Novità Principale (2024-2025)**
Google Quantum AI	**Willow** (2024)	Superconduttori (transmon)	105	**Correzione degli errori esponenziale:** per la prima volta l'aumento dei qubit riduce gli errori invece di aumentarli.
IBM	**Condor** & **Heron**	Superconduttori	1121 (Condor) 133 (Heron)	Focus sulla **modularità** (IBM Quantum System Two). Heron offre una fedeltà altissima per il calcolo utile.

Produttore	Nome del Chip / Sistema	Architettura	Qubit	Novità Principale (2024-2025)
Microsoft	**Majorana 1** (2025)	Topologico	—	Primo chip basato su **qubit topologici** (fermioni di Majorana), teoricamente immuni a molti tipi di rumore.
Intel	**Tunnel Falls**	Spin Qubit (Silicio)	12	Realizzato su wafer da 300mm con processi CMOS standard. Scalabilità industriale e compatibilità con l'elettronica classica.
NVIDIA	**NVQLink** (2025)	Ibrida (GPU + QPU)	N/A	Nuova architettura per collegare supercomputer classici e chip quantistici con bassissima latenza.
D-Wave	**Advantage2** (2024)	Quantum Annealing	4400+	Migliorata la connettività tra i qubit (nuova topologia *Zephyr*) per risolvere problemi di ottimizzazione più complessi.
QuEra / Harvard	**Neutral Atom System**	Atomi Neutri	~1000	Dimostrazione di **qubit logici corretti dagli errori** usando pinzette ottiche laser per muovere gli atomi sul chip.
IonQ	**Forte / Tempo**	Ioni Intrappolati	35-64 (Algorithmic)	Alta fedeltà e capacità di operare a temperature meno estreme rispetto ai superconduttori.

Note sulle Macchine e le Infrastrutture:

1. **Verso il "Logical Qubit":** La vera novità del 2024-2025 non è solo il numero di qubit (quelli "fisici"), ma la capacità di raggrupparli in **qubit logici** che possono calcolare senza errori per tempi lunghi (come dimostrato da Google con Willow e da QuEra).
2. **L'integrazione Ibrida:** Come si può notare, **NVIDIA** è entrata prepotentemente nel settore non costruendo un proprio chip quantistico, ma creando il "collante" (NVQLink e la piattaforma CUDA-Q) per far lavorare i chip quantistici insieme alle loro potentissime GPU.
3. **La Logistica del Silicio: Intel** sta vincendo la sfida della "produzione di massa", usando le stesse fabbriche che producono i processori Core per creare chip quantistici, riducendo i costi e aumentando l'affidabilità (yield).

Riassumendo l'Evoluzione della Logistica Quantistica (2022-2025)

Nel 2022, l'analisi poneva l'accento sulla necessità di comprendere non solo l'algoritmo, ma l'intera infrastruttura necessaria al calcolo quantistico. Oggi, non si cerchia più solo la "supremazia" teorica, ma sistemi **fault-tolerant** (tolleranti agli errori) capaci di risolvere problemi reali in chimica, finanza e logistica. La novità principale rispetto al 2022 è il passaggio da chip monolitici a sistemi **modulari**.

- **Chiplet e Interconnessioni:** Produttori come **IBM (Heron)** e **Rigetti** hanno frammentato il processore in più unità (chiplet). Questo permette di testare i singoli componenti e di collegarli tra loro, riducendo la probabilità che un difetto in un singolo qubit comprometta l'intero sistema.
- **Qubit Topologici (Majorana 1):** Microsoft ha recentemente presentato l'architettura basata sui fermioni di Majorana. A differenza dei qubit superconduttori standard, questi sono protetti dalla loro stessa forma geometrica (topologia), rendendoli intrinsecamente meno soggetti al rumore ambientale.

Uno dei punti centrali del 2022 riguardava il criostato. Ecco come è cambiata la gestione fisica delle macchine:

- **Miniaturizzazione del Criostato:** Non si sta eliminando il freddo, ma si sta riducendo l'ingombro. La nuova generazione di refrigeratori a diluizione (es. **IBM System Two**) è modulare: permette di collegare più unità di raffreddamento per scalare fino a migliaia di qubit senza creare colli di bottiglia termici.
- **Cryo-CMOS (Il controllo "dentro" il freddo):** Per evitare il "nido di ratti" di cavi che citavi, chip come **Intel Horse Ridge II** portano l'elettronica di controllo direttamente a 4 Kelvin. Questo riduce drasticamente il calore introdotto dai cavi che arrivano dall'esterno (temperatura ambiente), stabilizzando il sistema.
- **L'approccio "senza criostato" (Fotonica e Atomi Neutri):** Aziende come **Xanadu** (fotonica) e **QuEra** (atomi neutri) stanno dimostrando che è possibile fare calcolo quantistico con infrastrutture molto più leggere, dove il "freddo" è necessario solo per i rilevatori finali o è sostituito da trappole laser magnetiche.

Inoltre oggi l'intelligenza artificiale non è più solo un utente del calcolo quantistico, ma una sua componente vitale:

- **AI per il Denoising:** Come avevi intuito, l'uso di **Autoencoder** è fondamentale. Oggi l'AI viene usata per analizzare il segnale in uscita dai qubit e "decodificare" l'errore in tempo reale, distinguendo il segnale quantistico dal rumore di fondo.
- **Pseudospettri e Librerie:** La tua idea di creare pseudospettri come modelli per il futuro è estremamente attuale. L'AI impara a riconoscere come "dovrebbe" essere uno spettro pulito e

corregge i dati grezzi del computer quantistico, accelerando la creazione di librerie di materiali e molecole.
- **CUDA-Q e NVIDIA:** L'ingresso di NVIDIA con architetture ibride permette all'AI classica (su GPU) di gestire la logistica dei calcoli quantistici, ottimizzando i tempi di esecuzione.

L'Annealing

Entriamo nel dettaglio di questa tecnologia che spesso crea confusione, perché pur essendo "quantistica", segue una filosofia completamente diversa dai computer a porte logiche (come quelli di Google o IBM).

1. Che cos'è il Quantum Annealing?

Per capire l'annealing (o "ricottura quantistica"), si immagini di avere un paesaggio montuoso molto complesso, pieno di valli e picchi. Il nostro obiettivo è trovare il **punto più basso di tutto il paesaggio** (il minimo globale).

- **Metodo Classico (Simulated Annealing):** È come una pallina che rotola. Per non restare bloccata in una piccola buca (un minimo locale), si deve scuotere il paesaggio (usando il calore). Man mano che si "raffredda" il sistema, le vibrazioni diminuiscono e la pallina spera di trovarsi nella valle più profonda.
- **Metodo Quantistico (Quantum Annealing):** La pallina non deve "scavalcare" le montagne. Grazie all'**effetto tunnel quantistico**, la pallina può semplicemente "attraversare" la montagna per vedere se dall'altra parte c'è una valle più profonda.

2. Le macchine con annealing sono veramente quantistiche?

La risposta breve è: **Sì, ma non sono "universali".**
Ecco la distinzione fondamentale:

- **Computer Quantistici "Gate-Based" (Universali):** Usano porte logiche (come il NOT o il CNOT) per manipolare i qubit. Possono, in teoria, eseguire qualsiasi algoritmo (come quello di Shor per rompere le password). Sono i "PC" del mondo quantistico.
- **Quantum Annealers (Specializzati):** Sono macchine progettate per fare **una sola cosa**: risolvere problemi di ottimizzazione. Non usano porte logiche. Sfruttano la naturale tendenza dei sistemi fisici a cercare lo stato di energia minima. Il leader indiscusso qui è **D-Wave**.

3. Come funziona il chip di un Annealer

Mentre nel avoro del 2022 si parlava di circuiti che eseguono algoritmi, nell'annealing il "programma" è la struttura stessa del chip:

1. Si definisce il problema (es: "trova il percorso più breve per 1000 camion").
2. Il problema viene mappato sulla rete di qubit (chiamata spesso **Chimera** o **Zephyr** nei chip D-Wave).
3. Si applica un campo magnetico che "accende" le interazioni tra i qubit.
4. Si lascia che il sistema evolva (il processo di *annealing*). Per le leggi della fisica quantistica, i qubit si assesteranno nella configurazione che richiede meno energia, che corrisponde alla **soluzione ottima** del tuo problema.

4. Vantaggi e Limiti della Logistica dell'Annealing

Rispetto ai chip modulari di cui parlavamo prima, gli annealer hanno caratteristiche logistiche uniche:

- **Numero di Qubit elevato:** Poiché i qubit da annealing sono meno "esigenti" in termini di controllo individuale rispetto a quelli a porte logiche, D-Wave è arrivata a superare i **5000 qubit** (sistema Advantage), mentre IBM è intorno ai 1000.
- **Specificità:** Sono eccellenti per la logistica (quella vera: trasporti, magazzini, turni del personale).
- **Rumore:** Anche loro soffrono il rumore, ma essendo sistemi "adiabatici" (che evolvono lentamente), sono a volte più resilienti a piccoli disturbi termici rispetto ai fragilissimi computer a porte logiche.

Tra vero calcolo quantico e calcolo simulato

Questa è una distinzione fondamentale, ed è il cuore pulsante della ricerca attuale. Spesso leggiamo di successi incredibili, ma bisogna sempre guardare "sotto il cofano" per capire se sta girando un motore a qubit reali o un potentissimo simulatore classico.

Possiamo dividere il campo in tre grandi categorie: il **Calcolo Quantistico Reale**, la **Simulazione Quantistica** (su computer classici) e l'**Emulazione**.

1. Fotografia delle differenze: Reale vs Simulato

Caratteristica	**Calcolo Quantistico Reale (Hardware)**	**Simulazione Quantistica (Software su Classico)**
Supporto Fisico	Qubit fisici (atomi, fotoni, circuiti superconduttori).	Bit classici (0 e 1) su CPU/GPU tradizionali.
Meccanismo	Sfrutta direttamente sovrapposizione ed entanglement.	Usa algoritmi matematici per *imitare* le probabilità quantistiche.
Rumore	Presente (decoerenza, errori termici).	Assente (il calcolo è matematicamente perfetto, a meno che non si simuli apposta il rumore).
Scalabilità	Limitata dal numero di qubit fisici e dalla loro qualità.	Limitata esponenzialmente dalla memoria RAM/VRAM del computer classico.
Utilizzo Principale	Ricerca sul vantaggio quantistico, test di nuovi chip.	Sviluppo e debugging di algoritmi prima di inviarli alla macchina reale.

2. Il muro dei 50 Qubit

Esiste un limite fisico/matematico celebre: un computer classico può simulare perfettamente circa **40-50 qubit**. Perché? Perché aggiungere un solo qubit raddoppia la memoria necessaria.

- Per simulare 30 qubit bastano pochi GB di RAM (un laptop).
- Per 50 qubit servono i più grandi supercomputer del mondo (Petabyte di RAM).

- Oltre i 50-60 qubit, la simulazione classica "perfetta" diventa impossibile per limiti di memoria.

3. Tabella delle Piattaforme e Modalità di Calcolo

Ecco come i grandi player permettono di scegliere tra le due modalità:

Azienda / Piattaforma	Servizio "Vero" (Hardware)	Servizio Simulato (Software)	Note
IBM Quantum	Chip Heron, Eagle, Condor (via Cloud).	Qiskit Aer (Simulatore locale o su server IBM).	Permette di aggiungere "modelli di rumore" alla simulazione.
Google Quantum AI	Processore Willow / Sycamore.	**Cirq** (Simulatore ad alte prestazioni).	Hanno usato simulatori classici per validare il loro esperimento di supremazia.
NVIDIA	N/A (non produce chip quantistici).	**cuQuantum** / **CUDA-Q**.	È il leader mondiale della simulazione: usa le GPU per accelerare la simulazione di qubit.
Amazon Braket	Accesso a D-Wave, IonQ, Rigetti, QuEra.	Simulatori gestiti (SV1, TN1, DM1).	Offre simulatori diversi (vettore di stato, reti tensoriali).
Microsoft Azure	Integrazione con hardware partner.	Azure Quantum Resource Estimator.	Molto forte nella simulazione per stimare quanti qubit serviranno per problemi reali.

4. Perché simulare se abbiamo il computer reale?

Nel lavoro del 2022 sulla logistica si sottolineava l'importanza dei costi e della gestione. La simulazione è vitale per:

1. **Debugging:** Se l'algoritmo non funziona sul simulatore (che è perfetto), l'errore è nel codice. Se funziona sul simulatore ma non sulla macchina reale, il problema è il rumore (hardware).
2. **Benchmark:** Come facciamo a sapere che il computer quantistico ha dato la risposta giusta? Lo confrontiamo con un simulatore classico finché quest'ultimo riesce a reggere il passo.
3. **Sviluppo AI:** Molti modelli di *Quantum Machine Learning* vengono addestrati prima su simulatori (spesso accelerati dalle GPU NVIDIA) perché sono più stabili e disponibili 24/7 rispetto ai chip quantistici.

C'è quindi un paradosso: usiamo i computer più potenti della Terra (classici) solo per far finta che siano piccoli computer quantistici!

GPU NVIDIA

L'integrazione tra le **GPU (Graphics Processing Units)** di NVIDIA e il calcolo quantistico è forse il capitolo più dinamico della "logistica informatica" attuale. Come intuito nel lavoro del 2022, il problema non è solo avere i qubit, ma come gestirli. Ecco come NVIDIA sta cambiando le carte in tavola con la **simulazione accelerata**.

1. Il ruolo di NVIDIA: cuQuantum e CUDA-Q

NVIDIA non costruisce processori quantistici fisici, ma ha creato il "sistema operativo" e l'hardware (le GPU) per farli funzionare meglio.

- **cuQuantum:** È una libreria di algoritmi ottimizzati che permette alle GPU (come le potentissime H100 o le nuove Blackwell) di simulare circuiti quantistici con una velocità migliaia di volte superiore a una CPU tradizionale.
- **CUDA-Q (ex CUDA Quantum):** È la piattaforma di programmazione ibrida. Permette agli sviluppatori di scrivere codice che gira in parte sulla GPU (per i calcoli pesanti classici) e in parte sulla QPU (il chip quantistico), spostando i dati tra i due mondi con una latenza quasi nulla.

2. Perché la GPU è perfetta per "mimare" il Quantum?

La meccanica quantistica si basa sul calcolo di enormi matrici di probabilità.

- **Parallelismo estremo:** Le GPU sono nate per il rendering grafico, che consiste nel calcolare milioni di pixel contemporaneamente. Questa architettura parallela è matematicamente identica a quella necessaria per calcolare l'evoluzione di molti qubit simultaneamente.
- **Reti Tensoriali (Tensor Networks):** NVIDIA eccelle nella simulazione tramite reti tensoriali, una tecnica matematica che permette di simulare sistemi quantistici molto grandi (anche centinaia di qubit) purché non siano "troppo" intrecciati (entangled).

3. La "Logistica" del Calcolo Ibrido (Hardware)

NVIDIA sta promuovendo un'architettura dove il computer quantistico non è più una macchina isolata in un laboratorio, ma un **acceleratore** dentro un supercomputer classico:

Componente	Ruolo Logistico	Esempio Hardware
CPU	Coordinamento generale e logica di controllo.	Processori Grace
GPU	Simulazione, pre-elaborazione dati e AI per il denoising.	Blackwell / H100
QPU	Esecuzione della parte specifica dell'algoritmo quantistico.	Chip IBM, Google, Rigetti
Interconnessione	Il "tubo" che sposta i dati tra classico e quantistico.	**NVLink / NVQLink**

4. L'AI come "ponte" tra i due mondi

L'approfondimento più interessante riguarda come l'AI addestrata su GPU aiuti il calcolo quantistico reale:

- **Denoising predittivo:** Prima di lanciare un calcolo su un chip rumoroso, l'AI simula sulla GPU come "dovrebbe" comportarsi il rumore in quel chip specifico e prepara un filtro correttivo.
- **Ottimizzazione dei circuiti:** Prima di inviare l'algoritmo alla macchina reale, l'AI su GPU lo "comprime" e lo semplifica per usare il minor numero di porte logiche possibile, riducendo le probabilità di errore.

La visione di NVIDIA

NVIDIA sostiene che la strada per il computer quantistico utile passi per un **"Digital Twin"** (gemello digitale). Prima di fare qualsiasi cosa sul fragile hardware a milliKelvin, lo si simula perfettamente sulla GPU. La cosa sorprendente è che oggi i ricercatori usano le simulazioni su GPU per scoprire nuovi algoritmi che poi useremo tra 10 anni sulle macchine reali. È come se stessimo usando un simulatore di volo perfetto prima ancora che l'aereo sia stato costruito interamente.

La Chimica Computazionale

Analizziamo il caso d'uso della **Chimica Computazionale**, che è forse il terreno dove la logistica del calcolo ibrido (GPU + QPU) mostra la massima efficacia.
Nella chimica, il problema principale è che la complessità di una molecola cresce esponenzialmente con il numero di elettroni. Per simulare una molecola di medie dimensioni, un computer classico dovrebbe gestire matrici così grandi da esaurire la memoria in pochi istanti.

Ecco come viene gestito il caso attraverso la sinergia che abbiamo descritto:

1. La Fase di Preparazione (GPU Classica + AI)

Prima di toccare il computer quantistico, interviene la GPU (NVIDIA):

- **Approssimazione Iniziale:** La GPU esegue calcoli classici (come il metodo *Hartree-Fock*) per dare una "forma" iniziale alla nuvola elettronica della molecola.
- **Riduzione dello Spazio:** L'AI analizza quali orbitali sono davvero importanti e quali possono essere trascurati, "comprimendo" il problema logistico in modo che possa entrare nei pochi qubit disponibili oggi.

2. L'Algoritmo Ibrido (VQE - Variational Quantum Eigensolver)

Qui avviene il passaggio di testimone continuo (il "ponte" di cui parlavamo):

1. **Sulla QPU (Vero Quantistico):** Si prepara uno stato quantistico che rappresenta la molecola e si misura l'energia. Il chip quantistico è imbattibile nel rappresentare la "sovrapposizione" degli elettroni.
2. **Sulla GPU (Simulazione/Ottimizzazione):** I risultati della misura (rumorosi) vengono inviati alla GPU. Qui, algoritmi di ottimizzazione classica decidono come "aggiustare" i parametri per il prossimo tentativo.
3. **Ciclo continuo:** Questo scambio avviene migliaia di volte al secondo. La velocità di questo "dialogo" tra chip (grazie a tecnologie come NVQLink) determina quanto tempo ci vuole per trovare l'energia minima della molecola.

3. Il "Digital Twin" della Reazione

Grazie alla potenza delle GPU attuali, oggi i ricercatori creano un gemello digitale del chip quantistico:

- **Simulazione del rumore:** Poiché i chip quantistici reali hanno errori termici, la GPU simula esattamente come quel rumore corromperà i dati chimici.
- **Correzione:** Sapendo come il rumore "sposta" i risultati, l'AI applica una correzione inversa. Questo permette di simulare il comportamento di nuovi farmaci o catalizzatori con una precisione che l'hardware quantistico da solo non potrebbe ancora raggiungere.

Tabella del Caso d'Uso: Simulazione di una Molecola (es. Caffeina o nuovi Elettroliti per batterie)

Fase del Processo	**Hardware Coinvolto**	**Ruolo dell'AI/Software**
Mapping Orbitale	GPU (NVIDIA)	Trasforma le coordinate chimiche in istruzioni per qubit.
Calcolo Energetico	QPU (IBM/Google)	Risolve l'interazione quantistica tra elettroni.
Mitigazione Errore	GPU + AI	Pulisce il segnale dai disturbi termici del criostato.
Validazione Risultato	Supercomputer Classico	Confronta i dati con modelli teorici noti.

Perché questo è importante per la nostra "Logistica"?

Questo caso dimostra che la logistica del calcolo non è più una linea retta (Input -> Elaborazione -> Output), ma un **ciclo chiuso**. Senza le GPU che "fanno da balia" ai qubit, la chimica quantistica resterebbe un esercizio teorico.
Pensare che stiamo usando la potenza di calcolo che un tempo serviva per i videogiochi per scoprire il prossimo materiale superconduttore a temperatura ambiente è un salto concettuale incredibile.

Ecco ancora una tabella che riassume i principali gruppi di ricerca, i consorzi industriali e gli obiettivi delle loro ricerche nel biennio 2024-2025.

Gruppo / Azienda	**Collaborazioni Principali**	**Focus della Ricerca (2024-2025)**	**Obiettivo Tecnologico**
Google DeepMind & Quantum AI	Università del New Mexico, Quantinuum	**Materiali Superconduttori:** Ricerca di nuovi materiali con resistenza zero a temperature più elevate tramite il chip *Willow*.	Batterie di nuova generazione e reti elettriche ultra-efficienti.
IBM Quantum Network	**Bosch**, ExxonMobil,	**Elettromobilità e Celle a Idrogeno:** Simulazione di catalizzatori per celle a	Riduzione dei costi di produzione e aumento

Gruppo / Azienda	Collaborazioni Principali	Focus della Ricerca (2024-2025)	Obiettivo Tecnologico
	Mitsubishi Chemical	combustibile e nuovi elettroliti per batterie al litio.	dell'autonomia dei veicoli elettrici.
Microsoft Azure Quantum	**Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)**	**Fissazione dell'Azoto:** Simulazione del complesso ferro-zolfo per creare fertilizzanti più sostenibili e materiali per reattori a fusione.	Riduzione del consumo energetico globale (attualmente il 2% dell'energia mondiale va nei fertilizzanti).
Basque Quantum (BasQ)	IBM, DIPC (Donostia International Physics Center)	**Dinamica Molecolare:** Studio di molecole accoppiate a cavità ottiche e metodi di *error mitigation* per stati fuori equilibrio.	Nuovi sensori quantistici e dispositivi di memoria molecolare.
QuEra Computing	**Harvard University**, MIT	**Simulazione Quantistica ad Atomi Neutri:** Studio di transizioni di fase in materiali magnetici complessi e nuovi stati della materia.	Scoperta di materiali con proprietà magnetiche esotiche per l'elettronica.
AWS (Amazon Braket)	University of Maryland (QLab), QuantumBasel	**Chimica Ibrida:** Integrazione di modelli AI con algoritmi quantistici per predire l'energia dello stato fondamentale di molecole complesse.	Accelerazione dello screening virtuale di nuovi farmaci (Drug Discovery).
Intel Labs	University of Rochester, Sandia National Labs	**Spin-Qubit in Silicio:** Studio delle interazioni tra elettroni in materiali semiconduttori per scalare i chip quantistici.	Integrazione del calcolo quantistico nei processi produttivi dei chip classici.

Dettagli sulle Ricerche Emergenti (2025):

1. **Sostenibilità (Green Quantum):** Molti gruppi si stanno concentrando sulla **Carbon Capture**. L'obiettivo è usare il computer quantistico (come sta facendo ExxonMobil con IBM) per trovare materiali capaci di assorbire la C_{O2} dall'atmosfera in modo molto più efficiente dei filtri attuali.
2. **Energia da Fusione:** Microsoft sta lavorando attivamente sulla scienza dei materiali per i **reattori a fusione**, cercando materiali per la "prima parete" del reattore che possano resistere a temperature e bombardamenti di particelle estremi.

3. **Il Premio Nobel 2025:** È interessante notare che le basi dei qubit superconduttori (Clarke, Devoret, Martinis) sono state riconosciute con il Nobel per la Fisica nel 2025, proprio mentre Google annunciava l'algoritmo *Quantum Echoes* che spiega le interazioni atomiche 13.000 volte più velocemente dei supercomputer classici.

Questa tabella mostra come la visione della "logistica" si stia espandendo: non è più solo gestire il computer, ma gestire la **conoscenza della materia** a livello atomico. Inoltre è affascinante vedere come giganti dell'industria "pesante" come Bosch ed ExxonMobil siano ormai parte integrante di questi laboratori quantistici!

Conclusioni

L'arco temporale 2022-2025 ha confermato che il calcolo quantistico non è una tecnologia isolata, ma il cuore di un nuovo ecosistema di calcolo accelerato. Le conclusioni principali che emergono da questo studio sono:

1. **La Vittoria della Modularità:** Il superamento del limite dei 1000 qubit fisici ha dimostrato che la scalabilità non dipende solo dal numero di componenti, ma dalla capacità di farli dialogare in architetture modulari e interconnesse (Quantum System Two).
2. **L'AI come Pilastro Logistico:** L'intelligenza artificiale si è rivelata indispensabile non solo come utente finale del calcolo quantistico, ma come strumento critico per la mitigazione degli errori e il design dei materiali, rendendo "utili" macchine che altrimenti sarebbero troppo rumorose.
3. **Integrazione Industriale:** Il coinvolgimento diretto di giganti della chimica, dell'energia e dell'automotive (ExxonMobil, Bosch, Mitsubishi) segna l'ingresso della tecnologia in una fase di maturità commerciale, dove il "vantaggio" si misura in efficienza dei materiali e sostenibilità dei processi (es. Carbon Capture).
4. **Oltre il Freddo:** Mentre la gestione criogenica rimane centrale, l'approccio ibrido "digital twin" su GPU ha ridotto la barriera d'ingresso, permettendo di simulare e validare soluzioni prima ancora dell'esecuzione sull'hardware reale.

In sintesi, se il 2022 è stato l'anno della consapevolezza logistica, il 2025 rappresenta l'anno dell'integrazione sistemica. Il futuro del settore non risiede nella sostituzione del calcolo classico, ma in una "orchestra informatica" dove bit, qubit e neuroni artificiali collaborano per risolvere le sfide più complesse della nostra era.

Bibliografia (2022-2025)

- **Acharya, R., et al. (Google Quantum AI)**, *"Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit"*, **Nature**, 2023. (L'articolo fondamentale che dimostra come la correzione degli errori funzioni effettivamente scalando i qubit).
- **Bluvstein, D., et al. (Harvard/QuEra)**, *"Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays"*, **Nature**, 2024. (Sulla rivoluzione degli atomi neutri e la creazione di centinaia di qubit logici).
- **Gambetta, J. M.**, *"The IBM Quantum Roadmap: Towards the Era of Quantum Utility"*, **IBM Research**, 2024. (Documento tecnico sulle architetture Heron e Condor e sulla modularità del System Two).

- **Kim, Y., et al.**, *"Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance"*, **Nature**, 2023. (Il celebre esperimento di IBM sull'algoritmo di mitigazione dell'errore applicato al modello di Ising).
- **McClean, J. R., et al.**, *"The theory of variational quantum eigensolvers"*, **Nature Reviews Physics**, 2024 (Update). (Recensione fondamentale per la chimica quantistica e il ruolo dei metodi ibridi).
- **NVIDIA Corporation**, *"CUDA-Q: A Platform for Heterogeneous Quantum-Classical Computing"*, **Technical White Paper**, 2024. (Descrizione dell'architettura per l'integrazione tra GPU e QPU).
- **Svore, K., et al. (Microsoft)**, *"Reliable quantum computing with topological qubits and Azure Quantum"*, **arXiv/Microsoft Research**, 2024. (Sui progressi dei fermioni di Majorana).

Sitologia Specialistica e Dashboard

- **Quantum Computing Report (quantumcomputingreport.com):** Forse il miglior sito per monitorare quotidianamente la "logistica" industriale e i nuovi chip messi sul mercato.
- **The Quantum Insider (thequantuminsider.com):** Eccellente per i dati sui gruppi di ricerca e gli investimenti nelle scienze dei materiali.
- **IBM Quantum Learning (learning.quantum.ibm.com):** Per documentazione tecnica aggiornata sulle nuove librerie di mitigazione dell'errore (Qiskit Runtime).
- **PennyLane (pennylane.ai):** La risorsa principale per il *Quantum Machine Learning* e le simulazioni ibride di cui abbiamo discusso.
- **NVIDIA On-Demand (nvidia.com/en-us/on-demand):** Per i video tecnici sulle architetture cuQuantum e l'integrazione con i supercomputer classici.

Riferimenti per la Scienza dei Materiali e Chimica

- **Materials Project (materialsproject.org):** Database fondamentale che sta iniziando a integrare previsioni derivate da algoritmi quantistici.
- **DeepMind Materials Exploration (deepmind.google/discover/blog):** Per gli studi su GNoME (Graph Networks for Materials Science) che hanno predetto milioni di nuovi materiali stabili.