



The CLEAN PAPER

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

Kvantna memorija napokon se poboljšavala kako je rasla — stvarna prekretnica, ali ne i gotov mašina

Google Quantum AI prvi je put čisto pokazao da kvantna memorija sa surface codeom može raditi ispod praga: dok je kod rastao s udaljenosti 3 na 5 pa 7, stopa logičkih grešaka eksponencijalno je padala (oko 2.14x pri svakom povećanju za dva), a najveća memorija, udaljenosti 7 i sa 101 kubitom, nadživjela je svoj najbolji fizički kubit — iznad breakevena — uz korekciju grešaka u stvarnom vremenu. To je dugo tražena inženjerska prekretnica. Ali to je i jedan logički kubit koji služi kao memorija, sa stopom greške još daleko od onoga što trebaju stvarni algoritmi, bez logičkih operacija, s neobjašnjenim podom grešaka koji autori sami ističu i s još mnogo redova veličine skaliranja. pređen prag, ne isporučeno računar.

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

Trenutak kada se krivulja napokon savila u pravom smeru

Trideset godina kvantna korekcija grešaka počivala je na obećanju koje nikada nije bilo čisto ispunjeno. Teorija kaže da, ako jednu jedinicu kvantne informacije — jedan *logički* kubit — rasporedite preko mnogo bučnih fizičkih kubita i ako su ti fizički kubit dovoljno dobri, dodavanje *još* kubita treba logički kubit učiniti *boljim*, tako da greške eksponencijalno padaju kako kod raste. Kvaka je u tom „ako”: ispod kritičnog praga šuma više kubita pomaže; iznad njega više kubita samo dodaje više šuma. Svaki prethodni eksperiment bio je na pogrešnoj strani te granice ili nije čisto pokazao trend. Veći kod pogoršavao je stvari umesto da ih poboljšava.

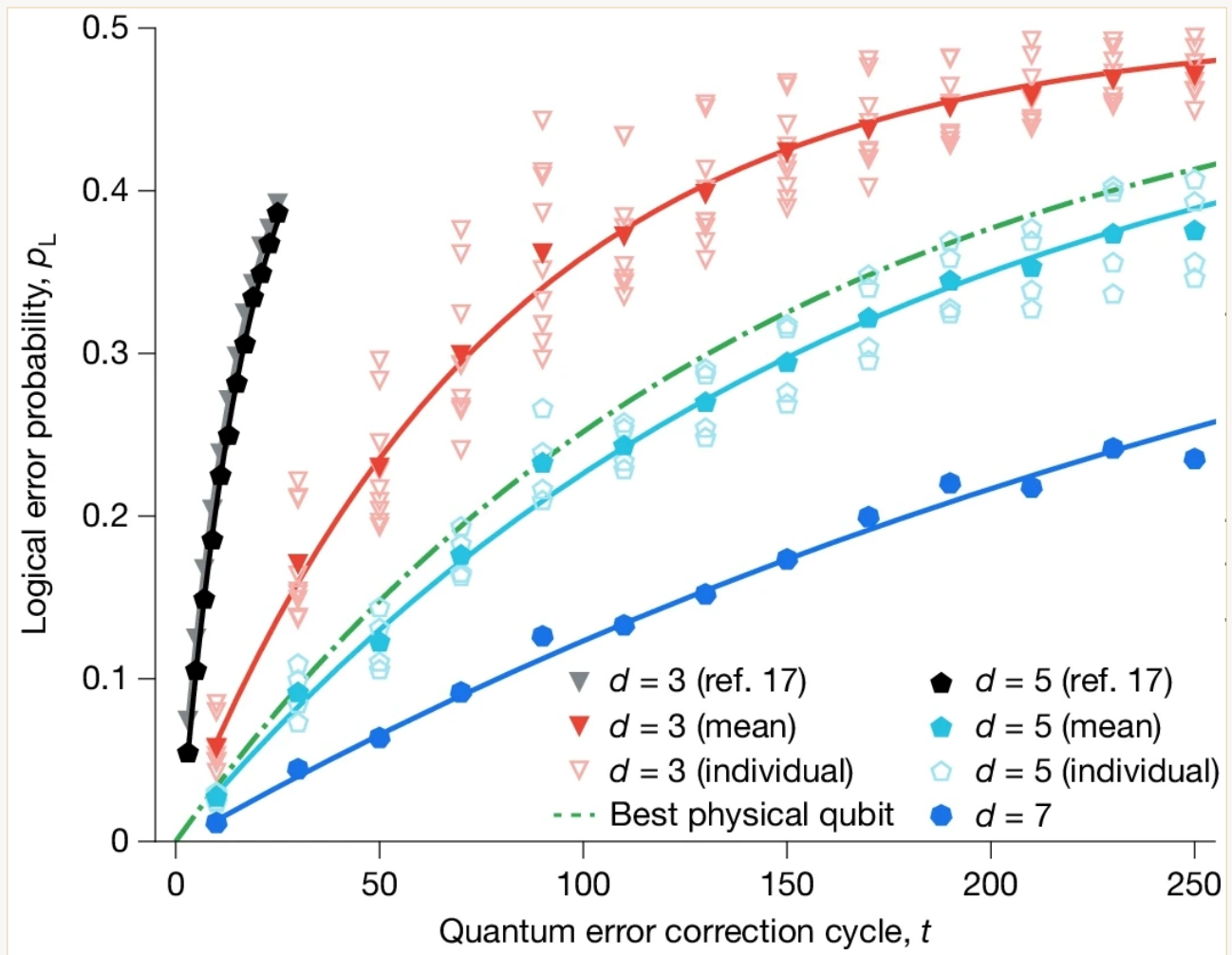
U decembru 2024. Google Quantum AI izvestio je o prvoj jasnoj demonstraciji suprotnog režima. Na Willowu, njihovoj najnovijoj generaciji supravodljivih procesora, izgradili su memorije sa surface codeom udaljenosti 3, 5 i 7 te gledali kako stopa logičkih grešaka *pada* svaki put kada kod postane veći — za faktor $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ pri svakom povećanju udaljenosti za dva. Najveća memorija, s udaljenosti 7 i 101 kubitom, držala je logički kubit uz grešku od $0.143\% \pm 0.003\%$ po ciklusu korekcije i — naslov unutar naslova — trajala je *duže od najboljeg fizičkog kubita od kojeg je bila sastavljena*, za faktor 2.4 ± 0.3 . To se naziva „iznad breakevena” i prvi je put da je celi aparat korekcije grešaka na ovom hardveru nadoknadio sopstveni trošak.

To je stvarna prekretnica i vredi biti precizan kakva. To je dokaz da skaliranje sada ide u pravom smeru. Nije funkcionalan kvantni računar i rad ne tvrdi da je.

Šta znače „surface code”, „udaljenost” i „ispod praga”

Logički kubit jedna je zaštićena jedinica kvantne informacije kodirana kroz mnogo fizičkih kubita. **Surface code** je poseban način takvog kodiranja na 2D mreži, gde dodatni „merni” kubit stalno proveravaju greške bez narušavanja sačuvane informacije. **Udaljenost koda** d nije fizička udaljenost: to je najmanji broj dobro raspoređenih grešaka koji može oštetiti logički kubit a da ih kod ne primeti. Veći d znači veći i robusniji komad koda — troši više fizičkih kubita (otprilike $2d^2 - 1$) i ispravlja više istovremenih grešaka, do $(d - 1)/2$. Zato tri veličine testirane ovde, udaljenosti 3, 5 i 7, ispravlja 1, 2 i 3 istovremne greške i troše otprilike 17, 49 i 97 fizičkih kubita — Googleova memorija udaljenosti 7 koristila je 101, malo više od tog udžbeničkog minimuma.

„**Ispod praga**” ključna je fraza. Korekcija grešaka pomaže samo ako je stopa fizičkih grešaka ispod kritične vrednosti; tada svako povećanje udaljenosti eksponencijalno smanjuje stopu logičkih grešaka. Faktor potiskivanja Λ to meri — $\Lambda > 1$ znači da povećavanje koda pomaže, a što je Λ veći, to bolje. Google izveštava $\Lambda \approx 2.14$, što znači da je svako povećanje udaljenosti za dva otprilike prepolovilo stopu logičkih grešaka. Činjenica da je Λ komotno iznad 1 celi je rezultat.



Kako se logička greška nakuplja tokom ciklusa korekcije za memorije udaljenosti 3, 5 i 7 (odozgo naniže). Linija koju treba pratiti zelena je isprekidana — *najbolji pojedinačni fizički kubit* na čipu. Memorija udaljenosti 7 (plava, najniža) nakuplja grešku sporije od te linije, pa kodirani kubit nadživi najbolji fizički kubit od kojeg je sastavljen — „iznad breakevena”, za faktor $2.4\times$. To je rezultat životnog veka; samo potiskivanje ispod praga ($\Lambda = 2.14$ dok kod raste s udaljenosti 3 na 5 pa 7) nalazi se u brojkama u tekstu.

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

Šta su autori uradili

- Izgradili su surface-code memorije na dva Willow čipa: procesoru sa 105 kubita koji je pokretao kodove udaljenosti 3, 5 i 7 u testu skaliranja (najveći je bio kod udaljenosti 7 sa 101 kubitom i 49 podatkovnih kubita) te procesoru sa 72 kubita koji je pokretao memoriju udaljenosti 5 s dekoderom u stvarnom vremenu i kodove ponavljanja velike udaljenosti.
- Merili su kako se logička greška *po ciklusu* menja kada udaljenost koda raste s 3 na 5 pa 7, izvodeći faktor potiskivanja Λ .
- Uporedili su životni vek logičkog kubita s najboljim pojedinačnim fizičkim kubitom na istom čipu kako bi testirali „breakeven”.
- Pokretali su kod udaljenosti 5 s **dekoderom u stvarnom vremenu** — klasičnim hardverom koji

tumači provjere grešaka brzinom kojom nastaju — do milion ciklusa, kako bi pokazali da korekcija može pratiti mašinom.

- Jednostavnije **kodove ponavljanja** rastegnuli su do udaljenosti 29 kako bi tražili retke, duboke izvore grešaka koji postavljaju donju granicu performansi.

Šta su pronašli

- **Kod je ispod praga.** Logička greška po ciklusu smanjivala se za faktor $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ pri svakom povećanju udaljenosti za dva — čisto eksponencijalno potiskivanje, ponašanje koje je teorija obećavala a nijedan procesor nije definitivno pokazao.
- **Memorija udaljenosti 7 dostigla je grešku od $0.143\% \pm 0.003\%$ po ciklusu** i živjela 2.4 ± 0.3 puta duže od najboljeg fizičkog kubita — iznad breakevena.
- **Dekodiranje u stvarnom vremenu držalo je korak.** Dekoder je na udaljenosti 5 imao prosečnu latenciju od 63 mikrosekunde nasuprot ciklusu od 1.1 mikrosekunde, održano kroz milion ciklusa — korekcija grešaka radila je uživo, a ne samo u naknadnoj analizi.
- **Ostaje red, dubok izvor grešaka.** U testovima s kodovima ponavljanja performanse su na kraju ograničavali korelirani naleti grešaka koji se događaju približno **jednom na sat** (oko jednom u svakih 3×10^9 ciklusa), postavljajući pod greške blizu 10^{-10} , čiji uzrok autori kažu da **još nije shvaćen**.

Šta ovo ne dokazuje

- Ovo **nije** kvantno računar koje računa. Ovo je kvantna *memorija*: čuva i štiti jedan logički kubit. Ne izvodi logičke operacije (vrata) između logičkih kubita i ne pokreće algoritam.
- **Nije** jedan kubit udaljeno od korisnih mašina. Logički kubit udaljenosti 7 troši oko 101 fizički kubit; stopa greške od 0,1% po ciklusu još je daleko iznad približno 10^{-6} do 10^{-10} koliko trebaju stvarni algoritmi. Zatvaranje tog jaza znači prelazak na mnogo veće udaljenosti — mnogo više fizičkih kubita po logičkom kubit — a korisni algoritmi trebaju *hiljade* logičkih kubita odjednom. Budžet fizičkih kubita tada ide u milione.
- Izraz „**ako se skalira**” **nosi stvarnu težinu**. Sopstveni zaključak rada glasi da bi performanse uređaja, *ako se skaliraju*, mogle zadovoljiti zahteve velikih algoritama. Pokazati pravi trend na jednom logičkom kubit nije isto što i izgraditi skalirani mašina i ništa ovde ne jamči da će trend preživeti na mnogo većim veličinama.
- **Neobjašnjeni pod grešaka živ je problem.** Korelirani naleti koji ograničavaju kodove ponavljanja, rečima autora, redovima su veličine veći od očekivanog i onemogućili bi veće fault-tolerant primene dok se ne razumeju — otvorena mana, jasno navedena, a ne rešen detalj.
- Rad ne govori ništa o **razbijanju enkripcije ili „kvantnoj nadmoći” za korisne zadatke**. Za to je potreban puni fault-tolerant mašina kojem je ovo osnovni kamen, a ne njegova demonstracija.

Koliko su dokazi jaki

- **Centralna tvrdnja čvrsta je i važna.** Rad ispod praga s čistim eksponencijalnim potiskivanjem kroz tri udaljenosti koda, uz životni vek iznad breakevena i funkcionalan dekodeer u stvarnom vremenu, upravo je kombinacija koju je područje pokušavala postići i ovde je direktno demonstrirana, a ne izvedena posredno. To nije artefakt hypea; stvran je inženjerski rezultat vodeće grupe.
- **Autori su oprezni s opsegom.** Rezultat opisuju kao memoriju *ispod praga*, sami ističu neobjašnjeni pod koreliranih grešaka i budućnost uslovuju upadljivim „ako se skalira”. Preterivanje, gde ga ima, dolazi iz okolnog izveštavanja koje „memorijski kubit s korekcijom grešaka poboljšavao se kako je rastao” zaokružuje u „kvantno računarstvo je stiglo”.
- **Pošten status je osnovni korak, uredno napravljen.** Jedan logički kubit, zaštićen dovoljno dobro da dodatna redundancija napokon pomaže — uz dug, težak i još nezajamčen put skaliranja, logičkih vrata i neobjašnjenih grešaka koji tek sledi.

Zašto je to važno

Fault-tolerant kvantno računarstvo oduvek je imalo problem kokoši i jajeta: korisnim mašinama trebaju stope greške koje nijedan fizički kubit ne može postići, a rešenje — korekcija grešaka — deluje samo ako je hardver već dovoljno dobar da bude ispod praga. Prelazak te granice, makar jednom i na samo jednom logičkom kubit, menja pitanje iz „da li je ovo uopšte moguće?” u „koliko se daleko može skalirati i koliko brzo?” To je stvarna i važna promena i razlog zašto rezultat zaslužuje pažnju.

Ali ista pažnja zbog koje je rezultat verodostojan treba umiriti priču oko njega. Ovo je prva cigla osnova, dobro položena. Nije zgrada, a ljudi koji su je položili prvi to kažu. Pravi način praćenja kvantnog računarstva sledećih godina upravo je ova neglamurozna krivulja: drži li faktor potiskivanja dok kodovi rastu, mogu li se logička vrata izvoditi jednako čisto kao logička memorija i hoće li ona misteriozna greška jednom na sat ikada biti objašnjena.

Kratak rezime

Google Quantum AI prvi je put čisto pokazao da kvantna memorija sa surface codeom može raditi *ispod praga*: dok su povećavali kod s udaljenosti 3 na 5 pa 7, stopa logičkih grešaka padala je eksponencijalno (oko $2,14 \times$ pri svakom povećanju za dva), a najveća memorija, udaljenosti 7 i sa 101 kubitom, nadživjela je svoj najbolji fizički kubit — iznad breakevena — uz korekciju grešaka u stvarnom vremenu. To je stvarna prekretnica, dugo tražena prekretnica u inženjerstvu kvantnih računara. Ali to je i jedan logički kubit koji služi kao memorija, sa stopom greške još daleko od onoga što traže stvarni algoritmi, bez izvedenih logičkih operacija, s neobjašnjenim podom grešaka koji sami autori naglašavaju i uz skaliranje od mnogo redova veličine pred nama. pređen stvaran prag — ne isporučeno kvantno računar.

Izvori

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>