



The CLEAN PAPER

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

Augnablikið þegar ferillinn beygði loksins í rétta átt

Google Quantum AI sýndi í fyrsta sinn skýrt að surface-code skammtaminni getur starfað undir villuþröskuldi: þegar kóðafjarlægð jókst úr 3 í 5 í 7 lækkaði rökræn villutíðni veldislega. Stærsta 101-skammta-bita minnið lifði lengur en besti eðlisfræðilegi skammtabitinn. Þetta er mikilvægt verkfræðilegt þröskuldsskref, en aðeins eitt rökrænt minnisbitakerfi, án rökrænna aðgerða og enn langt frá villutíðni sem hagnýt reiknirit þurfa.

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

Augnablikið þegar ferillinn beygði loksins í rétta átt

Í þrjátíu ár hefur skammtavilluleiðrétting byggst á loforði sem aldrei hafði verið sýnt hreint í vélbúnaði. Kenningin segir að ef ein eining skammtaupplýsinga — einn rökrænn skammtabiti — er dreifð yfir marga hávaðasama eðlisfræðilega skammtabita, og ef þeir eru nógu góðir, þá eigi fleiri skammtabitar að gera rökræna bitann *betri*: villutíðnin ætti að falla veldisvísis þegar kóðinn stækkar. En það er stórt „ef“. Fyrir neðan ákveðið hávaðamark hjálpar meiri endurtekning; fyrir ofan það bætir hún bara við meiri hávaða. Allar fyrri tilraunir höfðu verið röngu megin við þetta mark eða ekki sýnt þróunina nægilega skýrt. Stærri kóði gerði niðurstöðuna verri, ekki betri.

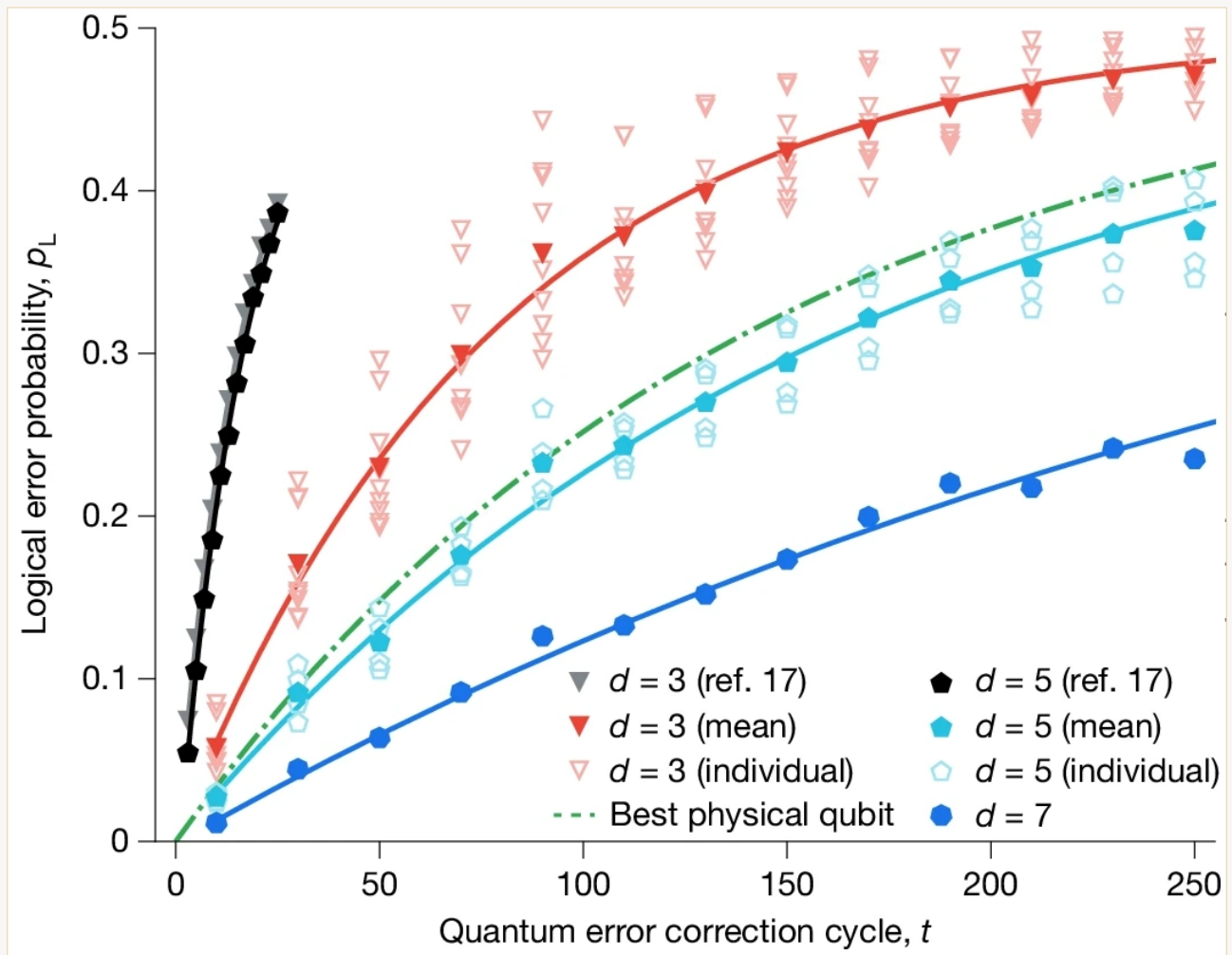
Í desember 2024 greindi Google Quantum AI frá fyrstu skýru sýningunni á hinu ástandinu. Á Willow, nýjustu kynslóð ofurleiðandi örgjörva fyrirtækisins, byggðu rannsakendurnir surface-code minni með kóðafjarlægðir 3, 5 og 7 og sáu rökræna villutíðni *lækka* í hvert sinn sem kóðinn stækkaði — um stuðulinn $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ fyrir hver tvö skref í fjarlægð. Stærsta minnið, 101-skammta-bita distance-7 minni, hélt einum rökrænum skammtabita með $0,143\% \pm 0,003\%$ villutíðni á hverri leiðréttingarlotu. Og aðalatriðið innan aðalatriðisins: það lifði *lengur en besti einstaki eðlisfræðilegi skammtabitinn* á örgjörvanum, um stuðulinn $2,4 \pm 0,3$. Það kallast að fara „fram yfir jafnvægispunkt“ (*beyond breakeven*) og er í fyrsta sinn sem allt yfirbygging villuleiðréttingar skilar hreinum ávinningi á þessum vélbúnaði.

Þetta er raunverulegur áfangi og mikilvægt er að segja nákvæmlega hvers konar áfangi. Hann sýnir að skölinin fer nú í rétta átt. Þetta er ekki starfandi skammtatölva og greinin heldur því ekki fram.

Hvað „surface code“, „distance“ og „below threshold“ þýða

Rökrænn skammtabiti er ein varin eining skammtaupplýsinga sem er kóðuð yfir marga eðlisfræðilega skammtabita. **Surface code** er sérstök leið til að gera þetta á tvívíðu neti, þar sem auka „mæli“-skammtabitar fylgjast stöðugt með villum án þess að eyðileggja geymda skammtaupplýsinguna. Kóðafjarlægðin d er ekki raunveruleg lengd: hún er minnsti fjöldi rétt staðsettra villa sem getur spilt rökræna skammtabitnum án þess að kóðinn greini þær. Stærri d þýðir stærri og sterkari plástur — fleiri eðlisfræðilega skammtabita (gróflega $2d^2 - 1$) og getu til að leiðrétta fleiri samtímis villur, allt að $(d - 1)/2$. Stærðirnar 3, 5 og 7 sem hér voru prófaðar leiðrétta því 1, 2 og 3 samtímis villur og nota gróflega 17, 49 og 97 eðlisfræðilega skammtabita — distance-7 minnið sem Google smíðaði notaði 101, aðeins yfir kennslubókarlágmarkinu.

„**Fyrir neðan mark**“ (*below threshold*) er lykilhugtakið. Villuleiðrétting hjálpar aðeins ef eðlisfræðileg villutíðni er fyrir neðan gagnrýnið gildi; þar veldur hver aukning í fjarlægð veldisvísislækkun rökrænnar villutíðni. Dempunarstuðullinn Λ mælir þetta — $\Lambda > 1$ þýðir að stærri kóði hjálpar og hærra Λ er betra. Google mælir $\Lambda \approx 2,14$, sem þýðir að hver tveggja skrefa aukning í fjarlægð skar rökræna villutíðnina um það bil í tvennt. Að Λ sé greinilega yfir 1 er kjarni niðurstöðunnar.



Hvernig rökræn villa safnast upp yfir leiðréttingarlotur fyrir distance-3, -5 og -7 minni (ofan frá og niður). Línan sem skiptir máli er græna strikalínan — *besti einstaki eðlisfræðilegi skammtabitinn* á örgjörvanum. Distance-7 minnið (blátt, neðst) safnar villu hægar en sú lína, þannig að kóðaði skammtabitinn lifir lengur en besti eðlisfræðilegi bitinn sem hann er byggður úr — „beyond breakeven“, um $2,4\times$. Þetta er líftímamælingin; sjálf undir-marks dempunin ($\Lambda = 2,14$ þegar kóðinn stækkar $3 \rightarrow 5 \rightarrow 7$) kemur úr tölunum í textanum.

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

Hvað höfundarnir gerðu

- Byggðu surface-code minni á tveimur Willow-flögum: 105-skammta-bita örgjörva sem keyrði distance-3, -5 og -7 kóða fyrir skölunarprófið (stærsta útgáfan var 101-skammta-bita distance-7 minni með 49 gagnaskammtabítum) og 72-skammta-bita örgjörva sem keyrði distance-5 minni með rauntímaafkóðara auk háfjarlægðar endurtekingarkóða.
- Mældu hvernig rökræn villa **á hverri lotu** breyttist þegar kóðafjarlægð jókst frá 3 í 5 í 7 og reiknuðu dempunarstuðulinn Λ .
- Báru líftíma rökræna skammtabitans saman við besta einstaka eðlisfræðilega skammtabitann á sömu flögu til að prófa hvort jafnvægispunkti væri náð.
- Keyrðu distance-5 kóðann með **rauntímaafkóðara** — klassískum vélbúnaði sem túlkar vil-

lumælingar jafnóðum og þær myndast — í allt að milljón lotur til að sýna að villuleiðréttingin getur starfað meðan vélin keyrir.

- Prófuðu einfaldari **endurtekningarkóða** allt að distance 29 til að leita að sjaldgæfum, djúpum villum sem setja neðri mörk á frammistöðuna.

Hvað þeir fundu

- **Kóðinn er fyrir neðan markið.** Rökræn villa á lotu lækkaði með $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ fyrir hverja tveggja skrefa hækkun í fjarlægð — skýr veldisvísisdempun sem kenningin spáði en enginn örgjörvi hafði áður sýnt svo ótvírætt.
- **Distance-7 minnið náði 0,143% $\pm$ 0,003% villu á lotu** og lifði **2,4 $\pm$ 0,3 sinnum lengur** en besti eðlisfræðilegi skammtabitinn — fram yfir jafnvægispunkt.
- **Rauntímaafkóðun hélt í við kerfið.** Afkóðarinn hafði að meðaltali 63 míkrósekúndna töf við distance 5 á móti 1,1 míkrósekúndna lotutíma og starfaði yfir milljón lotur — villuleiðréttingin var virk á meðan kerfið keyrði, ekki aðeins greind eftir á.
- **Sjaldgæf og djúp villuuppspretta er enn til staðar.** Í endurtekningarkóðunum takmarkaðist frammistaða að lokum af samhengdum villukippum sem gerðust um **einu sinni á klukkustund** (um einu sinni í 3×10^9 lotum), og settu villugólf nálægt 10^{-10} . Uppruni þess er, að sögn höfundanna, **enn óskilinn**.

Hvað þetta sannar ekki

- Þetta er **ekki** skammtatölva sem framkvæmir útreikninga. Þetta er skammtaminni: það geymir og ver einn rökrænan skammtabita. Það framkvæmir ekki rökrænar aðgerðir (gates) milli rökrænna skammtabita og keyrir ekkert reiknirit.
- Þetta er **ekki** „bara einum skammtabita frá nytsamlegri vél“. Distance-7 rökrænn skammtabiti notar um 101 eðlisfræðilegan bita og 0,1% villa á lotu er enn miklu hærri en um 10^{-6} til 10^{-10} sem raunveruleg reiknirit þurfa. Að loka því bili krefst miklu stærri kóða — miklu fleiri eðlisfræðilegra bita fyrir hvern rökrænan bita — og nytsamleg reiknirit þurfa þúsundir rökrænna skammtabita samtímis. Þá fer heildarfjöldi eðlisfræðilegra skammtabita í milljónir.
- Orðin „**ef þetta skalar**“ skipta raunverulega máli. Niðurstaða greinarinnar er að frammistaða tækisins, *ef henni er skalað upp*, gæti uppfyllt kröfur stórra reiknirita. Að sýna rétta þróun í einum rökrænum skammtabita er ekki það sama og að hafa smíðað stóru vélina, og ekkert hér tryggir að þróunin haldist við miklu stærri kóða.
- **Óútskýrða villugólfíð er lifandi vandamál.** Samhengdu villukippirnir eru mörgum stærðargráðum stærri en búist var við og myndu, að sögn höfundanna, koma í veg fyrir stærri villuþolnar notkunir þar til uppruni þeirra er skilinn — opið vandamál, ekki leyst smáatriði.
- Greinin segir ekkert um **að brjóta dulkóðun eða „quantum supremacy“ í nytsamlegum verkefnum**. Það krefst heillar villuþolinnar tölvu sem þessi niðurstaða er aðeins grunnsteinn fyrir.

Hversu sterk eru gögnin?

- **Kjarnafullyrðingin er sterk og mikilvæg.** Undir-marks virkni með skýrri veldisvísisdempun yfir þrjár kóðastærðir, auk líftíma fram yfir jafnvægispunkt og virks rauntímaafkóðara, er nákvæmlega sú samsetning sem sviðið hefur reynt að ná. Hún er sýnd beint, ekki ályktuð. Þetta er raunveruleg verkfræðiniðurstaða frá leiðandi rannsóknarhópi, ekki bara markaðssetning.
- **Höfundarnir eru varkárir um gildissviðið.** Þau kalla þetta undir-marks *minni*, benda sjálf á óútskýrða villugólfið og setja framtíðina skýrt undir „ef þetta skalar“. Ýkjurnar, þegar þær birtast, koma frekar í umfjöllun sem breytir „villuleiðrétt minni batnaði þegar það stækkaði“ í „skammtatölvur eru komnar“.
- **Heiðarleg staða er grunnskref sem hefur verið tekið vel.** Einn rökrænn skammtabiti, varinn nógu vel til að meiri endurtekning hjálpi loksins — með langri, erfiðri og alls ekki tryggðri vegferð uppskalunar, rökrænna hliða og óskýrðra villa enn fram undan.

Af hverju þetta skiptir máli

Villupolin skammtaúrvinnsla hefur alltaf haft hænu-og-eggi vandamál: nytsamlegar vélar þurfa villutíðni sem enginn eðlisfræðilegur skammtabiti nær, og lausnin — villuleiðréttning — virkar aðeins ef vélbúnaðurinn er þegar nógu góður til að vera fyrir neðan mark. Að fara yfir þann þröskuld, jafnvel einu sinni og aðeins með einum rökrænum skammtabita, breytir spurningunni úr „er þetta yfirhöfuð hægt?“ í „hversu langt má skala þetta og hversu hratt?“ Það er raunveruleg breyting og þess vegna á niðurstaðan skilið athygli.

En sama nákvæmnin sem gerir niðurstöðuna trúverðuga ætti að tempra söguna í kringum hana. Þetta er fyrsti múrsteinninn grunnsins, vel lagður. Þetta er ekki húsið og þeir sem lögðu múrsteininn segja það sjálfir. Rétt leiðin til að fylgjast með skammtatölvum næstu ár er einmitt þessi óglæsilega ferill: heldur dempunarstuðullinn þegar kóðarnir stækka, er hægt að framkvæma rökrænar hliðar jafn hreint og rökrænt minni, og verður dularfulla einu-sinni-á-klukkustund villan nokkurn tíma útskýrð?

Í stuttu máli

Google Quantum AI sýndi í fyrsta sinn skýrt að surface-code skammtaminni getur starfað fyrir neðan villumark: þegar kóðinn stækkaði frá distance 3 í 5 í 7 lækkaði rökræn villutíðni veldisvísis (um $2,14 \times$ fyrir hver tvö skref), og stærsta minnið, 101-skammta-bita distance-7 minni, lifði lengur en besti eðlisfræðilegi skammtabitinn — fram yfir jafnvægispunkt — á meðan villuleiðréttningin keyrði í rauntíma. Þetta er raunverulegur og lengi eftirsóttur áfangi í verkfræði skammtatölva. En þetta er líka einn rökrænn skammtabiti sem virkar sem minni, með villutíðni enn langt frá því sem raunveruleg reiknirit krefjast, engar rökrænar aðgerðir framkvæmdar, óútskýrðu villugólfi sem höfundarnir sjálfir leggja áherslu á og uppskalunarveg margra stærðargráða fram undan. Raunverulegur þröskuldur yfirstiginn — ekki skammtatölva afhent.

Heimildir

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>