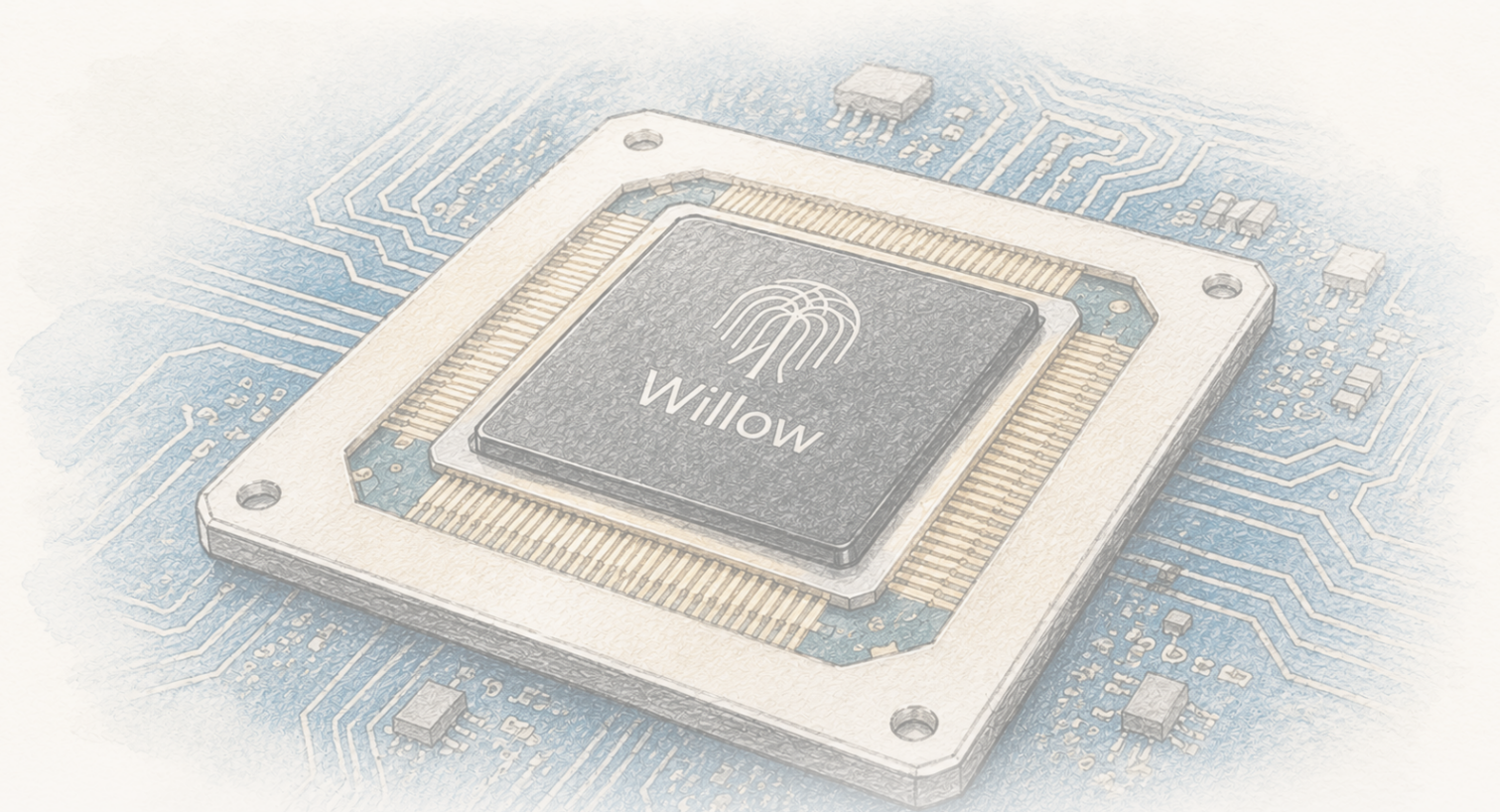




The CLEAN PAPER

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

Bộ nhớ lượng tử cuối cùng đã tốt hơn khi lớn lên — cột mốc thật sự, và cỗ máy mà nó chưa phải

Google Quantum AI lần đầu chứng minh rõ ràng rằng một bộ nhớ lượng tử surface-code có thể hoạt động dưới ngưỡng: khi mã tăng từ distance 3 lên 5 rồi 7, tỷ lệ lỗi logic giảm theo hàm mũ (khoảng $2,14\times$ mỗi hai bước), và bộ lớn nhất, bộ nhớ distance-7 dùng 101 qubit, sống lâu hơn qubit vật lý tốt nhất của chính nó — vượt điểm hòa vốn — với sửa lỗi chạy theo thời gian thực. Đây là một cột mốc kỹ thuật được chờ đợi lâu. Nhưng nó vẫn chỉ là một qubit logic dùng làm bộ nhớ, ở tỷ lệ lỗi còn xa mức thuật toán thật cần, chưa thực hiện phép toán logic, có một sản lỗi chưa giải thích mà chính tác giả nêu ra và còn nhiều bậc độ lớn phải mở rộng. Một ngưỡng đã được vượt qua, chưa phải một máy tính hoàn chỉnh.

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

Cuối cùng, bộ nhớ lượng tử tốt hơn khi nó lớn lên

Sửa lỗi lượng tử có một lời hứa đơn giản nhưng rất khó thực hiện. Mã hóa một đơn vị thông tin lượng tử — một *qubit logic* — trên nhiều qubit vật lý nhiều, và nếu các qubit vật lý đủ tốt thì thêm *nhiều hơn* phải làm qubit logic *tốt hơn*, với lỗi giảm theo hàm mũ khi mã lớn lên. Cái khó nằm ở chữ “nếu”: dưới một ngưỡng nhiều tới hạn, thêm qubit giúp; trên ngưỡng đó, thêm qubit chỉ thêm nhiễu. Mọi thí nghiệm trước đây hoặc đều nằm sai phía của ranh giới này, hoặc chưa cho thấy xu hướng đủ sạch. Làm mã lớn hơn khiến mọi thứ tệ hơn, không tốt hơn.

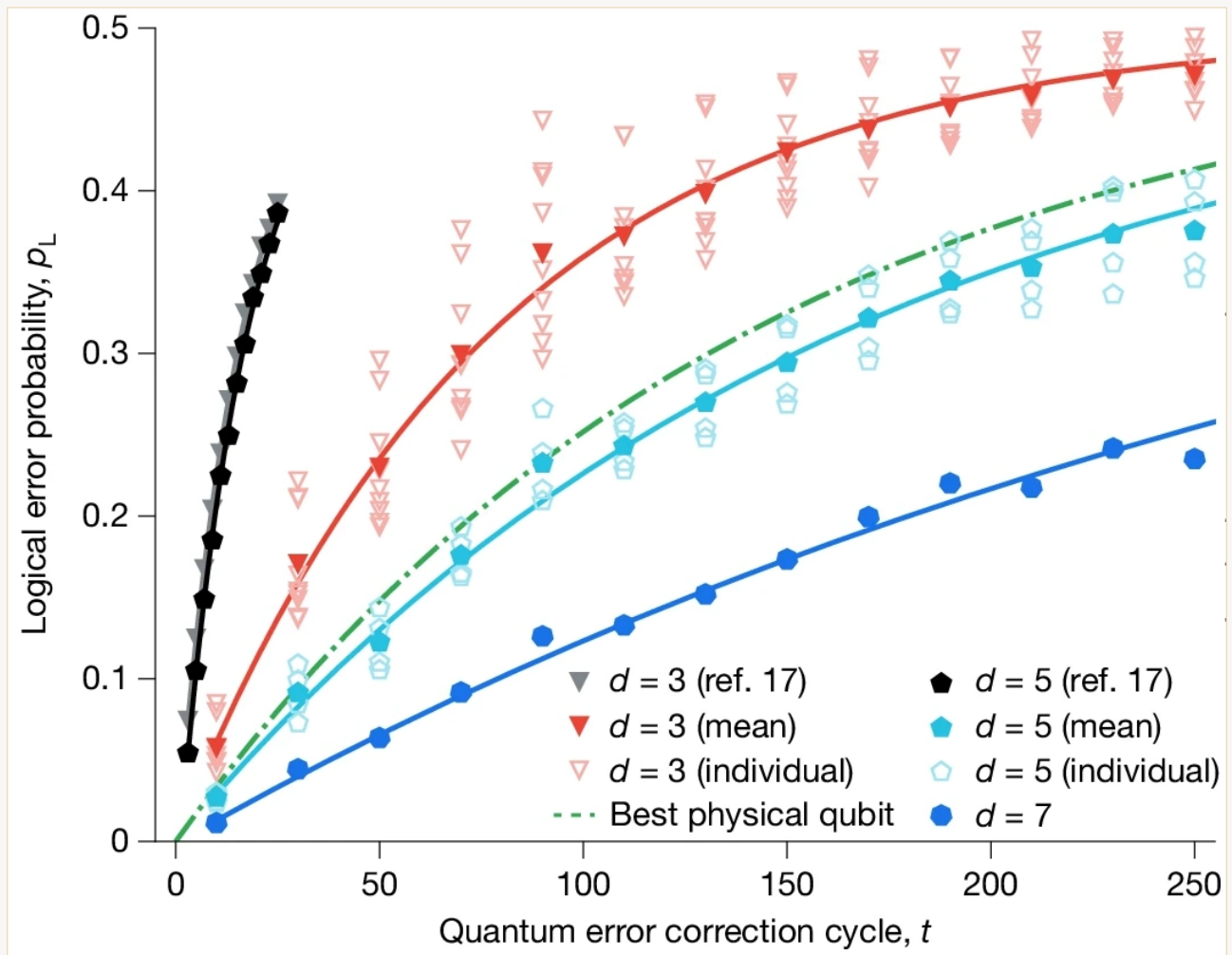
Tháng 12/2024, Google Quantum AI báo cáo mình chứng rõ ràng đầu tiên về chế độ ngược lại. Trên Willow, thế hệ bộ xử lý siêu dẫn mới nhất của họ, nhóm xây các bộ nhớ surface-code ở khoảng cách mã 3, 5 và 7, rồi thấy tỷ lệ lỗi logic *giảm* mỗi lần mã lớn hơn — theo hệ số $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ cho mỗi hai bước tăng khoảng cách. Bộ nhớ lớn nhất, distance-7 dùng 101 qubit, giữ một qubit logic với lỗi $0.143\% \pm 0.003\%$ mỗi chu kỳ sửa lỗi và — tiêu đề nằm trong tiêu đề — sống *lâu hơn chính qubit vật lý tốt nhất của nó*, theo hệ số 2.4 ± 0.3 . Điều này được gọi là “vượt điểm hòa vốn” (*beyond breakeven*), và là lần đầu toàn bộ bộ máy sửa lỗi thực sự tự bù lại chi phí của nó trên phần cứng này.

Đây là một cột mốc thật sự, và cần nói chính xác nó thuộc loại nào. Nó chứng minh xu hướng khi mở rộng quy mô giờ đã đi đúng hướng. Nó không phải một máy tính lượng tử đang hoạt động, và bài báo cũng không tuyên bố như vậy.

“Surface code”, “distance” và “below threshold” nghĩa là gì

Một **qubit logic** là một đơn vị thông tin lượng tử được bảo vệ bằng cách mã hóa trên nhiều qubit vật lý. **Surface code** là một cách cụ thể để làm việc đó trên lưới 2D, nơi các qubit “đo” bổ sung liên tục kiểm tra lỗi mà không làm xáo trộn thông tin được lưu. **Khoảng cách mã** (*distance*) d không phải khoảng cách vật lý: đó là số lỗi được đặt đúng chỗ nhỏ nhất có thể làm hỏng qubit logic mà mã không phát hiện được. d lớn hơn nghĩa là một mảng lớn và bền hơn — dùng nhiều qubit vật lý hơn (xấp xỉ $2d^2 - 1$) và sửa được nhiều lỗi đồng thời hơn, tối đa $(d - 1)/2$ lỗi. Vì vậy ba kích thước thử ở đây, distance 3, 5 và 7, lần lượt sửa được 1, 2 và 3 lỗi đồng thời và dùng xấp xỉ 17, 49 và 97 qubit vật lý — bộ nhớ distance-7 Google xây thực tế dùng 101, hơi trên mức tối thiểu sách giáo khoa này.

“**Below threshold**” — dưới ngưỡng — là cụm từ then chốt. Sửa lỗi chỉ giúp nếu tỷ lệ lỗi vật lý nằm dưới một giá trị tới hạn; khi đó, mỗi lần tăng distance sẽ làm tỷ lệ lỗi logic giảm theo hàm mũ. Hệ số triệt lỗi Λ đo điều này — $\Lambda > 1$ nghĩa là làm mã lớn hơn có ích, và Λ càng cao càng tốt. Google báo $\Lambda \approx 2.14$, tức mỗi lần tăng distance thêm hai đơn vị thì tỷ lệ lỗi logic giảm khoảng một nửa. Việc Λ nằm thoải mái trên 1 chính là cốt lõi của kết quả.



Lỗi logic tích lũy như thế nào qua các chu kỳ sửa lỗi ở các bộ nhớ distance-3, -5 và -7 (từ trên xuống). Đường cần nhìn là nét đứt màu xanh lá — qubit vật lý đơn tốt nhất trên chip. Bộ nhớ distance-7 (màu xanh dương, thấp nhất) tích lũy lỗi chậm hơn đường đó, nên qubit đã mã hóa sống lâu hơn qubit vật lý tốt nhất tạo nên nó — “vượt điểm hòa vốn”, theo hệ số $2,4\times$. Đây là kết quả về thời gian sống; sự triệt lỗi dưới ngưỡng ($\Lambda = 2,14$ khi mã tăng từ distance 3 lên 5 rồi 7) nằm trong các con số của phần văn bản.

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

Các tác giả đã làm gì

- Xây bộ nhớ surface-code trên hai chip Willow: một bộ xử lý 105 qubit chạy các mã distance-3, -5 và -7 cho phép thử mở rộng quy mô (lớn nhất là bộ nhớ distance-7 dùng 101 qubit, gồm 49 qubit dữ liệu), và một bộ xử lý 72 qubit chạy bộ nhớ distance-5 với bộ giải mã thời gian thực cùng các mã lập distance cao.
- Đo lỗi logic *mỗi chu kỳ* thay đổi thế nào khi tăng distance của mã từ 3 lên 5 rồi 7, từ đó rút ra hệ số triệt Λ .
- So sánh thời gian sống của qubit logic với qubit vật lý riêng lẻ tốt nhất trên cùng chip, để kiểm tra “điểm hòa vốn”.
- Chạy mã distance-5 với **bộ giải mã thời gian thực** — phần cứng cố điển diễn giải các phép

kiểm tra lỗi khi chúng được sinh ra — trong tối đa một triệu chu kỳ, để chứng minh sửa lỗi có thể theo kịp máy.

- Đẩy các **mã lặp** đơn giản hơn lên distance 29 để săn những nguồn lỗi hiếm và sâu đặt ra sản hiệu năng.

Họ tìm thấy gì

- **Mã hoạt động dưới ngưỡng.** Lỗi logic mỗi chu kỳ giảm theo hệ số $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ cho mỗi lần distance tăng hai đơn vị — sự triệt theo hàm mũ sạch, đúng hành vi lý thuyết hứa hẹn nhưng chưa bộ xử lý nào trước đó chứng minh dứt khoát.
- **Bộ nhớ distance-7 đạt lỗi $0,143\% \pm 0,003\%$ mỗi chu kỳ** và sống **lâu hơn $2,4 \pm 0,3$ lần** so với qubit vật lý tốt nhất — vượt điểm hòa vốn.
- **Giải mã thời gian thực theo kịp.** Bộ giải mã có độ trễ trung bình 63 microsecond ở distance 5 so với chu kỳ dài 1,1 microsecond, duy trì trên một triệu chu kỳ — sửa lỗi chạy trực tiếp, không chỉ phân tích lại sau thí nghiệm.
- **Một nguồn lỗi hiếm và sâu vẫn còn.** Trong các thử nghiệm mã lặp, hiệu năng cuối cùng bị giới hạn bởi các đợt lỗi tương quan xảy ra khoảng **mỗi giờ một lần** (xấp xỉ một trên 3×10^9 chu kỳ), đặt sản lỗi gần 10^{-10} ; các tác giả nói nguồn gốc của nó **vẫn chưa được hiểu**.

Điều nghiên cứu này không chứng minh

- Đây **không** phải máy tính lượng tử đang tính toán. Đây là một *bộ nhớ* lượng tử: nó lưu và bảo vệ một qubit logic. Nó không thực hiện các phép toán logic (cổng) giữa các qubit logic và không chạy thuật toán nào.
- Nó **không** chỉ còn cách máy hữu dụng một qubit. Một qubit logic distance-7 dùng khoảng 101 qubit vật lý; lỗi khoảng 0,1% mỗi chu kỳ vẫn cao hơn rất nhiều so với mức xấp xỉ 10^{-6} đến 10^{-10} mà các thuật toán thật cần. Thu hẹp khoảng cách đó đòi hỏi distance lớn hơn nhiều — nhiều qubit vật lý hơn cho mỗi qubit logic — còn thuật toán hữu dụng cần *hàng nghìn* qubit logic cùng lúc. Ngân sách qubit vật lý khi ấy lên tới hàng triệu.
- Cụm **“nếu mở rộng quy mô” thực sự mang trọng lượng**. Chính kết luận của bài báo nói hiệu năng thiết bị, *nếu được mở rộng*, có thể đáp ứng yêu cầu của các thuật toán lớn. Cho thấy xu hướng đúng trên một qubit logic không giống với việc đã xây máy ở quy mô đó, và không có gì ở đây bảo đảm xu hướng sẽ sống sót khi kích thước tăng rất nhiều.
- **Sản lỗi chưa giải thích là vấn đề đang sống.** Các đợt lỗi tương quan chặn hiệu năng mã lặp, theo lời tác giả, lớn hơn kỳ vọng nhiều bậc độ lớn và sẽ ngăn các ứng dụng chịu lỗi lớn hơn cho đến khi được hiểu — một lỗ hổng mở được nói thẳng, không phải chi tiết đã giải quyết.
- Kết quả không nói gì về **phá mã hóa hay “ưu thế lượng tử” cho tác vụ hữu ích**. Những việc đó cần cỗ máy chịu lỗi hoàn chỉnh mà đây mới là một viên đá nền, không phải một minh chứng của chính cỗ máy ấy.

Bằng chứng mạnh đến đâu

- **Tuyên bố cốt lõi vững và quan trọng.** Hoạt động dưới ngưỡng với sự triệt lỗi theo hàm mũ sạch qua ba distance, cộng với thời gian sống vượt điểm hòa vốn và một bộ giải mã thời gian thực hoạt động, chính là tổ hợp mà lĩnh vực đã cố đạt tới; ở đây nó được chứng minh trực tiếp chứ không suy ra gián tiếp. Đây không phải sản phẩm của cường điệu; nó là kết quả kỹ thuật thật từ một nhóm hàng đầu.
- **Các tác giả cẩn thận về phạm vi.** Họ mô tả nó là *bộ nhớ* dưới ngưỡng, tự nêu sản lỗi tương quan chưa giải thích và đặt tương lai sau cụm “nếu mở rộng quy mô”. Sự quá lời, khi có, thường nằm ở phần đưa tin xung quanh, nơi “một qubit bộ nhớ sửa lỗi tốt hơn khi mã lớn lên” bị làm tròn thành “máy tính lượng tử đã đến”.
- **Trạng thái trung thực là một bước nền tảng đã được thực hiện sạch.** Một qubit logic được bảo vệ đủ tốt để thêm dư thừa cuối cùng cũng có ích — trong khi con đường dài, khó và chưa được bảo đảm của mở rộng quy mô, cổng logic và lỗi chưa giải thích vẫn nằm phía trước.

Vì sao nó quan trọng

Máy tính lượng tử chịu lỗi luôn có cảm giác như bài toán con gà và quả trứng: cỗ máy hữu dụng cần tỷ lệ lỗi mà không qubit vật lý nào đạt được, còn cách sửa — sửa lỗi — chỉ hoạt động nếu phần cứng vốn đã đủ tốt để nằm dưới ngưỡng. Vượt qua ranh giới ấy, dù chỉ một lần, trên dù chỉ một qubit logic, đổi câu hỏi từ “điều này có làm được hay không?” thành “có thể mở rộng bao xa và nhanh đến mức nào?”. Đó là một thay đổi thật và có ý nghĩa, vì vậy kết quả xứng đáng được chú ý.

Nhưng chính sự cẩn thận khiến kết quả đáng tin cũng nên làm câu chuyện xung quanh nó dịu lại. Đây là viên gạch đầu tiên của nền móng, được đặt tốt. Nó không phải tòa nhà, và những người đặt viên gạch là những người đầu tiên nói vậy. Cách đúng để theo dõi máy tính lượng tử trong vài năm tới là nhìn vào chính đường cong không hào nhoáng này: hệ số triệt lỗi có giữ được khi mã lớn lên không, các cổng logic có thể sạch như bộ nhớ logic không, và lỗi bí ẩn xảy ra mỗi giờ một lần kia có được giải thích hay không.

Tóm tắt gọn

Google Quantum AI đã chứng minh rõ ràng, lần đầu tiên, rằng một bộ nhớ lượng tử surface-code có thể hoạt động *dưới ngưỡng*: khi họ tăng mã từ distance 3 lên 5 rồi 7, tỷ lệ lỗi logic giảm theo hàm mũ (khoảng $2,14 \times$ mỗi hai bước), và bộ lớn nhất, bộ nhớ distance-7 dùng 101 qubit, sống lâu hơn qubit vật lý tốt nhất của chính nó — vượt điểm hòa vốn — trong khi sửa lỗi chạy theo thời gian thực. Đây là một cột mốc kỹ thuật thật sự, được chờ đợi lâu trong việc xây máy tính lượng tử. Nó cũng chỉ là một qubit logic hoạt động như bộ nhớ, với tỷ lệ lỗi vẫn còn rất

xa mức thuật toán thật cần, chưa thực hiện phép toán logic nào, có một sàn lỗi chưa giải thích mà chính tác giả nêu ra và còn cả nhiều bậc độ lớn phải mở rộng. Một ngưỡng thật đã được vượt qua — không phải một máy tính lượng tử đã được giao đến.

Nguồn

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>