



The CLEAN PAPER

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

Kvantu atmiņa beidzot kļuva labāka, to palielinot —
īstā robežzīme un dators, kas tas vēl nav

Google Quantum AI pirmo reizi skaidri parādīja, ka virsmas koda kvantu atmiņa var strādāt zem sliekšņa: palielinot kodu no attāluma 3 uz 5 un 7, loģiskā kļūdu varbūtība eksponenciāli kritās (aptuveni $2,14\times$ uz katriem diviem soļiem), un lielākā, 101 kubita attāluma-7 atmiņa darbojās ilgāk nekā labākais fiziskais kubits, kamēr kļūdu korekcija notika reāllaikā. Tas ir ilgi gaidīts inženiertehniskais sasniegums. Taču tas ir viens loģisks kubits kā atmiņa, kļūdu līmenis joprojām ir tālu no reāliem algoritmiem vajadzīgā, loģiskas operācijas nav demonstrētas, paliek neizskaidrota kļūdu grīda un priekšā ir milzīga mērogošana.

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

Kvantu atmiņa beidzot kļuva labāka, to palielinot — īstā robežzīme un dators, kas tas vēl nav

Kvantu datoru lielākā inženiertehniskā problēma ir vienkārša formulējumā un nežēlīga praksē: fiziskie kubiti kļūdās pārāk bieži. Lai palaistu garus algoritmus, vajag loģiskus kubitus, kuru kļūdu iespējamība ir daudz zemāka nekā jebkuram atsevišķam fiziskam kubitam. Kvantu kļūdu korekcija sola to panākt, izklaidējot vienu loģisko kubitam pa daudziem fiziskiem kubitiem un nepārtraukti meklējot kļūdas.

Taču šai idejai ir sliekšnis. Ja paši fiziskie kubiti kļūdās pārāk bieži, papildu kubiti tikai rada vairāk vietu jaunām kļūdām. Kļūdu korekcija kļūst patiesi noderīga tikai **zem sliekšņa**: tad, palielinot kodu, loģiskā kļūdu varbūtība krītas eksponenciāli.

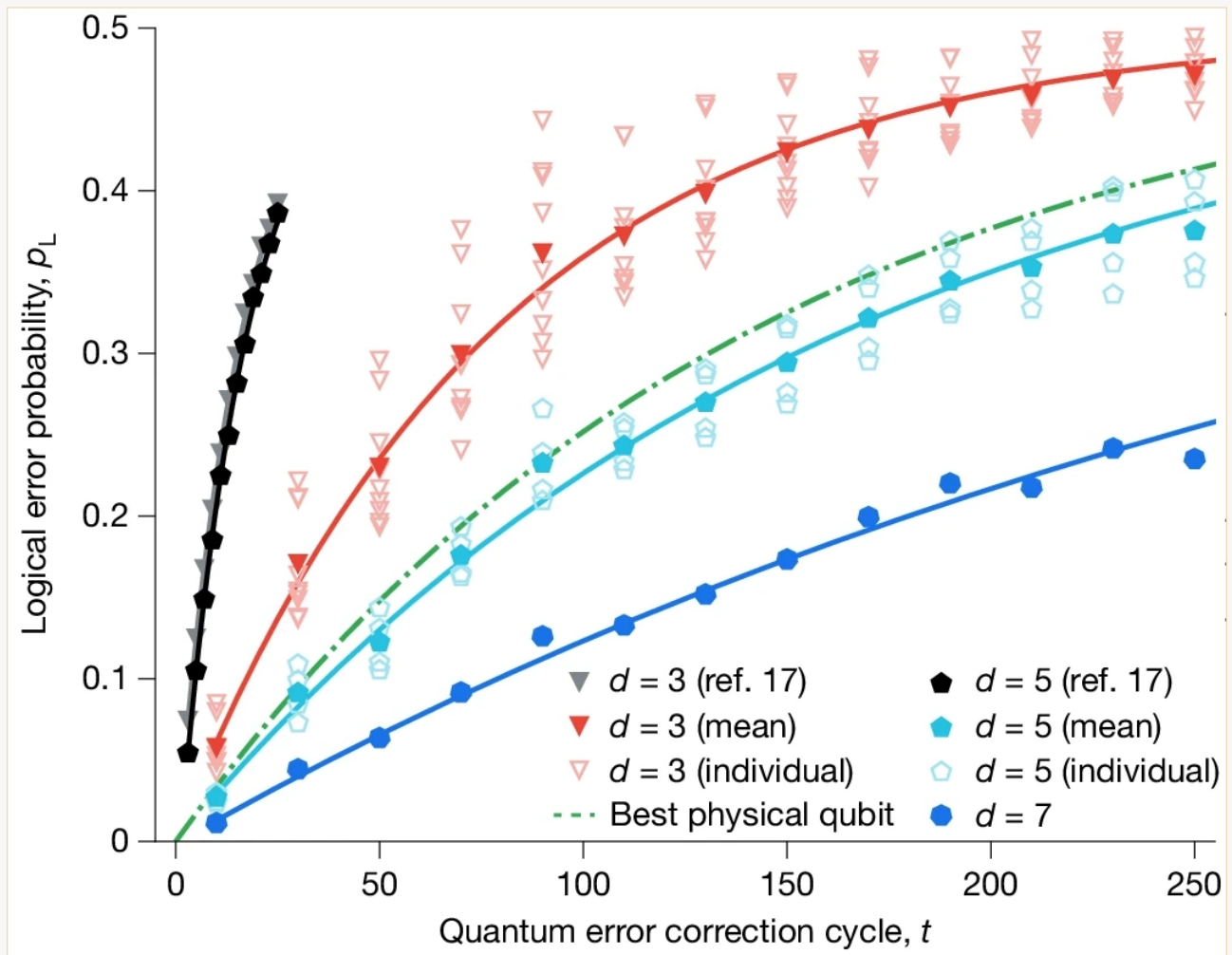
2024. gada decembrī Google Quantum AI ar Willow procesoriem parādīja tieši šo režīmu virsmas kodā. Palielinot koda attālumu no 3 uz 5 un 7, loģiskā kļūdu varbūtība katrā korekcijas ciklā samazinājās ar nomākšanas koeficientu $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ uz katriem diviem attāluma soļiem. Lielākā, 101 fiziskā kubita attāluma-7 atmiņa uzkrāja kļūdas lēnāk nekā labākais atsevišķais fiziskais kubits tajā pašā mikroschēmā — tā darbojās ilgāk par elementiem, no kuriem bija uzbūvēta.

Tas ir ilgi gaidīts kvantu kļūdu korekcijas inženiertehniskais sasniegums, un Nature publicētais raksts tieši šo mērogošanas režīmu arī demonstrē. Taču tas joprojām ir **viens loģisks kubits kā atmiņa**, nevis pilnvērtīgs kļūdu izturīgs kvantu dators. Tas neveic loģiskas operācijas starp loģiskiem kubitiem, nepilda algoritmu, un tā kļūdu līmenis joprojām ir daudzkārt par augstu praktiskiem lieliem aprēķiniem.

Ko nozīmē “virsmas kods”, “attālums” un “zem sliekšņa”

Loģiskais kubits ir viena aizsargāta kvantu informācijas vienība, kas iekodēta daudzos fiziskos kubitos. **Virsmas kods** ir konkrēts veids, kā to izdarīt divdimensiju režģī, kur papildu “mērīšanas” kubiti nepārtraukti pārbauda kļūdas, nesagraujot glabāto kvantu informāciju. Koda **attālums** d nav fizisks attālums; tas ir mazākais īpaši izvietotu kļūdu skaits, kas var sabojāt loģisko kubitam tā, ka kods to nepamana. Lielāks d nozīmē lielāku un izturīgāku koda laukumu: tas patērē vairāk fizisko kubitu (aptuveni $2d^2 - 1$) un spēj izlabot vairāk vienlaicīgu kļūdu — līdz $(d - 1)/2$. Tādēļ šeit pārbaudītie attālumi 3, 5 un 7 labo attiecīgi 1, 2 un 3 vienlaicīgas kļūdas un teorētiski prasa apmēram 17, 49 un 97 fiziskus kubitus; Google attāluma-7 atmiņa izmantoja 101.

“Zem sliekšņa” ir izšķirošais formulējums. Kļūdu korekcija palīdz tikai tad, ja fizisko kļūdu līmenis ir zem kritiskas robežas; tur katrs attāluma palielinājums eksponenciāli nomāc loģisko kļūdu līmeni. Nomākšanas koeficients Λ šo efektu raksturo: $\Lambda > 1$ nozīmē, ka lielāks kods palīdz, un jo lielāks Λ , jo labāk. Google ziņo par $\Lambda \approx 2,14$, tātad katrs attāluma pieaugums par diviem loģisko kļūdu līmeni aptuveni samazināja uz pusi. Tas, ka Λ pārliecinoši pārsniedz 1, ir rezultāta kods.



Loģiskās kļūdas uzkrāšanās kvantu kļūdu korekcijas ciklu gaitā attāluma-3, -5 un -7 atmiņām (no augšas uz leju). Svarīgā zaļā pārtrauktā līnija attēlo *labāko atsevišķo fizisko kubitu* mikroshēmā. Attāluma-7 atmiņas zilā līkne aug lēnāk un paliek zem šīs līnijas, tādā iekodētais kubits dzīvo ilgāk nekā labākais fiziskais kubits, no kura tas veidots — “beyond breakeven”, par $2,4\times$. Šis ir kalpošanas laika rezultāts; zemsliedzība nomāks pati ($\Lambda = 2,14$, palielinot kodu no 3 uz 5 uz 7) ir dota teksta skaitļos.

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

Ko autori darīja

- Uzbūvēja virsmas koda atmiņas uz divām Willow mikroshēmām: 105 kubitu procesors darbināja attāluma-3, -5 un -7 kodus mērogošanas testam (lielākais bija 101 kubita, 49 datu kubitu attāluma-7 atmiņa), bet 72 kubitu procesors darbināja attāluma-5 atmiņu ar reāllaika dekoderu un liela attāluma atkārtuma kodus.
- Mērija, kā loģiskās kļūdas varbūtība *vienā ciklā* mainās, palielinot koda attālumu no 3 uz 5 un 7, un no tā ieguva nomāksanas koeficientu Λ .
- Salīdzināja loģiskā kubita kalpošanas laiku ar labāko atsevišķo fizisko kubitu tajā pašā mikroshēmā, lai pārbaudītu, vai sasniegts “breakeven” — punkts, kur iekodēšana beidzot ir izdevīgāka par labāko komponentu.

- Darbināja attāluma-5 kodu ar **reāllaika dekoderu** — klasisku aparatūru, kas interpretē kļūdu pārbaudes pietiekami ātri, lai sekotu pašai mašīnai — līdz miljonam ciklu, parādot, ka korekciju iespējams izpildīt darbības laikā, ne tikai analizēt pēc eksperimenta.
- Vienkāršākus **atkārtojuma kodus** palielināja līdz attālumam 29, lai meklētu retus dziļus kļūdu avotus, kas nosaka veikspējas grīdu.

Ko viņi atklāja

- **Kods darbojas zem sliekšņa.** Katrā attāluma palielinājumā par diviem loģiskā kļūdu varbūtība vienā ciklā samazinājās par $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ — tīra eksponenciāla nomākšana, tieši tāda uzvedība, kādu sola teorija un ko procesors iepriekš nebija tik skaidri demonstrējis.
- **Attāluma-7 atmiņas kļūdu līmenis bija $0,143\% \pm 0,003\%$ vienā ciklā,** un tā darbojās **$2,4 \pm 0,3$ reizes ilgāk** nekā labākais fiziskais kubits — pārsniedzot breakeven.
- **Reāllaika dekodēšana tika līdzī.** Attāluma-5 gadījumā dekodera vidējais latentums bija 63 mikrosekundes pret 1,1 mikrosekundes koda ciklu, un tas tika uzturēts miljonu ciklu. Kļūdu korekcija notika dzīvā, ne tikai pēcāpstrādē.
- **Paliek rets, dziļš kļūdu avots.** Atkārtojuma kodus veikspēju galu galā ierobežoja korelēti kļūdu uzliesmojumi aptuveni **reizi stundā** (apmēram vienā no 3×10^9 ciklu), radot kļūdu grīdu ap 10^{-10} . Autori saka, ka šo notikumu izcelsme **vēl nav saprasta**.

Ko tas nepierāda

- Tas **nav kvantu dators, kas veic aprēķinu.** Šī ir kvantu *atmiņa*: tā glabā un aizsargā vienu loģisku kubitu. Tā neveic loģiskas vārtu operācijas starp loģiskiem kubitiem un nepilda algoritmu.
- Tas **nav viena kubita attālumā no praktiskas mašīnas.** Attāluma-7 loģiskais kubits patērē aptuveni 101 fizisku kubitu; kļūdu līmenis ap 0,1% ciklā joprojām ir daudz augstāks par aptuveni 10^{-6} līdz 10^{-10} , kas vajadzīgs reāliem algoritmiem. Šīs plaisas aizvēršanai vajag daudz lielākus attālumus — tāpat daudz vairāk fizisku kubitu vienam loģiskam kubitam — un noderīgiem algoritmiem vajadzēs *tūkstošiem* loģisku kubitu vienlaikus. Kopējais fizisko kubitu skaits tad var sasniegt miljonus.
- Frāze **“ja to izdotos mērogot”** dara ļoti daudz darba. Raksta paša secinājums ir, ka ierīces veikspēja, *ja to mērogotu*, varētu atbilst lielu algoritmu prasībām. Pareizas tendences parādīšana vienam loģiskam kubitam nav tas pats, kas uzbūvēt šo mērogoto sistēmu, un nekas šeit negarantē, ka tendence saglabāsies daudz lielākos izmēros.
- **Neizskaidrotā kļūdu grīda ir reāla problēma.** Korelētie uzliesmojumi, kas ierobežo atkārtojuma kodus, pēc autoru vārdiem ir par vairākām kārtām lielāki nekā gaidīts un līdz izskaidrošanai traucētu lielākām kļūdu izturīgām lietojumprogrammām. Tā ir atklāta problēma, nevis atrisināta detaļa.
- Darbs neko nepasaka par **šifrēšanas laušanu vai praktiskiem “kvantu pārkuma” uzdevumiem.** Tam vajadzīga pilna kļūdu izturīga mašīna; šis rezultāts ir viens no tās pamatiem, nevis demonstrācija.

Cik pārlicinoši ir pierādījumi?

- **Galvenais apgalvojums ir spēcīgs un svarīgs.** Zemsliedzēna darbība ar skaidru eksponenciālu nomāksanu trīs koda attālumos, plus ilgāks par fizisko kubitu kalpošanas laiks un strādājošs reāllaika dekoders ir tieši tā kombinācija, ko joma ilgi centās sasniegt, un tā ir demonstrēta tieši, nevis secināta netieši. Tas nav tikai reklāmas artefakts; tas ir īsts inženiertehniskais rezultāts no vadošās grupas.
- **Autori rūpīgi ierobežo rezultāta tvērumu.** Viņi to sauc par zemsliedzēna *atmiņu*, paši izceļ neizskaidroto korelēto kļūdu grīdu un nākotnes secinājumus sasaista ar uzkrītošo “ja izdotos mērogot”. Pārspilējums galvenokārt rodas apkārtējā atspoguļojumā, kas “kļūdu koriģēta atmiņa kļūst labāka, to palielinot” noapaļo līdz “kvantu datori ir klāt”.
- **Godīgais statuss: pamatakmens ir ielikts labi.** Viens loģiskais kubits, kas aizsargāts pietiekami labi, lai papildu redundance beidzot palīdzētu — bet priekšā ir garš, grūts un negarantēts ceļš ar mērogošanu, loģiskiem vārtiem un neizskaidrotām kļūdām.

Kāpēc tas ir svarīgi

Kļūdu izturīgai kvantu skaitļošanai vienmēr bijusi vistas un olas problēma: noderīgai mašīnai vajag kļūdu līmeni, ko neviens fiziskais kubits nespēj sasniegt, bet risinājums — kļūdu korekcija — darbojas tikai tad, ja aparatūra jau ir pietiekami laba, lai atrastos zem sliekšņa. Šīs robežas šķērsošana kaut vienu reizi un kaut vienam loģiskam kubitam maina jautājumu no “vai tas vispār ir iespējams?” uz “cik tālu to var mērogot un cik ātri?”. Tā ir reāla, nozīmīga pārmaiņa, tāpēc rezultāts ir uzmanības vērts.

Taču tieši tā pati piesardzība, kas padara rezultātu uzticamu, ir jāpiemēro stāstam ap to. Tas ir pirmais pamata ķieģelis, ielikts pareizi. Tā vēl nav ēka, un paši autori to saka vispirms. Tuvākajos gados kvantu skaitļošanai vērts sekot tieši šajā neglamūrīgajā liknē: vai nomāksanas koeficients saglabājas, kodam augot; vai loģiskos vārtus var realizēt tikpat tīri kā loģisku atmiņu; un vai noslēpumainā aptuveni reizi stundā notiekošā kļūda tiks izskaidrota.

Īss kopsavilkums

Google Quantum AI pirmo reizi skaidri parādīja, ka virsmas koda kvantu atmiņa var darboties *zem sliekšņa*: palielinot kodu no attāluma 3 uz 5 un 7, loģiskā kļūdu varbūtība eksponenciāli samazinājās (aptuveni $2,14 \times$ uz katriem diviem attāluma soļiem), un lielākā, 101 kubita attāluma-7 atmiņa darbojās ilgāk nekā labākais fiziskais kubits, no kura tā veidota, kamēr kļūdu korekcija notika reāllaikā. Tas ir īsts, ilgi gaidīts kvantu datoru inženierijas sasniegums. Taču tas joprojām ir viens loģiskais kubits, kas darbojas kā atmiņa, ar kļūdu līmeni krietni virs reāliem algoritmiem vajadzīgā; loģiskas operācijas netika veiktas, pastāv neizskaidrota kļūdu grīda, un mērogošanai priekšā ir daudzas lieluma kārtas. Īsts sliekšnis ir šķērsots — kvantu dators vēl nav piegādāts.

Avoti

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>