



The CLEAN PAPER

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

একটি quantum memory বড় হওয়ার সঙ্গে সঙ্গে সত্যি
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 সঠিকি দকি বাকল

প্রায় 30 বছর ধরে কায়ান্টাম ত্রুটি-সংশোধন একটি প্রতশ্রুতির ওপর দাঁড়িয়ে: ত্রুটিপ্রবণ ভট্ট কডিবিটের অনেকেগুলোর ওপর একটি **যটিক্তি কডিবিট** সংকতোয়তি করলে, আর ভট্ট কডিবিট যথেষ্ট ভালো হলে, কোড বড় করার সঙ্গে যটিক্তি ত্রুটি **সূচকীয়ভাবে কমা উচিত**। জটিলতা হলো সীমা। ভট্ট ত্রুটি সংকটসীমার স্তরে **নচি** হলে অতিরিক্ত পুনরাবৃত্তি সাহায্য করে; ওপরে হলে আরও কডিবিট শুধু আরও শব্দদূষণ যোগ করে। আগরে পরীক্ষায় কোড বড় করলে ত্রুটিকিমার পরিষ্কার প্রবণতা দেখা যায়নি।

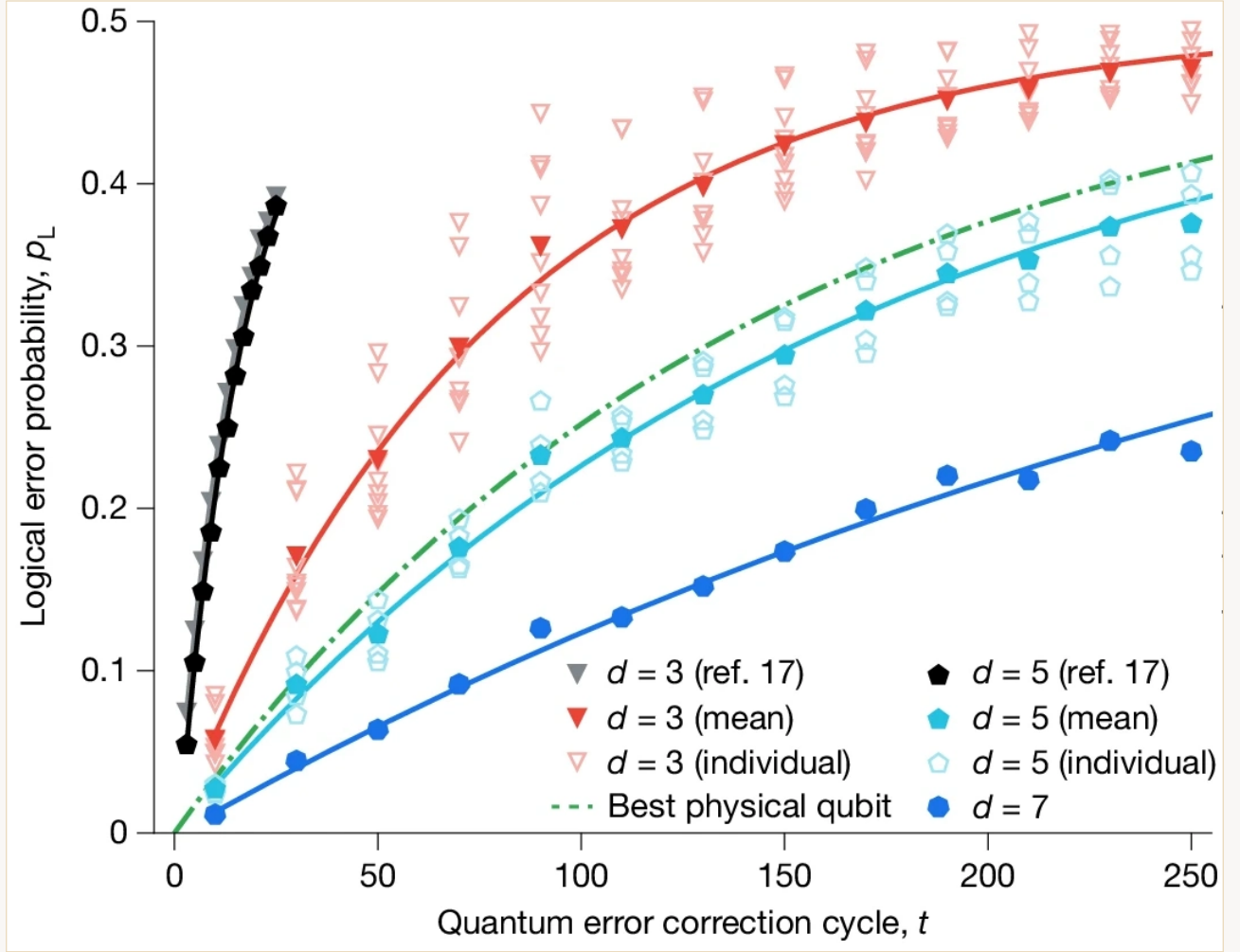
ডিসেম্বর 2024-এ Google কায়ান্টাম AI Willow সুপারকন্ডাক্টিং প্রসেসরে পৃষ্ঠ-কোড স্মৃতিদূরত্ব 3, 5 ও 7 বানিয়ে প্রথম স্পষ্ট নচি-সীমা স্কেলে প্রতবিদেন করে। কোড দূরত্ব প্রত দুই ধাপ বাড়লে যটিক্তি ত্রুটিকারক $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ কমছে। সবচেয়ে বড় দূরত্ব-7 স্মৃতি **101 ভট্ট কডিবিট** ব্যবহার করে যটিক্তি ত্রুটি $0.143\% \pm 0.003\%$ **প্রত সংশোধন চক্র** পেয়েছে; এবং সংকতোয়তি স্মৃতিখণ্ডের সরো একক ভট্ট কডিবিটের চেয়ে $2.4 \pm 0.3 \times$ **বশেসিময়** টকিছে। এটি “ব্রকে-ইভনে অতিক্রম”।

এটি বাস্তব মাইলফলক—স্কেলে এখন সঠিকি দকি। কিন্তু গবেষণাপত্র কার্যকর কায়ান্টাম কম্পিউটার দাবি করে না। এটি সুরক্ষিত **স্মৃতি**, অ্যালগরিদমিকি যন্ত্র নয়।

পৃষ্ঠ কোড, দূরত্ব আর নচি সীমা কী

যটিক্তি কডিবিট হলো বহু ভট্ট কডিবিটে সংকতোয়তি সুরক্ষিত কায়ান্টাম তথ্য। **পৃষ্ঠ কোড** একটি 2D গ্রিডে তথ্য-কডিবিট ও অতিরিক্ত পরিমাপ-কডিবিট বসিয়ে ত্রুটি-সিদ্ধির ম্যাক্সিমাম বারবার যাচাই করে, কিন্তু সংরক্ষিত কায়ান্টাম অবস্থাটিকে সরাসরি মাপে না। কোডের **দূরত্ব d** কোনো ভট্ট দৈর্ঘ্য নয়; শনাক্ত না হওয়া একটি যটিক্তি ত্রুটি ঘটাত ন্যূনতম কতটি সঠিকি জায়গায় পড়া ত্রুটি দরকার, তার মাপ। বড় d বশে ভট্ট কডিবিট খরচ করে এবং একই সঙ্গে বশে ত্রুটি সহ্য করতে পারে—পাঠ্যপুস্তকের হিসাবে প্রায় $2d^2 - 1$ ভট্ট কডিবিট, যদিও বাস্তব বাস্তবায়নের অতিরিক্ত খরচ ভিন্ন হতে পারে।

দূরত্ব 3, 5, 7 প্রায় 1, 2, 3 একযোগে ত্রুটি সংশোধন করতে পারে। **নচি সীমা** মানে ভট্ট ত্রুটি যথেষ্ট নম্ন যো d বাড়ালে যটিক্তি ত্রুটি সূচকীয়ভাবে দমন করা হয়। দমন কারক $\Lambda > 1$ হলে কোড বড় করা সাহায্য করছে। Google-এর $\Lambda \approx 2.14$ মানে দূরত্ব দুই বাড়ালে যটিক্তি ত্রুটি প্রায় অর্ধেকেরও কম হচ্ছে।



দূরত্ব-3, 5 ও 7 স্মৃতিতে সংশোধন চক্রের সঙ্কেত যাই ইকতকি ত্রুটি সঞ্চেয়। সবুজ ডাশাযুক্ত রথো খণ্ডরে সরো একক ভট্ট কডিবিটি। দূরত্ব-7 যাই ইকতকি স্মৃতি তার চয়ে ধীরে ত্রুটি জমায়—আয়ুস্কালা 2.4× ব্রকে-ইভনে অভিক্রম। নচি-সীমা স্কেলিংরে $\Lambda = 2.14$ পাঠ্যরে দূরত্ব তুলনা থকে আসে।

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

গবেষকরো কী করছেন

- দুই Willow খণ্ডে পৃষ্ঠ-কোড স্মৃতি চালনা করনে: **105-কডিবিটি প্রসেসের দূরত্ব 3/5/7** স্কেলিং পরীক্ষা (সবচেয়ে বড় 101-কডিবিটি দূরত্ব-7 স্মৃতি, 49 তথ্য কডিবিটি), এবং **72-কডিবিটি প্রসেসের দূরত্ব-5** বাস্তব-সময় ডিকোডিং ও বড় পুনরাবৃত্তিকোড পরীক্ষা।
- দূরত্ব 3→5→7-এ যাই ইকতকি ত্রুটি **প্রতিচক্র** কীভাবে বদলায় পরিমাপ করে Λ নির্ণয় করনে।
- যাই ইকতকি স্মৃতি আয়ুস্কালা একই খণ্ডরে সরো ভট্ট কডিবিটিরে সঙ্কেত তুলনা করে **সমতা-বিন্দু** পরীক্ষা করনে।
- দূরত্ব-5 কোডে **বাস্তব-সময় ডিকোডিং** চালান—ধ্রুপদী হার্ডওয়্যার সনিড্রোম ধারা চলমান ব্যাখ্যা করে—**একটি মিলিয়ন চক্র** পর্যন্ত।
- আরও সরল **পুনরাবৃত্তিকোড দূরত্ব 29** পর্যন্ত বাড়িয়ে বরিল সহস্রম্পরকতি ত্রুটি উৎস/ত্রুটি নিম্নসীমা খোঁজনে।

তাঁরা কী পয়েছেন

- **নচি-সীমা স্কলেডিং:** দূরত্ব প্রতি+2-তে যৈ ঐক্তিক ত্রুটি $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ কারক দমন। তত্বের প্রতিশ্রুত সূচকীয় প্রবণতা স্পষ্ট।
- **দূরত্ব-7: $0.143\% \pm 0.003\%$ ত্রুটি/চক্র,** সরো ভৈ ঐত কডিবিটিরে আয়ুষ্কালরে $2.4 \pm 0.3 \times$ —ব্রকে-ইভনে অতিক্রম।
- **বাস্তব-সময়রে ডকিোডার কাজরে চাপ সামলছে:** দূরত্ব 5-এ গড় বলিম্ব ছিল $63 \mu s$ । সংশোধন চক্র মাত্র $1.1 \mu s$ হলেও ধাপক্রম ধারাবাহিক তথ্য ধারা সামলে মলিয়িন-চক্র চালনা চালিয়ে যেতে পরেছে; অর্থাৎ ফলটি শুধু পরে বসে তথ্য প্রক্রিয়া করার নয়।
- **বরিল গভীর ত্রুটি একটিনিচিরে সীমা তরৈকিরছে:** পুনরাবৃত্তি-কোড পরীক্ষায় পারস্পরিক-সম্পরকযুক্ত হঠাৎ-বৃদ্ধি আনুমানিক ঘণ্টায় একবার, অর্থাৎ প্রায় 3×10^9 চক্রে একবার, দেখা গেছে; এতে কার্যসম্পাদনরে নমিনসীমা প্রায় 10^{-10} । লখেকদরে মতে এর উৎস অজানা, এবং বড় ত্রুটি-সহনশীল ব্যবস্থার জন্য এটি গুরুত্বপূর্ণ সমস্যা।

এট কী প্রমাণ করে না

- এটি গণনাকারী কে ইয়ান্টাম কম্পিউটার নয়। **একটি যৈ ঐক্তিক স্মৃতি কডিবিটি,** যৈ ঐক্তিক ধাপ নটেওয়ারক/অ্যালগরিদম নয়।
- উপযোগী যন্ত্রেরে এক ধাপ দূর নয়। $\sim 0.1\%$ প্রতি-চক্র ত্রুটি বাস্তব অ্যালগরিদমরে $\sim 10^{-6}$ – 10^{-10} প্রয়োগজনীয়তার অনেকে ওপরে; বড়তর দূরত্ব মানবে বহু বেশি ভৈ ঐত কডিবিটি/যৈ ঐক্তিক কডিবিটি, আর উপযোগী অ্যালগরিদম হাজার হাজার যৈ ঐক্তিক কডিবিটি চাইতে পারে—মলিয়িন-পরসির ভৈ ঐত কডিবিটি বাজটে।
- **“যদি বড় করলে”** অত্যান্ত গুরুত্বপূর্ণ। একটি যৈ ঐক্তিক কডিবিটি সঠিক প্রবণতা বড় যন্ত্রে একই কারক থাকবে নশিচয়তা নয়।
- **অব্যাখ্যাত সহসম্পরকতি ত্রুটির নমিনসীমা** এখনো সমস্যা; লখেকরো বলেনে, বর্তমান মাত্রা বোঝা ও কমানো না গেলে তা বড় ত্রুটি-সহনশীল ব্যবস্থার ব্যবহার ঠেকাতে পারে।
- এনক্রিপশন ভাঙা বা উপযোগী “কে ইয়ান্টাম শ্রেষ্ঠত্ব” নয়।

প্রমাণ কতটা শক্তিশালী?

মূল প্রকটীশল দাবী শক্তিশালী: তনিটি কোড দূরতবে পরষিকার সূচকীয় দমন, বহির্ভূত-সমতা-বিন্দু আয়ুষ্কাল, বাস্তব-সময় ডকিোডার—ক্ষেত্রের দীর্ঘ খোঁজা সমন্বয়। এটি আবরণ-তরৈকি অতিরঞ্জিত প্রচার কৃত্রিম প্রভাব নয়।

লখেকরো পরষি সতরক রখেছেন: ফলটিকে “সীমার নচি স্মৃতি” হিসেবেই বর্ণনা করনে, অব্যাখ্যাত ত্রুটির নমিনসীমা নজিরোই স্পষ্ট করে দেখোন এবং বড় করার প্রসঙ্গে বারবার **যদি** শব্দটি রাখনে। অতিরঞ্জন শুরু হয় যখন “কোড বড় করলে সংকতোয়িত স্মৃতি কডিবিটি ভালো হয়ছে” থেকে “কে ইয়ান্টাম কম্পিউটিং এসে গেছে” বলা হয়।

সতরক অবস্থা: **ভিত্তিগত ধাপ, স্পষ্টভাবে নেওয়া।** একটি যৈ ঐক্তিক স্মৃতি কডিবিটি; স্কলেডিং, যৈ ঐক্তিক ধাপ, সহসম্পরকতি-ত্রুটি পিদার্থবদ্বিয়া এবং বিশাল প্রকটীশল সড়ক এগিয়ে।

কনে এটি গুরুত্বপূর্ণ

ত্রুটি-সহনশীল কে ইয়ান্টাম কম্পিউটিং মুরগি-ও-ডমিরে সমস্যা: উপযোগী অ্যালগরিদম যে ত্রুটির হার চায় ভৈ ঐত কডিবিটি দিতে পারেনা; ত্রুটি সংশোধন তখনই কাজ করে যখন হার্ডওয়ার সীমার নচি। সেই রকো একবার অতিক্রম করা—এমনকি একটি যৈ ঐক্তিক কডিবিটি স্মৃতিতে—প্রশ্ন বদলে দেয়: “সম্ভব?” থেকে “কত দূর স্কেলে করা যায়?”

পরের বছরে নরিস বক্ররখোই গুরুত্বপূর্ণ: বড়তর দূরতবে Λ বজায় থাকে কি, যৈ াক্তিক ধাপ স্মৃতির মতৈ পরিষ্কার হয় কি, ঘণ্টায়-একবার বসিফে ারণ ব্যাখ্যা করা/সংশোধন হয় কি।

সংক্ষিপ্ত সারাংশ

Google কোয়ান্টাম AI Willow-এ প্রথম পরিষ্কার **নচি-সীমা পৃষ্ঠ-কোড স্মৃতি** দেখিয়েছে। দূরত্ব $3 \rightarrow 5 \rightarrow 7$ বাড়ালে যৈ াক্তিক ত্রুটি প্রতিদুই দূরতবে $\sim 2.14 \times$ দমন করা হয়; 101-কডিবিটি দূরত্ব-7 স্মৃতি **0.143% ত্রুটি/চক্র** এবং একই খণ্ডেরে সরো ভৈ াত কডিবিটিরে চয়ে $2.4 \times$ **দীর্ঘতর আয়ুষ্কাল** পয়েছে। বাস্তব-সময় ডকি াডার মলিয়িন-চক্র চালনা করছে। মাইলফলক বাস্তব, কনিত্তু এটি একক যৈ াক্তিক **স্মৃতি**, উপযৈ াগী কম্পিউটার নয়; ত্রুটি এখনও অ্যালগরিদমিক লক্ষ্যেরে বহু ওপরে এবং বরিল সহসম্প্রকতি বসিফে ারণেরে অব্যাখ্যাত নমিনসীমা স্কেলিংরে 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>