



The CLEAN PAPER

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

O memorie cuantică a devenit în sfârșit mai bună pe măsură ce a crescut: etapa reală și mașina care nu este

Google Quantum AI a arătat, pentru prima dată curat, că o memorie cuantică cu surface code poate rula sub prag: când au crescut codul de la distanța 3 la 5 la 7, rata erorii logice a scăzut exponențial (aproximativ 2,14x la fiecare doi pași), iar cea mai mare, o memorie distance-7 de 101 qubiți, a trăit mai mult decât cel mai bun qubit fizic al ei - dincolo de breakeven - cu corecție a erorilor în timp real. Este o etapă inginerască așteptată de mult. Este și un singur qubit logic care funcționează ca memorie, la o rată de eroare încă departe de ce cer algoritmi reali, fără operații logice executate, cu o podea de eroare neexplicată semnalată de autori și cu ordine de mărime de scalare înainte. Un prag trecut, nu un computer livrat.

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

Momentul în care curba s-a îndoit în direcția bună

Timp de treizeci de ani, corecția erorilor cuantice s-a sprijinit pe o promisiune care nu fusese demonstrată fără echivoc. Teoria spune că, dacă distribui o unitate de informație cuantică - un qubit *logic* - peste mulți qubiți fizici zgomotoși, și dacă acei qubiți fizici sunt suficient de buni, atunci adăugarea a *mai mulți* ar trebui să facă qubitul logic *mai bun*, cu erori care scad exponențial pe măsură ce codul crește. Problema este „dacă”: sub un prag critic de zgomot, mai mulți qubiți ajută; deasupra lui, mai mulți qubiți adaugă doar mai mult zgomot. Fiecare experiment anterior trăise de partea greșită a acelei linii sau nu reușise să arate tendința curat. Creșterea codului făcea lucrurile mai rele, nu mai bune.

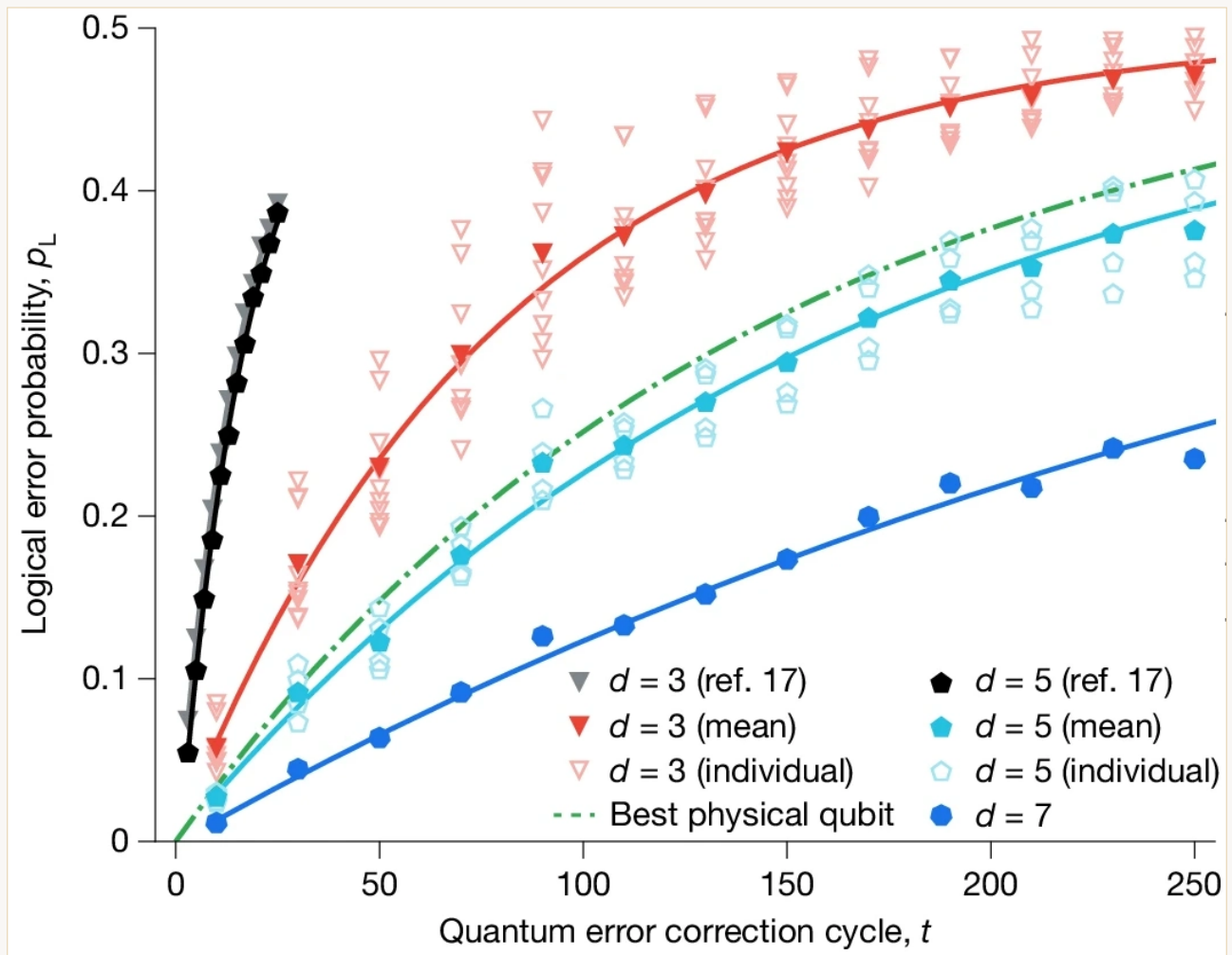
În decembrie 2024, Google Quantum AI a raportat prima demonstrație clară a celui alt regim. Pe Willow, cea mai nouă generație a lor de procesoare supraconductoare, au construit memorii cu surface code la distanțe de cod 3, 5 și 7 și au văzut rata erorii logice scăzând de fiecare dată când codul devenea mai mare - cu un factor $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ pentru fiecare doi pași în plus ai distanței. Cea mai mare, o memorie de distanță 7 cu 101 qubiți, a păstrat un qubit logic cu o eroare de $0,143\% \pm 0,003\%$ pe ciclu de corecție și - titlul din titlu - a supraviețuit *mai mult decât cel mai bun qubit fizic al ei*, cu un factor de $2,4 \pm 0,3$. Asta se numește a fi „dincolo de breakeven” și este prima dată când întregul aparat al corecției erorilor se plătește pe acest hardware.

Este o etapă reală și merită să fim preciși despre ce fel de etapă este. Este o dovadă că scalarea merge acum în direcția bună. Nu este un computer cuantic funcțional, iar articolul nu pretinde că ar fi.

Ce înseamnă “surface code”, “distance” și “below threshold”

Un **qubit logic** este o unitate protejată de informație cuantică, codificată peste mulți qubiți fizici. **Surface code** este un anumit mod de a face această codificare pe o grilă 2D, unde qubiți suplimentari de „măsură” verifică încontinuu erorile fără să perturbe informația stocată. **Distanța** codului d nu este o distanță fizică: este cel mai mic număr de erori bine plasate care pot corupe qubitul logic fără ca codul să observe. Un d mai mare este un patch mai mare și mai robust - folosește mai mulți qubiți fizici (aproximativ $2d^2 - 1$) și corectează mai multe erori simultane, până la $(d - 1)/2$. Așadar, cele trei dimensiuni testate aici, distanțele 3, 5 și 7, corectează 1, 2 și 3 erori simultane și folosesc aproximativ 17, 49 și 97 de qubiți fizici; memoria distance-7 construită de Google a folosit 101, puțin peste acest minim de manual.

“**Below threshold**” este expresia crucială. Corecția erorilor ajută doar dacă rata erorilor fizice stă sub o valoare critică; acolo, fiecare creștere a distanței suprimă exponențial rata erorii logice. Factorul de suprimare Λ măsoară asta: $\Lambda > 1$ înseamnă că mărirea codului ajută, iar cu cât Λ este mai mare, cu atât mai bine. Google raportează $\Lambda \approx 2,14$, adică fiecare creștere cu doi pași a distanței a redus rata erorii logice aproximativ la jumătate. Faptul că Λ este confortabil peste 1 este întregul rezultat.



Cum se acumulează eroarea logică de-a lungul ciclurilor de corecție, pentru memoriile de distanță 3, 5 și 7 (de sus în jos). Linia de urmărit este cea verde punctată — *cel mai bun qubit fizic individual* de pe cip. Memoria de distanță 7 (albastru, jos) acumulează eroare mai lent decât acea linie: qubitul codificat trăiește mai mult decât cel mai bun qubit fizic din care e făcut — „dincolo de breakeven”, cu un factor de $2,4\times$. Acesta este rezultatul privind durata de viață; suprimarea sub prag în sine ($\Lambda = 2,14$, pe măsură ce codul crește de la distanța 3 la 5 la 7) se află în numerele din text.

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

Ce au făcut autorii

- Au construit memorii cu surface code pe două cipuri Willow: un procesor de 105 qubiți care a rulat codurile de distanță 3, 5 și 7 din testul de scalare (cel mai mare fiind memoria distance-7 de 101 qubiți, cu 49 de qubiți de date), și un procesor de 72 de qubiți care a rulat o memorie distance-5 cu decoder în timp real plus coduri de repetiție la distanță mare.
- Au măsurat cum s-a schimbat eroarea logică *pe ciclu* când au crescut distanța codului de la 3 la 5 la 7, extrăgând factorul de suprimare Λ .
- Au comparat durata de viață a qubitului logic cu cea a celui mai bun qubit fizic individual de pe același cip, pentru a testa „breakeven”.

- Au rulat codul distance-5 cu un **decoder în timp real** - hardware clasic care interpretează verificările de eroare la fel de repede cum sunt produse - până la un milion de cicluri, pentru a arăta că corecția erorilor poate ține pasul cu mașina.
- Au împins coduri de **repetiție** mai simple până la distanța 29 pentru a căuta sursele rare și profunde de eroare care fixează o podea a performanței.

Ce au găsit

- **Codul este sub prag.** Eroarea logică pe ciclu a scăzut cu $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ pentru fiecare creștere cu doi a distanței: suprimare exponențială clară, comportamentul promis de teorie și neprezentat definitiv până acum de niciun procesor.
- **Memoria distance-7 a ajuns la $0,143\% \pm 0,003\%$ eroare pe ciclu** și a trăit **de $2,4 \pm 0,3$ ori mai mult** decât cel mai bun qubit fizic al ei - dincolo de breakeven.
- **Decodarea în timp real a ținut pasul.** Decoderul a avut în medie o latență de 63 de microsecunde la distanța 5, față de un timp de ciclu de 1,1 microsecunde, susținut pe un milion de cicluri: corecția erorilor a rulat live, nu doar în analiză după fapt.
- **Rămâne o sursă rară și profundă de eroare.** În testele cu coduri de repetiție, performanța a fost în cele din urmă limitată de rafale de erori corelate care apar cam **o dată pe oră** (aproximativ una la fiecare 3×10^9 cicluri), fixând o podea a erorii aproape de 10^{-10} , a cărei origine autorii spun că **nu este încă înțeleasă**.

Ce nu dovedește

- **Nu** este un computer cuantic care face calcul. Este o *memorie* cuantică: stochează și protejează un qubit logic. Nu execută operații logice (porți) între qubiți logici și nu rulează niciun algoritm.
- **Nu** este la un qubit distanță de mașini utile. Un qubit logic distance-7 folosește aproximativ 101 qubiți fizici; o rată de eroare de 0,1% pe ciclu este încă mult peste aproximativ 10^{-6} - 10^{-10} cât cer algoritmii reali. Închiderea acestui decalaj înseamnă distanțe mult mai mari - mult mai mulți qubiți fizici pentru fiecare qubit logic - iar algoritmii utili au nevoie de *mii* de qubiți logici simultan. Bugetul de qubiți fizici ajunge la milioane.
- **„Dacă este scalat” face muncă reală.** Concluzia articolului este că performanța dispozitivului, *dacă este scalată*, ar putea satisface cerințele algoritmilor mari. A arăta că tendința este corectă pe un qubit logic nu este același lucru cu a fi construit mașina scalată, și nimic de aici nu garantează că tendința supraviețuiește la dimensiuni mult mai mari.
- **Podeaua de eroare neexplicată este o problemă vie.** Rafalele corelate care plafonează performanța codurilor de repetiție sunt, în cuvintele autorilor, ordine de mărime mai mari decât se așteptau și ar împiedica aplicații fault-tolerant mai mari până când ar fi înțelese - o fisură deschisă, spusă clar, nu un detaliu rezolvat.
- Nu spune nimic despre **spargerea criptării sau “supremația cuantică” pentru sarcini utile**. Acelea cer mașina fault-tolerant completă pentru care acesta este o piatră de temelie, nu o demonstrație.

Cât de solide sunt dovezile?

- **Afirmația centrală este solidă și importantă.** Operare sub prag cu suprimare exponențială clară pe trei distanțe de cod, plus durată dincolo de breakeven și decoder în timp real funcțional: exact combinația pe care domeniul încerca să o atingă, demonstrată direct, nu inferată. Nu este un artefact de hype; este un rezultat ingineresc real de la un grup lider.
- **Autorii sunt atenți la perimetru.** Îl încadrează ca *memorie* sub prag, semnalează ei înșiși podeaua de erori corelate neexplicată și pun viitorul sub acel vizibil „dacă este scalat”. Exagerarea, acolo unde apare, este în acoperirea din jur, care rotunjește „un qubit de memorie corectat pentru erori s-a îmbunătățit pe măsură ce a crescut” în „calculul cuantic a sosit”.
- **Statutul onest este un pas fondator, făcut curat.** Un qubit logic, protejat suficient de bine încât adăugarea de redundanță să ajute în sfârșit - cu un drum lung, greu și încă negarantat înainte pentru scalare, porți logice și erori neexplicate.

De ce contează

Calculul cuantic fault-tolerant a avut mereu aerul unei probleme cu oul și găina: mașinile utile au nevoie de rate de eroare pe care niciun qubit fizic nu le poate atinge, iar soluția - corecția erorilor - funcționează doar dacă hardware-ul este deja suficient de bun ca să fie sub prag. Trecerea acelei linii, chiar o singură dată, chiar pe un singur qubit logic, schimbă întrebarea din „este posibil?” în „cât de departe poate fi scalat și cât de repede?” Este o schimbare reală și semnificativă, iar de aceea rezultatul merită atenție.

Dar aceeași grijă care face rezultatul credibil ar trebui să tempereze povestea din jurul lui. Este prima cărămidă a unei fundații, pusă bine. Nu este clădirea, iar oamenii care au pus-o sunt primii care o spun. Modul corect de a urmări calculul cuantic în următorii ani este exact această curbă neglamuroasă: dacă factorul de suprimare se menține când codurile cresc, dacă porțile logice pot fi făcute la fel de curat ca memoria logică și dacă acea eroare misterioasă o dată pe oră va fi explicată vreodată.

Pe scurt

Google Quantum AI a arătat, pentru prima dată curat, că o memorie cuantică cu surface code poate opera *sub prag*: crescând codul de la distanța 3 la 5 la 7, rata erorii logice a scăzut exponențial (cu aproximativ $2,14\times$ la fiecare doi pași), iar cea mai mare, o memorie distance-7 de 101 qubiți, a trăit mai mult decât cel mai bun qubit fizic al ei - dincolo de breakeven - în timp ce corecția erorilor rula în timp real. Este o etapă autentică, căutată de mult în ingineria computerelor cuantice. Este și un singur qubit logic care funcționează ca memorie, cu o rată de eroare încă departe de ceea ce cer algoritmii reali, fără operații logice executate, cu o podea de eroare neexplicată semnalată chiar de autori și cu un drum de scalare de multe ordine de mărime înainte. Un prag real trecut - nu un computer cuantic livrat.

Surse

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>