



The CLEAN PAPER

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

Kvantová pamäť sa konečne zlepšovala s rastom — skutočný míľnik a stroj, ktorým nie je

Google Quantum AI prvýkrát jasne ukázal, že kvantová pamäť s povrchovým kódom môže pracovať pod hranicou: keď sa kód zväčšoval zo vzdialenosti 3 cez 5 na 7, logická chybovosť exponenciálne klesala (približne 2,14-krát na dva stupne) a najväčšia, 101-qubitová pamäť so vzdialenosťou 7 prežila svoj najlepší fyzický qubit — prekročila bod zvratu — s korekciou chýb v reálnom čase. Je to dlho očakávaný technický míľnik. Je to tiež jediný logický qubit ako pamäť, s chybovosťou ďaleko od potrieb skutočných algoritmov, bez logických operácií, s nevysvetleným chybovým dnom a mnohými rádmí škálovania pred sebou. Prekročená hranica, nie dodaný počítač.

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

Okamih, keď sa krivka konečne ohla správnym smerom

Tridsať rokov spočívala kvantová korekcia chýb na sľube, ktorý sa nikdy nepodarilo jasne splniť. Teória hovorí, že ak rozložíte jednu jednotku kvantovej informácie — jeden *logický* qubit — medzi mnoho hlučných fyzických qubitov a tieto fyzické qubity sú dostatočne kvalitné, potom by pridávanie *dalších* malo logický qubit zlepšovať a chyby by mali s rastom kódu exponenciálne klesať. Háčik je v onom „ak“: pod kritickou hranicou šumu viac qubitov pomáha; nad ňou iba pridáva ďalší šum. Každý skorší experiment sa nachádzal na nesprávnej strane tejto hranice alebo trend neukázal dostatočne presvedčivo. Zväčšovanie kódu situáciu zhoršovalo, nie zlepšovalo.

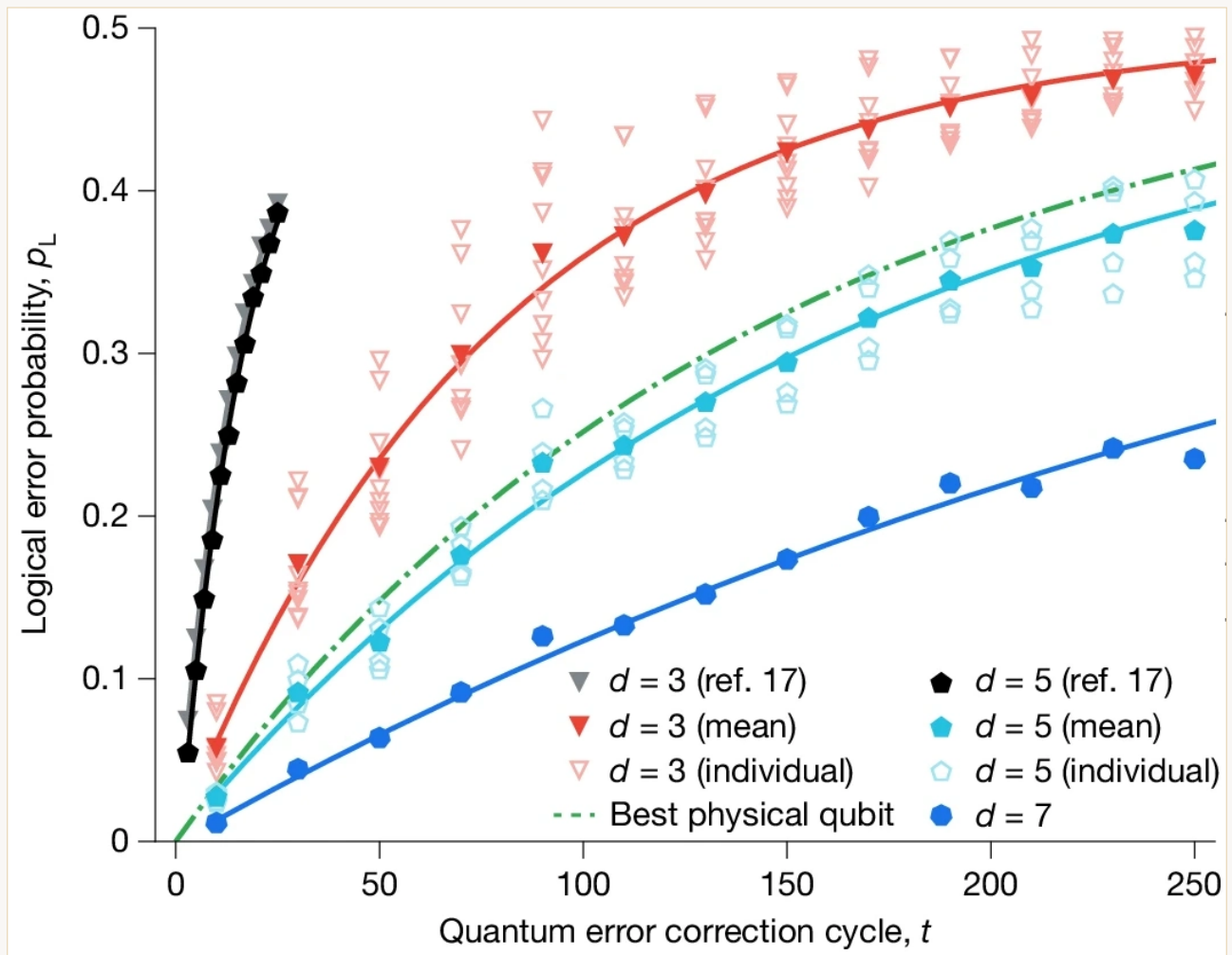
V decembri 2024 Google Quantum AI oznámil prvú jasnú ukážku opačného režimu. Na Willow, najnovšej generácii svojich supravodivých procesorov, vytvoril pamäť s povrchovým kódom so vzdialenosťami 3, 5 a 7 a pozoroval, ako logická chybovosť pri každom zväčšení kódu *klesá* — o faktor $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ pri každom zvýšení vzdialenosti o dva. Najväčšia, 101-qubitová pamäť so vzdialenosťou 7 uchovávala logický qubit s chybou $0,143 \% \pm 0,003 \%$ na cyklus korekcie a — hlavná správa vnútri titulu — *vydržala dlhšie než jej vlastný najlepší fyzický qubit*, o faktor $2,4 \pm 0,3$. Tomu sa hovorí prekročenie bodu zvratu (beyond breakeven) a prínos korekcie chýb na tomto hardvéri prvýkrát prevážil jej réžiu.

Je to skutočný míľnik a oplatí sa presne povedať, akého druhu. Dokazuje, že škálovanie teraz smeruje správnym smerom. Nie je to fungujúci kvantový počítač a práca to ani netvrdí.

Čo znamenajú „povrchový kód“, „vzdialenosť“ a „pod hranicou“

Logický qubit je jedna chránená jednotka kvantovej informácie zakódovaná do mnohých fyzických qubitov. **Povrchový kód** je konkrétny spôsob takéhoto kódovania na dvojrozmernej mriežke, kde ďalšie „meracie“ qubity neustále kontrolujú chyby bez narušenia uloženej informácie. **Vzdialenosť kódu** d nie je fyzická vzdialenosť: je to najmenší počet vhodne umiestnených chýb, ktoré môžu poškodiť logický qubit bez toho, aby si to kód všimol. Väčšie d znamená väčšiu a odolnejšiu oblasť — spotrebuje viac fyzických qubitov (približne $2d^2 - 1$) a opraví viac súčasných chýb, až $(d - 1)/2$. Tri tu testované veľkosti, vzdialenosti 3, 5 a 7, teda opravujú 1, 2 a 3 súčasné chyby a spotrebujú približne 17, 49 a 97 fyzických qubitov — pamäť so vzdialenosťou 7 od Googlu použila 101, o niečo viac než učebnicové minimum.

„**Pod hranicou**“ je kľúčový výraz. Korekcia chýb pomáha iba vtedy, keď fyzická chybovosť leží pod kritickou hodnotou; tam každé zvýšenie vzdialenosti exponenciálne potláča logickú chybovosť. Faktor potlačenia Λ tento účinok meria — $\Lambda > 1$ znamená, že zväčšovanie kódu pomáha, a čím vyššie Λ , tým lepšie. Google uvádza $\Lambda \approx 2,14$, teda že každé zvýšenie vzdialenosti o dva znížilo logickú chybovosť približne na polovicu. Podstatou výsledku je, že Λ pohodlne presahuje 1.



Ako logická chyba narastá s cyklami korekcie pri pamätiach so vzdialenosťou 3, 5 a 7 (zhora nadol). Sledujte zelenú prerušovanú čiaru — *najlepší jednotlivý fyzický qubit* na čípe. Pamäť so vzdialenosťou 7 (modrá, najnižšia) hromadí chyby pomalšie než táto čiara, takže zakódovaný qubit prežíva najlepšie fyzický qubit, z ktorého je vytvorený — prekračuje bod zvratu faktorom $2,4\times$. Toto je výsledok pre životnosť; samotné potlačenie pod hranicou ($\Lambda = 2,14$ pri raste kódu zo vzdialenosti 3 cez 5 na 7) vyjadrujú čísla v texte.

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

Čo autori urobili

- Vytvorili pamäte s povrchovým kódom na dvoch čípoch Willow: 105-qubitovom procesore, na ktorom bežali kódy so vzdialenosťou 3, 5 a 7 použité v skúške škálovania (najväčšia bola 101-qubitová pamäť so vzdialenosťou 7 a 49 dátovými qubitmi), a 72-qubitovom procesore, na ktorom bežala pamäť so vzdialenosťou 5 s dekodérom v reálnom čase a repetičné kódy s vysokými vzdialenosťami.
- Merali, ako sa logická chyba *na cyklus* mení pri zvyšovaní vzdialenosti kódu z 3 na 5 a 7, a určili faktor potlačenia Λ .
- Porovnali životnosť logického qubit s najlepším jednotlivým fyzickým qubitom na tom istom čípe, aby otestovali „bod zvratu“.

- Prevádzkovali kód so vzdialenosťou 5 s **dekodérom v reálnom čase** — klasickým hardvérom, ktorý vyhodnocuje kontroly chýb tak rýchlo, ako vznikajú — až milión cyklov, aby ukázali, že korekcia chýb dokáže držať krok so strojom.
- Rozšírili jednoduchšie **repetičné kódy** až na vzdialenosť 29, aby hľadali vzácne hlboké zdroje chýb vytvárajúce výkonnostné dno.

Čo zistili

- **Kód pracuje pod hranicou.** Logická chyba na cyklus klesala o faktor $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ pri každom zvýšení vzdialenosti o dva — jasné exponenciálne potlačenie, ktoré sľubovala teória a nijaký procesor predtým presvedčivo neukázal.
- **Pamäť so vzdialenosťou 7 dosiahla chybu $0,143\% \pm 0,003\%$ na cyklus** a žila $2,4 \pm 0,3$ -krát dlhšie než jej najlepší fyzický qubit — prekročila bod zvratu.
- **Dekódovanie v reálnom čase držalo krok.** Pri vzdialenosti 5 mal dekodér priemernú latenciu 63 mikrosekúnd oproti dĺžke cyklu 1,1 mikrosekundy a vydržal milión cyklov — korekcia chýb bežala naživo, nie iba v následnej analýze.
- **Zostáva vzácny hlboký zdroj chýb.** V testoch repetičných kódov výkon napokon obmedzovali korelované výbuchy chýb približne **raz za hodinu** (asi raz za 3×10^9 cyklov), ktoré vytvárajú chybové dno okolo 10^{-10} a ktorých pôvod podľa autorov **zatiaľ nie je známy**.

Čo to nedokazuje

- **Nie je** to kvantový počítač vykonávajúci výpočty. Ide o kvantovú *pamäť*: ukladá a chráni jeden logický qubit. Nevykonáva logické operácie (hradlá) medzi logickými qubitmi ani nespúšťa nijaký algoritmus.
- Od užitočných strojov nás **nedelí jediný qubit**. Logický qubit so vzdialenosťou 7 spotrebuje približne 101 fyzických qubitov; chyba 0,1 % na cyklus je stále ďaleko nad približne 10^{-6} až 10^{-10} , ktoré vyžadujú skutočné algoritmy. Uzavretie tejto medzery znamená oveľa väčšie vzdialenosti — oveľa viac fyzických qubitov na každý logický — a užitočné algoritmy potrebujú *tisíce* logických qubitov súčasne. Rozpočet fyzických qubitov pre takýto stroj siaha do miliónov.
- Výraz „**ak sa škáluje**“ **odvádza skutočnú prácu**. Vlastný záver práce hovorí, že výkon zariadenia by *pri škálovaní* mohol splniť požiadavky veľkých algoritmov. Ukázať správny trend na jednom logickom qubite nie je to isté ako postaviť stroj v cieľovej mierke a nič nezaručuje, že trend prežije pri oveľa väčších rozmeroch.
- **Ne vysvetlené chybové dno je živý problém.** Korelované výbuchy obmedzujúce výkon repetičného kódu sú podľa autorov o rády väčšie, než sa očakávalo, a kým nebudú pochopené, znemožnia väčšie aplikácie odolné proti chybám — otvorená chyba opísaná jasne, nie vyriešený detail.
- Výsledok nehovorí nič o **prelamaní šifier ani „kvantovej nadradenosti“ v užitočných úlohách**. Tie si vyžadujú úplný stroj odolný proti chybám, pre ktorý je toto základným kameňom, nie predvedením.

Aké silné sú dôkazy

- **Základné tvrdenie je pevné a dôležité.** Prevádzka pod hranicou s jasným exponenciálnym potlačením pri troch vzdialenostiach kódu, životnosťou za bodom zvratu a fungujúcim dekodérom v reálnom čase je presne kombinácia, o ktorú odbor usiloval, a je preukázaná priamo, nie odvodená. Nejde o výsledok vytvorený prehnaným rozprávaním; je to skutočný technický výsledok poprednej skupiny.
- **Autori starostlivo vymedzujú rozsah.** Opisujú ho ako *pamäť* pod hranicou, sami upozorňujú na nevysvetlené dno korelovaných chýb a budúcnosť podmieňujú nápadným „ak sa škáluje“. Preháňanie vzniká v okolitom spravodajstve, ktoré „pamäťový qubit s korekciou chýb sa pri raste zlepšoval“ zaokrúhľuje na „kvantové počítače sú tu“.
- **Poctivý záver je, že ide o presvedčivo zvládnutý základný krok.** Jeden logický qubit chránený natoľko, že pridávanie redundancie konečne pomáha — s dlhou, ťažkou a nezaručenou cestou škálovania, logických hradíel a nevysvetlených chýb stále pred sebou.

Prečo na tom záleží

Kvantové výpočty odolné proti chybám vždy pripomínali problém sliepky a vajca: užitočné stroje potrebujú chybovosť, ktorú nijaký fyzický qubit nedosiahne, a riešenie — korekcia chýb — funguje iba vtedy, keď je hardvér už dostatočne dobrý na prevádzku pod hranicou. Prekročenie tejto hranice čo len raz, hoci aj na jedinom logickom qubite, mení otázku z „je to vôbec možné?“ na „ako ďaleko a ako rýchlo sa to dá škálovať?“. To je skutočný a významný posun a dôvod, prečo si výsledok zaslúži pozornosť.

Rovnaká starostlivosť, vďaka ktorej je výsledok dôveryhodný, však má tľmiť príbeh okolo neho. Je to prvá tehla základov, položená dobre. Nie je to budova a ľudia, ktorí ju položili, to hovoria ako prví. Správnym spôsobom, ako v nasledujúcich rokoch sledovať kvantové výpočty, je práve táto neatraktívna krivka: či faktor potlačenia vydrží pri raste kódov, či možno logické hradlá vykonávať s rovnakou spoľahlivosťou ako logickú pamäť a či sa niekedy vysvetlí záhadná chyba raz za hodinu.

Stručné zhrnutie

Google Quantum AI prvýkrát jasne ukázal, že kvantová pamäť s povrchovým kódom môže pracovať *pod hranicou*: keď sa kód zväčšoval zo vzdialenosti 3 cez 5 na 7, logická chybovosť exponenciálne klesala (približne 2,14-krát na každé dva stupne) a najväčšia, 101-qubitová pamäť so vzdialenosťou 7 prežila svoj najlepší fyzický qubit — prekročila bod zvratu — zatiaľ čo korekcia chýb bežala v reálnom čase. Je to skutočný, dlho očakávaný míľnik v technike kvantových počítačov. Je to tiež jediný logický qubit fungujúci ako pamäť, s chybovosťou stále ďaleko od požiadaviek skutočných algoritmov, bez vykonaných logických operácií, s nevysvetleným chybovým dnom, na ktoré upozorňujú samotní autori, a s mnohými rádmí škálovania pred sebou. Prekročená skutočná hranica — nie dodaný kvantový

počítač.

Zdroje

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>