The Clean Paper

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

Didinama kvantinė atmintis pagaliau ėmė gerėti — tikrasis etapas ir kuo ši mašina dar nėra

Google Quantum AI pirmą kartą aiškiai parodė, kad paviršinio kodo kvantinė atmintis gali veikti žemiau slenksčio: didinant kodą nuo 3 iki 5 ir 7 atstumo, loginės klaidos dažnis mažėjo eksponentiškai, o didžiausia, 101 kubito ir 7 atstumo, atmintis veikė ilgiau už geriausią fizinį kubitą ir klaidų korekciją vykdė realiu laiku. Tai ilgai lauktas inžinerinis etapas, bet vis dar tik vienas loginis atminties kubitas, kurio klaidų lygis per didelis realiems algoritmams; loginės operacijos neatliktos, išlieka nepaaiškintos klaidų grindys, o mastelį dar teks didinti daugeliu dydžio laipsnių. Peržengtas slenkstis, ne pristatytas kompiuteris.

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

Akimirka, kai kreivė pagaliau pasuko teisinga kryptimi

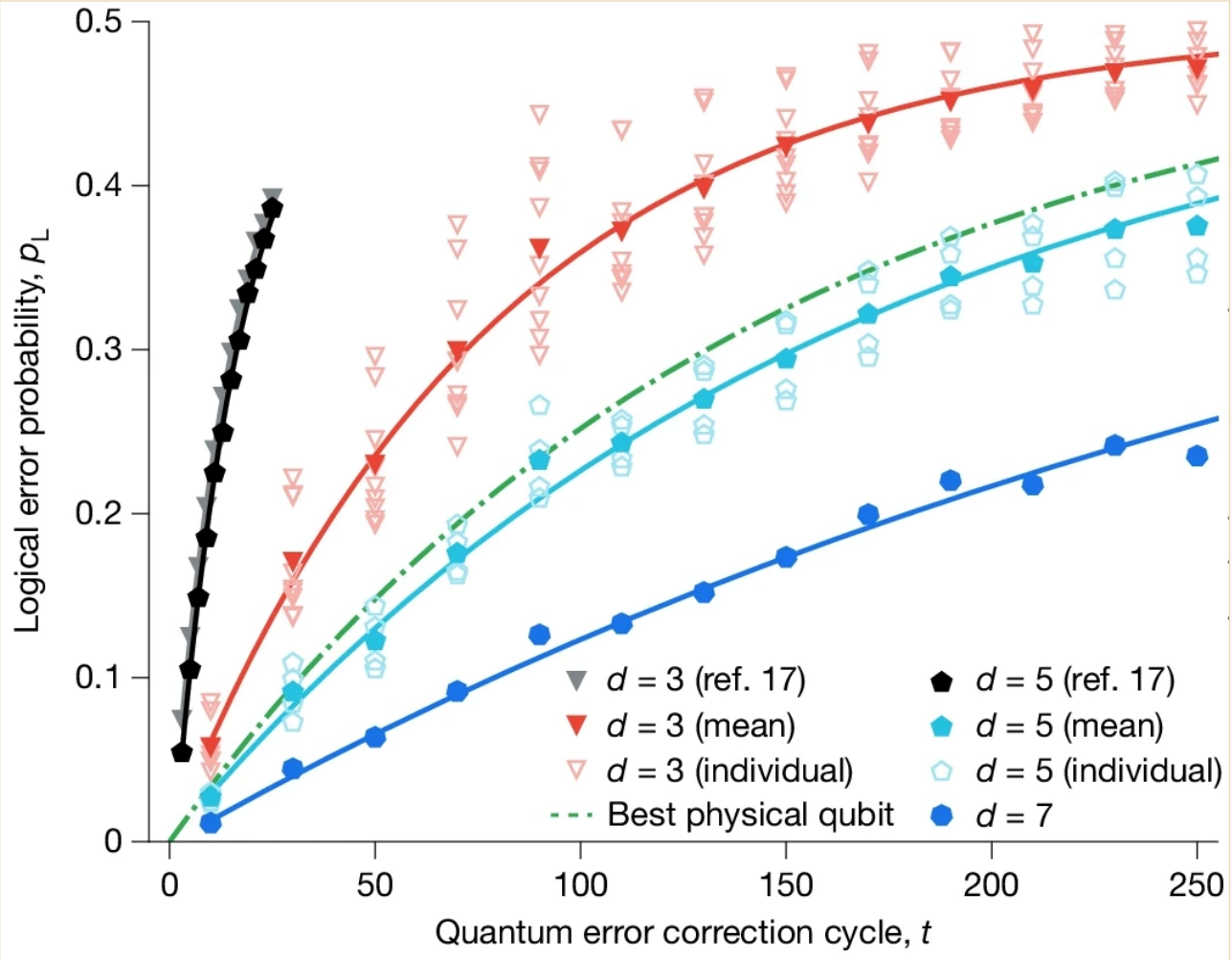
Trisdešimt metų kvantinė klaidų korekcija rėmėsi pažadu, kurio eksperimentai dar nebuvo aiškiai ištesėję. Teorija sako: jei vieną kvantinės informacijos vienetą – vieną *loginį* kubitą – paskirstome daugeliui triukšmingų fizinių kubitų ir jei jie pakankamai geri, pridėjus daugiau kubitų loginis kubitas turėtų tapti *patikimesnis*, o klaidų dažnis didėjant kodui mažėti eksponentiškai. Tačiau yra svarbi sąlyga: žemiau kritinio triukšmo slenksčio daugiau kubitų padeda, o virš jo jie tik prideda daugiau triukšmo. Ankstesni eksperimentai arba likdavo netinkamoje šios ribos pusėje, arba tendencijos neparodydavo pakankamai aiškiai. Didesnis kodas veikė blogiau, ne geriau.

2024 m. gruodį Google Quantum AI pranešė pirmą kartą aiškiai pademonstravusi kitą režimą. Naujos kartos superlaidžiajame procesoriuje Willow komanda sukūrė 3, 5 ir 7 kodo atstumo paviršinio kodo atmintis ir pamatė, kad didinant kodą loginės klaidos dažnis kaskart *mažėja*: kas du atstumo vienetus – koeficientu $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$. Didžiausia, 101 kubito ir 7 atstumo, atmintis saugojo loginį kubitą su $0.143\% \pm 0.003\%$ klaidos tikimybe per korekcijos ciklą ir, svarbiausia, išliko patikima *ilgiau už geriausią fizinį kubitą*, iš kurio buvo sudaryta – 2.4 ± 0.3 karto. Tai vadinama veikimu „virš atsipirkimo ribos“ (*beyond breakeven*): pirmą kartą šioje aparatinėje platformoje visa klaidų korekcijos našta davė gryną naudą.

Tai tikras etapas, tačiau svarbu tiksliai pasakyti, koks. Jis rodo, kad mastelio didinimo kryptis pagaliau teisinga. Tai nėra veikiantis kvantinis kompiuteris, ir pats straipsnis to neteigia.

Ką reiškia „paviršinis kodas“, „atstumas“ ir „žemiau slenksčio“?

Loginis kubitas – vienas apsaugotas kvantinės informacijos vienetas, užkoduotas daugelyje fizinių kubitų. **Paviršinis kodas** – konkretus tokio kodavimo būdas dvimatėje gardelėje, kur papildomi matavimo kubitai nuolat tikrina klaidas netrikdydami saugomos informacijos. Kodo **atstumas** d nėra fizinis nuotolis: tai mažiausias tinkamai išsidėsčiusių klaidų skaičius, galintis sugadinti loginį kubitą kodui to nepastebėjus. Didesnis d reiškia didesnį ir atsparesnį kodo plotą: jam reikia daugiau fizinių kubitų (apytikriai $2d^2 - 1$) ir jis gali ištaisyti daugiau vienu metu atsiradusių klaidų – iki $(d - 1)/2$. Taigi čia bandyti 3, 5 ir 7 atstumai gali ištaisyti atitinkamai 1, 2 ir 3 vienalaikes klaidas ir teoriškai reikalauja maždaug 17, 49 ir 97 fizinių kubitų. Google 7 atstumo atmintis naudojo 101 kubitą, šiek tiek daugiau už vadovėlinį minimumą.
Fraze **„žemiau slenksčio“** nusakoma visa rezultato esmė. Klaidų korekcija padeda tik tada, kai fizinių kubitų klaidų lygis yra žemiau kritinės ribos; tada didinant atstumą loginės klaidos slopinamos eksponentiškai. Tai aprašo slopinimo koeficientas Λ: jei $\Lambda > 1$, kodo didinimas padeda, o kuo Λ didesnis, tuo geriau. Google gavo $\Lambda \approx 2.14$, vadinasi, padidinus atstumą dviem vienetais loginės klaidos dažnis sumažėjo maždaug perpus. Visa naujiena yra tai, kad Λ aiškiai viršija 1.



Loginės klaidos kaupimasis per korekcijos ciklus 3, 5 ir 7 atstumo atmintims (iš viršaus į apačią). Svarbiausia žalia brūkšninė linija – *geriausias vienas fizinis kubitas* luste. 7 atstumo atminties kreivė (mėlyna, žemiausia) kyla lėčiau, todėl užkoduotas kubitas tarnauja ilgiau už geriausią fizinį kubitą, iš kurio sudarytas – 2.4× virš „breakeven“. Tai gyvavimo trukmės rezultatas; veikimą žemiau slenksčio aprašo tekste pateiktas $\Lambda = 2.14$, kai kodas didinamas nuo 3 iki 5 ir 7 atstumo.

Ką padarė autoriai

- Dviejuose Willow lustuose sukūrė paviršinio kodo atmintis: 105 kubitų procesoriuje paleido 3, 5 ir 7 atstumo kodus mastelio bandymui (didžiausia buvo 101 kubito, 49 duomenų kubitų, 7 atstumo atmintis), o 72 kubitų procesoriuje – 5 atstumo atmintį su realaus laiko dekoderiu ir didelio atstumo pasikartojimo kodus.
- Matavo, kaip didinant kodo atstumą nuo 3 iki 5 ir 7 keičiasi loginės klaidos tikimybė *per ciklą*, ir iš jos apskaičiavo slopinimo koeficientą Λ.
- Loginio kubito gyvavimo trukmę palygino su geriausiu atskiru fiziniu kubitu tame pačiame luste, kad patikrintų atsipirkimo ribą.
- 5 atstumo kodą paleido su **realaus laiko dekoderiu** – klasikine aparatine įranga, interpretuojančia

klaidų patikras joms atsirandant – iki milijono ciklų, kad parodytų, jog korekcija gali veikti kartu su įrenginiu.
- Paprastesnius **pasikartojimo kodus** išplėtė iki 29 atstumo, ieškodami retų giliųjų klaidų šaltinių, nustatančių galutinę našumo ribą.

Ką jie nustatė

- **Kodas veikia žemiau slenksčio.** Kas du atstumo vienetus loginė klaida per ciklą mažėjo koeficientu $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ – aiškus eksponentinis slopinimas, kurį teorija seniai numatė, bet joks ankstesnis procesorius nebuvo įtikinamai parodęs.
- **7 atstumo atmintis pasiekė 0.143% ± 0.003% klaidos tikimybę per ciklą** ir veikė **2.4 ± 0.3 karto ilgiau** už geriausią savo fizinį kubitą – taigi viršijo atsipirkimo ribą.
- **Realaus laiko dekodavimas spėjo paskui sistemą.** Esant 5 atstumui dekoderio vidutinė delsa buvo 63 mikrosekundės, palyginti su 1.1 mikrosekundės ciklo trukme, ir sistema taip veikė milijoną ciklų. Korekcija vyko realiu laiku, o ne vien vėliau analizuojant duomenis.
- **Išlieka retas gilus klaidų šaltinis.** Pasikartojimo kodų bandymuose našumą galiausiai ribojo koreliuotų klaidų protrūkiai, pasitaikantys maždaug **kartą per valandą** (apie kartą per 3×10^9 ciklų). Jie sukuria klaidų „grindis“ ties maždaug 10^{-10}, o jų kilmė, anot autorių, **dar nesuprasta**.

Ko tai neįrodo

- Tai **nėra skaičiavimus atliekantis kvantinis kompiuteris**. Čia parodyta kvantinė *atmintis*: ji saugo ir apsaugo vieną loginį kubitą. Ji neatlieka loginių operacijų (vartų) tarp loginių kubitų ir nevykdo algoritmo.
- Iki praktiškai naudingo įrenginio **neliko „tik vieno kubito“**. 7 atstumo loginiam kubitui reikia maždaug 101 fizinio kubito, o ~0,1% klaidos per ciklą vis dar gerokai viršija maždaug 10^{-6}–10^{-10} lygį, kurio reikia realiems algoritmams. Norint užpildyti šį tarpą teks smarkiai didinti kodų atstumą, vadinasi, naudoti daug daugiau fizinių kubitų kiekvienam loginiam kubitui; naudingi algoritmai dar reikalautų *tūkstančių* loginių kubitų vienu metu. Fizinių kubitų skaičius tada siektų milijonus.
- Žodžiai **„jei pavyks išplėsti mastelį“** yra esminė sąlyga. Straipsnio išvada – kad tokia įrenginio kokybė, *jei būtų išlaikyta didinant mastelį*, galėtų atitikti didelių algoritmų reikalavimus. Teisingą tendenciją parodyti su vienu loginiu kubitu nėra tas pats, kas pastatyti didelę mašiną, ir niekas negarantuoja, kad ši tendencija išliks daug didesnėse sistemose.
- **Nepaaiškintos klaidų grindys tebėra reali problema.** Koreliuoti protrūkiai, ribojantys pasikartojimo kodų našumą, yra keliais dydžio laipsniais didesni, nei tikėtasi, ir kol jų priežastis nesuprasta, jie trukdytų didesnėms gedimams atsparioms sistemoms. Tai aiškiai įvardyta atvira problema, ne išspręsta smulkmena.
- Rezultatas nieko nesako apie **šifravimo laužymą ar praktiškai naudingą „kvantinę viršenybę“**. Tam reikalinga visa gedimams atspari mašina, kuriai šis darbas yra tik vienas pamatinis žingsnis.

Kiek tvirti yra įrodymai

- **Pagrindinis teiginys tvirtas ir svarbus.** Žemiau slenksčio veikianti atmintis, aiškus eksponentinis slopinimas per tris kodo atstumus, gyvavimo trukmė virš atsipirkimo ribos ir veikiantis realaus laiko dekoderis – būtent tokio derinio sritis ilgai siekė. Jis parodytas tiesiogiai, o ne numanomas. Tai ne vien reklaminė interpretacija, o realus inžinerinis rezultatas iš vienos stipriausių grupių šioje srityje.
- **Patys autoriai atsargiai apibrėžia jo ribas.** Jie kalba apie žemiau slenksčio veikiančią *atmintį,* patys iškelia nepaaiškintų koreliuotų klaidų problemą ir ateities perspektyvas sąlygoja aiškiu „jei pavyks išplėsti mastelį“. Perdėjimas dažniau atsiranda aplinkiniame viešame pasakojime, kuriame „klaidas taisanti atmintis gerėjo didinama“ paverčiama „kvantinis kompiuteris jau čia“.
- **Tikslus statusas – gerai atliktas pamatinis žingsnis.** Vienas loginis kubitas jau apsaugotas pakankamai gerai, kad papildomas perteklumas pagaliau padėtų. Tačiau dar laukia ilgas ir negarantuotas mastelio didinimas, loginiai vartai ir nepaaiškintos klaidos.

Kodėl tai svarbu

Gedimams atspari kvantinė kompiuterija ilgą laiką turėjo vištos ir kiaušinio problemą: naudingi įrenginiai reikalauja klaidų lygio, kurio vienas fizinis kubitas pasiekti negali, o sprendimas – klaidų korekcija – padeda tik tada, kai aparatinė įranga jau pakankamai gera, kad būtų žemiau slenksčio. Net vieną kartą peržengus šią ribą su vienu loginiu kubitu klausimas keičiasi iš „ar tai apskritai įmanoma?“ į „kiek toli ir kaip greitai tai galima išplėsti?“. Tai tikras ir reikšmingas pokytis.

Tačiau būtent tas atsargumas, dėl kurio rezultatas patikimas, turėtų riboti ir istoriją aplink jį. Tai gerai padėta pirmoji pamato plyta, ne visas pastatas – ir patys autoriai tai sako. Per artimiausius metus kvantinę kompiuteriją verta vertinti pagal mažiau įspūdingą, bet svarbesnę kreivę: ar slopinimo koeficientas išliks didėjant kodams, ar loginius vartus pavyks atlikti taip pat švariai kaip saugoti loginę atmintį ir ar bus paaiškinta paslaptinga maždaug kartą per valandą pasitaikanti klaida.

Trumpa santrauka

Google Quantum AI pirmą kartą aiškiai parodė, kad paviršinio kodo kvantinė atmintis gali veikti *žemiau slenksčio*: didinant kodą nuo 3 iki 5 ir 7 atstumo, loginės klaidos dažnis mažėjo eksponentiškai – maždaug 2,14 karto kas du atstumo vienetus. Didžiausia, 101 kubito ir 7 atstumo, atmintis veikė ilgiau už geriausią savo fizinį kubitą, taigi peržengė atsipirkimo ribą, o klaidų korekcija vyko realiu laiku. Tai tikras ir ilgai lauktas kvantinių kompiuterių inžinerijos etapas. Tačiau tai vis dar vienas loginis kubitas, naudojamas kaip atmintis; jo klaidų dažnis gerokai per didelis realiems algoritmams, loginės operacijos neatliktos, išlieka pačių autorių pabrėžtos nepaaiškintos klaidų grindys, o mastelį dar reikėtų padidinti daugeliu dydžio laipsnių. Peržengtas tikras slenkstis – ne pristatytas kvantinis kompiuteris.

Šaltiniai

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