The
CLEAN PAPER

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

وہ لمحہ جب curve آخرکار 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× *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-*computer engineering* 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 *computer deliver* 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: 10.1038/s41586-024-08449-y

وہ لمحہ جب منحنی آخرکار 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۔

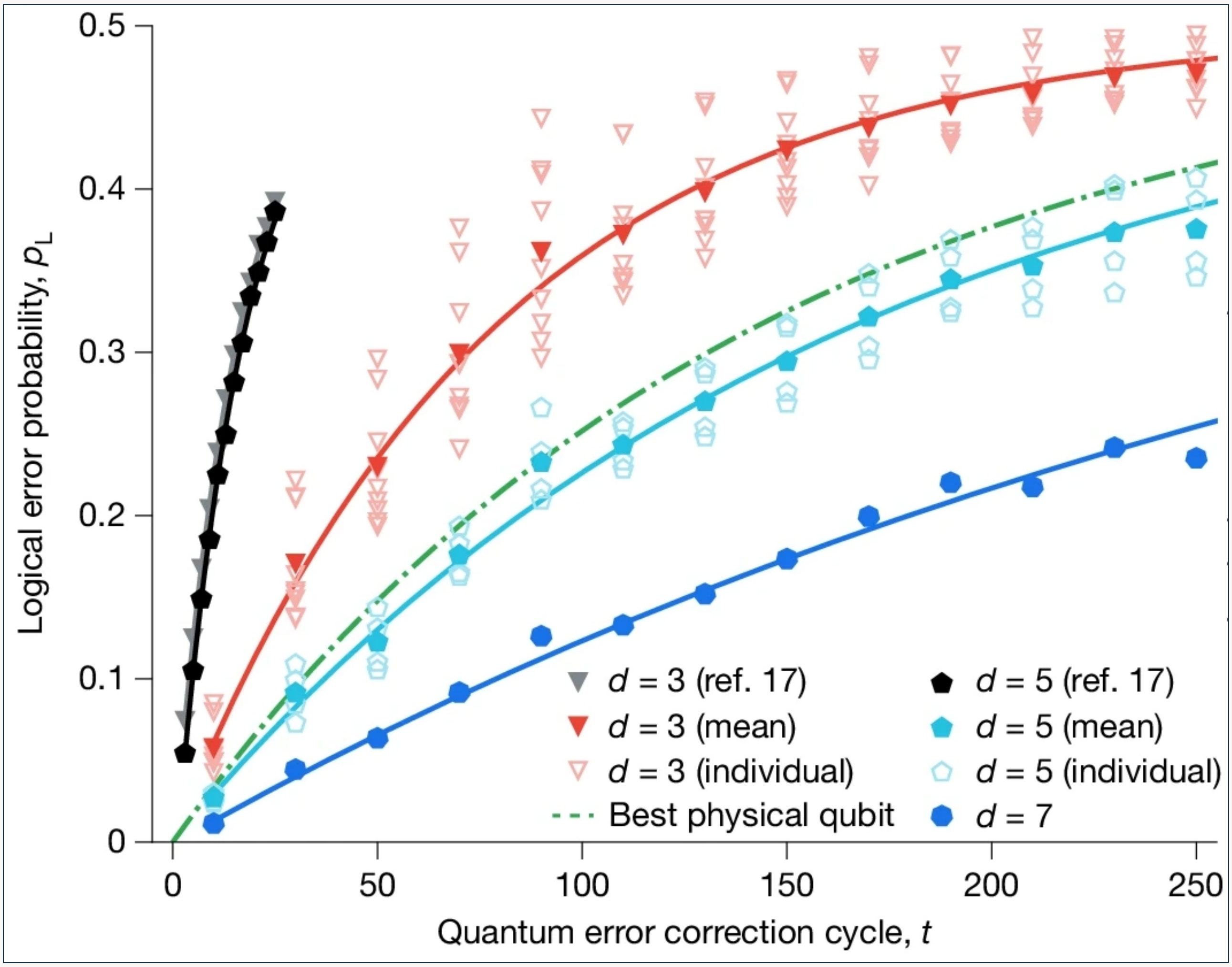
دسمبر 2024 میں Google کوانٹم اے آئی نے رپورٹ کیا کہ اس نے پہلی بار صاف طور پر دوسری حالت دکھائی۔ Willow نامی اپنی نئی superconducting processor نسل پر ٹیم نے فاصلہ 3، 5 اور 7 کے سطح-کوڈ memories بنائے۔ کوڈ بڑا کرنے پر ہر دفعہ منطقی غلطی شرح **کم** ہوئی — ہر دو فاصلہ مراحل پر دباؤ عامل **Λ = 14.2 ± 02.0**۔ سب سے بڑا فاصلہ-7 یادداشت 101 کیوبٹس پر مشتمل تھا اور تصحیح کے ہر چکر میں منطقی غلطی **143%.0 ± 003%.0** 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 سنگِ 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 براہِ 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 — $1 - 2d^2$ تقریباً بندی پیمانہ درسی کھردرا — ہیں لگتے کیوبٹس طبیعی زیادہ لیے کے اس مگر ہے، ٹکڑا مضبوط simultaneous 3 اور 2 1، تقریباً 7 اور 5 3، فاصلہ لیے اس ہے۔ سکتا کر درست تک غلطیاں 1)/2 − d(میں وقت ایک یادداشت فاصلہ-7 کا Google ہیں؛ کرتے spend کیوبٹس طبیعی 97 اور 49 17، تقریباً اور ہیں کرتے درست غلطیاں 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: Λ > 1 یعنی کوڈ بڑا کرنے سے فائدہ ہوتا ہے؛ Λ جتنا بڑا، دباؤ اتنی بہتر۔ Google نے Λ ≈ 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 ھی 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 رمزبند 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×۔ سے نیچے-حد دباؤ خود متن کے اعداد میں ہے: فاصلہ 3→5→7 پر Λ = 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 repetition codes کے لیے استعمال ہوا۔
- منطقی غلطی **فی چکر** کو فاصلہ 3→5→7 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 simpler **codes repetition** کو فاصلہ 29 تک بڑھایا۔

کیا ملا

- **کوڈ سے نیچے حد ہے۔** فاصلہ میں ہر دو-مرحلہ اضافہ پر منطقی غلطی/چکر Λ = **14.2 ± 02.0** سے کم ہوئی — صاف exponential دباؤ، وہ رویّہ جس کا نظریہ نے وعدہ کیا تھا اور processor پر پہلے definitively demonstrate نہیں ہوا تھا۔
- **فاصلہ-7 یادداشت کی غلطی 143%.0 ± 003%.0 فی چکر** تک پہنچی اور بہترین طبعی 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 decoder latency 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۔** Repetition-کوڈ ٹیسٹ میں آخرکار 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 طبعی 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 طبعی کیوبٹس — چاہیے ہوں گے، اور مفید الگورتھمز کو **thousands of منطقی کیوبٹس** ایک ساتھ چاہئیں۔ کل طبعی-کیوبٹ budget ملین تک جا سکتا 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۔** Correlated bursts repetition-کوڈ 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۔

شواهد 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 براہِ راست demonstrate ہوا ہے۔ یہ محض hype artefact نہیں؛ leading انجینئرنگ گروپ کا حقیقی نتیجہ ہے۔
- **مصنفین دائرہ کے بارے میں محتاط ہیں۔** وہ اسے نیچے-حد **یادداشت** کہتے ہیں، unexplained غلطی-correlated کم ترین سطح خود نشان کرتے ہیں، اور آئندہ کو conspicuous "fi scaled" کے ساتھ حالت کرتے ہیں۔ Overreach زیادہ تر surrounding

coverage میں آتا ہے، جہاں "غلطی-corrected یادداشت کیوبٹ کوڈ بڑھنے سے بہتر ہوا" کو "کوانٹم computing آ گئی" بنا دیا جاتا ہے۔

- **دیانت دار حیثیت: بنیادی کا ایک اہم قدم۔** ایک منطقی کیوبٹ، اتنا protect ہوا کہ مزید redundancy آخرکار 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 کیوبٹ خود نہیں دے سکتے، جبکہ حل—غلطی کی تصحیح—تبھی 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 کیوبٹ 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 منحنی 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 ×2.14 دباؤ، اور سب سے بڑا 101-کیوبٹ فاصلہ-7 یادداشت اپنے بہترین طبیعی کیوبٹ 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 سنگِ میل 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 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

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