



The CLEAN PAPER

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

وہ لمحہ جب curve آخر کار صحیح سمت مڑی

Google کوانٹم اے آئی نے پہلی بار صاف طور پر دکھایا کہ سطح-کوڈ کوانٹم یادداشت *below* حد ***operate* کر سکتی ہے: کوڈ فاصلہ 3 سے 5 سے 7 بڑھانے پر منطقی غلطی شرح *exponentially* کم ہوئی، ہر دو مراحل پر تقریباً $14.2 \times$ suppression اور سب سے بڑا 101-کیوبٹ فاصلہ 7-یادداشت اپنے بہترین طبیعی کیوبٹ سے زیادہ دیر زندہ رہا — *beyond breakeven* — جبکہ غلطی تصحیح حقیقی وقت میں چلتی رہی۔ یہ کوانٹم-engineering computer کا حقیقی اور طویل عرصے سے مطلوب milestone ہے۔ مگر یہ صرف ایک منطقی کیوبٹ بطور یادداشت ہے، غلطی شرح حقیقی الگورتھمز کی ضرورت سے ابھی بہت دور ہے، منطقی operations نہیں ہوئے، *unexplained* غلطی floor باقی ہے، اور پیمانہ بندی میں کئی orders of قد کا سفر ہے۔ **** ایک حقیقی حد *cross* ہوئی ہے — کوانٹم deliver computer نہیں ہوا۔ ****

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: y-08449-024-s41586/1038.10

وہ لمحہ جب منحنی آخر کار صحیح سمت مڑی

تیس برس سے کوانٹم غلطی تصحیح ایک ایسے وعدے پر کھڑی تھی جو تجربہ میں صاف طور پر پورا نہیں ہوا تھا۔ نظریہ کہتی ہے کہ اگر ایک کوانٹم معلومات اکائی — ایک منطقی کیوبٹ — کو بہت سے noisy طبیعی کیوبٹس میں encode کیا جائے، اور طبیعی کیوبٹس کافی اچھے ہوں، تو مزید کیوبٹس شامل کرنے سے منطقی کیوبٹ بہتر ہونا چاہیے: کوڈ جتنا بڑا ہو، منطقی غلطیاں اتنی تیزی سے کم ہوں۔ مگر ”اگر“ اہم ہے۔ ایک critical شور حد سے نیچے redundancy مدد کرتی ہے؛ حد سے اوپر مزید کیوبٹس مزید شور لاتے ہیں۔ پچھلے تجربات یا تو غلط جانب پر رہے، یا پیمانہ بندی trend صاف نہیں دکھا سکے۔ کوڈ بڑا کرنے سے غلطی کم ہونے کے بجائے بڑھتی رہی۔

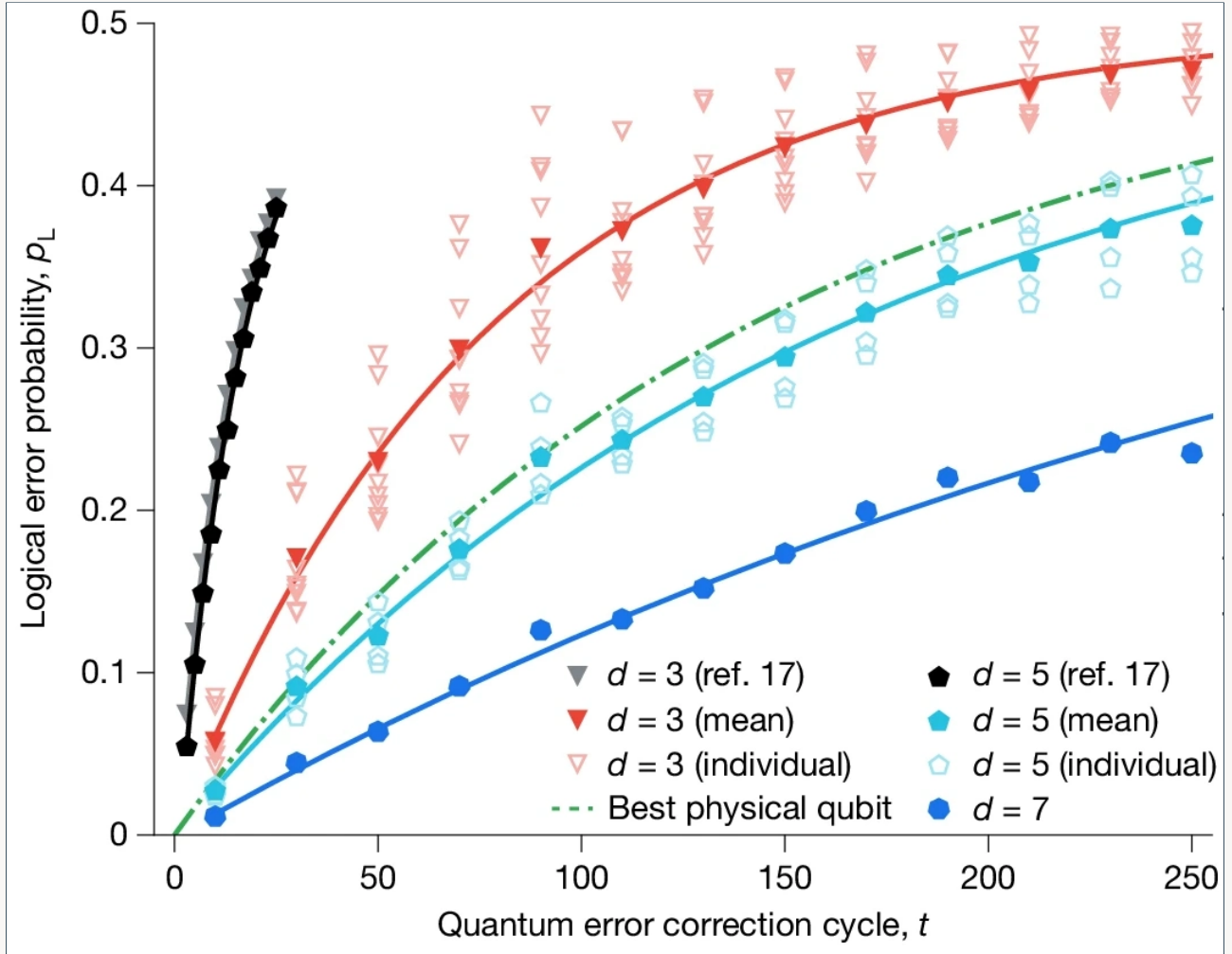
دسمبر 2024 میں Google کوانٹم اے آئی نے رپورٹ کیا کہ اس نے پہلی بار صاف طور پر دوسری حالت دکھائی۔ Willow نامی اپنی نئی processor superconducting نسل پر ٹیم نے فاصلہ 3، 5 اور 7 کے سطح-کوڈ memories بنائے۔ کوڈ بڑا کرنے پر ہر دفعہ منطقی غلطی شرح کم ہوئی — ہر دو فاصلہ مراحل پر دباؤ عامل $\Lambda = 14.2 \pm 0.2$ ۔ سب سے بڑا فاصلہ 7-یادداشت 101 کیوبٹس پر مشتمل تھا اور تصحیح کے ہر چکر میں منطقی غلطی $143\% \pm 0.003\%$ تک پہنچی۔ اور سرخی کے اندر اصل سرخی یہ تھی کہ رمزبند منطقی کیوبٹ اپنے chip کے بہترین طبیعی کیوبٹ سے 4.2 ± 3.0 گنا زیادہ دیر زندہ رہا۔ اسے ”beyond“ برابر کارکردگی کی حد” کہا جاتا ہے: پہلی بار غلطی-تصحیح overhead نے اسی hardware پر اپنی قیمت سے زیادہ فائدہ دیا۔

یہ واقعی سنگ میل ہے، مگر یہ سمجھنا ضروری ہے کہ کس نوعیت کا۔ یہ ثبوت ہے کہ پیمانہ بندی اب صحیح سمت میں جا رہی ہے۔ یہ working کوانٹم کمپیوٹر نہیں، اور مقالہ ایسا دعویٰ بھی نہیں کرتا۔

”سطح کوڈ“، ”فاصلہ“ اور ”below“ حد کا کیا مطلب ہے

سطح ہے۔ جاتا کیا encode پر کیوبٹس طبیعی کئی جسے ہے اکائی protected ایک کی معلومات کوانٹم کیوبٹ منطقی جانچ غلطیاں بار بار کیوبٹس ”پیمائش“ اضافی ہے؛ کرتا کام پر گرڈ 2D جو ہے طریقہ خاص ایک کا encoding اس کوڈ ترین کم وہ کی غلطیاں بلکہ نہیں، فاصلہ طبیعی d فاصلہ کوڈ کیے۔ پیمائش راست براہ کو معلومات محفوظ بغیر ہیں کرتے زیادہ اور بڑا d بڑا پکڑے۔ کے کوڈ بغیر ہے سکتی کر corrupt کو کیوبٹ منطقی کر ہو پر جگہوں مناسب جو ہے تعداد یہ اور $2d^2 - 1$ تقریباً بندی پیمانہ درسی کھردرا — ہیں لگتے کیوبٹس طبیعی زیادہ لیے کے اس مگر ہے، ٹکڑا مضبوط simultaneous 3 اور 2، تقریباً 7 اور 3، فاصلہ لیے اس ہے۔ سگنا کر درست تک غلطیاں $d - 2/1$ (میں وقت ایک یادداشت فاصلہ-7 کا Google ہیں؛ کرتے spend کیوبٹس طبیعی 97 اور 49، تقریباً اور ہیں کرتے درست غلطیاں 101 تھا۔ کرتا استعمال کیوبٹس 101

سے نیچے حد اصل phrase ہے۔ غلطی تصحیح تبھی فائدہ دیتی ہے جب طبیعی غلطی شرح critical حد سے نیچے ہو۔ اس حالت میں فاصلہ بڑھانے سے منطقی غلطی شرح exponentially دبانا ہوتی ہے۔ دباؤ عامل Λ اسی کو پیمائش کرتا ہے: $\Lambda < 1$ یعنی کوڈ بڑا کرنے سے فائدہ ہوتا ہے؛ Λ جتنا بڑا، دباؤ اتنی بہتر۔ Google نے $\Lambda \approx 14.2$ رپورٹ کیا، یعنی فاصلہ میں ہر دو-مرحلہ اضافہ منطقی غلطی شرح کو تقریباً نصف کر دیتا ہے۔ Λ کا آرام سے 1 سے اوپر ہونا ہی بنیادی حصہ نتیجہ ہے۔



تصحیح چکر کے ساتھ منطقی غلطی کیسے جمع ہوتی ہے، فاصلہ-3، 5- اور 7- memories کے لیے (اوپر سے نیچے)۔ سبز dashed لائن chip کے بہترین واحد طبیعی کیوبٹ کو دکھاتی ہے۔ فاصلہ-7 یادداشت کی blue منحنی اس لائن سے آہستہ غلطی جمع کرتی ہے، اس لیے رمز بند کیوبٹ ان طبیعی کیوبٹس میں سے بہترین کیوبٹ سے بھی زیادہ دیر چلتا ہے جن سے وہ بنا ہے۔ “beyond —” برابر کارکردگی کی حد، تقریباً $4.2 \times$ سے نیچے۔ حد دباؤ خود متن کے اعداد میں ہے: فاصلہ $7 \rightarrow 5 \rightarrow 3$ پر $\Lambda = 14.2$ ۔

Google Quantum AI and Collaborators / Nature CC BY-NC-ND 0.4

مصنفین نے کیا کیا

- دو Willow کھرچیں پر سطح-کوڈ memories بنائیں: 105-کیوبٹ processor نے فاصلہ-3، 5- اور 7- codes پیمانہ بندی ٹیسٹ کے لیے چلائے؛ سب سے بڑا 101-کیوبٹ، 49-ڈیٹا-کیوبٹ فاصلہ-7 یادداشت تھا۔ دوسرا 72-کیوبٹ processor فاصلہ-5 یادداشت کو حقیقی-وقت decoder کے ساتھ، اور بلند-فاصلہ codes repetition کے لیے استعمال ہوا۔
- منطقی غلطی فی چکر کو فاصلہ $7 \rightarrow 5 \rightarrow 3$ بڑھانے کے ساتھ پیمائش کیا اور دباؤ عامل Λ نکالا۔
- منطقی کیوبٹ کی عمر کو اسی chip کے بہترین فرد طبیعی کیوبٹ سے موازنہ کیا تاکہ “برابر کارکردگی کی حد” ٹیسٹ ہو۔
- فاصلہ-5 کوڈ کو حقیقی-وقت decoder کے ساتھ دس لاکھ چکر تک چلایا؛ کلاسیکی hardware غلطی جانچیں کو اتنی تیزی سے interpret کرتا رہا کہ تصحیح live چل سکے، صرف کے بعد-the-حقیقت تجزیہ نہ ہو۔
- نایاب گہرا غلطی مآخذ تلاش کرنے کے لیے codes repetition simpler کو فاصلہ 29 تک بڑھایا۔

کیا ملا

- کوڈ سے نیچے حد ہے۔ فاصلہ میں ہر دو-مرحلہ اضافہ پر منطقی غلطی/چکر $\Lambda = 14.2 \pm 0.2$ سے کم ہوئی — صاف exponential دباؤ، وہ رویہ جس کا نظریہ نے وعدہ کیا تھا اور processor پر پہلے demonstrate definitively نہیں ہوا تھا۔
- فاصلہ-7 یادداشت کی غلطی $143\% \pm 0.0$ فی چکر تک پہنچی اور بہترین طبیعی کیوبٹ سے 4.2 ± 3.0 گنا زیادہ دیر چلی — beyond برابر کارکردگی کی حد۔
- حقیقی-وقت decoding مشین کے ساتھ چل سکی۔ فاصلہ 5 پر latency decoder اوسط 63 microseconds تھی، جبکہ کوڈ چکر 1.1 microseconds تھا؛ pipeline نے دس لاکھ چکر sustain کیے۔ تصحیح live تھی، صرف بعد میں ڈیٹا عمل نہیں کیا گیا۔
- ایک نایاب، گہرا غلطی ماخذ باقی ہے۔ کوڈ-Repetition ٹیسٹ میں آکرار correlated غلطی bursts حد بنے، جو تقریباً ایک گھنٹے میں ایک بار ہوتے تھے — لگ بھگ 3×10^9 چکر میں ایک — اور غلطی کم ترین سطح تقریباً 10^{-10} پر سیٹ کرتے تھے۔ مصنفین کہتے ہیں اصل ابھی سمجھ نہیں آئی۔

یہ کیا ثابت نہیں کرتا

- یہ کوانٹم computation نہیں۔ یہ کوانٹم یادداشت ہے: ایک منطقی کیوبٹ کو محفوظ کرنا اور protect کیا گیا۔ منطقی کیوبٹس کے درمیان perform gates نہیں کیے گئے اور کوئی الگورتھم نہیں چلایا گیا۔
- یہ مفید مشین سے “صرف ایک کیوبٹ دور” نہیں۔ فاصلہ-7 منطقی کیوبٹ کے لیے تقریباً 101 طبیعی کیوبٹس لگے، اور تقریباً 1%0 فی-چکر غلطی حقیقی الگورتھمز کے لیے درکار تقریباً 10^{-6} سے 10^{-10} سے ابھی بہت اوپر ہے۔ خلا بند کرنے کے لیے larger فاصلے — ہر منطقی کیوبٹ کے لیے بہت زیادہ طبیعی کیوبٹس — چاہیے ہوں گے، اور مفید الگورتھمز کو thousands of منطقی کیوبٹس ایک ساتھ چاہئیں۔ کل طبیعی-کیوبٹ budget ملین تک جا سکا ہے۔
- “If” scaled واقعی اہم حالت ہے۔ مقالے کا نتیجہ ہے کہ آلہ کارکردگی، اگر پیمانہ ہو، بڑا الگورتھمز کی requirements پوری کر سکتی ہے۔ ایک منطقی کیوبٹ پر trend صحیح ہونا scaled مشین بن جانا نہیں، اور یہاں کچھ ضمانت نہیں کہ ایک ہی دباؤ بہت بڑی sizes تک برقرار رہے گی۔
- Unexplained غلطی کم ترین سطح زندہ مسئلہ ہے۔ bursts Correlated کوڈ-repetition کارکردگی کو cap کرتے ہیں، مصنفین کے مطابق متوقع سے مراتب of قد بڑے ہیں اور سمجھنے تک larger برداشت-fault کرنے والا applications روک سکتے ہیں۔ یہ solved تفصیل نہیں، مقالہ میں صاف کھلا flaw ہے۔
- یہ encryption توڑنے یا مفید “کوانٹم supremacy” کے بارے میں کچھ نہیں دکھاتا۔ وہ مکمل برداشت-fault کرنے والا کمپیوٹر کا کام ہے، اس بنیادی-stone مظاہرہ کا نہیں۔

شواہد کتنے مضبوط ہیں

- بنیادی حصہ دعویٰ ٹھوس اور اہم ہے۔ تین کوڈ فاصلے پر صاف exponential دباؤ، برابر-beyond کارکردگی کی حد عمر، اور working حقیقی-وقت decoder — یہی combination شعبہ کئی برس سے حاصل کرنا چاہتی تھی، اور یہاں براہ راست demonstrate ہوا ہے۔ یہ محض artefact hype نہیں، leading انجینئرنگ گروپ کا حقیقی نتیجہ ہے۔
- مصنفین دائرہ کے بارے میں محتاط ہیں۔ وہ اسے سے نیچے حد یادداشت کہتے ہیں، unexplained غلطی-correlated کم ترین سطح خود نشان کرتے ہیں، اور آئندہ کو “fi conspicuous” scaled کے ساتھ حالت کرتے ہیں۔ Overreach زیادہ تر surrounding

coverage میں آتا ہے، جہاں “غلطی-corrected یادداشت کیوٹ کوڈ بڑھنے سے بہتر ہوا” کو “کوانٹم computing آگئی” بنا دیا جاتا ہے۔

• دیانت دار حیثیت: بنیادی کا ایک اہم قدم۔ ایک منطقی کیوٹ، اتنا protect ہوا کہ مزید redundancy آخر کار واقعی مدد کرتی ہے؛ مگر پیمانہ بندی، منطقی gates اور unexplained غلطیاں کا لمبا، مشکل اور غیر-یقینی راستہ باقی ہے۔

یہ کیوں اہم ہے

Fault-tolerant کوانٹم computing میں ایک عرصے سے chicken-and-egg مسئلہ رہا ہے: مفید مشینوں کو ایسی کم غلطی شرح چاہیے جو طبیعی کیوٹ خود نہیں دے سکتے، جبکہ حل-غلطی کی تصحیح-تبیہ کام کرتا ہے جب hardware پہلے ہی ایک خاص حد سے نیچے کافی اچھا ہو۔ اس حد کو ایک بار بھی عبور کرنا، چاہے صرف ایک منطقی کیوٹ کے لیے، اسی لیے اہم ہے۔

مگر یہی نگہداشت جو نتیجہ کو trustworthy بناتی ہے، کہانی کو بھی temper کرنی چاہیے۔ یہ بنیادی کی پہلی brick ہے، اچھی طرح رکھی گئی۔ Building نہیں۔ اگلے برسوں میں کوانٹم computing کو پیروی کرنے کا درست طریقہ یہی unglamorous منحی ہے: کوڈ بڑا ہونے پر دباؤ عامل قائم رہتا ہے یا نہیں، منطقی gates یادداشت جتنے صاف بنتے ہیں یا نہیں، اور وہ mysterious once-an-hour غلطی کبھی وضاحت کرنا ہوتی ہے یا نہیں۔

صاف خلاصہ

Google کوانٹم اے آئی نے پہلی بار صاف طور پر دکھایا کہ سطح-کوڈ کوانٹم یادداشت سے نیچے حد کام کرتی کر سکتی ہے: کوڈ فاصلہ 3 سے 5 سے 7 بڑھانے پر منطقی غلطی شرح exponentially کم ہوئی، ہر دو مراحل پر تقریباً $14.2 \times$ دباؤ، اور سب سے بڑا 101-کیوٹ فاصلہ-7 یادداشت اپنے بہترین طبیعی کیوٹ سے زیادہ دیر زندہ رہا — beyond برابر کارکردگی کی حد — جبکہ غلطی تصحیح حقیقی وقت میں چلتی رہی۔ یہ کوانٹم-کمپیوٹر انجینئرنگ کا حقیقی اور طویل عرصے سے مطلوب سنگ میل ہے۔ مگر یہ صرف ایک منطقی کیوٹ بطور یادداشت ہے، غلطی شرح حقیقی الگورتھمز کی ضرورت سے ابھی بہت دور ہے، منطقی operations نہیں ہوئے، unexplained غلطی کم ترین سطح باقی ہے، اور پیمانہ بندی میں کئی مراتب of قد کا سفر ہے۔ ایک حقیقی حد cross ہوئی ہے — کوانٹم کمپیوٹر فراہم کرنا نہیں ہوا۔

ماخذ

920 ,638 Nature threshold, code surface the below correction error Quantum Collaborators, and AI Quantum Google (2025)

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>

a corrects — (2026) E5 ,653 Nature threshold, code surface the below correction error Quantum Correction: Author results (1 (Fig. below-threshold the affect not does keys; legend and label axis 3a Fig.

<https://www.nature.com/articles/s41586-026-10559-8>