The CLEAN PAPER

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

یک حافظهٔ کوانتومی بالاخره با بزرگ‌تر شدن بهتر شد — نقطهٔ عطف واقعی، و ماشینی که هنوز نیست

Google Quantum AI برای نخستین بار به‌طور روشن نشان داد یک حافظهٔ کوانتومی *code surface* می‌تواند *below threshold* کار کند: با رشد کد از فاصلهٔ ۳ به ۵ به ۷، نرخ خطای منطقی به‌صورت نمایی پایین آمد (حدود 14.2× به ازای هر دو واحد)، و بزرگ‌ترین نمونه، حافظهٔ فاصله-۷ با ۱۰۱ کیوبیت، از بهترین کیوبیت فیزیکی خودش بیشتر عمر کرد — *beyond breakeven* — در حالی که تصحیح خطا بلادرنگ اجرا می‌شد. نقطهٔ عطف مهندسی واقعی است. اما یک کیوبیت منطقی در نقش حافظه است، با خطایی هنوز بسیار بالاتر از نیاز الگوریتم‌ها، بدون *gate* منطقی، با کف خطای ناشناخته و چندین مرتبهٔ بزرگی *scaling* در پیش. آستانه‌ای رد شد، نه رایانه‌ای تحویل داده شد.

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

لحظه‌ای که منحنی بالاخره در جهت درست خم شد

سی سال است تصحیح خطای کوانتومی بر وعده‌ای تکیه دارد که هیچ آزمایشی آن را تمیز و روشن محقق نکرده بود. نظریه می‌گوید اگر یک واحد اطلاعات کوانتومی — یک کیوبیت منطقی — را روی تعداد زیادی کیوبیت فیزیکی پرنویز پخش کنید و اگر آن کیوبیت‌های فیزیکی به‌اندازهٔ کافی خوب باشند، افزودن تعداد بیشتر باید کیوبیت منطقی را بهتر کند و با بزرگ شدن کد، خطا به‌صورت نمایی پایین بیاید. گیر کار همان «اگر» است: پایین یک آستانهٔ بحرانی نویز، کیوبیت بیشتر کمک می‌کند؛ بالای آن، کیوبیت بیشتر فقط نویز بیشتری می‌آورد. همهٔ آزمایش‌های قبلی در سمت نادرست این خط بودند یا نتوانسته بودند روند را تمیز نشان دهند. بزرگ کردن کد وضع را بدتر می‌کرد، نه بهتر.

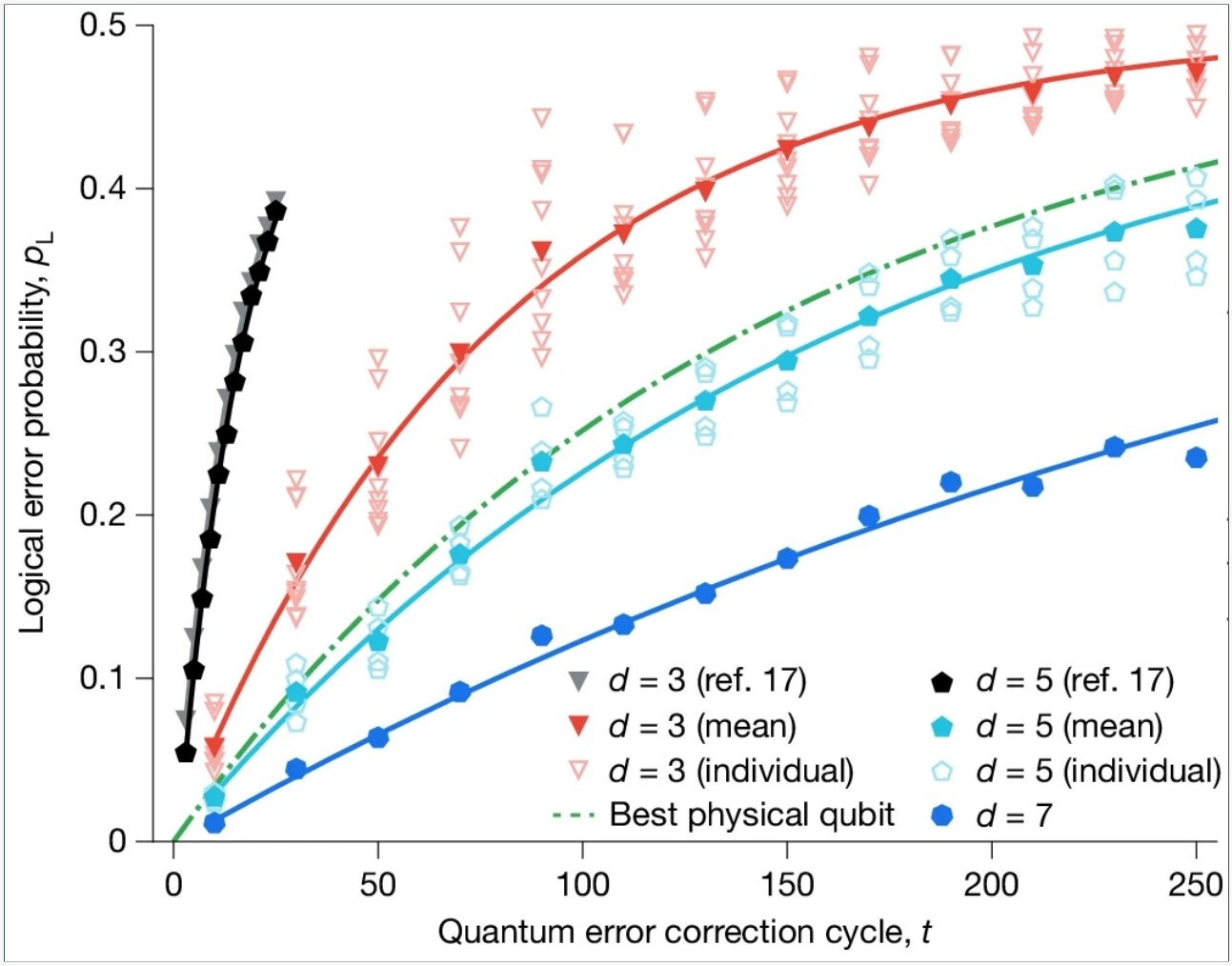
در دسامبر ۲۰۲۴، Google Quantum AI گزارش کرد نخستین نمایش روشن از رژیم دیگر را به دست آورده است. روی Willow، نسل جدید پردازنده‌های ابررسانای آن‌ها، حافظه‌های code surface با فاصلهٔ کد ۳، ۵ و ۷ ساختند و دیدند هر بار کد بزرگ‌تر شد نرخ خطای منطقی کاهش یافت — به‌اندازهٔ ضریب $\Lambda = 14.2 \pm 0.02$ به ازای هر دو واحد افزایش فاصله. بزرگ‌ترین نمونه، حافظهٔ فاصله-۷ با ۱۰۱ کیوبیت، یک کیوبیت منطقی را با خطای $0.143\% \pm 0.003\%$ در هر چرخهٔ تصحیح نگه داشت و — تیتر درون تیتر — **از بهترین کیوبیت فیزیکی خودش هم بیشتر عمر کرد**، به ضریب 2.4 ± 0.3. این وضعیت «beyond breakeven» نامیده می‌شود و نخستین بار است که کل هزینهٔ تصحیح خطا روی این سخت‌افزار از نظر طول عمر خودش را جبران کرده است.

این یک نقطهٔ عطف واقعی است و باید دقیق گفت چه نوع نقطهٔ عطفی. اثباتی است که scaling اکنون در جهت درست می‌رود. یک رایانهٔ کوانتومی عملیاتی نیست و مقاله هم چنین ادعایی ندارد.

«surface code»، «distance» و «below threshold» یعنی چه

کدگذاری فیزیکی کیوبیت زیادی تعداد روی که است کوانتومی اطلاعات از محافظت‌شده‌ای واحد **منطقی کیوبیت** یک اضافیِ کیوبیت‌های آن در است؛ دوبعدی شبکهٔ یک روی کدگذاری این برای خاصی روش **surface code** می‌شود. کمترین نیست: فیزیکی فاصلهٔ d **کد فاصلهٔ** می‌کنند. بررسی ذخیره‌شده اطلاعات زدن برهم بدون را خطاها مدام «اندازه‌گیری» بزرگ‌تر d کنند. خراب شود متوجه کد آنکه بدون را منطقی کیوبیت می‌توانند که است درست‌جای گرفته‌ای خطاهای تعداد تا بیشتری، هم‌زمان خطاهای و $(2d^2 - 1)$ (تقریباً می‌کند مصرف بیشتری فیزیکی کیوبیت — مقاوم‌تر و بزرگ‌تر patch یعنی را هم‌زمان خطای ۳ و ۱۲، به‌ترتیب ۷، و ۵ ۳، فاصله‌های آزموده‌شده، اندازهٔ سه بنابراین می‌کند. اصلاح را $(d - 1)/2$، کیوبیت ۱۰۱ عمل در Google فاصله-۷ حافظهٔ — می‌کنند مصرف فیزیکی کیوبیت ۹۷ و ۴۹ ۱۷، تقریباً و می‌کنند اصلاح کتابی. حداقل این از بیشتر کمی داشت،

عبارت **«below threshold»** بخش حیاتی است. تصحیح خطا فقط وقتی کمک می‌کند که نرخ خطای فیزیکی زیر یک مقدار بحرانی باشد؛ آنجا هر افزایش فاصله نرخ خطای منطقی را به‌صورت نمایی سرکوب می‌کند. ضریب سرکوب Λ این را اندازه می‌گیرد — $\Lambda > 1$ یعنی بزرگ کردن کد کمک می‌کند و هرچه Λ بزرگ‌تر باشد بهتر است. Google مقدار $\Lambda \approx 14.2$ گزارش می‌کند، یعنی هر دو واحد افزایش فاصله تقریباً نرخ خطای منطقی را نصف کرده است. اینکه Λ با فاصلهٔ امنی بالاتر از ۱ است، تمام نکتهٔ نتیجه است.



چگونگی انباشته شدن خطای منطقی در چرخه‌های تصحیح برای حافظه‌های فاصله-۳، -۵ و -۷ (از بالا به پایین). خطی که باید نگاه کرد خط سبز نقطه‌چین است — بهترین کیوبیت فیزیکی منفرد روی تراشه. حافظهٔ فاصله-۷ (آبی، پایین‌ترین) خطا را کندتر از آن خط جمع می‌کند، بنابراین کیوبیت کدگذاری‌شده از بهترین کیوبیت فیزیکی سازندهٔ خودش بیشتر عمر می‌کند — «beyond breakeven»، به ضریب 4.2×. این نتیجهٔ طول عمر است؛ خود سرکوب below-threshold (Λ = 14.2) هنگام رشد کد از فاصلهٔ ۳ به ۵ به ۷) در عددهای متن دیده می‌شود.

نویسندگان چه کردند

- حافظه‌های code surface را روی دو تراشهٔ Willow ساختند: یک پردازندهٔ ۱۰۵ کیوبیتی که کدهای فاصله-۳، -۵ و -۷ آزمون scaling را اجرا کرد (بزرگ‌ترین، حافظهٔ فاصله-۷ با ۱۰۱ کیوبیت و ۴۹ کیوبیت داده)، و یک پردازندهٔ ۷۲ کیوبیتی که حافظهٔ فاصله-۵ با decoder بلادرنگ و همچنین repetition های‌code فاصله‌بالا را اجرا کرد.
- اندازه گرفتند خطای منطقی در هر چرخه با افزایش فاصلهٔ کد از ۳ به ۵ به ۷ چگونه تغییر می‌کند و ضریب سرکوب Λ را استخراج کردند.
- طول عمر کیوبیت منطقی را با بهترین کیوبیت فیزیکی منفرد روی همان تراشه مقایسه کردند تا breakeven را بیازمایند.
- کد فاصله-۵ را با **decoder بلادرنگ** اجرا کردند — سخت‌افزار کلاسیکی که چک‌های خطا را همان‌قدر سریع که تولید می‌شوند تفسیر می‌کند — تا یک میلیون چرخه، برای نشان دادن اینکه تصحیح خطا می‌تواند با دستگاه همگام بماند.
- **code repetition**های ساده‌تر را تا فاصلهٔ ۲۹ گسترش دادند تا منبع‌های نادر و عمیق خطا را که کف عملکرد را تعیین می‌کنند

پیدا کنند.

چه پیدا کردند

- **کد زیر آستانه است.** خطای منطقی در هر چرخه با هر دو واحد افزایش فاصله به ضریب $\Lambda = 14.2 \pm 0.2$ کاهش یافت — سرکوب نمایی تمیز، رفتاری که نظریه وعده داده بود و هیچ پردازنده‌ای پیش‌تر به‌طور قطعی نشان نداده بود.
- **حافظهٔ فاصله-۷ به خطای $0.143\% \pm 0.003\%$ در هر چرخه رسید و 4.2 ± 3.0 برابر بیشتر** از بهترین کیوبیت فیزیکی‌اش عمر کرد — breakeven، beyond.
- **decoder بلادرنگ از پس کار برآمد.** در فاصلهٔ ۵، میانگین latency آن ۶۳ میکروثانیه در برابر زمان چرخهٔ ۱٫۱ میکروثانیه بود و برای یک میلیون چرخه پایدار ماند — تصحیح خطا زنده اجرا شد، نه فقط در تحلیل پس از آزمایش.
- **یک منبع خطای نادر و عمیق باقی مانده است.** در آزمون‌های repetition code، عملکرد در نهایت با هایburst خطای همبسته محدود شد که تقریباً **ساعتی یک بار** رخ می‌دادند (حدود یک مورد در هر 3×10^9 چرخه) و کف خطایی نزدیک 10^{-01} ایجاد می‌کردند، منشأ آن به گفتهٔ نویسندگان **هنوز فهمیده نشده است.**

این مقاله چه چیزی را اثبات نمی‌کند

- این یک رایانهٔ کوانتومی در حال محاسبه **نیست.** یک حافظهٔ کوانتومی است: یک کیوبیت منطقی را ذخیره و محافظت می‌کند. عملیات منطقی (gate) میان کیوبیت‌های منطقی انجام نمی‌دهد و الگوریتمی اجرا نمی‌کند.
- فقط یک کیوبیت با ماشین مفید فاصله **ندارد.** یک کیوبیت منطقی فاصله-۷ حدود ۱۰۱ کیوبیت فیزیکی مصرف می‌کند؛ نرخ خطای حدود ۰٫۱٪ در هر چرخه هنوز بسیار بالاتر از حدود 10^{-6} تا 10^{-01} مورد نیاز الگوریتم‌های واقعی است. بستن این شکاف یعنی رفتن به فاصله‌های بسیار بزرگ‌تر — کیوبیت فیزیکی بسیار بیشتر برای هر کیوبیت منطقی — و الگوریتم‌های مفید به هزاران کیوبیت منطقی هم‌زمان نیاز دارند. بودجهٔ کیوبیت فیزیکی آن به میلیون‌ها می‌رسد.
- عبارت «**اگر مقیاس داده شود**» واقعاً بار نتیجه را حمل می‌کند. نتیجه‌گیری خود مقاله این است که عملکرد دستگاه، اگر مقیاس داده شود، می‌تواند نیازهای الگوریتم‌های بزرگ را برآورده کند. درست بودن روند برای یک کیوبیت منطقی با ساخت دستگاه مقیاس‌یافته یکی نیست و هیچ‌چیز تضمین نمی‌کند روند تا اندازه‌های بسیار بزرگ‌تر حفظ شود.
- **کف خطای توضیح‌داده‌نشده یک مشکل زنده است.** هایburst همبسته‌ای که عملکرد code repetition را محدود می‌کنند، به گفتهٔ نویسندگان چند مرتبهٔ بزرگی بیش از انتظارند و تا وقتی فهمیده نشوند کاربردهای تحمل‌خطای بزرگ‌تر را ناممکن می‌کنند — نقصی باز و صریحاً بیان‌شده، نه جزئیاتی حل‌شده.
- دربارهٔ **شکستن رمزنگاری یا «quantum supremacy» برای کارهای مفید** چیزی نمی‌گوید. آن‌ها به ماشین تحمل‌خطای کامل نیاز دارند که این نتیجه فقط یکی از سنگ‌های بنیادش است.

قدرت شواهد چقدر است؟

- **ادعای مرکزی محکم و مهم است.** کارکرد زیر آستانه با سرکوب نمایی تمیز در سه فاصلهٔ کد، همراه با طول عمر beyond-breakeven و decoder بلادرنگ عملی، دقیقاً ترکیبی است که حوزه مدت‌ها در پی آن بود و مستقیماً نشان داده شده نه استنباط. این مصنوع hype نیست؛ یک نتیجهٔ مهندسی واقعی از گروهی پیشرو است.

- **نویسندگان دربارهٔ دامنهٔ نتیجه محتاط‌اند.** آن را حافظهٔ *below-threshold* معرفی می‌کنند، خودشان کف خطای همبستهٔ ناشناخته را برجسته می‌کنند و آینده را با همان «اگر مقیاس داده شود» آشکار مشروط می‌گذارند. اغراق، وقتی رخ می‌دهد، بیشتر در پوششی است که «حافظهٔ تصحیح‌خطا با بزرگ شدن بهتر شد» را به «رایانش کوانتومی رسید» گرد می‌کند.
- **وضعیت صادقانه یک گام بنیادیِ خوب برداشته‌شده است.** یک کیوبیت منطقی، آن‌قدر خوب محافظت‌شده که افزودن افزونگی بالاخره کمک می‌کند — با راهی بلند، دشوار و تضمین‌نشده برای scaling، gate های منطقی و خطاهای توضیح‌داده‌نشده در پیش.

چرا مهم است

رایانش کوانتومی تحمل‌خطا همیشه حس مرغ و تخم‌مرغ داشته است: ماشین مفید به نرخ خطایی نیاز دارد که هیچ کیوبیت فیزیکی نمی‌تواند به آن برسد، و راه‌حل — تصحیح خطا — فقط وقتی کار می‌کند که سخت‌افزار از قبل آن‌قدر خوب باشد که زیر آستانه قرار گیرد. عبور از این خط، حتی یک بار و حتی روی فقط یک کیوبیت منطقی، پرسش را از «اصلاً ممکن است؟» به «تا کجا و با چه سرعتی می‌شود مقیاسش داد؟» تغییر می‌دهد. این تغییر واقعی و معنادار است و دلیل توجه به نتیجه همین است.

اما همان دقتی که نتیجه را قابل‌اعتماد می‌کند باید داستان پیرامونش را هم مهار کند. این نخستین آجر یک پی است، خوب گذاشته شده. ساختمان نیست و کسانی که آجر را گذاشتند اولین کسانی‌اند که همین را می‌گویند. راه درست دنبال کردن رایانش کوانتومی در چند سال آینده همین منحنی کم‌زرق‌وبرق است: آیا ضریب سرکوب با بزرگ شدن کدها باقی می‌ماند، آیا gate های منطقی به تمیزی حافظهٔ منطقی انجام می‌شوند، و آیا آن خطای مرموز ساعتی بالاخره توضیح داده می‌شود.

خلاصهٔ تمیز

AI Quantum Google برای نخستین بار به‌طور تمیز نشان داد یک حافظهٔ کوانتومی code surface می‌تواند زیر آستانه کار کند: با بزرگ شدن کد از فاصلهٔ ۳ به ۵ به ۷، نرخ خطای منطقی به‌طور نمایی کاهش یافت (حدود 14.2× به ازای هر دو واحد افزایش)، و بزرگ‌ترین نمونه، حافظهٔ فاصله-۷ با ۱۰۱ کیوبیت، از بهترین کیوبیت فیزیکی خودش بیشتر عمر کرد — breakeven beyond — در حالی که تصحیح خطا به‌صورت بلادرنگ اجرا می‌شد. این یک نقطهٔ عطف واقعی و دیرانتظار در مهندسی رایانه‌های کوانتومی است. اما همچنان فقط یک کیوبیت منطقی در نقش حافظه است، با نرخ خطایی بسیار بالاتر از نیاز الگوریتم‌های واقعی، بدون عملیات منطقی، با کف خطای ناشناخته‌ای که خود نویسندگان برجسته کرده‌اند و چندین مرتبهٔ بزرگی scaling در پیش. یک آستانه واقعاً رد شد — نه اینکه رایانه تحویل شده باشد.

منابع

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