



The CLEAN PAPER

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

Kvant yaddaşı nəhayət böyüdükcə yaxşılaşdı — əsl mərhələ budur, amma bu hələ maşın deyil

Google Quantum AI ilk dəfə aydın göstərdi ki, surface-code kvant yaddaşı below threshold işləyə bilər: kod distance 3-dən 5-ə, sonra 7-yə böyüdükcə məntiqi səhv dərəcəsi eksponensial azaldı (hər iki addımda təxminən $2.14\times$) və ən böyük, 101-kubitlik distance-7 yaddaş özünün ən yaxşı fiziki kubitindən daha uzun yaşadı — beyond breakeven — səhv korreksiyası real vaxtda işləyərkən. Bu, uzun müddət axtarılan mühəndislik mərhələsidir. Amma bu, yaddaş rolunda bir məntiqi kubitdir; səhv dərəcəsi real alqoritmlərin ehtiyacından hələ uzaqdır, məntiqi əməliyyat aparılmayıb, müəlliflərin bayraqladığı izah olunmamış səhv döşəməsi var və qarşıda böyüklük mərtəbələri qədər miqyaslama dayanır. Threshold keçildi, kompüter təhvil verilmədi.

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

Əyrinin nəhayət doğru istiqamətə döndüyü an

Otuz il ərzində kvant səhv korreksiyası heç vaxt təmiz şəkildə yerinə yetirilməmiş bir vədə söykənirdi. Nəzəriyyə deyir ki, bir vahid kvant məlumatını — bir *məntiqi* kubiti — çoxlu səs-küylü fiziki kubitə yaysanız və həmin fiziki kubitlər kifayət qədər yaxşı olsa, *daha çox* kubit əlavə etmək məntiqi kubiti *daha yaxşı* etməlidir; kod böyüdükcə səhvlər eksponensial azalmalıdır. Problem “əgər” sözündədir: kritik səs-küy həddindən aşağıda daha çox kubit kömək edir; həddin üstündə isə daha çox kubit yalnız daha çox səs-küy əlavə edir. Bütün əvvəlki eksperimentlər bu xəttin səhv tərəfində qalmışdı və ya trendi təmiz göstərə bilməmişdi. Kod böyüdükcə iş yaxşılaşmaq əvəzinə pisləşirdi.

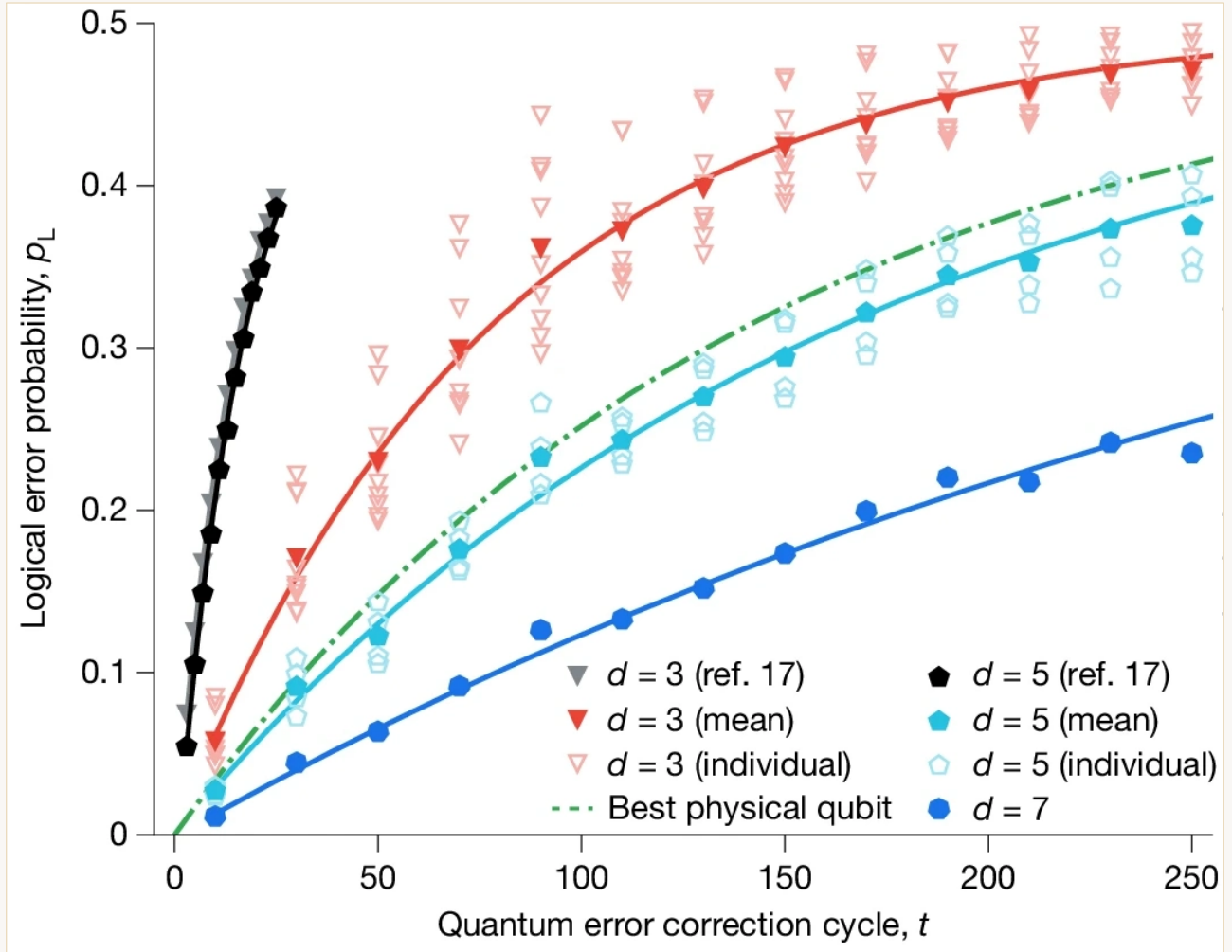
2024-cü ilin dekabrında Google Quantum AI bildirdi ki, ilk dəfə digər rejimi aydın nümayiş etdirib. Superkeçirici prosessorların ən yeni nəsli olan Willow üzərində məsafəsi 3, 5 və 7 olan surface-code yaddaşları qurdular və kod hər dəfə böyüdükcə məntiqi səhv dərəcəsinin *azaldığını* gördülər — məsafədə hər iki addım artım üçün $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ faktoruna qədər. Ən böyüyü, 101 kubitlik distance-7 yaddaş, bir korreksiya dövrü üçün $0.143\% \pm 0.003\%$ səhqli məntiqi kubiti saxladı və — başlığın içindəki başlıq — özünün ən yaxşı fiziki kubitindən **2.4 ± 0.3 dəfə daha uzun** yaşadı. Buna “beyond breakeven” deyilir və bu hardware-də səhv korreksiyası aparatının öz xərcini ilk dəfə kompensasiya etməsidir.

Bu, həqiqi mərhələdir və hansı növ mərhələ olduğunu dəqiq deməyə dəyər. Bu, miqyaslanmanın artıq düzgün istiqamətə getdiyinə sübutdur. İşləyən kvant kompüter deyil və məqalə belə iddia etmir.

“Surface code”, “distance” və “below threshold” nə deməkdir

Məntiqi kubit çoxlu fiziki kubit üzrə kodlanmış, qorunan bir vahid kvant məlumatıdır. **Surface code** bunu 2D şəbəkədə etməyin xüsusi üsuludur; əlavə “measure” kubitləri saxlanılan məlumatı pozmadan daim səhv yoxlamaları aparır. Kodun **distance** d dəyəri fiziki məsafə deyil: kodun hiss etmədən məntiqi kubiti korlaya bilən, düzgün yerləşmiş səhvlərin ən kiçik sayıdır. Daha böyük d daha böyük və daha davamlı patch deməkdir — daha çox fiziki kubit sərf edir (təxminən $2d^2 - 1$) və eyni vaxtda daha çox səhvi, $(d - 1)/2$ -yə qədərini, düzəldə bilir. Burada sınıyan distance 3, 5 və 7 ölçüləri müvafiq olaraq 1, 2 və 3 eyni vaxtlı səhvi düzədir və təxminən 17, 49 və 97 fiziki kubit tələb edir — Google-un qurduğu distance-7 yaddaş 101 kubit istifadə etdi, dərslük minimumundan bir qədər çox.

“**Below threshold**” əsas ifadədir. Səhv korreksiyası yalnız fiziki səhv dərəcənin kritik qiymətdən aşağı olduqda kömək edir; həmin rejimdə distance-in hər artımı məntiqi səhv dərəcəsinə eksponensial azaldır. Sönümləndirmə faktoru Λ bunu ölçür — $\Lambda > 1$ kodu böyütməyin kömək etdiyini, daha yüksək Λ isə daha yaxşı nəticəni göstərir. Google $\Lambda \approx 2.14$ bildirir; yəni distance-də hər iki addım artım məntiqi səhv dərəcəsinə təxminən yarıya endirib. Λ -nın rahat şəkildə 1-dən böyük olması bütün nəticənin özüdür.



Distance-3, -5 və -7 yaddaşlarında (yuxarıdan aşağıya) korreksiya dövrləri boyunca məntiqi səhvin necə toplandığı. İzəlməli xətt yaşıl kəsik xətdir — çipdəki *ən yaxşı tək fiziki kubit*. Distance-7 yaddaş (mavi, ən aşağı) səhvi həmin xətdən daha yavaş toplayır, buna görə kodlanmış kubit qurulduğu *ən yaxşı fiziki kubit*dən daha uzun yaşayır — $2.4\times$ faktorla “beyond breakeven”. Bu, ömür nəticəsidir; below-threshold sönməndirməsinin özü (kod distance 3-dən 5-ə, sonra 7-yə böyüdükə $\Lambda = 2.14$) mətnin rəqəmlərindədir.

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

Müəlliflər nə etdilər

- İki Willow çipində surface-code yaddaşları qurdular: miqyaslama testinin distance-3, -5 və -7 kodlarını işlədən 105-kubitlik prosessor (ən böyüyü 101-kubitlik, 49 data-kubitlik distance-7 yaddaş idi) və real-time decoder-li distance-5 yaddaşı, həmçinin yüksək-distance repetition code-ları işlədən 72-kubitlik prosessor.
- Kod distance-ni 3-dən 5-ə, sonra 7-yə artırarkən hər dövr üçün məntiqi səhvin necə dəyişdiyini ölçdülər və sönməndirmə faktoru Λ -nı çıxardılar.
- “Breakeven”i yoxlamaq üçün məntiqi kubitin ömrünü eyni çipdəki *ən yaxşı fərdi fiziki kubit*lə müqayisə etdilər.
- Səhv yoxlamalarını yarandığı qədər tez şərh edən klassik hardware — **real-time decoder**

— ilə distance-5 kodunu bir milyon dövrədək işlətdilər ki, səhv korreksiyasının maşına ayaq uydura bildiyini göstərsinlər.

- Performansın aşağı həddini müəyyən edən nadir, dərin səhv mənbələrini axtarmaq üçün daha sadə **repetition code**-ləri distance 29-a qədər apardılar.

Nə tapdılar

- **Kod below threshold-dur.** Distance-də hər iki addım artım üçün hər dövr üzrə məntiqi səhv $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ dəfə azaldı — nəzəriyyənin vəd etdiyi və heç bir prosessorun əvvəl qəti göstərmədiyi təmiz eksponensial sönümlənmə.
- **Distance-7 yaddaş hər dövr üçün $0.143\% \pm 0.003\%$ səhvə çatdı** və özünün ən yaxşı fiziki kubitindən 2.4 ± 0.3 dəfə uzun yaşadı — beyond breakeven.
- **Real-time decoding ayaq uydurdu.** Distance 5-də decoder-in orta gecikməsi 63 mikrosaniyə idi, dövr vaxtı 1.1 mikrosaniyə; bu, bir milyon dövr boyunca saxlanıldı — səhv korreksiyası sonradan analizdə yox, canlı işləyirdi.
- **Nadir, dərin səhv mənbəyi qalır.** Repetition-code testlərində performans sonda təxminən **saatda bir dəfə** baş verən korrelyasiyalı səhv partlayışları ilə məhdudlaşdı (təxminən hər 3×10^9 dövrdən biri); bu, 10^{-10} yaxınlığında səhv dərəcəsi yaradır və müəlliflər mənbəyinin **hələ başa düşülmədiyini** deyirlər.

Bu nəyi sübut etmir

- Bu, hesablama aparan kvant kompüterini **deyil**. Bu kvant *yaddaşdır*: bir məntiqi kubit saxlayır və qoruyur. Məntiqi kubitlər arasında məntiqi əməliyyatlar (gate-lər) aparmır və heç bir alqoritm işləmir.
- Faydalı maşından **bir kubit uzaqda** deyil. Distance-7 məntiqi kubit təxminən 101 fiziki kubit sərf edir; hər dövr üçün 0.1% səhv dərəcəsi real alqoritmlərin ehtiyac duyduğu təxminən 10^{-6} - 10^{-10} -dan hələ çox yüksəkdir. Bu boşluğu bağlamaq xeyli daha böyük distance-lərə — hər məntiqi kubit üçün daha çox fiziki kubitə — getmək deməkdir və faydalı alqoritmlərə eyni anda *minlərlə* məntiqi kubit lazımdır. Bunun fiziki-kubit büdcəsi milyonlara çıxır.
- **“If scaled” həqiqətən böyük iş görür.** Məqalənin öz nəticəsi cihaz performansının *miqyaslandırılrsa* böyük alqoritmlərin tələblərinə cavab verə biləcəyidir. Bir məntiqi kubitdə trendin düzgün olduğunu göstərmək miqyaslandırılmış maşını qurmaqla eyni deyil və burada heç nə trendin çox böyük ölçülərdə də qalacağına zəmanət vermir.
- **İzah olunmamış səhv dərəcəsi canlı problemdir.** Repetition-code performansını məhdudlaşdıran korrelyasiyalı partlayışlar müəlliflərin sözləri ilə gözləniləndən böyüklük mərtəbələri qədər böyükdür və başa düşülməyənədək daha iri fault-tolerant tətbiqləri mümkünsüz edərdi — açıq qüsurlar, həll edilmiş detal deyil.
- **Şifrələməni sındırmaq və ya faydalı tapşırıqlar üçün “quantum supremacy”** barədə heç nə demir. Bunlara bu işin təməl daşı olduğu tam fault-tolerant maşın lazımdır, bu

nümayiş yox.

Sübut nə qədər güclüdür

- **Əsas iddia möhkəm və vacibdir.** Üç code distance boyunca təmiz eksponensial sönümlənmə ilə below-threshold işləmə, üstəlik beyond-breakeven ömrü və işlək real-time decoder — sahənin çatmağa çalışdığı kombinasiyanın məhz özüdür və inferensiya ilə yox, birbaşa nümayiş etdirilib. Bu hype artefaktı deyil; aparıcı qrupdan real mühəndislik nəticəsidir.
- **Müəlliflər əhatə dairəsinə ehtiyatla yanaşırlar.** Bunu below-threshold yaddaş kimi təqdim edir, izah olunmamış korrelyasiyalı səhv döşəməsini özləri bayraqlayır və gələcəyi həmin nəzərəçarpan “if scaled” ilə şərtləndirirlər. Şişirtmə varsa, “səhv-korreksiya yaddaş kubitini böyüdükcə yaxşılaşdı”nı “kvant kompüterləri artıq buradadır”a yuvarlaqlaşdıran ətraf mediada görünür.
- **Dürüst status təmiz atılmış təməl addımıdır.** Bir məntiqi kubit, redundantlıq əlavə etməyin nəhayət kömək etdiyi qədər yaxşı qorunub — amma qarşıda uzun, çətin və zamanətsiz miqyaslama, məntiqi gate-lər və izah olunmamış səhvlər yolu var.

Niyə vacibdir

Fault-tolerant kvant hesablama həmişə toyuq-yumurta problemi kimi görünürdü: faydalı maşınların heç bir fiziki kubitin çata bilmədiyi səhv dərəcəsinə ehtiyacı var, həll — səhv korreksiya — isə yalnız hardware artıq threshold-dan aşağı olacaq qədər yaxşıdırsa işləyir. Bu xətti bir dəfə, hətta tək bir məntiqi kubitdə keçmək belə sualı “bu ümumiyyətlə mümkündürmü?”dən “nə qədər və nə sürətlə miqyaslana bilər?”ə dəyişir. Bu, real və mənalı dəyişiklikdir, ona görə nəticə diqqətə layiqdir.

Amma nəticəni etibarlı edən eyni diqqət onun ətrafındakı hekayəni də yumşaltmalıdır. Bu, təməlin ilk kərpicidir və yaxşı qoyulub. Bina deyil; kərpic qoyanlar da bunu birinci deyirlər. Növbəti illərdə kvant hesablama prosesini izləməyin doğru yolu məhz bu parıltısız əyridir: kodlar böyüdükcə sönümləndirmə faktorunun qalıb-qalmaması, məntiqi gate-lərin məntiqi yaddaş qədər təmiz həyata keçirilə bilməsi və saatda bir dəfə çıxan o sirli səhvin nəhayət izah olunub-olunmaması.

Təmiz xülasə

Google Quantum AI ilk dəfə aydın göstərdi ki, surface-code kvant yaddaşı *below threshold* işləyə bilər: kod distance 3-dən 5-ə, sonra 7-yə böyüdükcə məntiqi səhv dərəcəsi eksponensial azaldı (hər iki addımda təxminən $2.14\times$) və ən böyük, 101-kubitlik distance-7 yaddaş özünün

ən yaxşı fiziki kubitindən daha uzun yaşadı — beyond breakeven — səhv korreksiyası real vaxtda işləyərkən. Bu, kvant kompüterlərinin mühəndisliyində uzun müddət axtarılan həqiqi mərhələdir. Amma bu, yaddaş kimi işləyən bir məntiqi kubitdir; səhv dərəcəsi real alqoritmlərin tələb etdiyindən hələ çox uzaqdır, heç bir məntiqi əməliyyat aparılmayıb, müəlliflərin özlərinin bayraqladığı izah olunmamış səhv döşəməsi var və qarşıda çoxlu böyüklük mərtəbəsində miqyaslama yolu dayanır. Real threshold keçildi — kvant kompüteri təhvil verilmədi.

Mənbələr

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>