



The CLEAN PAPER

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

Quantum memory पहलीबार बड़ीहोमे पर बेहतर हुई — असली milestone यही है, पूरा computer नहीं

Google Quantum AI ने पहलीबार सफ़ दखिआका surface-code quantum memory threshold के नीचे चल सकती है: code distance 3 से 5 और फिर 7 करने पर logical error rate exponential रूप से घटा (हर दो distance steps पर लगभग $2.14\times$), और सबसे बड़ी 101-qubit distance-7 memory अपने best physical qubit से अधिक देर चली — beyond breakeven — जबकि error correction real time में चल रही थी। यह लंबे समय से चहा गया engineering milestone है। लेकिन यह memory की तरह कम करता एक logical qubit है; error rate वास्तविक algorithms की जरूरत से अभी बहुत दूर है; कई logical operation नहीं हुई; authors ने unexplained error floor flag किया है; और useful machine तक पहुँचने के लिए orders of magnitude scaling बक़ी है। Threshold पर हुई है, computer deliver नहीं हुआ।

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

वह क्षण जब वक्र सहीदिशामें मुड़ी

तीस साल से क्वंटम त्रुटि सुधार एक ऐसे वक्रे पर टिकीथीजिसि सफ़्त तरीके से कभीपूराहोते नहींदेखागयाथा। सदिधंत कहती है कि अगर एक unit क्वंटम जमकरी— एक तर्किक क्यूबिट — कोबहुत-से noisy भौतिक क्यूबिट में फैलायाजए, और भौतिक क्यूबिट पर्याप्त अच्छे हों तोउनमें और क्यूबिट जोड़ने से तर्किक क्यूबिट बेहतर होमाचहए, कोड बढ़ने के साथ त्रुटियाँexponentially घटने चहए। Catch उसी“अगर” में है: critical शोर सीमासे नीचे अधिक क्यूबिट मदद करते हैं; उससे ऊपर वे केवल और शोर जोड़ते हैं। हर पछिलाप्रयोग इस रेखाके गलत पक्ष पर रहाथा याtrend कोसफ़्त नहींदखा पयाथा। कोड बढ़ने से चीजें बेहतर नहीं खरब होतीथी।

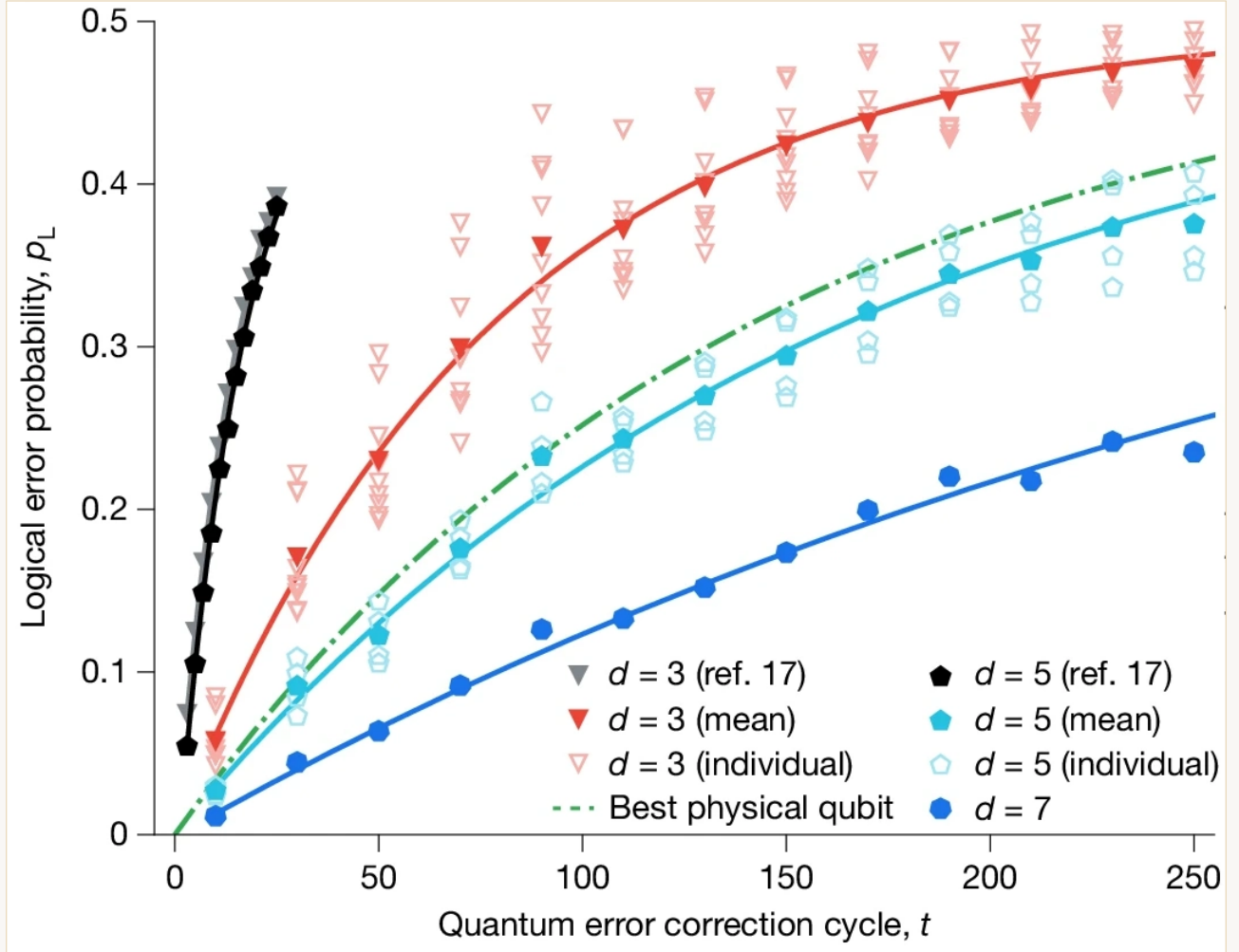
दिसंबर 2024 में Google क्वंटम AI ने रपिरेट कियाकि उसने पहलीबार दूसरीregime सफ़्त दिखाई। Willow, उसकीनई पीढ़ी के superconducting processors, पर टीम ने कोड distances 3, 5 और 7 कीsurface-code memories बनई और हर बार कोड बढ़ाकरने पर तर्किक त्रुटिदर कोघटते देखा— दूरीमें हर दोचरण वृद्धिपर काक ठीक $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ कीsuppression। सबसे बड़ी 101-क्यूबिट दूरी7 स्मृति ने तर्किक क्यूबिट कोसुधार के हर चक्र पर $0.143\% \pm 0.003\%$ त्रुटि के साथ रखा और सुर्खीके भीतर सुर्खी वह अपने सबसे अच्छे भौतिक क्यूबिट से भीअधिक देर टिकतीथी काक 2.4 ± 0.3 से। इसे “beyond breakeven” कहते हैं, और इस hardware पर पहलीबार त्रुटि सुधार कापूराapparatus अपने overhead से अधिक लाभ देतादखा।

यह वास्तविक milestone है, और यह ठीक किस तरह काmilestone है, इसमें सटीक रहनाजरूरी है। यह प्रमाण है किस्केलिंग अब सहीदिशामें जाती है। यह काह्यशील क्वंटम computer नहीं है, और शोधपत्र ऐसादमनहीकरता।

“surface code”, “distance” और “below threshold” काअर्थ

तर्किक क्यूबिट क्वंटम जमकरीकीएक protected unit है जिसि कई भौतिक क्यूबिट में encode कियाजताहै। सतह कोड ऐसाencoding 2D ग्रिड पर करने काएक खास तरीकाहै, जहाँअतिरिक्त “मम” क्यूबिट stored जमकरी कोdisturb किए बिनालगतार त्रुटियाँजाँच करते हैं। कोड दूरी d भौतिक दूरीनहीं है: यह well-placed त्रुटियाँकीवह सबसे छोटीसंख्याहै जोकोड कीनजर से बचकर तर्किक क्यूबिट कोcorrupt कर सकतीहै। बड़ा d बड़ाऔर अधिक मजबूत patch है — अधिक भौतिक क्यूबिट खर्च करताहै (लगभग $2d^2 - 1$) और अधिक simultaneous त्रुटियाँ सहीकर सकताहै, अधिकतम $(d - 1)/2$ । इसलिए यहाँपरिक्षण किए distances 3, 5 और 7 क्रमशः 1, 2 और 3 simultaneous त्रुटियाँसहीकरते हैं और textbook minimum के हिसाब से लगभग 17, 49 और 97 भौतिक क्यूबिट लेते हैं — Google कीदूरी7 स्मृति ने 101 इस्तेमाल किए, minimum से थोड़ाऊपर।

“Below सीमा” नरिणयक phrase है। त्रुटि सुधार तभीमदद करतीहै जब भौतिक त्रुटि दर critical मम से नीचे हो वहाँदूरीबढ़ने पर तर्किक त्रुटि दर exponentially suppress होतीहै। Suppression काक Λ इसे मापताहै — $\Lambda > 1$ काअर्थ कोड बढ़तामदद करताहै, और जतिनाबड़ा Λ , उतनाबेहतर। Google $\Lambda \approx 2.14$ रपिरेट करताहै, यमीदूरीमें हर दोचरण वृद्धि से तर्किक त्रुटि दर लगभग आधीहुई। Λ काcomfortably 1 से ऊपर होमापूरापरणिम है।



दूरी 3, -5 और -7 memories में सुधार cycles बढ़ने के साथ तर्किक त्रुटि कैसे accumulate होती है (ऊपर से नीचे)। देखने वाली रेखा green dashed है — chip का सर्वोत्तम एकल भौतिक क्यूबिट। दूरी 7 स्मृति (blue, सबसे नीचे) उस रेखा से धीमे त्रुटि accumulate करती है, यानी encoded क्यूबिट उसी hardware के सर्वोत्तम भौतिक क्यूबिट से अधिक देर टिकता है — “beyond breakeven,” करक 2.4× से। यह आयु काल परणाम है; below-threshold suppression खुद ($\Lambda = 2.14$, कोड दूरी 3 से 5 से 7 बढ़ने पर) पथ के संख्या में है।

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

शोधकर्तओं ने क्या किया

- दो Willow chips पर surface-code memories बनईं: 105-क्यूबिट processor ने स्कैलिंग परीक्षण के दूरी 3, -5 और -7 codes चलाए (सबसे बड़ा 101-क्यूबिट, 49-data-qubit दूरी 7 स्मृति), और 72-क्यूबिट processor ने real-time decoder वाली दूरी 5 स्मृति तथा उच्च-distance repetition codes चलाए।
- कोड दूरी 3 से 5 से 7 बढ़ने पर तर्किक त्रुटि per चक्र कैसे बदली यह मापा और suppression करक Λ निकाला।
- “Breakeven” परीक्षण करने के लिए तर्किक क्यूबिट की आयु काल की तुलना उसी chip के सर्वोत्तम व्यक्ति भौतिक क्यूबिट से की।
- दूरी 5 को real-time decoder के साथ up to एक मिलियन cycles चलाया — शस्त्रीय hardware जो त्रुटि जाँच को उतनी तेजी से व्याख्या करता है जितनी तेजी से वे बनते हैं — तर्क दिखे कि त्रुटि सुधार मशीन के साथ जैविति pace रख सकती है।
- प्रदर्शन न्यूनतम सीमा तय करने वाले दुर्लभ, गहरा त्रुटि स्रोत खोजने के लिए simpler repetition codes दूरी 29 तक

push किए।

क्यामलिया

- **कोड below सीमा है।** दूरी में हर दोवृद्धि पर तर्किक त्रुटि per चक्र $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ से गरी — सफ़ exponential suppression, वही व्यवहार जिसका सदिधंत ने वनाकिया था और किसी processor ने definitively नहीं दिखाया था।
- **दूरी 7 स्मृति $0.143\% \pm 0.003\%$ त्रुटि per चक्र तक पहुँची और अपने सर्वोत्तम भौतिक क्यूबिट से 2.4 ± 0.3 बार longer जी — beyond breakeven।**
- **Real-time decoding pace रख पड़े।** दूरी 5 पर decoder की औसत latency 63 microseconds थी चक्र समय 1.1 microseconds के समाने, और यह एक मिलियन cycles तक बनाए रखना हुआ — त्रुटि सुधार जीवित चली केवल बढ़ के विश्लेषण में नहीं।
- **एक दुर्लभ, गहरा त्रुटि स्रोत अब भी है।** Repetition-code परिक्षण में प्रदर्शन अंततः correlated त्रुटि bursts से सीमित हुई जो लगभग once an hour (लगभग हर 3×10^9 cycles में एक) होती थी और त्रुटि न्यूनतम सीमा करीब 10^{-10} पर set करती थी। लेखक कहते हैं उत्पत्ति अभी समझ में नहीं आया है।

यह क्या सक्षम नहीं करता

- यह computation करता क्वैंटम computer नहीं। यह क्वैंटम स्मृति है: एक तर्किक क्यूबिट store और सुरक्षा देती है। तर्किक क्यूबिट के बीच तर्किक क्रियाएँ (gates) नहीं करती और कोई एल्गोरिदम नहीं चलती।
- यह उपयोगी मशीन से केवल एक क्यूबिट दूर नहीं है। दूरी 7 तर्किक क्यूबिट लगभग 101 भौतिक क्यूबिट लेता है; 0.1%-per-cycle त्रुटि दर अभी भी वस्तुतः एल्गोरिदम के लिए ज़रूरी लगभग 10^{-6} से 10^{-10} से बहुत ऊपर है। अंतर बंद करने के लिए much बड़ा distances चाहिए — हर तर्किक क्यूबिट पर बहुत अधिक भौतिक क्यूबिट — और उपयोगी एल्गोरिदम को एक सय thousands तर्किक क्यूबिट चाहिए। भौतिक-qubit budget millions तक जाता है।
- **“If scaled” सचमुच भरी कम कर रहा है।** शोध पत्र का own नष्कर्ष है कि उपकरण प्रदर्शन, if scaled, बड़ा एल्गोरिदम की requirements meet कर सकती है। एक तर्किक क्यूबिट पर trend सही होता scaled मशीन बना लेने जैसा नहीं और कुछ भी गारंटी नहीं करता कि much बड़ा sizes पर trend कम रहेगा।
- **Unexplained त्रुटि न्यूनतम सीमा जीवित समस्या है।** Repetition-code प्रदर्शन cap करने वाले correlated bursts, लेखकों के शब्दों में, अपेक्षित से ऑर्डर of परिमाण बड़े हैं और समझे बना बड़ा fault-tolerant अनुप्रयोग को रोकेंगे — यह खुली flaw है, solved detail नहीं।
- यह encryption तोड़ने या उपयोगी कार्य पर “क्वैंटम supremacy” के बारे में कुछ नहीं कहता। उसके लिए पूर्ण fault-tolerant मशीन चाहिए जिसकी यह foundation stone है, प्रदर्शन नहीं।

प्रमाण कतिनाम जबूत है

- **मुख्य दवा ठोस और महत्वपूर्ण है।** तीन कोड distances में सफ़ exponential suppression के साथ below-threshold क्रिया plus beyond-breakeven आयु काल और कार्यशील real-time decoder — क्षेत्र जिस संयोजन तक पहुँचना चाह रहा था वही है, और यह सिधे demonstrated है, अनुमति नहीं। यह hype artifact नहीं। leading समूह का वस्तुतः अभियंत्रण की परिणाम है।

- लेखक scope पर सन्नधन हैं। वे इसे below-threshold स्मृति कहते हैं, unexplained correlated-error न्यूनतम सीमा खुद संकेतक करते हैं, और भविष्य को conspicuous “if scaled” पर hedge करते हैं। Overreach आसपास की दायरामें आता है, जहाँ “error-corrected स्मृति क्यूबिट कोड़ बढ़ने पर बेहतर हुई” को “क्वंटम computing आ गई” में दौरे up कर दिया जाता है।
- ईमानदार स्थिति: foundational चरण, cleanly taken। एक तर्क कि क्यूबिट, इतना protected कि redundancy जोड़ना अंततः मदद करता है — लेकिन स्केलिंग, तर्क कि gates और unexplained त्रुटियाँ कालंबा कठिन और अभी unguaranteed रस्ता बकरी है।

यह क्यों महत्वपूर्ण है

Fault-tolerant क्वंटम computing हमेशा chicken-और-egg समस्या जैसी रही है: उपयोगी मशीनें को ऐसे त्रुटि rates चाहिए जो कई भौतिक क्यूबिट अकेले नहीं दे सकता और सुधार — त्रुटि सुधार — तभी कम करती है जब hardware पहले ही सीमा से नीचे पर्याप्त अच्छा हो। उस रेखा को एक बार भी एक तर्क कि क्यूबिट पर भी पर करना सवाल को “क्या यह संभव है?” से “इसे कतिना और कतिनी तेजी से पैमाना किया जा सकता है?” में बदल देता है। यह वास्तविक, सत्यक बदलन है, इसलिए परिणाम ध्यान योग्य है।

लेकिन परिणाम को trustworthy बनाने वाली वही सन्नधनी आसपास की कहानी को भी temper करनी चाहिए। यह foundation की पहली brick है, अच्छी तरह रखी गई। Building नहीं और brick रखने वाले लोग सबसे पहले यही कहते हैं। अगले कुछ वर्षों में क्वंटम computing अनुसरण करने का सही तरीका यही unglamorous वक्र है: codes बढ़ने पर suppression का एक टुकड़ा है यानही तर्क कि gates तर्क कि स्मृति जितने सफ़ हो सकते हैं यानही और वह mysterious once-an-hour त्रुटि कभी समझना होती है यानही।

संक्षिप्त सार

Google क्वंटम AI ने पहली बार सफ़ दिखाया कि surface-code क्वंटम स्मृति below सीमा operate कर सकती है: कोड़ दूरी 3 से 5 से 7 बढ़ने पर तर्क कि त्रुटि दर exponentially घटी (हर दो चरण पर लगभग $2.14\times$), और सबसे बड़ी 101-क्यूबिट दूरी 7 स्मृति अपने सर्वोत्तम भौतिक क्यूबिट से अधिक देर टकती रही — beyond breakeven — जबकि त्रुटि सुधार वास्तविक समय में चली। यह क्वंटम computers की अभियंत्रण में वास्तविक, long-sought milestone है। सच ही यह केवल स्मृति की तरह कम करता एकल तर्क कि क्यूबिट है, त्रुटि दर वास्तविक एल्गोरिदम की ज़रूरत से अभी बहुत दूर, कई तर्क कि क्रियाएँ नहीं लेखक द्वारा संकेतक की गई unexplained त्रुटि न्यूनतम सीमा और कई ऑर्डर of परिमाण स्केलिंग बकरी वास्तविक सीमा crossed — क्वंटम computer delivered नहीं।

स्रोत

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>