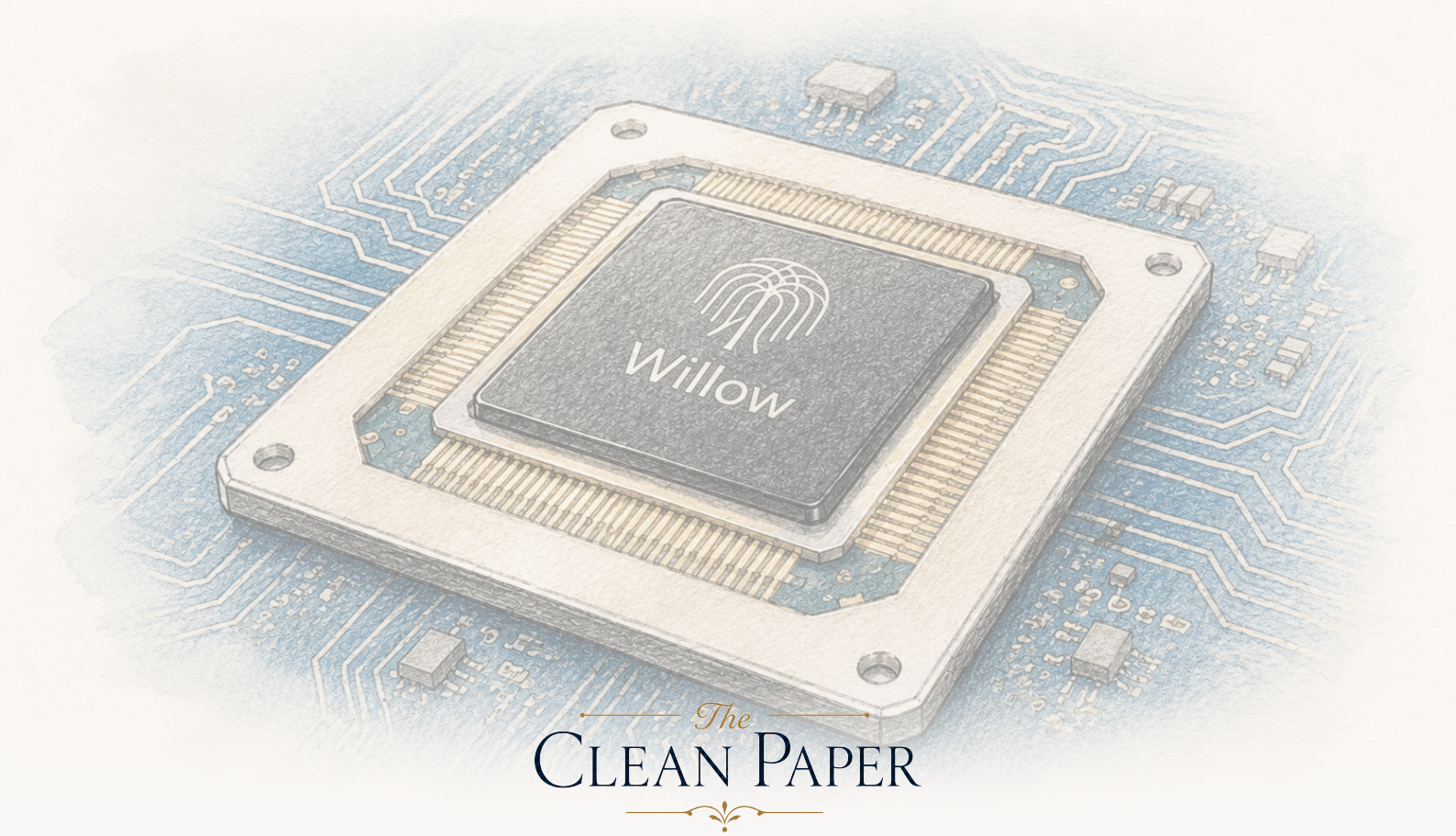


The Clean Paper

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

Քվանտային հիշողությունը վերջապես լավացավ՝ մեծանալով. իրական milestone-ը, բայց ոչ դեռ quantum computer

Google Quantum AI-ը առաջին անգամ մաքուր ցույց տվեց, որ surface-code quantum memory-ն կարող է աշխատել below threshold. distance-ը 3-ից 5, ապա 7 բարձրացնելիս logical error rate-ը exponential նվազեց՝ մոտ 2.14× յուրաքանչյուր երկու step-ի համար, իսկ 101-qubit distance-7 memory-ն իր լավագույն physical qubit-ից ավելի երկար ապրեց՝ beyond breakeven, real-time error correction-ով: Սա երկար սպասված engineering milestone է, բայց դեռ մեկ logical qubit է memory-ի դերում՝ իրական algorithm-ներին անհրաժեշտից շատ ավելի բարձր error rate-ով, առանց logical operation-ների և unexplained error floor-ով:

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

Այն պահը, երբ կորն առաջին անգամ ճիշտ ուղղությամբ թեքվեց

Երեսուն տարի քվանտային սխալ ուղղումը հենվում էր մի խոստման վրա, որը դեռ երբեք մաքուր ձևով չէր իրականացվել: Տեսությունն ասում է. եթե քվանտային տեղեկությունի մեկ միավորը՝ մեկ *տրամաբանական քուբիթ*, տարածեք բազմաթիվ noisy ֆիզիկական քուբիթների վրա, և եթե այդ ֆիզիկական քուբիթները բավական լավն են, ապա դրանցից *ավելի շատ* ավելացնելը պետք է տրամաբանական քուբիթը *ավելի լավ* դարձնի՝ կողը մեծանալիս սխալները էքսպոնենցիալ նվազեցնելով: Խնդիրը այդ «եթե»-ն է. critical աղմուկ շեմից ցածր ավելի շատ քուբիթը օգնում է, իսկ դրանից վեր՝ պարզապես ավելի շատ աղմուկ է ավելացնում: Նախորդ փորձերը կամ շեմի սխալ կողմում էին, կամ միտում-ը մաքուր չէին ցույց տվել: կողը մեծացնելը արդյունքը վատացնում էր, ոչ լավացնում:

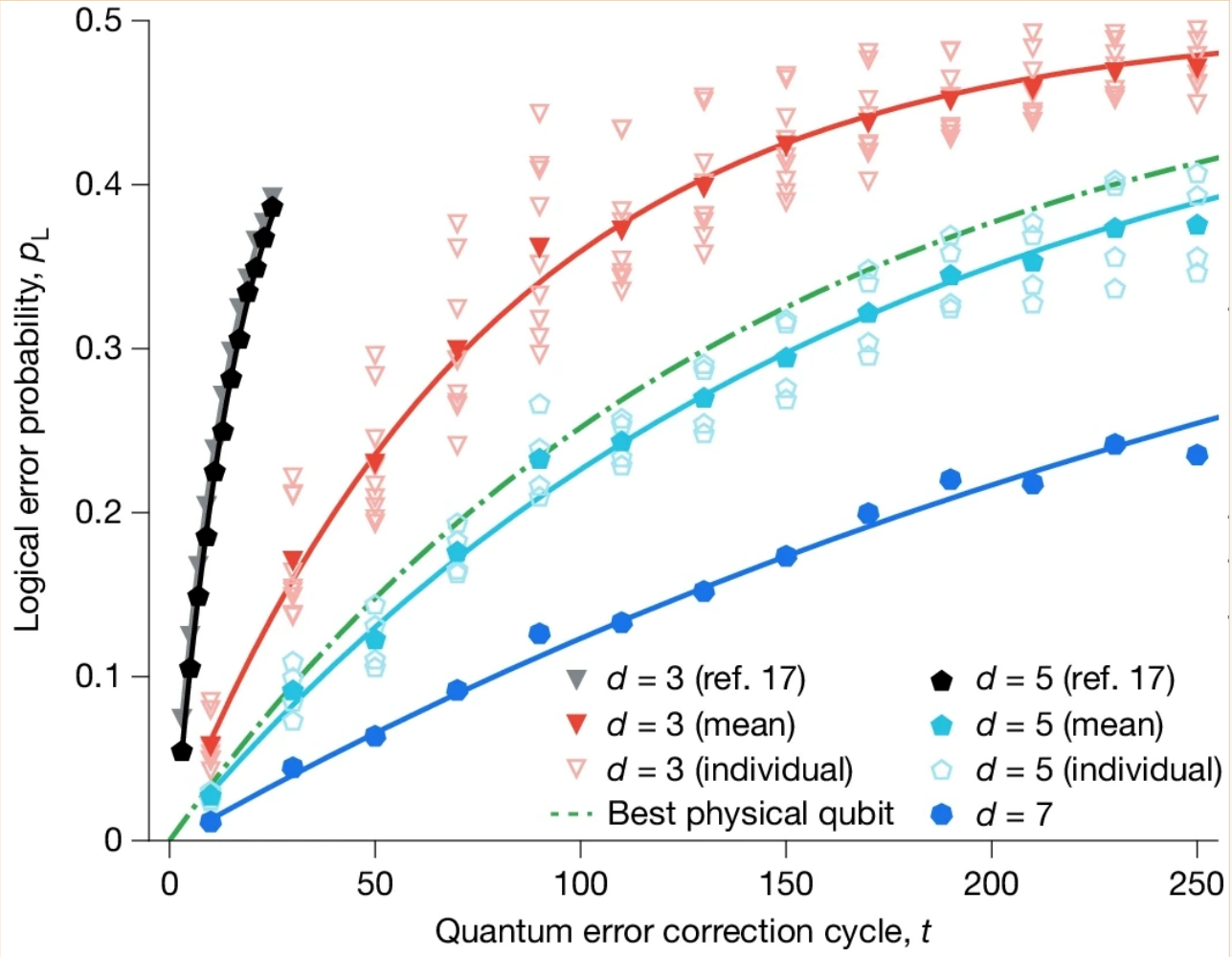
2024 թվականի դեկտեմբերին Google քվանտային ԱԲը հաղորդեց առաջին հստակ ցուցադրումը հակառակ regime-ի: Willow-ի՝ իրենց նորագույն superconducting պրոցեսոր-ների վրա նրանք մակերեսկոդ հիշողություններ կառուցեցին հեռավորություն 3, 5 և 7-ով և տեսան, որ տրամաբանական սխալի հաճախականությունը կողը մեծացնելիս ամեն անգամ *նվազում* է՝ յուրաքանչյուր երկու հեռավորություն քայլի համար $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ ճնշում գործոնով: Ամենամեծը՝ 101-քուբիթ հեռավորություն-7 հիշողությունն, մեկ տրամաբանական քուբիթ պահեց 0.143% ± 0.003% սխալ per ուղղում ցիկլով և՝ վերնագրի ամենակարևոր մասով, ապրեց *ավելի երկար, քան նույն չիպի լավագույն ֆիզիկական քուբիթը*՝ 2.4 ± 0.3 անգամ: Սա կոչվում է **սահմանից այն կողմ շահավետության շեմ**: Առաջին անգամ այս սարքավորում-ի վրա սխալ ուղղումի ամբողջ overhead-ը իր արժեքը վերադարձրեց:

Սա իրական հանգրվան է, և կարևոր է ճշգրտել՝ ինչ հանգրվան: Արդյունքը ցույց է տալիս, որ մասշտաբավորումը հիմա ճիշտ ուղղությամբ է գնում: Սա աշխատող քվանտային համակարգիչ չէ, և հոդվածը դա չի էլ պնդում:

> **Ինչ են նշանակում «մակերես code»-ը, «հեռավորություն»-ը և «below շեմ»-ը**
>
> **տրամաբանական քուբիթ**-ը քվանտային տեղեկությունի մեկ պաշտպանված միավոր է, կոդավորված բազմաթիվ ֆիզիկական քուբիթների վրա: **Surface կոդ**-ը այդ encoding-ի կոնկրետ մեթոդ է 2D ցանցի վրա, որտեղ լրացուցիչ չափել քուբիթներ անընդհատ ստուգում են սխալները՝ առանց պահված տեղեկությունը խանգարելու: կոդ **հեռավորություն** d-ն ֆիզիկական հեռավորություն չէ: Դա ճիշտ տեղերում առաջացած սխալների ամենափոքր թիվն է, որը կարող է տրամաբանական քուբիթը corrupt անել՝ առանց կոդի կողմից հայտնաբերվելու: Ավելի մեծ d-ն ավելի մեծ և կայուն patch է. այն ծախսում է ավելի շատ ֆիզիկական քուբիթ (մոտ $2d^2 - 1$) և միաժամանակ ավելի շատ սխալ է ուղղում՝ մինչև $(d - 1)/2$: Այսպիսով այստեղ փորձարկված distances 3, 5 և 7-ը ուղղում են համապատասխանաբար 1, 2 և 3 simultaneous

սխալ և տեսականորեն պահանջում մոտ 17, 49 և 97 ֆիզիկական քուբիթ: Google-ի հեռավորություն-7 հիշողությունն օգտագործել է 101՝ մի փոքր ավելի, քան textbook minimum-ը:

Below շեմ-ը կարևոր արտահայտությունն է: սխալ ուղղումը օգնում է միայն այն դեպքում, երբ ֆիզիկական սխալի հաճախականությունը կրիտիկական արժեքից ցածր է: Այդ ռեժիմում հեռավորության յուրաքանչյուր աճ տրամաբանական սխալի հաճախականությունը էքսպոնենցիալ ճնշում է: ճնշում գործոն Λ-ն չափում է դա. Λ > 1 նշանակում է կողը մեծացնելն օգնում է, և որքան բարձր է Λ-ն, այնքան լավ: Google-ը հայտնում է Λ ≈ 2.14, այսինքն՝ հեռավորության յուրաքանչյուր երկուքայլ աճը տրամաբանական սխալի հաճախականությունը մոտ կեսով նվազեցրել է: Հենց այն, որ Λ-ն հստակ 1-ից մեծ է, ամբողջ արդյունքի սիրտն է:



Ինչպես է տրամաբանական սխալը կուտակվում ուղղում ցիկլների ընթացքում հեռավորություն-3, -5 և -7 հիշողությունների համար՝ վերևից ներքև: Դիտելու հիմնական գիծը կանաչ dashed-ն է՝ չիպի *լավագույն մեկ ֆիզիկական քուբիթը*: հեռավորություն-7 հիշողությունն՝ կապույտ, ամենացածր curve-ը, այդ գծից ավելի դանդաղ է սխալ կուտակում, այսինքն կոդավորված քուբիթը ապրում է ավելի երկար, քան այն լավագույն ֆիզիկական քուբիթը, որոնցից կառուցված է՝ 2.4× սահմանից այն կողմ շահավետության

շեմ: Սա lifetime արդյունքն է. below-շեմ ճնշումը ինքնին (Λ = 2.14, երբ հեռավորությունը 3-ից 5, ապա 7 է աճում) տեքստի թվերում է:

Ինչ արեցին հեղինակները

- Երկու Willow չիպի վրա կառուցեցին մակերեսկոդ հիշողություններ: 105-քուբիթ պրոցեսոր-ը գործարկեց մասշտաբավորում թեստի հեռավորություն-3, -5 և -7 կոդերը՝ ամենամեծը 101-քուբիթ, 49-տվյալներքուբիթ հեռավորություն-7 հիշողություն: 72-քուբիթ պրոցեսոր-ը գործարկեց հեռավորություն-5 հիշողություն՝ իրականժամանակ decoder-ով, ինչպես նաև բարձրհեռավորություն կրկնության կոդեր:
- Չափեցին, թե տրամաբանական սխալը *per ցիկլ* ինչպես է փոխվում կոդ հեռավորությունը 3-ից 5, ապա 7 բարձրացնելիս, և դրանից հանեցին Λ ճնշում գործոնը:
- տրամաբանական քուբիթի lifetime-ը համեմատեցին նույն չիպի լավագույն անհատ ֆիզիկական քուբիթի հետ՝ շահավետության շեմը փորձարկելու համար:
- հեռավորություն-5 կոդը գործարկեցին **իրականժամանակ decoder**-ով՝ դասական սարքավորում, որը սխալ ստուգումները մեկնաբանում է գրեթե նույն արագությամբ, որով դրանք ստեղծվում են, մինչև մեկ միլիոն ցիկլ՝ ցույց տալու, որ սխալ ուղղումը կարող է live աշխատել մեքենաի հետ:
- Ավելի պարզ **կրկնության կոդ**-երը հասցրին մինչև հեռավորություն 29՝ փնտրելով հազվադեպ, խոր սխալ աղբյուրներ, որոնք արդյունավետության համար floor են սահմանում:

Ինչ գտան

- **կոդը below շեմ է**: տրամաբանական սխալ per ցիկլը հեռավորությունի յուրաքանչյուր երկուքայլ աճի համար նվազեց Λ = 2.14 ± 0.02 գործոնով: Սա մաքուր էքսպոնենցիալ ճնշում է՝ այն վարքը, որը տեսությունն վաղուց խոստանում էր և ոչ մի պրոցեսոր դեռ համոզիչ կերպով չէր ցույց տվել:
- **հեռավորություն-7 հիշողությունն հասավ 0.143% ± 0.003% սխալ per ցիկլի** և իր լավագույն ֆիզիկական քուբիթից **2.4 ± 0.3 անգամ ավելի երկար ապրեց**՝ սահմանից այն կողմ շահավետության շեմ:
- **իրականժամանակ decoding-ը հասցրեց մեքենաին**: հեռավորություն 5-ի դեպքում ապակոդավորիչի միջին ուշացումը 63 միկրովայրկյան էր՝ 1.1-միկրովայրկյան ցիկլ ժամանակի պայմաններում, և դա պահպանվեց մեկ միլիոն ցիկլի ընթացքում: սխալ ուղղումը աշխատում էր իրական ժամանակում, ոչ միայն հետագա վերլուծությունում:
- **Մնում է հազվադեպ, խոր սխալ աղբյուր**: Repetition-կոդ թեստերում արդյունավետությ վերջում սահմանափակվեց correlated սխալ burst-երով, որոնք լինում էին մոտ

ժամը մեկ անգամ՝ մոտ 3×10^9 ցիկլից մեկում, առաջացնելով մոտ 10^{-10} սխալ floor: Հեղինակներն ասում են՝ դրա պատճառը **դեռ հասկանալի չէ**:

Ինչ սա չի ապացուցում

- Սա **քվանտային համակարգիչ չէ, որը computation է անում**: Սա քվանտային *հիշողություն* է՝ պահում և պաշտպանում է մեկ տրամաբանական քուբիթ: Այն տրամաբանական քուբիթների միջև տրամաբանական գործողություն կամ դարպաս չի կատարում և ալգորիթմ չի աշխատեցնում:
- Սա **օգտակար մեքենաից մեկ քուբիթ հեռու լինել չէ**: հեռավորություն-7 տրամաբանական քուբիթը ծախսում է մոտ 101 ֆիզիկական քուբիթ: 0.1% սխալ per ցիկլը դեռ շատ բարձր է այն մոտ 10^{-6}–10^{-10} միջակայքից, որը իրական ալգորիթմներին է պետք: Այդ տարբերությունը փակելու համար պետք են շատ ավելի մեծ հեռավորություններ՝ յուրաքանչյուր տրամաբանական քուբիթի համար շատ ավելի շատ ֆիզիկական քուբիթ, իսկ օգտակար ալգորիթմները միաժամանակ *հազարավոր* տրամաբանական քուբիթ են պահանջում: Ֆիզիկական քուբիթ budget-ը կարող է հասնել միլիոնների:
- Հոդվածի **«եթե մասշտաբավորվի»**-ը կարևոր սահմանափակում է: Իր եզրակացության մեջ հոդվածը ասում է, որ սարք արդյունավետությունը *եթե սանդղակ արվի*, կարող է բավարարել մեծ ալգորիթմների պահանջները: Մեկ տրամաբանական քուբիթի վրա ճիշտ միտում ցույց տալը նույնը չէ, ինչ մասշտաբավորված մեքենա կառուցելը, և այստեղ ոչինչ չի երաշխավորում, որ միտում-ը շատ ավելի մեծ չափերի վրա նույնը կմնա:
- **Անբացատրելի սխալի ստորին սահմանը իրական բաց խնդիր է**: Կապակցված պոռթկումները, որոնք սահմանափակում են repetition-կոդ արդյունավետությունը, հեղինակների խոսքով մի քանի կարգով ավելի մեծ են սպասվածից և, մինչև հասկացվելը, կարող են խանգարել ավելի մեծ խափանումադիմացկուն կիրառումներին: Սա բաց խնդիր է, ոչ փակված մանրուք:
- Արդյունքը ոչինչ չի ասում **գաղտնագրում կոտրելու կամ օգտակար առաջադրանքների համար «քվանտային գերակայություն»-ի** մասին: Դրա համար պետք է ամբողջական խափանումադիմացկուն մեքենա, որի հիմք stone-երից մեկն է այս արդյունքը, ոչ ինքնին ցուցադրումը:

Որքա՞ն ուժեղ է ապացույցը

- **Հիմնական պնդումը ուժեղ և կարևոր է**: Երեք կոդ հեռավորության վրա հստակ էքսպոնենցիալ ճնշումով շեմից ցածր աշխատանք, և սահմանից այն կողմշահավետության շեմ lifetime և աշխատող իրականժամանակ decoder՝ հենց այն համադրությունն է, որ դաշտը փորձում էր հասնել: Այն ցուցադրված է ուղիղ, ոչ անուղղակի եզրակացությունով: Սա գովազդային չափազանցություն չէ, այլ իրական ինժեներական արդյունք առաջատար խմբից:

- **Հեղինակները սահմանների հարցում զգույշ են**: Նրանք արդյունքը նկարագրում են որպես below-շեմ *հիշողություն*, իրենք են մատնանշում unexplained correlated-սխալի ստորին սահմանը և ապագայի մասին խոսելիս հատուկ պահում «եթե մասշտաբավորվի» վերապահումը: Չափազանցումը հիմնականում surrounding ծածկույթում է, երբ «սխալուղղված հիշողություն քուբիթը մեծանալիս լավացավ» դարձնում են «քվանտային հաշվարկը արդեն այստեղ է»:
- **Ազնիվ կարգավիճակը հիմքային քայլ է**: Մեկ տրամաբանական քուբիթ, այնքան լավ պաշտպանված, որ redundancy-ն վերջապես օգնում է, բայց առջևում երկար, դժվար և ոչ երաշխավորված ճանապարհ է՝ մասշտաբավորում, տրամաբանական դարպասներ և unexplained սխալներ:

Ինչու է սա կարևոր

խափանումադիմացկուն քվանտային computing-ը միշտ մի փոքր chicken-and-egg խնդիր էր հիշեցնում: Օգտակար մեքենաներին պետք են սխալի հաճախականություններ, որոնց ոչ մի ֆիզիկական քուբիթ չի հասնում, իսկ լուծումը՝ սխալ ուղղումը, աշխատում է միայն այն ժամանակ, երբ սարքավորում-ն արդեն բավական լավ է շեմից ցածր լինելու համար: Այդ գիծը թեկուզ մեկ անգամ, մեկ տրամաբանական քուբիթի վրա անցնելը հարցը փոխում է «ընդհանրապես հնարավո՞ր է» ձևից դեպի «որքա՞ն հեռու և որքա՞ն արագ կարելի է սանդղակ անել»: Սա իրական և կարևոր փոփոխություն է:

Բայց հենց այն նույն զգուշությունը, որը արդյունքը վստահելի է դարձնում, պետք է զսպի դրա շուրջ պատմությունը: Սա հիմքի առաջին լավ դրված աղյուսն է: Սա building-ը չէ, և այն դրած մարդիկ առաջիններից են դա ասելու: քվանտային computing-ին հաջորդ տարիներին հետևելու լավագույն ձևը հենց այս ոչ glamorous curve-ն է՝ ճնշում գործոնը կպահպանվի՞ կոդը մեծացնելիս, տրամաբանական դարպասները կաշխատե՞ն այնքան հստակ, որքան տրամաբանական հիշողությունն, և արդյոք ժամում մեկ անգամ հայտնվող այդ տարօրինակ սխալը երբևէ կբացատրվի:

Կարճ ամփոփում

Google քվանտային ԱԲը առաջին անգամ մաքուր ցույց տվեց, որ մակերեսկոդ քվանտային հիշողությունն կարող է աշխատել *շեմից ցածր*: կոդ հեռավորությունը 3-ից 5, ապա 7 բարձրացնելիս տրամաբանական սխալի հաճախականությունը էքսպոնենցիալ նվազեց՝ յուրաքանչյուր երկու քայլի համար մոտ 2.14×, իսկ ամենամեծ՝ 101-քուբիթ հեռավորություն-7 հիշողությունն իր լավագույն ֆիզիկական քուբիթից ավելի երկար ապրեց՝ սահմանից այն կողմ շահավետության շեմ, իրականժամանակ աշխատող սխալ ուղղումով: Սա քվանտային համակարգչային ինժեներիայի երկար սպասված իրական հանգրվան է: Բայց այն նաև ընդամենը մեկ տրամաբանական քուբիթ է՝ հիշողությունի դերում, սխալի հաճախականությունով, որը դեռ շատ հեռու

է իրական ալգորիթմների պահանջներից, առանց տրամաբանական գործողությունների, հեղինակների իսկ մատնանշած unexplained սխալ floor-ով և մասշտաբավորումի մի քանի կարգի մասշտաբավորման ճանապարհով։ Իրական շեմ է անցել, ոչ քվանտային համակարգիչ է հանձնվել։

Աղբյուրներ

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