



The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Una memoria quantistica è finalmente migliorata crescendo: la vera tappa, e la macchina che non è

Google Quantum AI ha mostrato, per la prima volta in modo pulito, che una memoria quantistica a surface code può funzionare sotto soglia: facendo crescere il codice da distanza 3 a 5 a 7, il tasso di errore logico è sceso esponenzialmente (circa 2,14x ogni due passi), e la più grande, una memoria distance-7 da 101 qubit, è vissuta più a lungo del suo miglior qubit fisico - oltre il breakeven - con correzione d'errore in tempo reale. È una tappa ingegneristica a lungo cercata. È anche un singolo qubit logico usato come memoria, con un tasso d'errore ancora lontano da quello richiesto dagli algoritmi reali, nessuna operazione logica eseguita, un pavimento d'errore inspiegato segnalato dagli autori e molti ordini di grandezza di scaling davanti. Una soglia attraversata, non un computer consegnato.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Quantum error correction below the surface code threshold*, Google Quantum AI and Collaborators, Nature 638, 920 (2025) · DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y

Il momento in cui la curva ha piegato nella direzione giusta

Per trent'anni, la correzione d'errore quantistica si è appoggiata a una promessa che non era mai stata mantenuta in modo pulito. La teoria dice che se distribuisce un'unità di informazione quantistica - un qubit *logico* - su molti qubit fisici rumorosi, e se quei qubit fisici sono abbastanza buoni, allora aggiungerne *altri* dovrebbe rendere migliore il qubit logico, con errori che calano esponenzialmente al crescere del codice. Il punto è il "se": sotto una soglia critica di rumore, più qubit aiutano; sopra, più qubit aggiungono solo altro rumore. Ogni esperimento precedente era rimasto dalla parte sbagliata di quella linea, oppure non era riuscito a mostrare la tendenza in modo pulito. Far crescere il codice peggiorava le cose, non le migliorava.

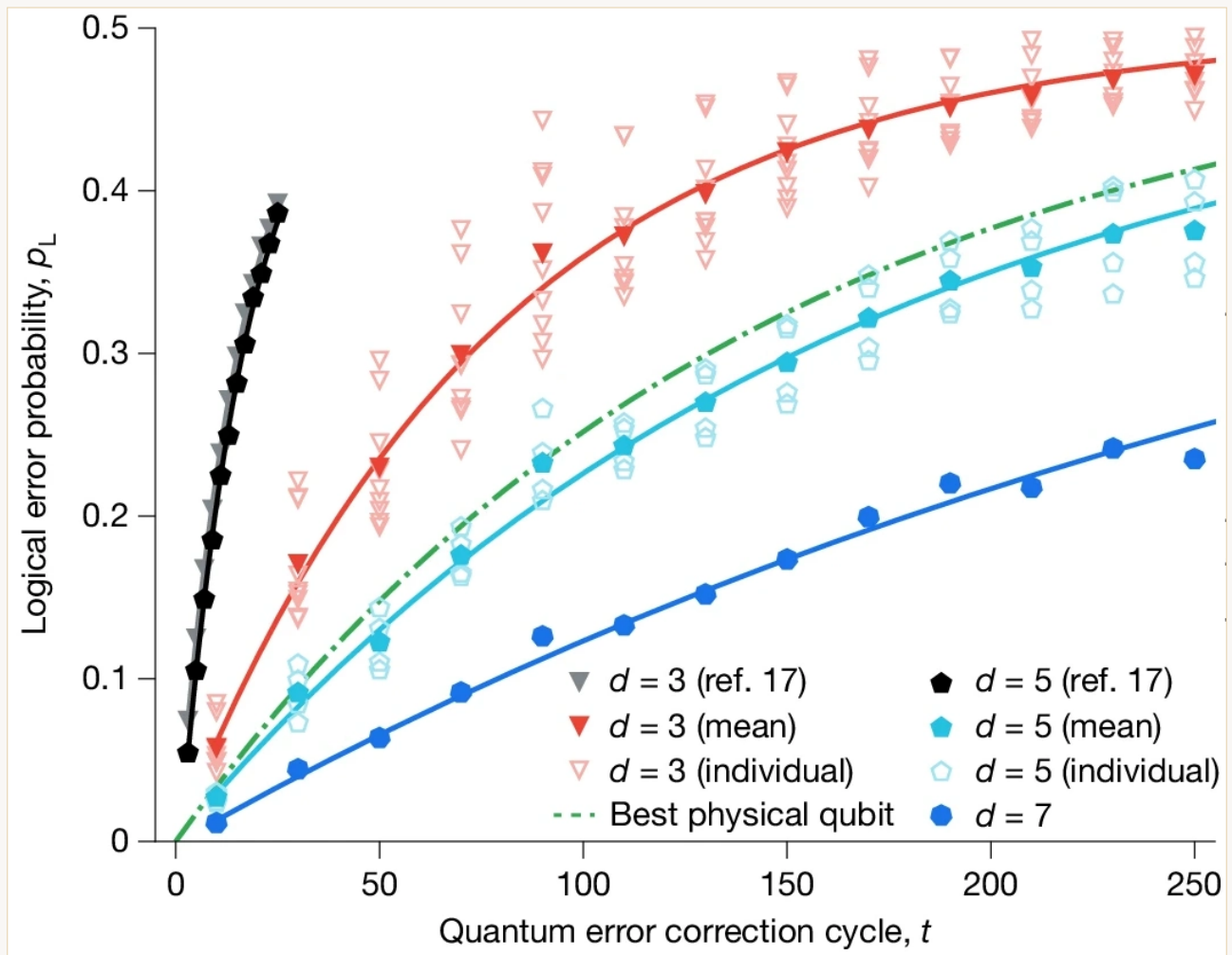
Nel dicembre 2024, Google Quantum AI ha riportato la prima dimostrazione chiara dell'altro regime. Su Willow, la loro nuova generazione di processori superconduttivi, hanno costruito memorie a surface code con distanze di codice 3, 5 e 7, e hanno visto il tasso di errore logico *scendere* ogni volta che il codice diventava più grande - di un fattore $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ per ogni due passi in più di distanza. La più grande, una memoria di distanza 7 da 101 qubit, ha mantenuto un qubit logico con un errore dello $0,143\% \pm 0,003\%$ per ciclo di correzione e - il titolo dentro il titolo - è sopravvissuta *più a lungo del suo miglior qubit fisico*, di un fattore $2,4 \pm 0,3$. Questo si chiama essere "oltre il breakeven", ed è la prima volta che tutto l'apparato della correzione d'errore si ripaga su questo hardware.

È una tappa reale, e vale la pena essere precisi su che tipo di tappa sia. È una prova che lo scaling ora va nella direzione giusta. Non è un computer quantistico funzionante, e l'articolo non sostiene di esserlo.

Che cosa significano "surface code", "distance" e "below threshold"

Un **qubit logico** è un'unità protetta di informazione quantistica codificata su molti qubit fisici. Il **surface code** è un modo particolare di fare questa codifica su una griglia 2D, dove qubit extra di "misura" controllano continuamente gli errori senza disturbare l'informazione conservata. La **distanza** del codice d non è una distanza fisica: è il numero minimo di errori ben piazzati che possono corrompere il qubit logico senza che il codice se ne accorga. Una d più grande è una patch più grande e più robusta: usa più qubit fisici (circa $2d^2 - 1$) e corregge più errori simultanei, fino a $(d - 1)/2$. Quindi le tre dimensioni testate qui, distanze 3, 5 e 7, correggono 1, 2 e 3 errori simultanei e usano circa 17, 49 e 97 qubit fisici; la memoria distance-7 costruita da Google ne usava 101, un po' sopra questo minimo da manuale.

"**Below threshold**" è l'espressione cruciale. La correzione d'errore aiuta solo se il tasso di errore fisico sta sotto un valore critico; lì, ogni aumento della distanza sopprime esponenzialmente il tasso di errore logico. Il fattore di soppressione Λ misura questo: $\Lambda > 1$ significa che far crescere il codice aiuta, e più alto è Λ , meglio è. Google riporta $\Lambda \approx 2,14$, cioè ogni aumento di due passi nella distanza ha circa dimezzato il tasso di errore logico. Che Λ sia comodamente sopra 1 è l'intero risultato.



Come l'errore logico si accumula lungo i cicli di correzione, per le memorie a distanza 3, 5 e 7 (dall'alto in basso). La linea da guardare è quella verde tratteggiata — il *miglior singolo qubit fisico* sul chip. La memoria a distanza 7 (blu, in basso) accumula errore più lentamente di quella linea: il qubit codificato vive più a lungo del miglior qubit fisico di cui è fatto — “oltre il breakeven”, di un fattore 2,4×. Questo è il risultato sulla durata; la soppressione sotto soglia in sé ($\Lambda = 2,14$, man mano che il codice cresce da distanza 3 a 5 a 7) sta nei numeri nel testo.

Google Quantum AI and Collaborators / Nature CC BY-NC-ND 4.0

Che cosa hanno fatto gli autori

- Hanno costruito memorie a surface code su due chip Willow: un processore da 105 qubit che ha eseguito i codici di distanza 3, 5 e 7 dietro il test di scaling (il più grande era la memoria distance-7 da 101 qubit, con 49 qubit di dati), e un processore da 72 qubit che ha eseguito una memoria distance-5 con decoder in tempo reale più i codici di ripetizione ad alta distanza.
- Hanno misurato come cambiava l'errore logico *per ciclo* aumentando la distanza del codice da 3 a 5 a 7, estraendo il fattore di soppressione Λ .
- Hanno confrontato la durata del qubit logico con quella del miglior qubit fisico individuale sullo stesso chip, per testare il “breakeven”.
- Hanno eseguito il codice distance-5 con un **decoder in tempo reale** - hardware classico che in-

interpreta i controlli d'errore alla velocità con cui vengono prodotti - fino a un milione di cicli, per mostrare che la correzione d'errore può tenere il passo con la macchina.

- Hanno spinto codici di **ripetizione** più semplici fino a distanza 29 per cercare le sorgenti rare e profonde di errore che fissano un pavimento alle prestazioni.

Che cosa hanno trovato

- **Il codice è sotto soglia.** L'errore logico per ciclo è sceso con $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ per ogni aumento di due nella distanza: soppressione esponenziale pulita, il comportamento promesso dalla teoria e mai mostrato definitivamente da un processore.
- **La memoria distance-7 ha raggiunto lo $0,143\% \pm 0,003\%$ di errore per ciclo**, ed è vissuta $2,4 \pm 0,3$ volte più a lungo del suo miglior qubit fisico: oltre il breakeven.
- **Il decoding in tempo reale ha tenuto il passo.** Il decoder aveva in media 63 microsecondi di latenza a distanza 5 contro un tempo di ciclo di 1,1 microsecondi, sostenuto per un milione di cicli: la correzione d'errore girava dal vivo, non solo in analisi a posteriori.
- **Resta una sorgente d'errore rara e profonda.** Nei test con codici di ripetizione, le prestazioni erano alla fine limitate da burst di errori correlati che avvenivano circa **una volta all'ora** (circa uno ogni 3×10^9 cicli), fissando un pavimento d'errore vicino a 10^{-10} la cui origine gli autori dicono di **non comprendere ancora**.

Che cosa non prova

- **Non** è un computer quantistico che fa calcolo. È una *memoria* quantistica: conserva e protegge un qubit logico. Non esegue operazioni logiche (gate) tra qubit logici e non fa girare nessun algoritmo.
- **Non** è a un qubit dalle macchine utili. Un qubit logico distance-7 usa circa 101 qubit fisici; un tasso d'errore per ciclo dello 0,1% è ancora molto sopra il circa 10^{-6} - 10^{-10} richiesto dagli algoritmi reali. Chiudere quel divario significa spingere a distanze molto più grandi - molti più qubit fisici per qubit logico - e gli algoritmi utili richiedono *migliaia* di qubit logici insieme. Il budget di qubit fisici arriva ai milioni.
- Il **“se scalato” fa un lavoro reale**. La conclusione dell'articolo è che le prestazioni del dispositivo, *se scalate*, potrebbero soddisfare i requisiti di grandi algoritmi. Mostrare che la tendenza è giusta su un qubit logico non equivale ad aver costruito la macchina scalata, e nulla qui garantisce che la tendenza sopravviva a dimensioni molto più grandi.
- Il **pavimento d'errore inspiegato è un problema aperto**. I burst correlati che limitano le prestazioni dei codici di ripetizione sono, nelle parole degli autori, ordini di grandezza più grandi del previsto e impedirebbero applicazioni fault-tolerant più grandi finché non fossero compresi: una falla aperta, dichiarata chiaramente, non un dettaglio risolto.
- Non dice nulla sul **rompere la crittografia o sulla “supremazia quantistica” per compiti utili**. Queste cose richiedono la macchina fault-tolerant completa di cui questo è una pietra di fondazione, non una dimostrazione.

Quanto sono solide le prove?

- **L'affermazione centrale è solido e importante.** Funzionamento sotto soglia con soppressione esponenziale pulita su tre distanze di codice, più durata oltre il breakeven e decoder in tempo reale funzionante, è esattamente la combinazione che il campo cercava di raggiungere, ed è dimostrata direttamente invece che inferita. Non è un artefatto di hype; è un risultato ingegneristico reale di un gruppo leader.
- **Gli autori sono attenti sul perimetro.** Lo presentano come *memoria* sotto soglia, segnalano loro stessi il pavimento di errore correlato inspiegato e vincolano il futuro a quel visibile “se scalato”. L'esagerazione, quando compare, è nella copertura intorno, che arrotonda “un qubit di memoria corretto dagli errori migliora crescendo” in “il quantum computing è arrivato”.
- **Lo status onesto è un passo fondativo, fatto in modo pulito.** Un qubit logico, protetto abbastanza bene perché aggiungere ridondanza finalmente aiuti - con una strada lunga, dura e non ancora garantita davanti per scaling, gate logici ed errori inspiegati.

Perché conta

Il quantum computing fault-tolerant ha sempre avuto un'aria da problema dell'uovo e della gallina: le macchine utili richiedono tassi d'errore che nessun qubit fisico può raggiungere, e la soluzione - la correzione d'errore - funziona solo se l'hardware è già abbastanza buono da essere sotto soglia. Attraversare quella linea, anche una sola volta, anche su un singolo qubit logico, sposta la domanda da “è possibile in assoluto?” a “quanto si può scalare, e quanto rapidamente?” È uno spostamento reale e significativo, ed è per questo che il risultato merita attenzione.

Ma la stessa cautela che rende affidabile il risultato è ciò che dovrebbe temperare la storia attorno. È il primo mattone di una fondazione, posato bene. Non è l'edificio, e le persone che lo hanno posato sono le prime a dirlo. Il modo giusto di seguire il quantum computing nei prossimi anni è esattamente questa curva poco glamour: se il fattore di soppressione tiene quando i codici crescono, se i gate logici possono essere eseguiti con la stessa pulizia della memoria logica, e se quel misterioso errore una volta all'ora verrà mai spiegato.

In breve

Google Quantum AI ha mostrato, per la prima volta in modo pulito, che una memoria quantistica a surface code può funzionare *sotto soglia*: facendo crescere il codice da distanza 3 a 5 a 7, il tasso di errore logico è sceso esponenzialmente (di circa $2,14\times$ ogni due passi), e la più grande, una memoria distance-7 da 101 qubit, è vissuta più a lungo del suo miglior qubit fisico - oltre il breakeven - mentre la correzione d'errore girava in tempo reale. È una tappa autentica e a lungo cercata nell'ingegneria dei computer quantistici. È anche un singolo qubit logico usato come memoria, con un tasso d'errore ancora lontano da ciò che richiedono gli algoritmi reali, nessuna operazione logica eseguita, un

pavimento d'errore inspiegato che gli autori segnalano loro stessi e una strada di scaling lunga molti ordini di grandezza. Una soglia reale attraversata, non un computer quantistico consegnato.

Fonti

Google Quantum AI and Collaborators, Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 638, 920 (2025)

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>

Author Correction: Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 653, E5 (2026) — corrects a Fig. 3a axis label and legend keys; does not affect the below-threshold (Fig. 1) results

<https://www.nature.com/articles/s41586-026-10559-8>