The Clean Paper

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

Quantum memory पहलीबार बड़ीहमे पर बेहतर हुई — असलीmilestone यहीहै, पूराcomputer नहीं

Google Quantum AI ने पहलीबार साफ़ दखियाकि surface-code quantum memory threshold के नीचे चल सकतीहै: code distance 3 से 5 और फिर 7 करने पर logical error rate exponential रूप से घटा(हर दोdistance steps पर लगभग 2.14×), और सबसे बड़ी101-qubit distance-7 memory अपने best physical qubit से अधकि देर चली— beyond breakeven — जबकि error correction real time में चल रहीथी। यह लंबे समय से चहागया engineering milestone है। लेकनि यह memory कीतरह कम करताएक logical qubit है; error rate वास्तवकि algorithms कीजरूरत से अभीबहुत दूर है; कोई logical operation नहींहुई; authors ने unexplained error floor flag कियाहै; और useful machine तक पहुँचने के लिए orders of magnitude scaling बाकीहै। Threshold पार हुई है, computer deliver नहींहुआ।

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 सही दिशा में मुड़ी

तीस साल से क्वांटम त्रुटि सुधार एक ऐसे वादे पर टिकी थी जिसे साफ़ तरीके से कभी पूरा होते नहीं देखा गया था। सिद्धांत कहती है कि अगर एक unit क्वांटम जानकारी — एक *तार्किक* क्यूबिट — को बहुत-से noisy भौतिक क्यूबिट में फैलाया जाए, और भौतिक क्यूबिट पर्याप्त अच्छे हों, तो उनमें *और* क्यूबिट जोड़ने से तार्किक क्यूबिट *बेहतर* होना चाहिए, कोड बढ़ने के साथ त्रुटियाँ exponentially घटने चाहिए। Catch उसी "अगर" में है: critical शोर सीमा से नीचे। अधिक क्यूबिट मदद करते हैं; उससे ऊपर वे केवल और शोर जोड़ते हैं। हर पिछला प्रयोग इस रेखा के गलत पक्ष पर रहा था, या trend को साफ़ नहीं दिखा पाया था। कोड बढ़ाने से चीज़ें बेहतर नहीं, खराब होती थीं।

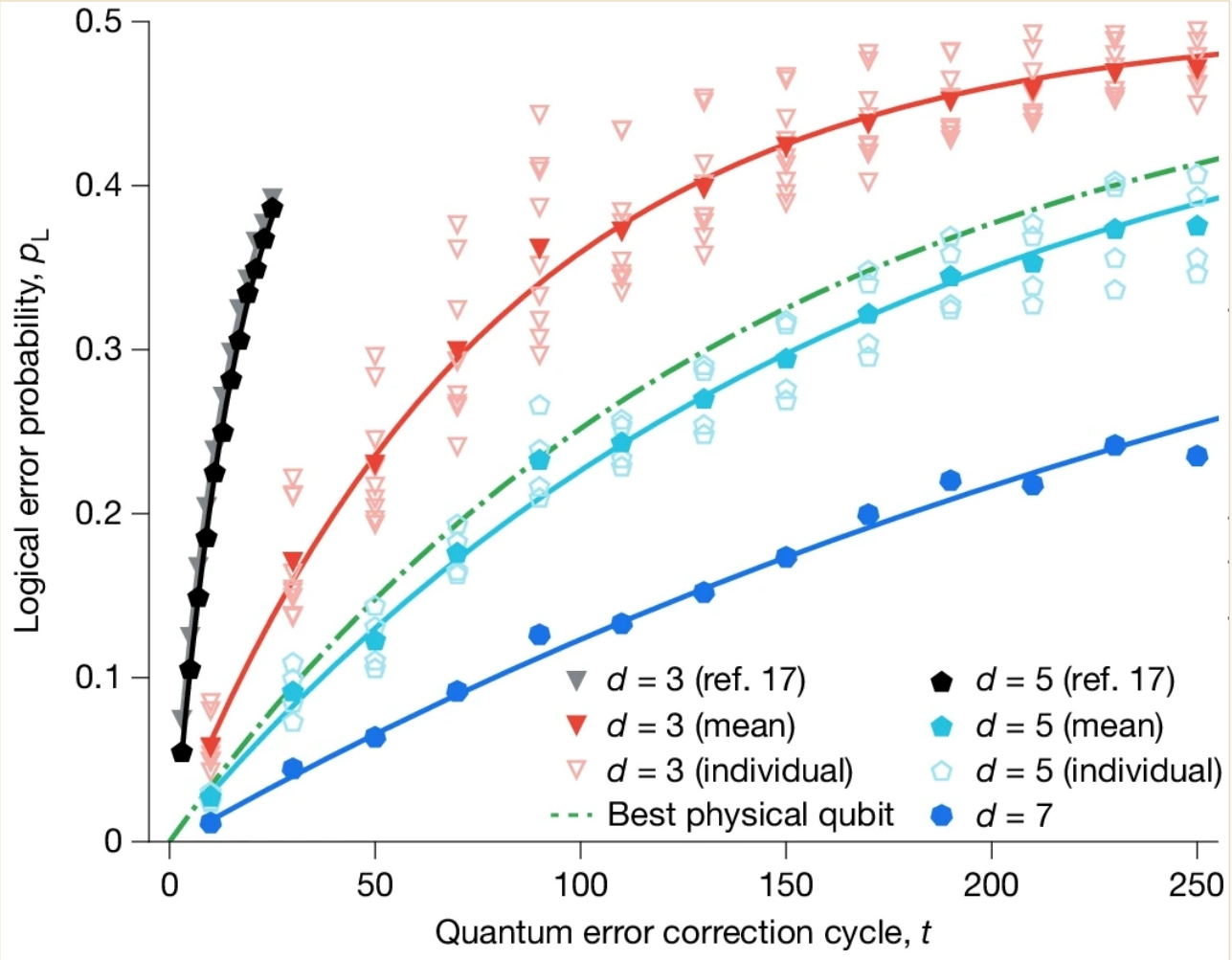
दिसंबर 2024 में Google क्वांटम AI ने रिपोर्ट किया कि उसने पहली बार दूसरी regime साफ़ दिखाई। Willow, उसकी नई पीढ़ी के superconducting processors, पर टीम ने कोड distances 3, 5 और 7 की surface-code memories बनाईं और हर बार कोड बड़ा करने पर तार्किक त्रुटि दर को *घटते* देखा — दूरी में हर दो-चरण वृद्धि पर कारक ठीक $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ की suppression। सबसे बड़ी 101-क्यूबिट दूरी-7 स्मृति ने तार्किक क्यूबिट को सुधार के हर चक्र पर 0.143% ± 0.003% त्रुटि के साथ रखा, और सुर्खी के भीतर सुर्खी वह अपने *सबसे अच्छे भौतिक क्यूबिट से भी अधिक* देर टिकती थी, कारक 2.4 ± 0.3 से। इसे "beyond breakeven" कहते हैं, और इस hardware पर पहली बार त्रुटि सुधार का पूरा apparatus अपने overhead से अधिक लाभ देता दिखा।

यह वास्तविक milestone है, और यह ठीक किस तरह का milestone है, इसमें सटीक रहना ज़रूरी है। यह प्रमाण है कि स्केलिंग अब सही दिशा में जाती है। यह कार्यशील क्वांटम computer नहीं है, और शोधपत्र ऐसा दावा नहीं करता।

"surface code", "distance" और "below threshold" का अर्थ

तार्किक क्यूबिट क्वांटम जानकारी की एक protected unit है जिसे कई भौतिक क्यूबिट में encode किया जाता है। **सतह कोड** ऐसा encoding 2D ग्रिड पर करने का एक खास तरीका है, जहाँ अतिरिक्त "माप" क्यूबिट stored जानकारी को disturb किए बिना लगातार त्रुटियाँ जाँच करते हैं। कोड **दूरी** d भौतिक दूरी नहीं है: यह well-placed त्रुटियों की वह सबसे छोटी संख्या है जो कोड की नज़र से बचकर तार्किक क्यूबिट को corrupt कर सकती है। बड़ा d बड़ा और अधिक मजबूत patch है — अधिक भौतिक क्यूबिट खर्च करता है (लगभग $2d^2 - 1$) और अधिक simultaneous त्रुटियाँ सही कर सकता है, अधिकतम $(d - 1)/2$। इसलिए यहाँ परीक्षण किए distances 3, 5 और 7 क्रमशः 1, 2 और 3 simultaneous त्रुटियाँ सही करते हैं और textbook minimum के हिसाब से लगभग 17, 49 और 97 भौतिक क्यूबिट लेते हैं — Google की दूरी-7 स्मृति ने 101 इस्तेमाल किए, minimum से थोड़ा ऊपर।

"**Below सीमा**" निर्णायक phrase है। त्रुटि सुधार तभी मदद करती है जब भौतिक त्रुटि दर critical माप से नीचे हो; वहाँ दूरी बढ़ाने पर तार्किक त्रुटि दर exponentially suppress होती है। Suppression कारक Λ इसे मापता है — $\Lambda > 1$ का अर्थ कोड बढ़ाना मदद करता है, और जितना बड़ा Λ, उतना बेहतर। Google $\Lambda \approx 2.14$ रिपोर्ट करता है, यानी दूरी में हर दो-चरण वृद्धि से तार्किक त्रुटि दर लगभग आधी हुई। Λ का comfortably 1 से ऊपर होना पूरा परिणाम है।



दूरी-3, -5 और -7 memories में सुधार cycles बढ़ने के साथ तार्किक 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," का एक 2.4× से। यह आयु का परिणाम है; below-threshold suppression खुद (Λ = 2.14, कोड दूरी 3 से 5 से 7 बढ़ने पर) पेपर के संख्याएँ में है।

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

शोधकर्ताओं ने क्या किया

- दो Willow chips पर surface-code memories बनाईं: 105-क्यूबिट processor ने स्केलिंग 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 तार्किक त्रुटि *per* चक्र कैसे बदली, यह मापा और suppression कारक Λ निकाला।
- "Breakeven" परीक्षण करने के लिए तार्किक क्यूबिट की आयु की तुलना उसी chip के सर्वोत्तम व्यक्तिगत भौतिक क्यूबिट से की।
- दूरी-5 कोड को **real-time decoder** के साथ up to एक मिलियन cycles चलाया — शास्त्रीय hardware जो त्रुटि जाँच को उतनी तेजी से व्याख्या करता है जितनी तेजी से वे बनते हैं — तक कि दिखे कि त्रुटि सुधार मशीन के साथ जीवित 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।

क्यामिला

- **कोड below सीमाहै।** दूरीमें हर दोवृद्धि पर तार्किक त्रुटि per चक्र $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ से गिरी— साफ़ exponential suppression, वहीव्यवहार जिसकासिद्धांत ने वादाकियाथाऔर किसीprocessor ने definitively नहींदिखायाथा।
- **दूरी-7 स्मृति 0.143% ± 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 पाई।** दूरी5 पर decoder कीऔसत latency 63 microseconds थी चक्र समय 1.1 microseconds के सामने, और यह एक मिलियन cycles तक बनाए रखनाहुआ — त्रुटि सुधार जीवित चली केवल बढ़ के विश्लेषण में नहीं।
- **एक दुर्लभ, गहरात्रुटि स्रोत अब भीहै।** Repetition-code परीक्षण में प्रदर्शन अंततःcorrelated त्रुटि bursts से सीमित हुई जोलगभग **once an hour** (लगभग हर 3×10^9 cycles में एक) होतीथी और त्रुटि न्यूनतम सीमाकरीब 10^{-10} पर set करतीथी। लेखक कहते हैं उत्पत्ति **अभीसमझ में नहींआयाहै**।

यह क्यासाबित नहींकरता

- यह computation करता**क्वांटम computer नहीं**। यह क्वांटम *स्मृति* है: एक तार्किक क्यूबिट store और सुरक्षादेती है। तार्किक क्यूबिट के बीच तार्किक क्रियाएँ (gates) नहींकरतीऔर कोई एल्गोरिदम नहींचलती।
- यह उपयोगीमशीन से केवल **एक क्यूबिट दूर** नहींहै। दूरी-7 तार्किक क्यूबिट लगभग 101 भौतिक क्यूबिट लेताहै; 0.1%-per-cycle त्रुटि दर अभीभीवास्तविक एल्गोरिदम के लिए जरूरीलगभग 10^{-6} से 10^{-10} से बहुत ऊपर है। अंतर बंद करने के लिए much बड़ाdistances चाहिए — हर तार्किक क्यूबिट पर बहुत अधिक भौतिक क्यूबिट — और उपयोगीएल्गोरिदम कोएक साथ *thousands* तार्किक क्यूबिट चाहिए। भौतिक-qubit budget millions तक जाताहै।
- **"If scaled" सचमुच भारीकाम कर रहाहै।** शोधपत्र काown निष्कर्ष है कि उपकरण प्रदर्शन, *if scaled*, बड़ाएल्गोरिदम कीrequirements meet कर सकतीहै। एक तार्किक क्यूबिट पर trend सहीहोनाscaled मशीन बनालेने जैसानहीं और कुछ भीगारंटीनहींकरताकि much बड़ाsizes पर trend कायम रहेगा।
- **Unexplained त्रुटि न्यूनतम सीमाजीवित समस्याहै।** Repetition-code प्रदर्शन cap करने वाले correlated bursts, लेखकोंके शब्दोंमें, अपेक्षित से ऑर्डर of परिमाण बड़े हैं और समझे बिनाबड़ाfault-tolerant अनुप्रयोग कोरोकेंगे — यह खुलीflaw है, solved detail नहीं।
- यह **encryption तोड़ने याउपयोगीकार्य पर "क्वांटम supremacy"** के बारे में कुछ नहींकहता। उसके लिए पूराfault-tolerant मशीन चाहिए जिसकीयह foundation stone है, प्रदर्शन नहीं।

प्रमाण कितनामजबूत है

- **मुख्य दावाठोस और महत्वपूर्ण है।** तीन कोड distances में साफ़ exponential suppression के साथ below-threshold क्रिया plus beyond-breakeven आयुकाल और कार्यशील real-time decoder — क्षेत्र जिस संयोजन तक पहुँचना चाह रहाथावहीहै, और यह सीधे demonstrated है, अनुमानित नहीं। यह hype artifact नहीं, leading समूह कावास्तविक अभियांत्रिकीपरिणाम है।

- **लेखक scope पर सावधान हैं।** वे इसे below-threshold *स्मृति* कहते हैं, unexplained correlated-error न्यूनतम सीमा खुद संकेतक करते हैं, और भविष्य कोconspicuous “if scaled” पर hedge करते हैं। Overreach आसपास कीदिशामें आताहै, जहाँ“error-corrected स्मृति क्यूबिट कोड बढ़ने पर बेहतर हुई” को“क्वांटम computing आ गई” में दौड़ up कर दियाजाताहै।
- **ईमानदार स्थिति: foundational चरण, cleanly taken।** एक तार्किक क्यूबिट, इतनाprotected कि redundancy जोड़ना अंततःमदद करताहै — लेकिन स्केलिंग, तार्किक gates और unexplained त्रुटियाँकालंबा, कठिन और अभीunguaranteed रास्ताबाकीहै।

यह क्योंमहत्वपूर्ण है

Fault-tolerant क्वांटम computing हमेशाchicken-और-egg समस्याजैसीरहीहै: उपयोगीमशीनें कोऐसे त्रुटि rates चाहिए जोकेवल भौतिक क्यूबिट अकेले नहींदे सकता और सुधार — त्रुटि सुधार — तभीकाम करतीहै जब hardware पहले हीसीमासे नीचे पर्याप्त अच्छाहो। उस रेखाकोएक बार भी एक तार्किक क्यूबिट पर भीपार करनासवाल को“क्यायह संभव है?” से “इसे कितनाऔर कितनीतेजीसे पैमानाकियाजासकताहै?” में बदल देताहै। यह वास्तविक, सार्थक बदलाव है, इसलिए परिणाम ध्यान योग्य है।

लेकिन परिणाम कोtrustworthy बनाने वालीवहीसावधानीआसपास कीकहानीकोभीtemper करनीचाहिए। यह foundation की पहलीbrick है, अच्छीतरह रखीगई। Building नहीं। और brick रखने वाले लोग सबसे पहले यहीकहते हैं। अगले कुछ वर्षोंमें क्वांटम computing अनुसरण करने कासहीतरीकायहीunglamorous वर्क है: codes बढ़ने पर suppression कायम टिकताहै यानहीं, तार्किक gates तार्किक स्मृति जितने साफ़ होसकते हैं यानहीं, और वह mysterious once-an-hour त्रुटि कभीसमझाजासकेगीहै यानहीं।

संक्षिप्त सार

Google क्वांटम AI ने पहलीबार साफ़ दिखायाकि surface-code क्वांटम स्मृति *below सीमा*operate कर सकतीहै: कोड दूरी3 से 5 से 7 बढ़ाने पर तार्किक त्रुटि दर exponentially घटी(हर दोचरण पर लगभग 2.14×), और सबसे बड़ी101-क्यूबिट दूरी-7 स्मृति अपने सर्वोत्तम भौतिक क्यूबिट से अधिक देर टिकीरही— beyond breakeven — जबकि त्रुटि सुधार वास्तविक समय में चली। यह क्वांटम computers कीअभियांत्रिकीमें वास्तविक, long-sought milestone है। साथ हीयह केवल स्मृति कीतरह काम करताएकल तार्किक क्यूबिट है, त्रुटि दर वास्तविक एल्गोरिदम कीजरूरत से अभीबहुत दूर, कोई तार्किक क्रियाएँ नहीं, लेखक द्वारासंकेतक कीगई unexplained त्रुटि न्यूनतम सीमा, और कई ऑर्डर of परिमाण स्केलिंग बाकी। वास्तविक सीमाcrossed — क्वांटम 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