



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

Memori kuantum akhirnya menjadi lebih baik apabila dibesarkan — pencapaian sebenar, dan mesin yang belum wujud

Google Quantum AI menunjukkan, dengan jelas buat kali pertama, bahawa memori kuantum kod permukaan boleh berjalan di bawah ambang: apabila kod dibesarkan dari jarak 3 kepada 5 kepada 7, kadar ralat logik jatuh secara eksponen (kira-kira $2.14\times$ bagi setiap dua langkah), dan yang terbesar, memori jarak-7 101-qubit, bertahan lebih lama daripada qubit fizikal terbaiknya — melepasi titik pulang modal — dengan pembetulan ralat berjalan secara masa nyata. Ia pencapaian kejuruteraan yang telah lama dicari. Ia juga hanya satu qubit logik yang bertindak sebagai memori, pada kadar ralat yang masih jauh daripada yang diperlukan algoritma sebenar, tanpa operasi logik dilakukan, dengan lantai ralat yang belum dijelaskan dan ditandakan sendiri oleh para penulis, serta beberapa tertib magnitud penskalaan masih di hadapan. Ambang dilintasi, bukan komputer dihantar.

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](https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y)

Saat lengkung itu akhirnya membengkok ke arah yang betul

Selama tiga puluh tahun, pembetulan ralat kuantum bersandar pada satu janji yang belum pernah dipenuhi dengan jelas. Teori mengatakan bahawa jika satu unit maklumat kuantum — satu qubit *logik* — disebarkan merentasi banyak qubit fizikal yang bising, dan jika qubit fizikal itu cukup baik, maka menambah *lebih banyak* qubit sepatutnya menjadikan qubit logik *lebih baik*, dengan ralat menurun secara eksponen apabila kod membesar. Masalahnya terletak pada perkataan “jika”: di bawah ambang hingar kritikal, lebih banyak qubit membantu; di atasnya, lebih banyak qubit hanya menambah hingar. Setiap eksperimen terdahulu berada di sisi yang salah daripada garis itu, atau gagal menunjukkan trend dengan jelas. Membesarkan kod menjadikan keadaan lebih buruk, bukan lebih baik.

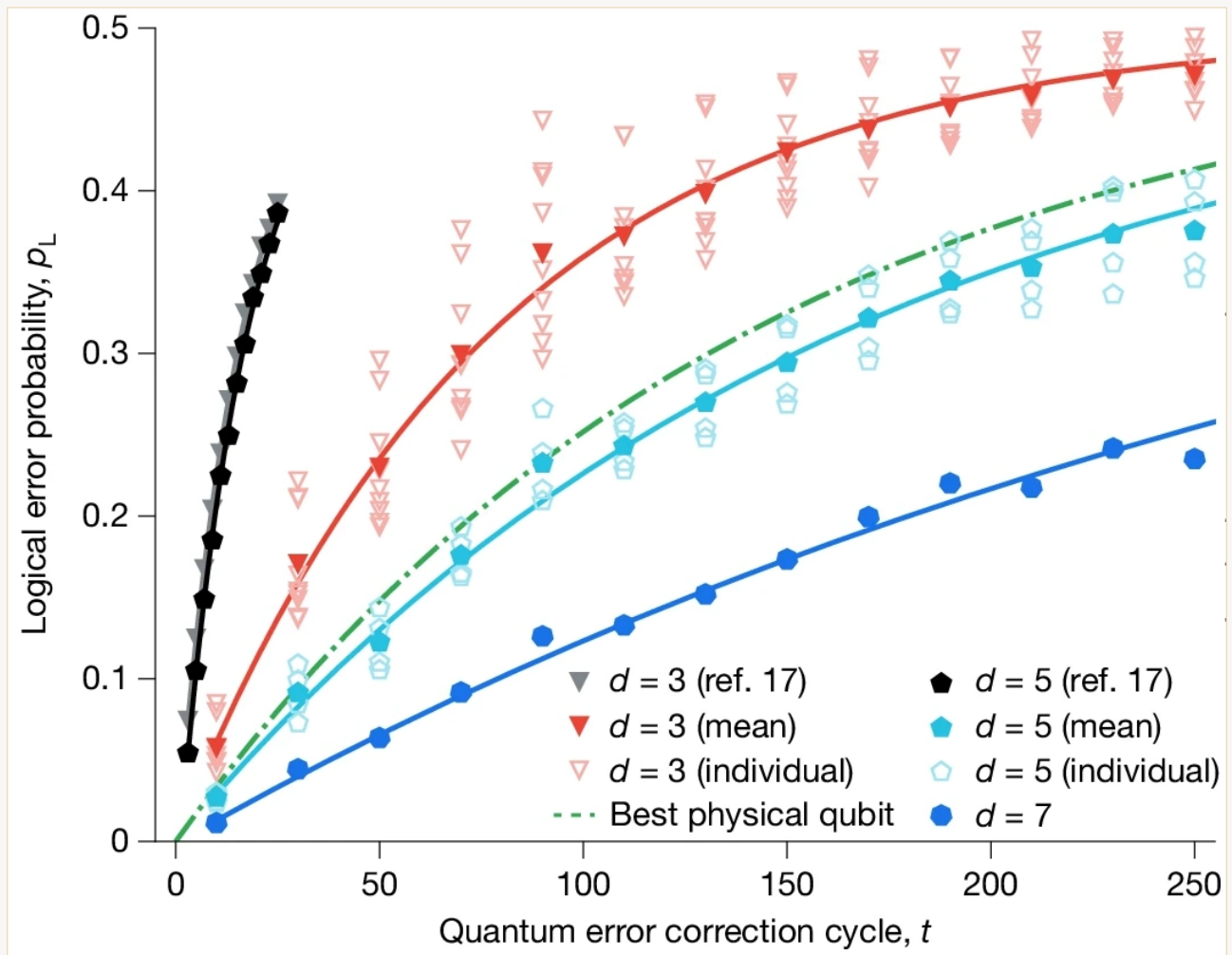
Pada Disember 2024, Google Quantum AI melaporkan demonstrasi jelas pertama bagi rejim sebaliknya. Pada Willow, generasi terbaru pemproses superkonduktor mereka, pasukan itu membina memori kod permukaan pada jarak kod 3, 5 dan 7, lalu melihat kadar ralat logik *menurun* setiap kali kod dibesarkan — dengan faktor $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ bagi setiap kenaikan dua langkah jarak. Memori terbesar mereka, jarak-7 dengan 101 qubit, menyimpan satu qubit logik dengan ralat $0.143\% \pm 0.003\%$ bagi setiap kitaran pembetulan, dan — tajuk utama di dalam tajuk utama — ia bertahan *lebih lama daripada qubit fizikal terbaiknya sendiri*, dengan faktor 2.4 ± 0.3 . Ini dipanggil “melempiati titik pulang modal” (*beyond breakeven*), dan inilah kali pertama keseluruhan mekanisme pembetulan ralat membayar kosnya sendiri pada perkakasan ini.

Ini pencapaian sebenar, dan penting untuk tepat tentang jenis pencapaian tersebut. Ia bukti bahawa penskalaan kini bergerak ke arah yang betul. Ia bukan komputer kuantum yang berfungsi, dan kertas itu juga tidak mendakwa demikian.

Maksud “kod permukaan”, “jarak” dan “di bawah ambang”

Satu **qubit logik** ialah satu unit maklumat kuantum terlindung yang dikodkan merentasi banyak qubit fizikal. **Kod permukaan** ialah cara tertentu melakukan pengekodan itu pada grid 2D, dengan qubit “pengukuran” tambahan sentiasa memeriksa ralat tanpa mengganggu maklumat yang disimpan. **Jarak** kod d bukan jarak fizikal: ia ialah bilangan terkecil ralat yang ditempatkan dengan tepat yang boleh merosakkan qubit logik tanpa dikesan oleh kod. d yang lebih besar bermaksud tampalan yang lebih besar dan lebih teguh — ia menggunakan lebih banyak qubit fizikal (kira-kira $2d^2 - 1$) dan membetulkan lebih banyak ralat serentak, sehingga $(d - 1)/2$ daripadanya. Jadi tiga saiz yang diuji di sini, jarak 3, 5 dan 7, membetulkan 1, 2 dan 3 ralat serentak dan menggunakan kira-kira 17, 49 dan 97 qubit fizikal — memori jarak-7 yang dibina Google menggunakan 101, sedikit melebihi minimum buku teks ini.

“**Di bawah ambang**” ialah frasa terpenting. Pembetulan ralat hanya membantu jika kadar ralat fizikal berada di bawah nilai kritikal; di situ, setiap peningkatan jarak menekan kadar ralat logik secara eksponen. Faktor penekanan Λ mengukurnya — $\Lambda > 1$ bermaksud membesarkan kod membantu, dan semakin tinggi Λ , semakin baik. Google melaporkan $\Lambda \approx 2.14$, bermakna setiap kenaikan dua langkah jarak mengurangkan kadar ralat logik kira-kira separuh. Hakikat bahawa Λ berada dengan selesa di atas 1 ialah keseluruhan hasil utama.



Bagaimana ralat logik terkumpul sepanjang kitaran pembetulan bagi memori jarak-3, -5 dan -7 (dari atas ke bawah). Garis yang perlu diperhatikan ialah garis putus-putus hijau — *qubit fizikal tunggal terbaik* pada cip. Memori jarak-7 (biru, paling bawah) mengumpul ralat lebih perlahan daripada garis itu, jadi qubit terkod bertahan lebih lama daripada qubit fizikal terbaik yang membinanya — “beyond breakeven”, dengan faktor $2.4\times$. Ini ialah hasil jangka hayat; penekanan di bawah ambang itu sendiri ($\Lambda = 2.14$, apabila kod membesar dari jarak 3 ke 5 ke 7) terdapat dalam nombor di dalam teks.

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

Apa yang dilakukan oleh para penulis

- Membina memori kod permukaan pada dua cip Willow: pemproses 105-qubit yang menjalankan kod jarak-3, -5 dan -7 untuk ujian penskalaan (yang terbesar ialah memori jarak-7 101-qubit dengan 49 qubit data), serta pemproses 72-qubit yang menjalankan memori jarak-5 dengan penyahkod masa nyata dan kod pengulangan berjarak tinggi.
- Mengukur bagaimana ralat logik *per kitaran* berubah apabila jarak kod ditingkatkan daripada 3 kepada 5 kepada 7, lalu mengekstrak faktor penekanan Λ .
- Membandingkan jangka hayat qubit logik dengan qubit fizikal individu terbaik pada cip yang sama untuk menguji “titik pulang modal”.

- Menjalankan kod jarak-5 dengan **penyakhkod masa nyata** — perkakasan klasik yang mentafsir pemeriksaan ralat sepantas ia dihasilkan — sehingga sejuta kitaran, untuk menunjukkan bahawa pembetulan ralat boleh mengikuti mesin secara langsung.
- Menolak **kod pengulangan** yang lebih ringkas sehingga jarak 29 bagi mencari sumber ralat jarang dan mendalam yang menetapkan had bawah prestasi.

Apa yang mereka temui

- **Kod berada di bawah ambang.** Ralat logik bagi setiap kitaran menurun dengan $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ bagi setiap peningkatan jarak sebanyak dua — penekanan eksponen yang bersih, tingkah laku yang dijanjikan teori tetapi belum pernah ditunjukkan secara muktamad oleh pemproses terdahulu.
- **Memori jarak-7 mencapai ralat $0.143\% \pm 0.003\%$ setiap kitaran**, dan bertahan 2.4 ± 0.3 kali lebih lama daripada qubit fizikal terbaiknya — melepasi titik pulang modal.
- **Penyakhkodan masa nyata mampu mengikuti.** Penyakhkod mencatat purata latensi 63 mikrosaata pada jarak 5 berbanding masa kitaran 1.1 mikrosaata, dikekalkan sepanjang sejuta kitaran — pembetulan ralat berjalan secara langsung, bukan sekadar dalam analisis selepas eksperimen.
- **Sumber ralat yang jarang tetapi mendalam masih wujud.** Dalam ujian kod pengulangan, prestasi akhirnya dihadkan oleh letusan ralat berkait yang berlaku kira-kira **sekali sejam** (sekitar satu dalam setiap 3×10^9 kitaran), menetapkan lantai ralat berhampiran 10^{-10} yang asalnya menurut para penulis **masih belum difahami**.

Apa yang tidak dibuktikan oleh kajian ini

- Ini **bukan** komputer kuantum yang melakukan pengiraan. Ini ialah *memori* kuantum: ia menyimpan dan melindungi satu qubit logik. Ia tidak melakukan operasi logik (gerbang) antara qubit logik, dan tidak menjalankan algoritma.
- Ia **bukan** tinggal satu qubit lagi untuk sampai kepada mesin berguna. Satu qubit logik jarak-7 menggunakan kira-kira 101 qubit fizikal; kadar ralat 0.1% setiap kitaran masih jauh lebih tinggi daripada kira-kira 10^{-6} hingga 10^{-10} yang diperlukan algoritma sebenar. Menutup jurang itu memerlukan jarak yang jauh lebih besar — lebih banyak qubit fizikal bagi setiap qubit logik — dan algoritma berguna memerlukan *ribuan* qubit logik serentak. Belanjawan qubit fizikal untuk itu mencecah jutaan.
- Frasa **“jika diskalakan” benar-benar penting**. Kesimpulan kertas itu sendiri ialah prestasi peranti, *jika diskalakan*, boleh memenuhi keperluan algoritma besar. Menunjukkan trend yang betul pada satu qubit logik tidak sama dengan sudah membina mesin berskala, dan tiada apa di sini menjamin trend itu bertahan pada saiz yang jauh lebih besar.
- **Lantai ralat yang tidak dapat dijelaskan masih masalah aktif.** Letusan berkait yang mengehadkan prestasi kod pengulangan adalah, menurut para penulis, beberapa tertib magnitud lebih besar daripada yang dijangka dan akan menghalang aplikasi toleran ralat yang lebih besar sehingga difahami — kelemahan terbuka yang dinyatakan terus terang, bukan perincian yang sudah

selesai.

- Kajian ini tidak mengatakan apa-apa tentang **memecahkan penyulitan atau “supremasi kuantum” untuk tugas berguna**. Itu memerlukan mesin toleran ralat penuh yang menjadi sasaran jangka panjang kepada batu asas ini, bukan sekadar demonstrasi ini.

Sejauh mana kukuh buktinya

- **Dakwaan teras kukuh dan penting.** Operasi di bawah ambang dengan penekanan eksponen yang bersih merentasi tiga jarak kod, ditambah jangka hayat melepasi titik pulang modal dan penyahkod masa nyata yang berfungsi, ialah tepat gabungan yang cuba dicapai bidang ini, dan ia ditunjukkan secara langsung dan bukannya disimpulkan. Ini bukan artifak gembur-gembur; ia hasil kejuruteraan sebenar daripada kumpulan terkemuka.
- **Para penulis berhati-hati tentang skopnya.** Mereka membingkaikannya sebagai *memori* di bawah ambang, sendiri menandakan rantai ralat berkait yang belum dijelaskan, dan meletakkan masa depan di bawah syarat “jika diskalakan” yang jelas. Keterlaluan, apabila muncul, datang daripada liputan sekeliling yang membulatkan “qubit memori dengan pembetulan ralat bertambah baik apabila dibesarkan” menjadi “pengkomputeran kuantum sudah tiba.”
- **Status jujurnya ialah langkah asas yang dilakukan dengan bersih.** Satu qubit logik, dilindungi cukup baik sehingga menambah redundansi akhirnya membantu — dengan jalan penskalaan, gerbang logik dan ralat yang belum dijelaskan masih panjang, sukar dan belum terjamin.

Mengapa ia penting

Pengkomputeran kuantum toleran ralat sentiasa mempunyai rasa masalah ayam-dan-telur: mesin yang berguna memerlukan kadar ralat yang tidak dapat dicapai oleh mana-mana qubit fizikal, dan penyelesaiannya — pembetulan ralat — hanya berfungsi jika perkakasan sudah cukup baik untuk berada di bawah ambang. Menyeberangi garis itu, walaupun sekali, walaupun hanya pada satu qubit logik, mengubah soalan daripada “adakah ini boleh dilakukan sama sekali?” kepada “sejauh mana ia boleh diskalakan, dan berapa pantas?” Itu perubahan yang nyata dan bermakna, sebab itulah hasil ini patut diberi perhatian.

Tetapi sikap berhati-hati yang menjadikan hasil ini boleh dipercayai juga patut mengekang cerita di sekelilingnya. Ini bata pertama bagi sebuah asas, dipasang dengan baik. Ia bukan bangunannya, dan orang yang memasangnya ialah yang pertama berkata demikian. Cara yang betul untuk mengikuti pengkomputeran kuantum dalam beberapa tahun akan datang ialah melihat lengkung yang tidak glamor ini: sama ada faktor penekanan kekal apabila kod membesar, sama ada gerbang logik boleh dilakukan sebersih memori logik, dan sama ada ralat misteri sekali-sejam itu akhirnya dapat dijelaskan.

Ringkasan utama

Google Quantum AI menunjukkan, dengan jelas buat kali pertama, bahawa memori kuantum kod permukaan boleh beroperasi *di bawah ambang*: apabila kod dibesarkan dari jarak 3 kepada 5 kepada 7, kadar ralat logik menurun secara eksponen (kira-kira $2.14\times$ bagi setiap dua langkah), dan yang terbesar, memori jarak-7 101-qubit, bertahan lebih lama daripada qubit fizikal terbaiknya — melepasi titik pulang modal — sementara pembetulan ralatnya berjalan secara masa nyata. Ini pencapaian sebenar yang telah lama dicari dalam kejuruteraan komputer kuantum. Tetapi ia juga hanya satu qubit logik yang bertindak sebagai memori, dengan kadar ralat yang masih jauh daripada tuntutan algoritma sebenar, tanpa operasi logik dilakukan, dengan lantai ralat yang belum dijelaskan dan sendiri ditandakan para penulis, serta jalan penskalaan beberapa tertib magnitud di hadapan. Satu ambang sebenar telah dilintasi — bukan komputer kuantum yang telah dihantar.

Sumber

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>