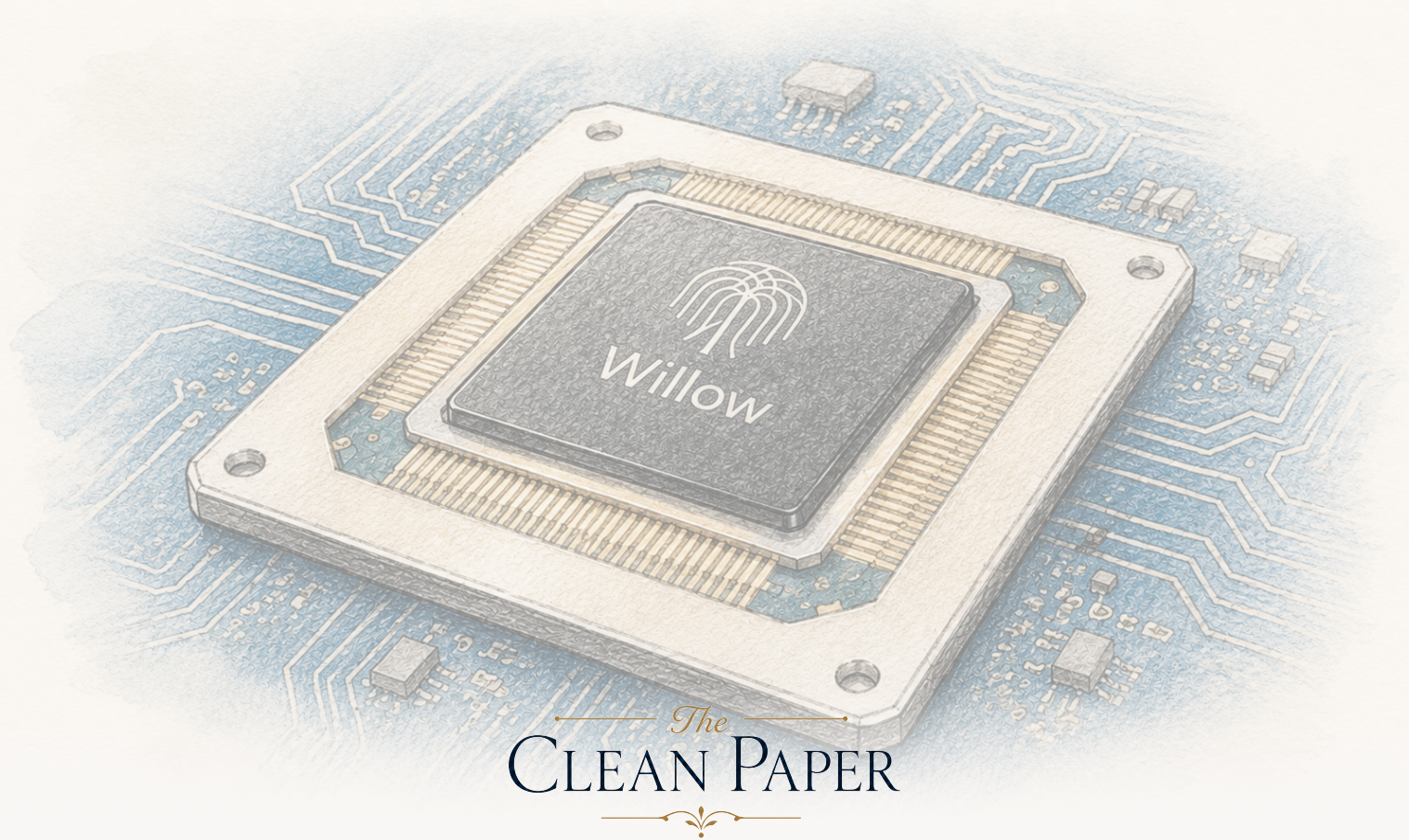




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Μια κβαντική μνήμη επιτέλους βελτιώθηκε καθώς μεγάλωνε — το πραγματικό ορόσημο και η μηχανή που δεν είναι

Η Google Quantum AI έδειξε καθαρά για πρώτη φορά ότι μια κβαντική μνήμη surface code μπορεί να λειτουργεί κάτω από το κατώφλι σφαλμάτων: καθώς αύξησαν τον κώδικα από distance 3 σε 5 και 7, ο λογικός ρυθμός σφάλματος μειώθηκε εκθετικά (περίπου $2.14 \times$ ανά δύο βήματα), και η μεγαλύτερη μνήμη, distance-7 με 101 qubits, έζησε περισσότερο από το καλύτερο φυσικό qubit της — πέρα από breakeven — με διόρθωση σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο. Είναι πολυαναμενόμενο μηχανικό ορόσημο. Είναι επίσης ένα μόνο λογικό qubit που λειτουργεί ως μνήμη, με ρυθμό σφάλματος ακόμη πολύ μακριά από ό,τι χρειάζονται πραγματικοί αλγόριθμοι, χωρίς λογικές πράξεις, με ανεξήγητο κατώφλι σφαλμάτων που επισημαίνουν οι συγγραφείς και με πολλές τάξεις μεγέθους κλιμάκωσης μπροστά. Ένα κατώφλι που ξεπεράστηκε, όχι ένας υπολογιστής που παραδόθηκε.

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

Η στιγμή που η καμπύλη λύγισε προς τη σωστή κατεύθυνση

Για τριάντα χρόνια, η κβαντική διόρθωση σφαλμάτων βασιζόταν σε μια υπόσχεση που δεν είχε ποτέ εκπληρωθεί καθαρά. Η θεωρία λέει ότι αν απλώσετε μία μονάδα κβαντικής πληροφορίας — ένα λογικό qubit — πάνω σε πολλά θορυβώδη φυσικά qubits, και αν αυτά τα φυσικά qubits είναι αρκετά καλά, τότε η προσθήκη περισσότερων θα πρέπει να κάνει το λογικό qubit καλύτερο, με τα σφάλματα να πέφτουν εκθετικά όσο μεγαλώνει ο κώδικας. Η παγίδα είναι το «αν»: κάτω από ένα κρίσιμο κατώφλι θορύβου, περισσότερα qubits βοηθούν· πάνω από αυτό, προσθέτουν απλώς περισσότερο θόρυβο. Κάθε προηγούμενο πείραμα βρισκόταν στη λάθος πλευρά αυτής της γραμμής ή δεν κατάφερνε να δείξει καθαρά την τάση. Η αύξηση του κώδικα έκανε τα πράγματα χειρότερα, όχι καλύτερα.

Τον Δεκέμβριο του 2024, η Google Quantum AI ανακοίνωσε την πρώτη καθαρή επίδειξη του άλλου καθεστώτος. Στο Willow, τη νεότερη γενιά υπεραγώγιμων επεξεργαστών της, κατασκεύασε μνήμες surface code με αποστάσεις κώδικα 3, 5 και 7 και είδε τον λογικό ρυθμό σφάλματος να μειώνεται κάθε φορά που ο κώδικας μεγάλωνε — κατά παράγοντα $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ για κάθε αύξηση της απόστασης κατά δύο. Η μεγαλύτερη, μνήμη distance-7 με 101 qubits, διατηρούσε ένα λογικό qubit με σφάλμα $0.143\% \pm 0.003\%$ ανά κύκλο διόρθωσης και — ο τίτλος μέσα στον τίτλο — επιβίωσε περισσότερο από το δικό της καλύτερο φυσικό qubit, κατά παράγοντα 2.4 ± 0.3 . Αυτό ονομάζεται «beyond breakeven» και είναι η πρώτη φορά που ολόκληρος ο μηχανισμός διόρθωσης σφαλμάτων αποδίδει περισσότερο από όσο κοστίζει σε αυτό το hardware.

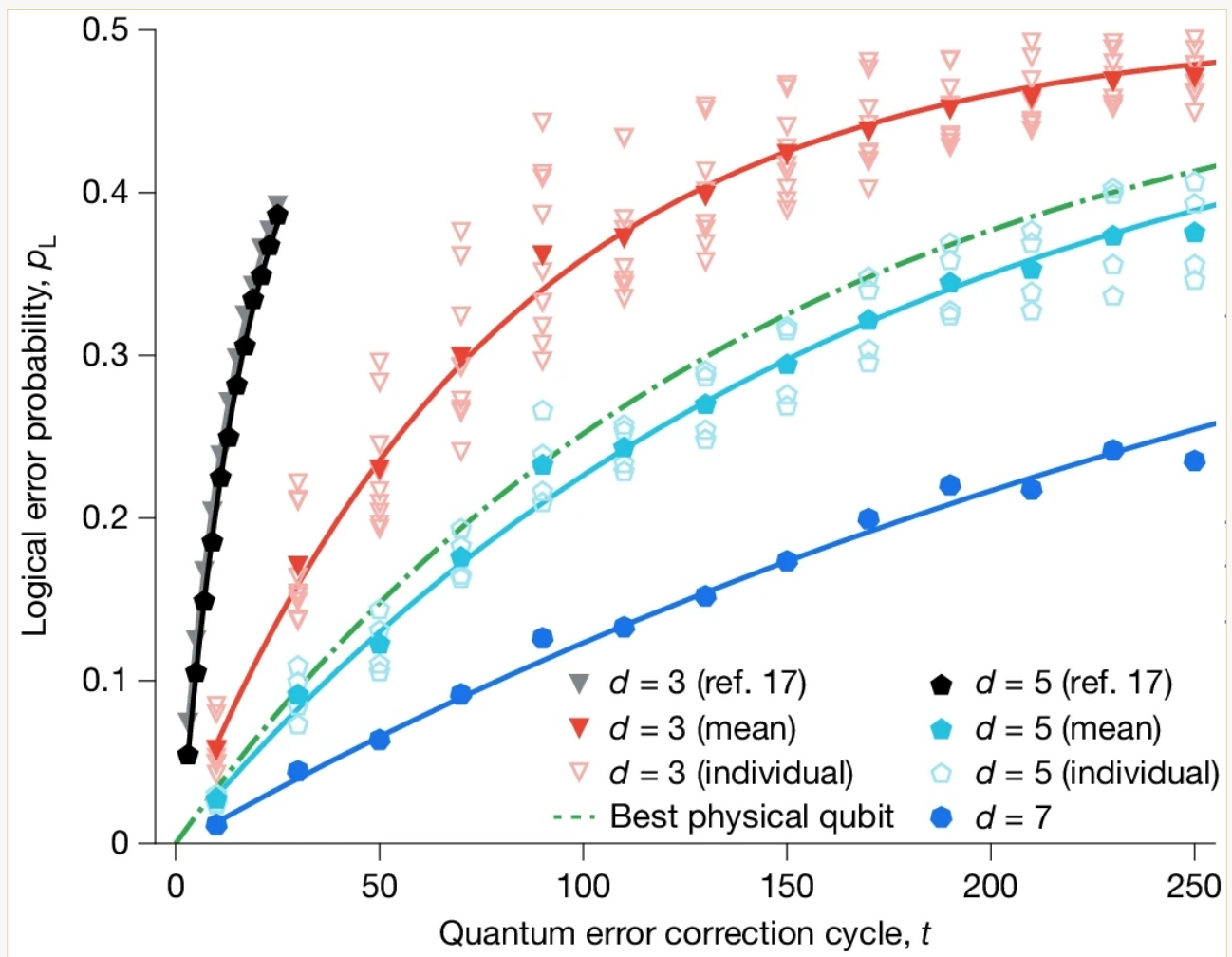
Είναι πραγματικό ορόσημο και αξίζει να είμαστε ακριβείς για το είδος του. Αποδεικνύει ότι η κλιμάκωση τώρα κινείται προς τη σωστή κατεύθυνση. Δεν είναι λειτουργικός κβαντικός υπολογιστής και η εργασία δεν ισχυρίζεται ότι είναι.

Τι σημαίνουν «surface code», «distance» και «below threshold»

Ένα **λογικό qubit** είναι μία προστατευμένη μονάδα κβαντικής πληροφορίας κωδικοποιημένη σε πολλά φυσικά qubits. Ο **surface code** είναι συγκεκριμένος τρόπος να γίνει αυτή η κωδικοποίηση σε διδιάστατο πλέγμα, όπου επιπλέον qubits «μέτρησης» ελέγχουν συνεχώς για σφάλματα χωρίς να διαταράσσουν την αποθηκευμένη πληροφορία. Η **απόσταση κώδικα** d δεν είναι φυσική απόσταση: είναι ο μικρότερος αριθμός σωστά τοποθετημένων σφαλμάτων που μπορούν να καταστρέψουν το λογικό qubit χωρίς να το αντληφθεί ο κώδικας. Μεγαλύτερο d σημαίνει μεγαλύτερο και πιο ανθεκτικό patch — ξοδεύει περισσότερα φυσικά qubits (περίπου $2d^2 - 1$) και διορθώνει περισσότερα ταυτόχρονα σφάλματα, έως $(d - 1)/2$. Έτσι, τα τρία μεγέθη που δοκιμάστηκαν εδώ, distances 3, 5 και 7, διορθώνουν 1, 2 και 3 ταυτόχρονα σφάλματα και απαιτούν περίπου 17, 49 και 97 φυσικά qubits — η μνήμη distance-7 της Google χρησιμοποίησε 101, λίγο πάνω από αυτό το θεωρητικό ελάχιστο.

Το «**below threshold**» είναι η κρίσιμη φράση. Η διόρθωση σφαλμάτων βοηθά μόνο αν ο φυσικός ρυθμός σφάλματος βρίσκεται κάτω από μια κρίσιμη τιμή· εκεί, κάθε αύξηση

της απόστασης καταστέλλει εκθετικά τον λογικό ρυθμό σφάλματος. Ο παράγοντας καταστολής Λ το μετρά — $\Lambda > 1$ σημαίνει ότι η αύξηση του κώδικα βοηθά, και όσο μεγαλύτερο το Λ , τόσο καλύτερα. Η Google αναφέρει $\Lambda \approx 2.14$, δηλαδή κάθε αύξηση της απόστασης κατά δύο περίπου υποδιπλασίαζε τον λογικό ρυθμό σφάλματος. Το ότι το Λ βρίσκεται άνετα πάνω από το 1 είναι ο πυρήνας του αποτελέσματος.



Πώς συσσωρεύεται το λογικό σφάλμα στους κύκλους διόρθωσης για τις μνήμες distance-3, -5 και -7 (από πάνω προς τα κάτω). Η γραμμή που πρέπει να παρακολουθήσετε είναι η πράσινη διακεκομμένη — το καλύτερο μεμονωμένο φυσικό qubit του chip. Η μνήμη distance-7 (μπλε, χαμηλότερη) συσσωρεύει σφάλμα πιο αργά από αυτή τη γραμμή, άρα το κωδικοποιημένο qubit ζει περισσότερο από το καλύτερο φυσικό qubit από το οποίο είναι φτιαγμένο — «beyond breakeven», κατά παράγοντα 2.4×. Αυτό είναι το αποτέλεσμα διάρκειας ζωής· η ίδια η καταστολή κάτω από το κατώφλι ($\Lambda = 2.14$, καθώς ο κώδικας μεγαλώνει από distance 3 σε 5 και 7) βρίσκεται στους αριθμούς του κειμένου.

Τι έκαναν οι συγγραφείς

- Κατασκεύασαν μνήμες surface code σε δύο chips Willow: έναν επεξεργαστή 105 qubits που έτρεξε κώδικες distance-3, -5 και -7 για τη δοκιμή κλιμάκωσης (με μεγαλύτερη τη μνήμη distance-7 των 101 qubits και 49 data qubits), και έναν επεξεργαστή 72 qubits που έτρεξε μνήμη distance-5 με decoder πραγματικού χρόνου, καθώς και repetition codes μεγάλης απόστασης.
- Μέτρησαν πώς άλλαζε το λογικό σφάλμα ανά κύκλο καθώς αύξαναν την απόσταση κώδικα από 3 σε 5 και 7, εξάγοντας τον παράγοντα καταστολής Λ .
- Σύγκριναν τη διάρκεια ζωής του λογικού qubit με το καλύτερο μεμονωμένο φυσικό qubit στο ίδιο chip, για να ελέγξουν το «breakeven».
- Έτρεξαν τον κώδικα distance-5 με **decoder πραγματικού χρόνου** — κλασικό hardware που ερμηνεύει τους ελέγχους σφαλμάτων όσο γρήγορα παράγονται — για έως ένα εκατομμύριο κύκλους, ώστε να δείξουν ότι η διόρθωση σφαλμάτων μπορεί να συμβαδίζει με τη μηχανή.
- Έφτασαν απλούστερους **repetition codes** μέχρι distance 29 για να αναζητήσουν τις σπάνιες, βαθιές πηγές σφάλματος που βάζουν πάτωμα στην απόδοση.

Τι βρήκαν

- **Ο κώδικας λειτουργεί κάτω από το κατώφλι.** Το λογικό σφάλμα ανά κύκλο μειωνόταν κατά παράγοντα $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ για κάθε αύξηση δύο στην απόσταση — καθαρή εκθετική καταστολή, ακριβώς τη συμπεριφορά που υποσχόταν η θεωρία και κανένας επεξεργαστής δεν είχε δείξει οριστικά.
- **Η μνήμη distance-7 έφτασε $0.143\% \pm 0.003\%$ σφάλμα ανά κύκλο και έζησε 2.4 ± 0.3 φορές περισσότερο** από το καλύτερο φυσικό qubit της — beyond breakeven.
- **Η αποκωδικοποίηση σε πραγματικό χρόνο συμβάδισε.** Ο decoder είχε μέση καθυστέρηση 63 μικροδευτερολέπτων στο distance 5 έναντι χρόνου κύκλου 1.1 μικροδευτερολέπτου, διατηρούμενη σε ένα εκατομμύριο κύκλους — η διόρθωση έτρεχε ζωντανά, όχι μόνο σε εκ των υστέρων ανάλυση.
- **Παραμένει μια σπάνια, βαθιά πηγή σφάλματος.** Στα repetition-code tests, η απόδοση τελικά περιοριζόταν από συσχετισμένες εκρήξεις σφαλμάτων περίπου **μία φορά την ώρα** (περίπου μία ανά 3×10^9 κύκλους), δημιουργώντας πάτωμα σφάλματος κοντά στο 10^{-10} , του οποίου η πρόβλεψη οι συγγραφείς λένε ότι **δεν είναι ακόμη κατανοητή**.

Τι δεν αποδεικνύει

- **Δεν είναι** κβαντικός υπολογιστής που εκτελεί υπολογισμούς. Είναι κβαντική μνήμη: αποθηκεύει και προστατεύει ένα λογικό qubit. Δεν εκτελεί λογικές πράξεις (gates) ανάμεσα σε λογικά qubits και δεν τρέχει αλγόριθμο.

- **Δεν** βρίσκεται ένα qubit μακριά από χρήσιμες μηχανές. Ένα λογικό qubit distance-7 απαιτεί περίπου 101 φυσικά qubits· ρυθμός σφάλματος 0.1% ανά κύκλο παραμένει πολύ πάνω από τα περίπου 10^{-6} έως 10^{-10} που χρειάζονται πραγματικοί αλγόριθμοι. Το κλείσιμο αυτού του χάσματος σημαίνει πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις — πολύ περισσότερα φυσικά qubits ανά λογικό qubit — ενώ χρήσιμοι αλγόριθμοι χρειάζονται χιλιάδες λογικά qubits ταυτόχρονα. Ο προϋπολογισμός φυσικών qubits φτάνει στα εκατομμύρια.
- Το «αν κλιμακωθεί» κάνει **πραγματική δουλειά**. Το ίδιο το συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι η απόδοση της συσκευής, αν κλιμακωθεί, θα μπορούσε να καλύψει τις απαιτήσεις μεγάλων αλγορίθμων. Το να δείξεις τη σωστή τάση σε ένα λογικό qubit δεν είναι το ίδιο με το να έχεις κατασκευάσει τη μηχανή κλίμακας, και τίποτε εδώ δεν εγγυάται ότι η τάση θα επιβιώσει σε πολύ μεγαλύτερα μεγέθη.
- Το **ανεξήγητο** πάτωμα σφάλματος είναι **ζωντανό πρόβλημα**. Οι συσχετισμένες εκρήξεις που περιορίζουν την απόδοση των repetition codes είναι, με τα λόγια των συγγραφέων, τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από το αναμενόμενο και θα απέκλειαν μεγαλύτερες fault-tolerant εφαρμογές μέχρι να κατανοηθούν — ανοιχτό ελάττωμα, δηλωμένο καθαρά, όχι λυμένη λεπτομέρεια.
- Δεν λέει τίποτα για **σπάσιμο κρυπτογράφησης ή «quantum supremacy» σε χρήσιμες εργασίες**. Αυτά απαιτούν την πλήρη fault-tolerant μηχανή για την οποία αυτό είναι θεμέλιος λίθος, όχι επίδειξη.

Πόσο ισχυρά είναι τα στοιχεία

- Ο **βασικός ισχυρισμός είναι ισχυρός και σημαντικός**. Λειτουργία κάτω από το κατώφλι με καθαρή εκθετική καταστολή σε τρεις αποστάσεις κώδικα, μαζί με διάρκεια ζωής beyond-breakeven και λειτουργικό decoder πραγματικού χρόνου, είναι ακριβώς ο συνδυασμός που το πεδίο προσπαθούσε να πετύχει και αποδεικνύεται άμεσα αντί να συναχθεί έμμεσα. Δεν είναι τεχνούργημα hype· είναι πραγματικό μηχανικό αποτέλεσμα από κορυφαία ομάδα.
- Οι **συγγραφείς είναι προσεκτικοί για το πεδίο του**. Το παρουσιάζουν ως μνήμη *below-threshold*, επισημαίνουν οι ίδιοι το ανεξήγητο πάτωμα συσχετισμένων σφαλμάτων και συνδέουν το μέλλον με αυτό το εμφανές «if scaled». Η υπερβολή, όπου εμφανίζεται, βρίσκεται στην περιφερειακή κάλυψη που στρογγυλεύει το «μια διορθωμένη μνήμη qubit βελτιώθηκε καθώς μεγάλωνε» σε «ο κβαντικός υπολογισμός έφτασε».
- Η **έντιμη κατάσταση είναι θεμελιώδες βήμα που έγινε καθαρά**. Ένα λογικό qubit, προστατευμένο αρκετά ώστε η προσθήκη πλεονασμού επιτέλους να βοηθά — με μακρύ, δύσκολο και μη εγγυημένο δρόμο κλιμάκωσης, λογικών gates και ανεξήγητων σφαλμάτων μπροστά.

Γιατί έχει σημασία

Ο fault-tolerant κβαντικός υπολογισμός είχε πάντα κάτι από το πρόβλημα κότας και αυγού: οι χρήσιμες μηχανές χρειάζονται ρυθμούς σφάλματος που κανένα φυσικό qubit δεν μπορεί

να φτάσει και η λύση — διόρθωση σφαλμάτων — λειτουργεί μόνο αν το hardware είναι ήδη αρκετά καλό ώστε να βρίσκεται κάτω από το κατώφλι. Το να περάσουμε αυτή τη γραμμή, έστω μία φορά και σε ένα μόνο λογικό qubit, αλλάζει το ερώτημα από «είναι καν δυνατό;» σε «πόσο μακριά μπορεί να κλιμακωθεί και πόσο γρήγορα;». Είναι πραγματική και ουσιαστική μετατόπιση, γι' αυτό το αποτέλεσμα αξίζει προσοχή.

Αλλά η ίδια προσοχή που κάνει το αποτέλεσμα αξιόπιστο είναι αυτή που πρέπει να συγκρατεί την ιστορία γύρω του. Είναι το πρώτο τούβλο ενός θεμελίου, τοποθετημένο καλά. Δεν είναι το κτίριο, και οι άνθρωποι που το τοποθέτησαν είναι οι πρώτοι που το λένε. Ο σωστός τρόπος να παρακολουθήσουμε τον κβαντικό υπολογισμό τα επόμενα χρόνια είναι ακριβώς αυτή η μη λαμπερή καμπύλη: αν ο παράγοντας καταστολής κρατά καθώς οι κώδικες μεγαλώνουν, αν τα λογικά gates μπορούν να γίνουν τόσο καθαρά όσο η λογική μνήμη και αν αυτό το μυστηριώδες σφάλμα μία φορά την ώρα θα εξηγηθεί ποτέ.

Καθαρή σύνοψη

Η Google Quantum AI έδειξε, καθαρά για πρώτη φορά, ότι μια κβαντική μνήμη surface code μπορεί να λειτουργεί κάτω από το κατώφλι: καθώς αύξησαν τον κώδικα από distance 3 σε 5 και 7, ο λογικός ρυθμός σφάλματος έπεσε εκθετικά (περίπου $2.14 \times$ ανά δύο βήματα), και η μεγαλύτερη, μνήμη distance-7 με 101 qubits, έζησε περισσότερο από το καλύτερο φυσικό qubit της — beyond breakeven — ενώ η διόρθωση σφαλμάτων έτρεχε σε πραγματικό χρόνο. Είναι πραγματικό, πολυαναμενόμενο ορόσημο στην μηχανική κβαντικών υπολογιστών. Είναι επίσης ένα μόνο λογικό qubit που λειτουργεί ως μνήμη, με ρυθμό σφάλματος ακόμη πολύ μακριά από ό,τι απαιτούν πραγματικοί αλγόριθμοι, χωρίς λογικές πράξεις, με ανεξήγητο πάτωμα σφάλματος που επισημαίνουν οι ίδιοι οι συγγραφείς και με δρόμο κλιμάκωσης πολλών τάξεων μεγέθους μπροστά. Ένα πραγματικό κατώφλι που ξεπεράστηκε — όχι ένας κβαντικός υπολογιστής που παραδόθηκε.

Πηγές

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>