The Clean Paper

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

একটি quantum memory বড় হওয়ার সঙ্গে সঙ্গে সত্যিই ভালো হয়েছে — আসল milestone, কিন্তু quantum computer নয়

Google Quantum AI-এর surface-code memory experiment-এ code distance বাড়ানোর সঙ্গে logical error rate কমছে, অর্থাৎ system below error-correction threshold operate করছে। Scalable fault-tolerant quantum computing-এর জন্য এটি গুরুত্বপূর্ণ milestone: redundancy বাড়ালে information আরও ভালোভাবে survive করছে। কিন্তু logical error এখনও আছে, unexplained error floor আছে, এবং experiment useful algorithm বা general quantum computer নয়। আসল অগ্রগতি হলো scaling behaviour, finished machine নয়।

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

যদেনি বক্ররখো সঠকি দকিে বাঁকল

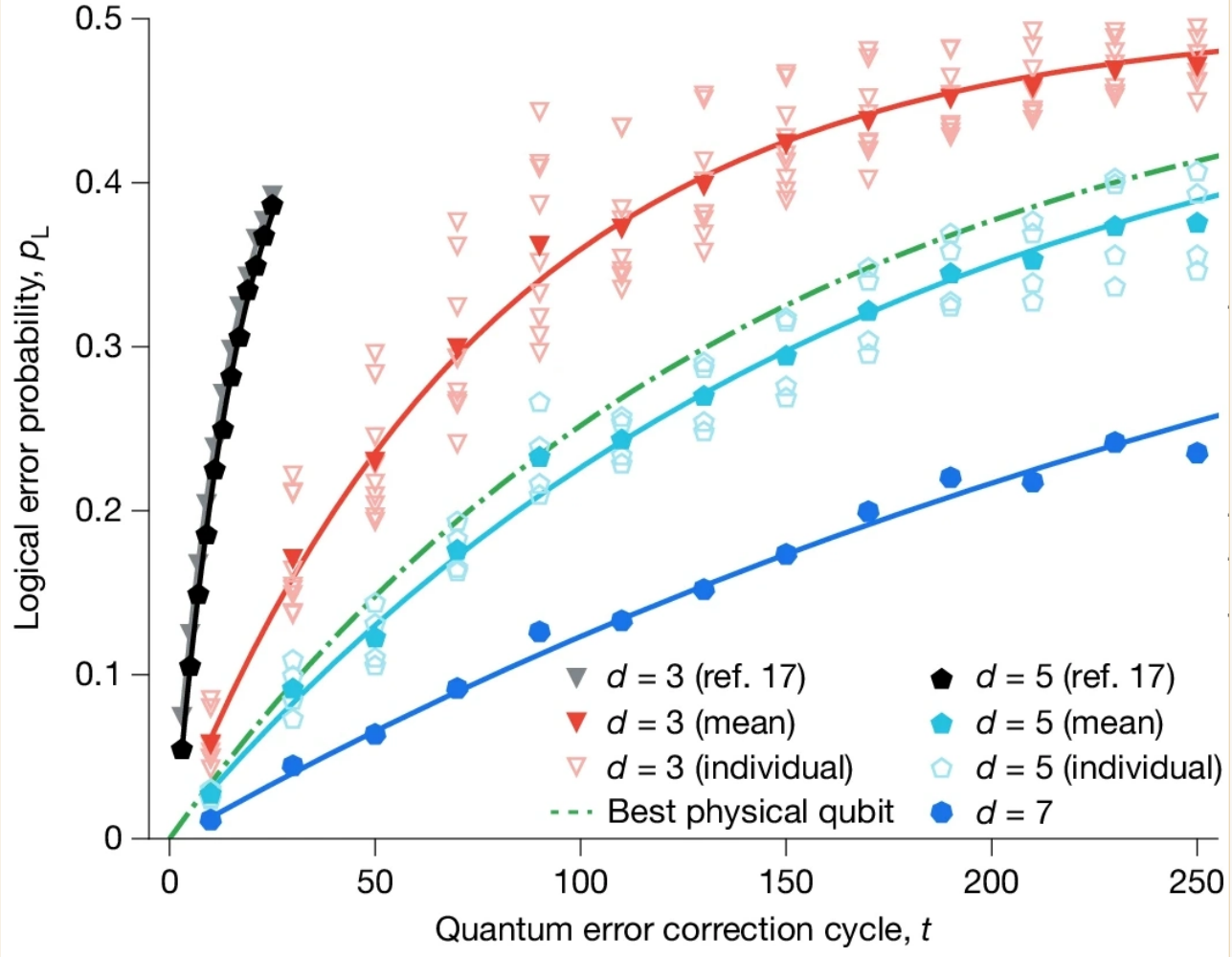
প্রায় 30 বছর ধরে কোয়ান্টাম ত্রুটি-সংশোধন একটি প্রতশিরুতরি ওপর দাঁড়য়িে: ত্রুটপ্রিবণ ভৌত কডিবটিরে অনকেগুলোর ওপর একটি **যৌক্তকি কডিবটি** সংকতোয়তি করা করলে, আর ভৌত কডিবটি যথষ্টে ভালো হলে, কোড বড় করার সঙ্গে যৌক্তকি ত্রুটি **সূচকীয়ভাবে কমা উচতি**। জটলিতা হলো সীমা। ভৌত ত্রুটি সংকটসীমার স্তররে **নচিে** হলে অতরিক্তি পুনরাবৃত্তি সাহায্য করে; ওপরে হলে আরও কডিবটি শুধু আরও শব্দদূষণ যোগ করে। আগরে পরীক্ষায় কোড বড় করলে ত্রুটি কমার পরষ্কিার প্রবণতা দখো যায়নি।

ডসিম্বের 2024-এ Google কোয়ান্টাম AI Willow সুপারকন্ডাক্টংি প্রসসেরে পৃষ্ঠ-কোড স্মৃতি দূরত্ব 3, 5 ও 7 বানয়িে প্রথম স্পষ্ট নচিে-সীমা স্কলেংি প্রতবিদেন করে। কোড দূরত্ব প্রতি দুই ধাপ বাড়লে যৌক্তকি ত্রুটি কারক $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ কমছে। সবচয়েে বড় দূরত্ব-7 স্মৃতি **101 ভৌত কডিবটি** ব্যবহার করে যৌক্তকি ত্রুটি **0.143% ± 0.003% প্রতি সংশোধন চক্র** পয়েছে; এবং সংকতোয়তি স্মৃতি খণ্ডরে সরো একক ভৌত কডিবটিরে চয়েে **2.4 ± 0.3× বশেি সময়** টকিছে। এটইি “বহরি্ভূত সমতা-বন্দিু”।

এটি বাস্তব মাইলফলক—স্কলেংি এখন সংশোধন করা দকিে। কন্তিু গবষেণাপত্র কার্যকর কোয়ান্টাম কম্পউিটার দাবি করে না। এটি সুরক্ষতি **স্মৃতি**, অ্যালগরদিমকি যন্ত্র নয়।

পৃষ্ঠ কোড, দূরত্ব আর নচিে সীমা কী

যৌক্তকি কডিবটি হলো বহু ভৌত কডিবটিে সংকতোয়তি সুরক্ষতি কোয়ান্টাম তথ্য। **পৃষ্ঠ কোড** একটি 2D গ্রডিে তথ্য-কডিবটি ও অতরিক্তি পরমিাপ-কডিবটি বসয়িে ত্রুটি-সন্ড্রিোম বারবার যাচাই করে, কন্তিু সংরক্ষতি কোয়ান্টাম অবস্থাটকিে সরাসরি মাপে না। কোডরে **দূরত্ব d** কোনো ভৌত দর্ঘৈ্য নয়; শনাক্ত না হওয়া একটি যৌক্তকি ত্রুটি ঘটাতে ন্যূনতম কতটি সঠকি জায়গায় পড়া ত্রুটি দরকার, তার মাপ। বড় d বশেি ভৌত কডিবটি খরচ করে এবং একই সঙ্গে বশেি ত্রুটি সহ্য করতে পারে—পাঠ্যপুস্তকরে হসিাবে প্রায় $2d^2-1$ ভৌত কডিবটি, যদওি বাস্তব বাস্তবায়নরে অতরিক্তি খরচ ভন্নি হতে পারে।
দূরত্ব 3, 5, 7 প্রায় 1, 2, 3 একযোগে ত্রুটি সংশোধন করতে পারে। **নচিে সীমা** মানে ভৌত ত্রুটি যথষ্টে নম্নি যে d বাড়ালে যৌক্তকি ত্রুটি সূচকীয়ভাবে দমন করা হয়। দমন কারক $\Lambda > 1$ হলে কোড বড় হওয়া করা সাহায্য করছে। Google-এর $\Lambda \approx 2.14$ মানে দূরত্ব দুই বাড়ালে যৌক্তকি ত্রুটি প্রায় অর্ধকেরেও কম হচ্ছে।



দূরত্ব-3, 5 ও 7 স্মৃতি-তে সংশোধন চক্ররে সঙ্গে যৌক্তিক ত্রুটি সঞ্চয়। সবুজ dashed রখো খণ্ডরে সরো একক ভৌত কডিবটি। দূরত্ব-7 যৌক্তিক স্মৃতি তার চয়েে ধীরে ত্রুটি জমায়—আয়ুষ্কালে **2.4× বহির্ভূত সমতা-বন্দিু**। নচি-সীমা স্কলেংিরে $\Lambda = 2.14$ পাঠ্যরে দূরত্ব তুলনা থকেে আসে।

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

গবষেকরো কী করছেনে

- দুই Willow খণ্ডে পৃষ্ঠ-কোড স্মৃতি চালনা করনে: **105-কডিবটি প্রসসের** দূরত্ব 3/5/7 স্কলেংি পরীক্ষা (সবচয়েে বড় 101-কডিবটি দূরত্ব-7 স্মৃতি, 49 তথ্য কডিবটি), এবং **72-কডিবটি প্রসসের** দূরত্ব-5 বাস্তব-সময় ডকিোডংি ও বড় পুনরাবৃত্তি-কোড পরীক্ষা।
- দূরত্ব 3→5→7-এ যৌক্তিক ত্রুটি **প্রতি চক্র** কীভাবে বদলায় পরমিাপ করে Λ extract করনে।
- যৌক্তিক স্মৃতি আয়ুষ্কাল একই খণ্ডরে সরো ভৌত কডিবটিরে সঙ্গে তুলনা করে **সমতা-বন্দিু** পরীক্ষা করনে।
- দূরত্ব-5 কোডে **বাস্তব-সময় ডকিোডার** চালান—ধ্রুপদি হার্ডওয়্যার সন্দ্রিোম ধারা চলমান ব্যাখ্যা করে—**একটি মলিয়িন চক্র** পর্যন্ত।
- Simpler **পুনরাবৃত্তি কোড দূরত্ব 29** পর্যন্ত বাড়য়িে বরিল সহসম্পর্কতি ত্রুটি উৎস/ত্রুটি নম্নিসীমা খোঁজনে।

তাঁরা কী পয়েছেনে

- **নচিে-সীমা স্কলেংি:** দূরত্ব প্রতি +2-তে যে াক্তকি ত্রুটি $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ কারক দমন করা। তত্ত্বর promised সূচকীয় প্রবণতা স্পষ্ট।
- **দূরত্ব-7: 0.143% ± 0.003% ত্রুটি/চক্র**, সরো ভে াত কডিবটিরে আয়ুষ্কালরে **2.4 ± 0.3×**—বহর্িভূত সমতা-বন্দিু।
- **বাস্তব-সময়রে decoder কাজরে চাপ সামলছে:** distance 5-এ গড় latency ছলি **63 μs**। Correction cycle মাত্র 1.1 μs হলওে pipeline ধারাবাহকি data stream সামলে million-cycle run চালয়িে যতেে পরেছে; অর্থাৎ ফলটি শুধু পরে বসে data process করার নয়।
- **বরিল গভীর ত্রুটি একটি নচিরে সীমা তরৈি করছে:** repetition-code পরীক্ষায় correlated burst আনুমানকি **ঘণ্টায় একবার**, অর্থাৎ প্রায় **3×10^{9} cycle-এ একবার**, দখো গছে; এতে কার্যসম্পাদনরে floor প্রায় **10^{-10}**। লখেকদরে মতে এর উৎস **অজানা**, এবং বড় fault-tolerant system-এর জন্য এটি গুরুত্বপূর্ণ সমস্যা।

এটি কী প্রমাণ করে না

- এটি গণনা করা কে ায়ান্টাম কম্পউিটার নয়। **একটি যে াক্তকি স্মৃতি কডিবটি**, যে াক্তকি ধাপ নটেওয়ার্ক/অ্যালগরদিম নয়।
- উপযে াগী যন্ত্ররে এক ধাপ দূরে নয়। ~0.1% প্রতি-চক্র ত্রুটি বাস্তব অ্যালগরদিমরে **~10^{-6}–10^{-10}** প্রয়ে াজনীয়তার অনকে ওপরে; বড়তর দূরত্ব মানে বহু বশেি ভে াত কডিবটি/যে াক্তকি কডিবটি, আর উপযে াগী অ্যালগরদিম thousands যে াক্তকি কডিবটি চাইতে পারে—মলিয়িন-পরসির ভে াত কডিবটি budget।
- “**যদি বড় করলে**” অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ। একটি যে াক্তকি কডিবটিে সংশে াধন করা প্রবণতা বড় যন্ত্রে একই কারক থাকবে নশি্চয়তা নয়।
- **অব্যাখ্যাত সহসম্পর্কতি ত্রুটরি নম্নিসীমা** এখনে া সমস্যা; লখেকরো বলনে, বর্তমান মাত্রা বে াঝা ও কমানে া না গলেে তা বড় ত্রুটি-সহনশীল ব্যবস্থার ব্যবহার ঠকোতে পার।ে
- Encryption breaking বা উপযে াগী “কে ায়ান্টাম supremacy” নয়।

প্রমাণ কতটা শক্তশিালী?

মূল প্রকে াশল দাবি শক্তশিালী: তনিটি কে াড দূরত্বে পরষ্কিার সূচকীয় দমন, বহর্িভূত-সমতা-বন্দিু আয়ুষ্কাল, বাস্তব-সময় ডকিে াডার—ক্ষত্রে দীর্ঘ খোঁজা সমন্বয়। এটি আবরণ-created অতরিঞ্জতি প্রচার কৃত্রমি প্রভাব নয়।

লখেকরো পরধিি সতর্ক রখেছেনে: ফলটকিে “threshold-এর নচিে memory” হসিবেইে বর্ণনা করনে, অব্যাখ্যাত ত্রুটরি নম্নিসীমা নজিরোই স্পষ্ট করে দখোন এবং বড় করার প্রসঙ্গে বারবার **যদি** শব্দটি রাখনে। অতরিঞ্জন শুরু হয় যখন “কে াড বড় করলে সংকতোয়তি memory qubit ভালে া হয়ছে” থকেে “কে ায়ান্টাম কম্পউিটংি এসে গছে” বলা হয়।

সতর্ক অবস্থা: **ভত্তিগিত ধাপ, স্পষ্টভাবে taken**। একটি যে াক্তকি স্মৃতি কডিবটি; স্কলেংি, যে াক্তকি ধাপ, সহসম্পর্কতি-ত্রুটি পদার্থবদি্যা এবং বশিাল প্রকে াশল সড়ক ahead।

কনে এটি গুরুত্বপূর্ণ

ত্রুটি-সহনশীল কোয়ান্টাম কম্পিউটিং chicken-এবং-egg সমস্যা: উপযোগী অ্যালগরিদম যে ত্রুটির হার চায় ভোক্তা কিউবিট দিতে পারে না; ত্রুটি সংশোধন তখনই কাজ করে যখন হার্ডওয়্যার সীমার নিচে। সেই রেখা একবার আন্তঃ করা—এমনকি একটি যৌক্তিক কিউবিট স্মৃতি-তে—প্রশ্ন বদলে দেয়: “সম্ভব?” থেকে “কত দূর পরিসর করা যায়?”

পরের বছরে নিরিস বক্ররেখা-ই গুরুত্বপূর্ণ: বড়তর দূরত্বে Λ hold করে কি, যৌক্তিক ধাপ স্মৃতির মতো পরিষ্কার হয় কি, একবার-an-ঘণ্টা বিস্ফোরণ ব্যাখ্যা করা/সংশোধন হয় কি।

সংক্ষিপ্ত সারাংশ

Google কোয়ান্টাম AI Willow-এ প্রথম পরিষ্কার **নিচে-সীমা পৃষ্ঠ-কোড স্মৃতি** দেখিয়েছে। দূরত্ব $3 \to 5 \to 7$ বাড়ালে যৌক্তিক ত্রুটি প্রতি দুই দূরত্বে **~2.14×** দমন করা হয়; 101-কিউবিট দূরত্ব-7 স্মৃতি **0.143% ত্রুটি/চক্র** এবং একই খণ্ডরে সেরা ভৌত কিউবিটের চেয়ে **2.4× দীর্ঘতর আয়ুষ্কাল** পেয়েছে। বাস্তব-সময় ডিকোডার মিলিয়ন-চক্র চালনা করেছে। মাইলফলক বাস্তব, কিন্তু এটি একক যৌক্তিক **স্মৃতি**, উপযোগী কম্পিউটার নয়; ত্রুটি এখনও অ্যালগরিদমিক লক্ষ্যের বহু ওপরে এবং বিরল সহসম্পর্কিত বিস্ফোরণের অব্যাখ্যাত নিম্নসীমা স্কেলিংয়ের বাধা।

উৎস

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