



The CLEAN PAPER

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

Quantum memory tokko guddatee dhuma irratti fooyya'e — milestone dhugaa, garuu machine miti

Google Quantum AI jalqabaaf qulqullinaan surface-code quantum memory below threshold hoj-jechuu danda'u agarsiise: code distance 3 irraa 5 fi 7tti guddisuun logical error rate exponential ta'een gadi bu'e (steps lama hundaaf naannoo $2.14\times$), fi guddaan, distance-7 memory 101-qubit, physical qubit isaa keessaa isa gaarii caalaa yeroo dheeraa jiraate — beyond breakeven — error correction real time keessatti hojjetaa. Kun milestone engineering dhugaa dha. Garuu logical qubit tokko memory ta'ee hojjetu qofa, error rate algorithms dhugaa barbaadan irraa fagoo, logical operations hin raawwatamne, unexplained error floor jira, fi scaling orders of magnitude fuuldura qaba. Threshold ce'ame, computer hin dhiyaanne.

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

Yeroo qaxxaamura'n kallattii sirriitti qaxxaamure

Waggaa soddomaaf quantum dogoggora correction waadaa tokko irratti hirkatee ture, garuu waadaan sun yaalii keessatti qulqullinaan hin mul'anne. Tiyyoorii'n akka jedhu, quantum odeeffannoo unit tokko — **loojikaalaa qubit** tokko — fiizikaalaa qubits noise qaban hedduu keessatti facaaftee encode yoo goote, fi fiizikaalaa qubits sun qulqullina gahaa yoo qabaatan, qubits **dabalataa** itti dabaluu loojikaalaa qubit caalaatti **gaarii** gochuu qaba; koodii guddachaa deemu dogoggorawwan exponential ta'een gadi bu'u. Garuu “yoo” jedhu murteessaa dha: critical noise daangaa gadiitti qubits dabalataa ni gargaaru; daangaa oliitti qubits dabalataa noise qofa dabaluu. Yaaliiwwan duraanii hundi sarara sana gama dogoggoraa irratti turan yookaan trend qulqullinaan hin agarsiifne. Koodii guddisuun wanta fooyyessu osoo hin taane caalaatti hammeessa ture.

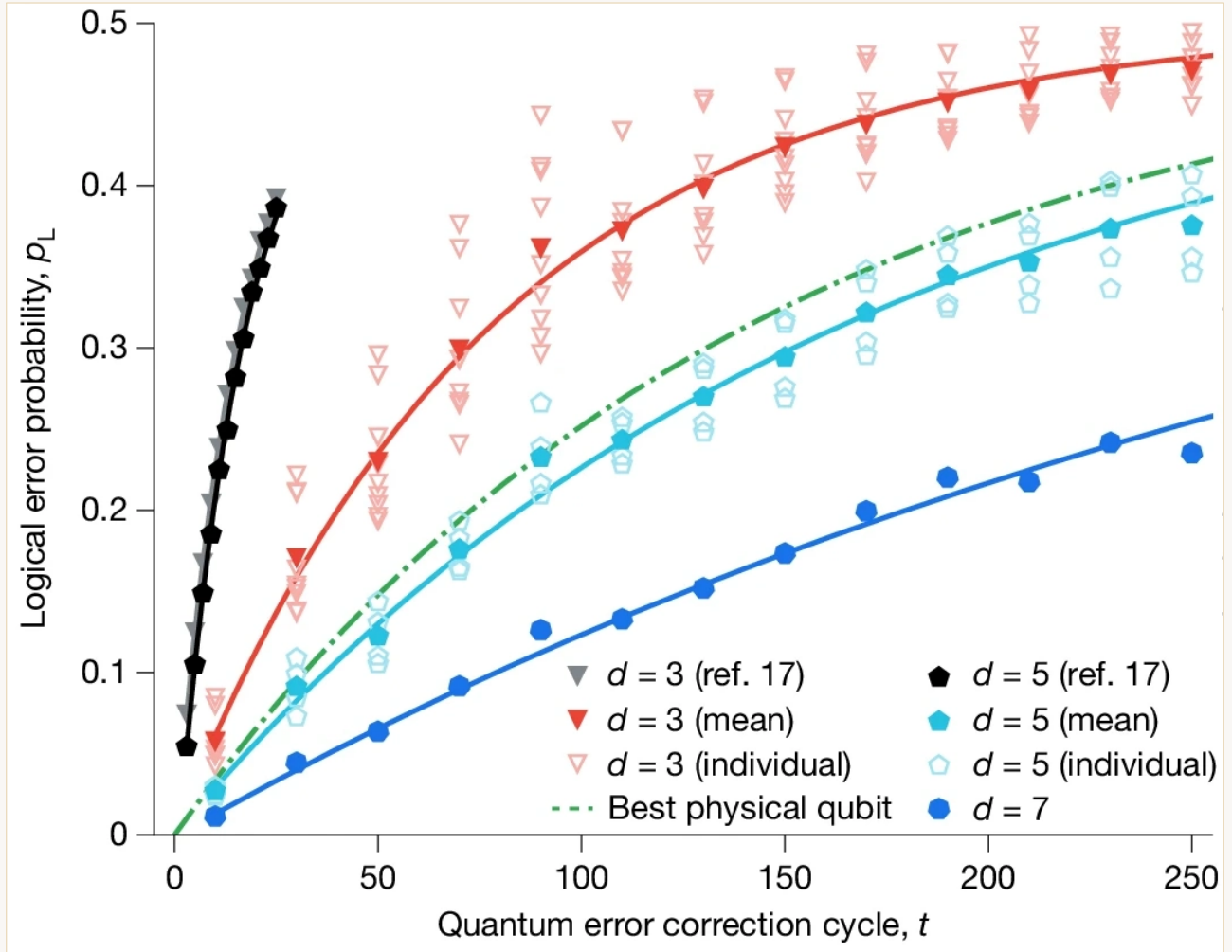
Muddee 2024 keessatti Google Quantum AI haala faallaa kana jalqabaaf ifatti agarsiise. Willow, generation haaraa superconducting processors isaanii irratti, surface-code memories koodii fageenyawwan 3, 5 fi 7 ijaaran; koodii guddatee yeroo hunda loojikaalaa dogoggora saffisa **gadi bu'uu** ilaalu — fageenya keessatti tarkaanfiiwwan lama ol ka'uu hundaaf faaktara $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$. Yaadannoo guddaan isaanii, distance-7 kan 101 qubits qabu, loojikaalaa qubit tokko correction marsaa tokko keessatti dogoggora $0.143\% \pm 0.003\%$ waliin ege; fi — mata-duree keessaa mata-duree — **fiizikaalaa qubit isaa keessaa isaa gaarii caalaa yeroo dheeraa jiraate**, faaktara 2.4 ± 0.3 . Kun “**beyond breakeven**” jedhama; hardware kana irratti apparatus dogoggora correction guutuun ofii isaa gatii isaa jalqabaaf baase.

Kun milestone dhugaa dha, garuu gosa milestone isaa sirriitti jechuun barbaachisa. Scaling amma kallattii sirriitti deema jechuun ragaa dha. Quantum kompiitara hojii raawwatu miti; barruun illee akkas hin himannaa godhu.

“Fuula koodii,” “distance” fi “below threshold” maal jechuu dha

Loojikaalaa qubit jechuun quantum odeeffannoo unit tokko kan fiizikaalaa qubits hedduu keessatti koodessuu eegamu dha. **Fuula koodii** encoding kana 2D grid irratti gochuuf mala tokko; “measure” qubits dabalataa odeeffannoo stored hin jeeqin dogoggorawwan yeroo hunda qoratu. Koodii **fageenya** d fageenya fiizikaalaa miti: loojikaalaa qubit koodii hin hubatin corrupt gochuu danda'an dogoggorawwan bakka sirriitti argaman keessaa lakkoofsa xiqqaa dha. d guddaan patch guddaa fi jabaataa ta'e dha — fiizikaalaa qubits baay'ee fayyadama (gara $2d^2 - 1$) fi dogoggorawwan yeroo tokkootti hedduu sirreessuu danda'a, hanga $(d - 1)/2$. Kanaaf fageenyawwan 3, 5 fi 7 as qorataman dogoggorawwan simultaneous 1, 2 fi 3 sirreessu; gara fiizikaalaa qubits 17, 49 fi 97 fayyadamu — Google distance-7 yaadannoo isaa 101 fayyadame, textbook xiqqaa irraa xiqqoo ol.

“**Below daangaa**” jechi ijoo dha. Dogoggora correction fiizikaalaa dogoggora saffisa critical gatii tokko gadi yoo ta'e qofa gargaara; achitti fageenya dabaluu hunda loojikaalaa dogoggora saffisa exponential ta'een suppress godha. Suppression faaktara Λ kana safara — $\Lambda > 1$ jechuun koodii guddisuun gargaara; Λ ol'aanaan caalaatti gaarii. Google $\Lambda \approx 2.14$ gabaasa; fageenya tarkaanfiiwwan lama dabaluu hunda loojikaalaa dogoggora saffisa gara walakkaa ta'a. Λ ifatti 1 ol ta'uun bu'aa guutuu dha.



Loojikaalaa dogoggora cycles correction keessa akkamitti walitti qabamu, distance-3, -5 fi -7 memories irratti. Sarara green dashed ilaali — chip irratti **tokko fiizikaalaa qubit isa gaarii**. Distance-7 yaadannoo (blue, gadi) dogoggora isaa sarara sana caalaa suuta walitti qaba; kanaaf encoded qubit fiizikaalaa qubit isaa keessaa isa gaarii caalaa yeroo dheeraa jiraata — “beyond breakeven,” faaktara $2.4\times$. Kun lifetime bu’aa dha; below-threshold suppression mataan isaa ($\Lambda = 2.14$, koodii fageenya 3 irraa 5 fi 7tti guddachaa) lakkoofsota barruu keessa jira.

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

Barreessitoonni maal godhan

- Willow chips lama irratti surface-code memories ijaaran: processor 105-qubit fageenyawwan 3, 5 fi 7 scaling qormaata raawwate (guddaan distance-7 yaadannoo 101-qubit, data-qubits 49), fi processor 72-qubit distance-5 yaadannoo real-time decoder waliin, akkasumas high-distance repetition codes raawwate.
- Koodii fageenya 3 irraa 5, achiis 7tti ol kaasuun loojikaalaa dogoggora **tokkoon tokkoon marsaa** akkamitti jijjiirame safaran; suppression faaktara Λ baasan.
- Loojikaalaa qubit lifetime, fiizikaalaa qubit nama dhuunfaa chip sanuma irratti isa gaarii waliin wal-bira qabanii “breakeven” qoran.

- Distance-5 koodii **real-time decoder** waliin — kilaasikaalaa hardware dogoggora sakatta’awwan yeroo uumaman saffisaan hiiku — miliyoona cycles hanga jiru raawwatan, dogoggora correction machine waliin live ta’ee hordofuu danda’uu agarsiisuuf.
- **Repetition codes** salphaa fageenya 29 hanga geessanii muraasa, deep dogoggora maddoota raawwii floor uuman barbaadan.

Maal argatan

- **Koodii below daangaa dha.** Loojikaalaa dogoggora tokkoon tokkoon marsaa fageenya tarkaanfiiwwan lama dabaluu hunda $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ ’n gadi bu’e — exponential suppression qulqulluu, amala tiyoorii’n waadaa gale fi processor kamiyyuu duraan definitively hin agarsiifne.
- **Distance-7 yaadannoo dogoggora $0.143\% \pm 0.003\%$ tokkoon tokkoon marsaa** ga’e; fiizikaalaa qubit isaa keessaa isa gaarii caalaa 2.4 ± 0.3 yeroowwan yeroo dheeraa jiraate — beyond breakeven.
- **Real-time decoding machine waliin itti fufe.** Decoder fageenya 5 irratti giddugaleessa latency 63 microseconds, marsaa yeroo 1.1 microseconds waliin, miliyoona cycles keessatti sustained. Dogoggora correction live ture; after-the-fact xiinxala qofa miti.
- **Muraasa, deep dogoggora madda tokko ammallee jira.** Repetition-code qormaatawwan keessatti raawwii correlated dogoggora bursts gara **sa’aatii tokko keessatti yeroo tokko** (waa’ee tokko in every 3×10^9 cycles) irraa daangaa ta’e; dogoggora floor naannoo 10^{-10} uume, origin isaa barreessitoonni akka jedhanitti **ammallee hin hubatamne**.

Kun maal hin mirkaneessu

- Kun **quantum kompiitara computation hojjetu miti.** Quantum **yaadannoo** dha: loojikaalaa qubit tokko store fi eega. Loojikaalaa qubits gidduutti loojikaalaa operations/gates hin raawwatu; algorithm tokko illee hin fiigsisu.
- Faayidaa qabu machine irraa “qubit tokko qofa” fagaata jechuu miti. Distance-7 loojikaalaa qubit fiizikaalaa qubits naannoo 101 fayyadama; dogoggora saffisa 0.1% tokkoon tokkoon marsaa algorithms dhugaa barbaadan gara 10^{-6} – 10^{-10} irraa fagoo dha. Gap kana cufuuf fageenyawwan guddaa — fiizikaalaa qubits loojikaalaa qubit tokkoof baay’ee dabalataa — barbaada; faayidaa qabu algorithms ammoo loojikaalaa qubits **kuma** yeroo tokkootti barbaadu. Physical-qubit budget miliyoona keessa seena.
- Jechi “**yoo scaled**” hojii dhugaa hojjeta. barruun device raawwii **yoo safartuu godhame** requirements algorithms gurguddaa guutuu danda’a jedha. Loojikaalaa qubit tokko irratti trend sirrii agarsiisuun scaled machine ijaaru waliin walqixa miti; trend kun sizes baay’ee guddaa irratti akka itti fufu homtuu guarantee hin godhu.
- **Dogoggora floor hin ibsamne rakkoo jiraataa dha.** Correlated bursts repetition-code raawwii cap godhan barreessitoonni akka jedhanitti eegamu caalaa orders of magnitude gurguddaa dha; hanga hubatamutti fault-tolerant fayyadamoota gurguddaa ni danqu. Rakkoo banaa, bal’ina ibsaa furame miti.

- **Encryption cabsuu yookaan “quantum supremacy” hojiiwwan faayidaa qaban irratti** homaa hin jedhu. Isaan guutuu fault-tolerant machine barbaadu, foundation stone kana qofa miti.

Ragaan hammam cimaa dha

- **Core himannaa jabaataa fi barbaachisaa dha.** Below-threshold operation koodii fageenyawwan sadii keessatti exponential suppression qulqulluu waliin, beyond-breakeven lifetime fi real-time decoder hojjetu — walitti maki kun fiidichi ga’uuf yaalaa ture. Kallattiin agarsiifame, irraa hubatu miti. Hype artefact miti; engineering bu’aa dhugaa, leading garee irraa.
- **Barreessitoonni scope irratti of-eeggannoo qabu.** Below-threshold yaadannoo jechuun frame godhu, correlated-error floor hin ibsamne ofumaan flag godhu, fi fuuldura “yoo scaled” jedhu irratti hedge godhu. Overreach, yoo jiraate, surrounding coverage keessatti — “error-corrected yaadannoo qubit guddatee fooyya’e” irraa “quantum computing dhufe”tti geeddaruu.
- **Status amanamaa foundational tarkaanfii, qulqullinaan fudhatame dha.** Loojikaalaa qubit tokko, redundancy dabaluu jalqabaaf gargaaraa ta’uu ga’uuf eeggannoo gahaa — garuu scaling, loojikaalaa gates fi dogoggorawwan hin ibsamne irratti karaa dheeraa, rakkisaa fi guarantee hin qabne qaba.

Maaliif barbaachisaa dha

Fault-tolerant quantum computing yeroo hunda chicken-and-egg rakkoo fakkaata: machines faayidaa qaban dogoggora saffisoota fiizikaalaa qubit tokko hin ga’in barbaadu; furmaata — dogoggora correction — hardware duraanuu below daangaa ta’uu yoo danda’e qofa hojjeta. Sarara sana, yeroo tokko illee, loojikaalaa qubit tokko irratti illee ce’uun gaaffii “kun ni danda’amaa?” irraa gara “hammam safartuu gochuu dandeenya, saffisa meeqa?”tti jijjiira. Kun jijjiirama dhugaa fi hiika qabu dha, kanaaf bu’aa kun xiyyeeffannoo argachuu qaba.

Garuu of-eeggannoon bu’aa kana amanamaa godhu seenicha itti marfame illee tasgabbeessuu qaba. Kun foundation keessaa brick jalqabaa, sirriitti kaa’ame dha. Building miti; namoonni brick kaa’an ofumaa akkas jedhu. Quantum computing waggoota dhufan keessatti hordofuuf qaxxaamura nama hin hawwine kana ilaaluun sirrii: suppression faaktara codes guddatanitti dhaabbataa? Loojikaalaa gates loojikaalaa yaadannoo akkuma kana qulqullinaan raawwatamuu danda’aa? Dogoggora sa’aatii tokko keessatti yeroo tokko mul’atu sun maal irraa dhufa?

Cuunfaa gabaabaa

Google Quantum AI jalqabaaf qulqullinaan surface-code quantum yaadannoo **below daangaa** hojjechuu danda’u agarsiise: koodii fageenya 3 irraa 5 fi 7tti guddisuun loojikaalaa dogoggora saffisa exponential ta’een gadi bu’e (tarkaanfiiwwan lama hundaaf gara $2.14\times$), fi guddaan, distance-7

yaadannoo 101-qubit, fiizikaalaa qubit isaa keessaa isa gaarii caalaa yeroo dheeraa jiraate — beyond breakeven — dogoggora correction dhugaa yeroo keessatti hojjetaa. Kun engineering quantum computers keessatti milestone dhugaa, yeroo dheeraaf barbaadame dha. Garuu loojikaalaa qubit tokko yaadannoo ta'ee hojjetu qofa, dogoggora saffisa algorithms dhugaa barbaadan irraa fagoo, loojikaalaa operations homaa hin raawwatamne, unexplained dogoggora floor barreessitoonni ofumaa flag godhan, fi orders of magnitude scaling fuuldura jira. Daangaa dhugaa ce'ame — quantum kompiitara hin dhiyaanne.

Maddoota

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>