



The CLEAN PAPER

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

Quantum memory hatimaye iliboreka ilipokua — milestone halisi, na machine ambayo bado siyo

Google Quantum AI imeonyesha kwa mara ya kwanza kwa usafi kwamba surface-code quantum memory inaweza kukimbia below threshold: code ilipokua kutoka distance 3 hadi 5 hadi 7, logical error rate ilishuka exponentially (takribani $2.14\times$ kwa kila hatua mbili), na kubwa zaidi, 101-qubit distance-7 memory, iliishi zaidi kuliko physical qubit yake bora — beyond breakeven — huku error correction ikiendeshwa real time. Ni milestone ya engineering iliyosubiriwa kwa muda mrefu. Pia ni logical qubit moja kama memory, yenye error rate bado mbali na algorithms halisi, bila logical operations, na unexplained error floor pamoja na scaling kubwa bado mbele. Threshold imevukwa, si computer iliyokabidhiwa.

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

Wakati curve ilipopinda upande sahihi

Kwa miaka thelathini, quantum error correction imeegemea ahadi ambayo haikuwa imeonyeshwa kwa usafi. Theory inasema kwamba ukienzeza unit moja ya quantum information — *logical qubit* moja — katika physical qubits nyingi zenye noise, na kama physical qubits hizo ni nzuri vya kutosha, basi kuongeza *zaidi* kunapaswa kufanya logical qubit iwe *bora*, huku errors zikishuka exponentially kadiri code inavyokua. Mtego uko kwenye “kama”: chini ya critical noise threshold, qubits zaidi husaidia; juu yake, qubits zaidi huongeza noise zaidi. Kila experiment ya awali ilikuwa upande usiofaa wa mstari huo, au haikuonyesha trend kwa usafi. Code ilipokua, mambo yalizidi kuwa mabaya, si bora.

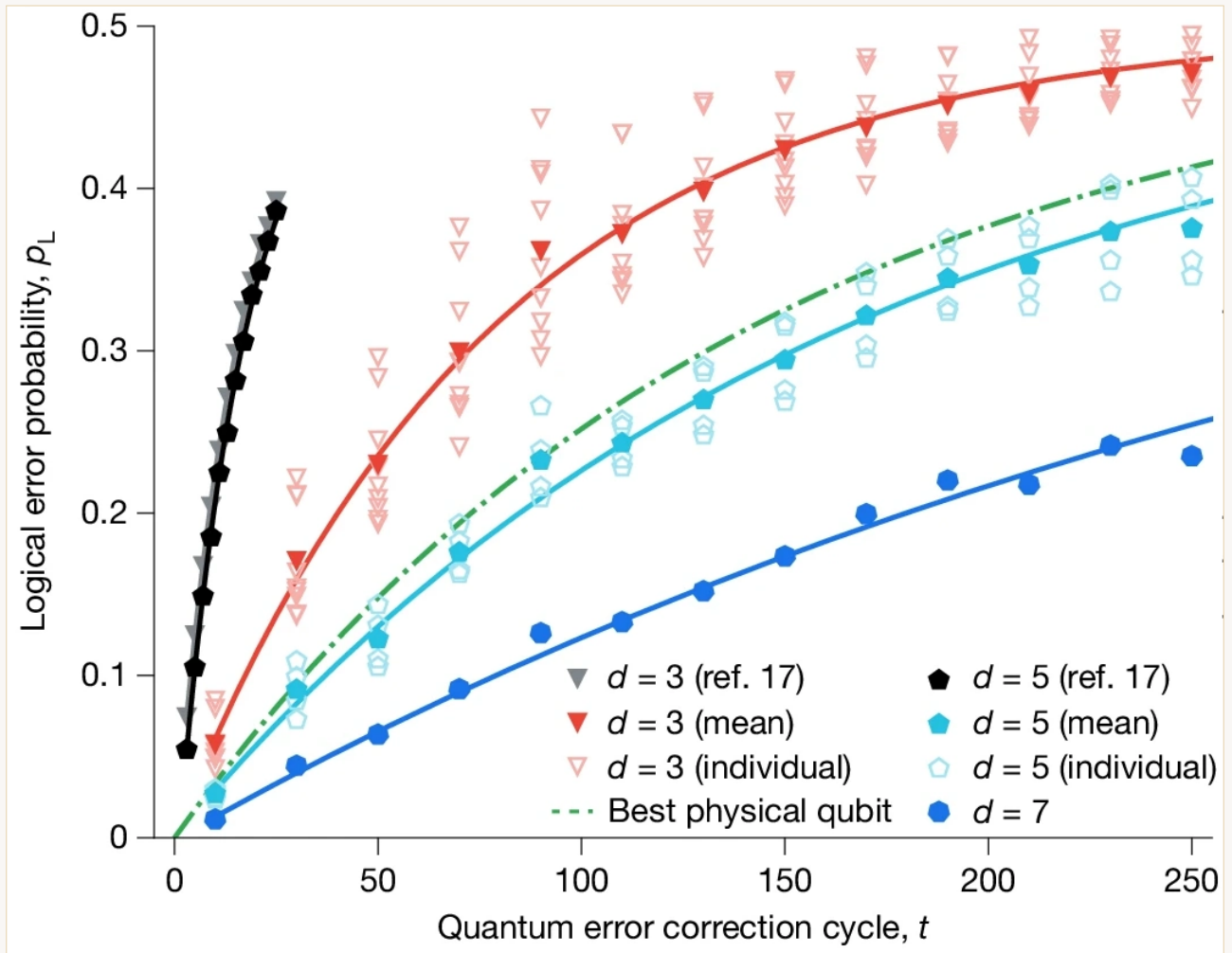
Desemba 2024, Google Quantum AI iliripoti demonstration ya kwanza iliyo wazi ya regime nyingine. Kwenye Willow, generation yao mpya ya superconducting processors, walijenga surface-code memories zenye code distances 3, 5 na 7, na wakaona logical error rate *ikishuka* kila code ilipokuwa kubwa — kwa factor ya $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ kwa kila hatua mbili za distance. Memory yao kubwa zaidi, distance-7 yenye qubits 101, ilihifadhi logical qubit kwa error ya $0.143\% \pm 0.003\%$ kwa kila cycle ya correction, na — kichwa cha habari ndani ya kichwa cha habari — iliishi *muda mrefu kuliko physical qubit yake bora zaidi*, kwa factor ya 2.4 ± 0.3 . Hii huitwa “beyond breakeven,” na ni mara ya kwanza mfumo mzima wa error correction umejilipia kwenye hardware hii.

Hii ni milestone halisi, na inastahili kuwa precise kuhusu ni aina gani. Ni uthibitisho kwamba scaling sasa inaenda upande sahihi. Si quantum computer inayofanya kazi, na makala haidai hivyo.

“Surface code,” “distance” na “below threshold” maana yake nini

Logical qubit ni unit moja iliyolindwa ya quantum information iliyocodewa katika physical qubits nyingi. **Surface code** ni njia maalum ya kufanya encoding hiyo kwenye grid ya 2D, ambapo “measure” qubits za ziada hukagua errors kila wakati bila kuvuruga information iliyohifadhiwa. **Code distance** d si umbali wa kimwili: ni idadi ndogo zaidi ya errors zilizowekwa mahali sahihi zinazoweza kuharibu logical qubit bila code kugundua. d kubwa ni patch kubwa na imara zaidi — hutumia physical qubits zaidi (takribani $2d^2 - 1$) na kurekebisha errors nyingi zaidi kwa wakati mmoja, hadi $(d - 1)/2$. Hivyo sizes tatu zilizojaribiwa hapa, distances 3, 5 na 7, hurekebisha errors 1, 2 na 3 kwa wakati mmoja na hutumia takribani 17, 49 na 97 physical qubits — distance-7 memory ya Google ilitumia 101, kidogo juu ya textbook minimum hii.

“**Below threshold**” ndiyo phrase muhimu. Error correction husaidia tu kama physical error rate iko chini ya critical value; hapo, kila ongezeko la distance hupunguza logical error rate exponentially. Suppression factor Λ hupima hili — $\Lambda > 1$ ina maana kuongeza code husaidia, na Λ kubwa zaidi ni bora. Google inaripoti $\Lambda \approx 2.14$, maana kila ongezeko la hatua mbili katika distance lilipunguza logical error rate karibu nusu. Ukweli kwamba Λ iko vizuri juu ya 1 ndiyo matokeo nzima.



Jinsi logical error inavyojikusanya katika cycles za correction kwa memories za distance 3, 5 na 7 (juu hadi chini). Line ya kuangalia ni ile ya kijani iliyokatika — *best single physical qubit* kwenye chip. Distance-7 memory (bluu, chini zaidi) inakusanya error polepole zaidi kuliko line hiyo, hivyo encoded qubit inaishi muda mrefu kuliko physical qubit bora zaidi iliyotumiwa kuijenga — “beyond breakeven,” kwa factor $2.4\times$. Hii ni lifetime matokeo; below-threshold suppression yenyewe ($\Lambda = 2.14$ kadiri code inavyokua kutoka distance 3 hadi 5 hadi 7) iko katika namba za text.

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

Waandishi walifanya nini

- Walijenga surface-code memories kwenye chips mbili za Willow: processor ya qubits 105 iliyokimbiza codes za distance 3, 5 na 7 kwa scaling test (kubwa zaidi ikiwa 101-qubit, 49-data-qubit distance-7 memory), na processor ya qubits 72 iliyokimbiza distance-5 memory yenye real-time decoder pamoja na high-distance repetition codes.
- Walipima jinsi logical error *per cycle* ilivyobadilika walipoongeza code distance kutoka 3 hadi 5 hadi 7, na kukokotoa suppression factor Λ .
- Walilinganisha lifetime ya logical qubit na physical qubit bora zaidi kwenye chip ileile ili kujaribu “breakeven.”

- Waliendesha distance-5 code na **real-time decoder** — classical hardware inayotafsiri error checks kwa kasi zinavyotengenezwa — kwa hadi cycles milioni moja, kuonyesha error correction inaweza kuendana na machine.
- Walisukuma **repetition codes** rahisi hadi distance 29 kutafuta rare, deep error vyanzo zinazoweka floor ya utendaji.

Walichokuta

- **Code iko below threshold.** Logical error per cycle ilishuka kwa $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ kwa kila ongezeko la hatua mbili za distance — clean exponential suppression, tabia ambayo theory iliahidi na processor yoyote haikuwa imeonyesha kwa definitive namna hii.
- **Distance-7 memory ilifikia $0.143\% \pm 0.003\%$ error per cycle,** na ikaishi **mara 2.4 ± 0.3 zaidi** kuliko physical qubit yake bora — beyond breakeven.
- **Real-time decoding iliweza kuendana.** Decoder ilikuwa na latency ya wastani ya microseconds 63 katika distance 5 dhidi ya cycle time ya microseconds 1.1, kwa cycles milioni moja — error correction iliendeshwa live, si uchanganuzi ya baadae tu.
- **Rare, deep error chanzo bado ipo.** Katika repetition-code tests, utendaji hatimaye ilizuiliwa na correlated error bursts zinazotokea takribani **mara moja kwa saa** (karibu moja katika kila cycles 3×10^9), zikiweka error floor karibu 10^{-10} ambayo chanzo chake waandishi wanasema **bado hakieleweki**.

Kile ambacho utafiti huu hauthibitishi

- **Si** quantum computer inayofanya computation. Hii ni quantum *memory*: huhifadhi na kulinda logical qubit moja. Haifanyi logical operations (gates) kati ya logical qubits, wala algorithm yoyote.
- **Si** “qubit moja tu” kutoka machines za maana. Distance-7 logical qubit hutumia takribani physical qubits 101; error rate ya $\sim 0.1\%$ per cycle bado iko juu sana kuliko takribani 10^{-6} hadi 10^{-10} ambazo algorithms halisi zinahitaji. Kufunga pengo hiyo kunahitaji distances kubwa zaidi — physical qubits nyingi zaidi kwa logical qubit — na muhimu algorithms zinahitaji *maelfu* ya logical qubits kwa wakati mmoja. Physical-qubit budget inafikia mamilioni.
- **“If scaled” ina kazi kubwa.** Hitimisho la makala yenyewe ni kwamba device utendaji, *ikiwa itascalewa*, inaweza kufikia mahitaji ya algorithms kubwa. Kuonyesha trend sahihi kwenye logical qubit moja si sawa na kujenga scaled machine, na hakuna hapa kinachohakikisha trend itaendelea katika sizes kubwa zaidi.
- **Unexplained error floor ni tatizo hai.** Correlated bursts zinazoweka cap kwenye repetition-code utendaji ni, kwa maneno ya waandishi, orders of magnitude kubwa kuliko ilivyotarajiwa na zingezuia larger fault-tolerant applications mpaka zieleweke — flaw iliyo wazi, si detail iliyotatuliwa.
- Haisemi chochote kuhusu **kuvunja encryption au “quantum supremacy” kwa muhimu tasks.** Hayo yanahitaji full fault-tolerant machine ambayo matokeo haya ni foundation stone yake, si demonstration yake.

Ushahidi una nguvu kiasi gani

- **Core dai ni imara na muhimu.** Below-threshold operation yenye clean exponential suppression katika code distances tatu, pamoja na beyond-breakeven lifetime na real-time decoder inayofanya kazi, ndiyo combination ambayo uwanja umekuwa ukijaribu kufikia, na imeonyeshwa moja kwa moja badala ya kuhitimishwa. Hii si hype artefact; ni engineering matokeo halisi kutoka group inayoongoza.
- **Waandishi ni makini kuhusu scope.** Wanai-frame kama below-threshold *memory*, wanaonyesha unexplained correlated-error floor wenyewe, na future yote ina hedge kubwa ya “if scaled.” Overreach, ikitokea, iko katika coverage inayozungusha “error-corrected memory qubit iliboreka ilipokua” kuwa “quantum computing imefika.”
- **Hali ya uaminifu ni foundational step iliyofanywa vizuri.** Logical qubit moja, iliyolindwa vizuri vya kutosha kwamba redundancy zaidi hatimaye inasaidia — huku safari ndefu na isiyo guaranteed ya scaling, logical gates na unexplained errors ikiwa bado mbele.

Kwa nini ni muhimu

Fault-tolerant quantum computing daima imekuwa na tatizo la kuku-na-yai: machines ambazo zingekuwa muhimu zinahitaji error rates ambazo physical qubit moja haiwezi kufikia, na suluhisho — error correction — hufanya kazi tu kama hardware tayari ni nzuri vya kutosha kuwa below threshold. Kuvuka mstari huo hata mara moja, kwa logical qubit moja, hubadilisha swali kutoka “hili linawezekana kabisa?” hadi “linaweza kuscalewa kiasi gani, na kwa kasi gani?” Hilo ni badiliko halisi na lenye maana, na ndiyo sababu matokeo inastahili attention.

Lakini uangalifu uleule unaofanya matokeo iwe trustworthy ndiyo unapaswa kupunguza simulizi inayozunguka. Hili ni tofali la kwanza la foundation, limewekwa vizuri. Si jengo, na walioliweka ndiyo wa kwanza kusema hivyo. Njia sahihi ya kufuatilia quantum computing miaka ijayo ni curve hii isiyong’aa: kama suppression factor inaendelea code zinapokua, kama logical gates zinaweza kufanywa kwa usafi sawa na logical memory, na kama mysterious once-an-hour error itawahi kueleweka.

Muhtasari safi

Google Quantum AI imeonyesha kwa mara ya kwanza kwa usafi kwamba surface-code quantum memory inaweza kufanya kazi *below threshold*: walipoongeza code kutoka distance 3 hadi 5 hadi 7, logical error rate ilishuka exponentially (takribani $2.14 \times$ kwa kila hatua mbili), na kubwa zaidi, 101-qubit distance-7 memory, iliishi zaidi kuliko physical qubit yake bora — beyond breakeven — huku error correction ikiendeshwa real time. Hii ni milestone halisi, iliyosubiriwa kwa muda mrefu katika engineering ya quantum computers. Pia ni logical qubit moja inayofanya kazi kama memory, yenye error rate bado mbali na algorithms halisi zinavyohitaji, bila logical operations, yenye unexplained error floor ambayo waandishi wenyewe wanaonyesha, na scaling ya orders nyingi za magnitude bado mbele. Threshold halisi imevukwa — si quantum computer iliyokabidhiwa.

Vyanzo

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>