

文部科学省 量子科学技術委員会 (第31回)

量子技術の研究開発に関する最新動向

量子誤り抑制・訂正の進展と未来

2024年1月16日

JST 研究開発戦略センター

嶋田 義皓

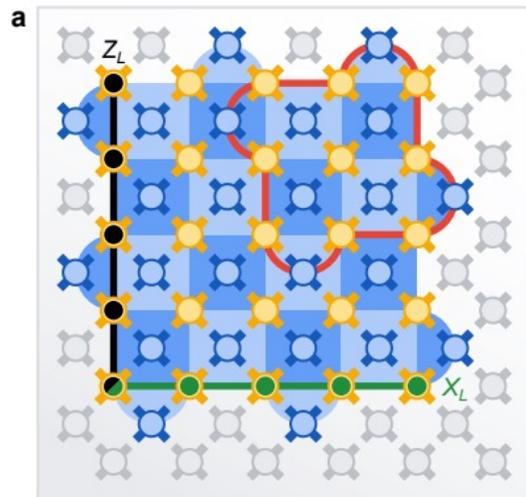
yoshiaki.shimada@jst.go.jp



2023年は「論理量子ビット元年」でした (私見)

Google

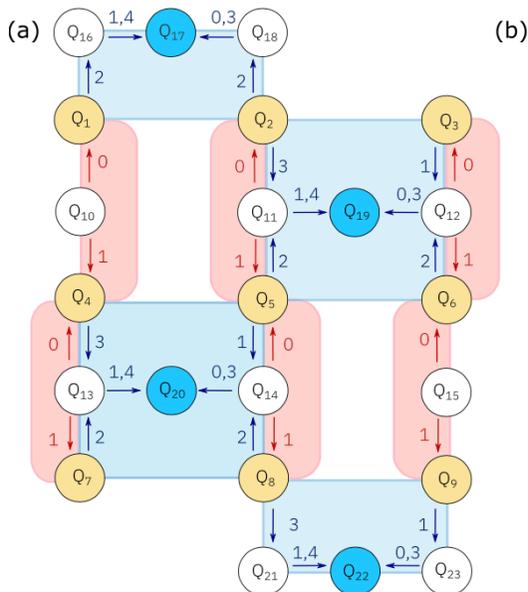
[[25, 1, 5]] Surface code



Google Quantum AI, Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit, Nature 614, 676-681 (2023).

IBM

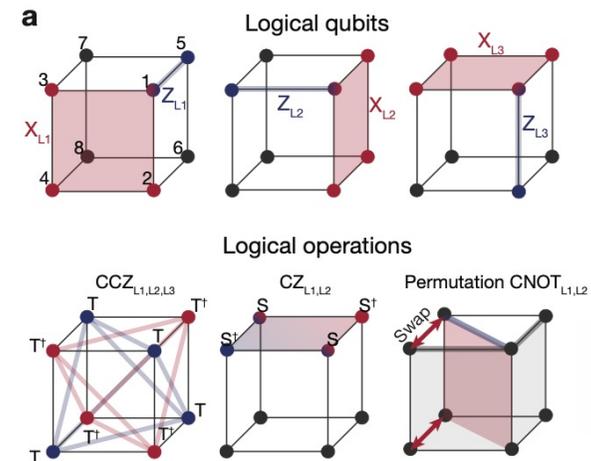
[[9, 1, 3]] Heavy-Hex code



N. Sundaresan et al., Demonstrating multi-round subsystem quantum error correction using matching and maximum likelihood decoders, Nature Communications 14, 2852 (2023).

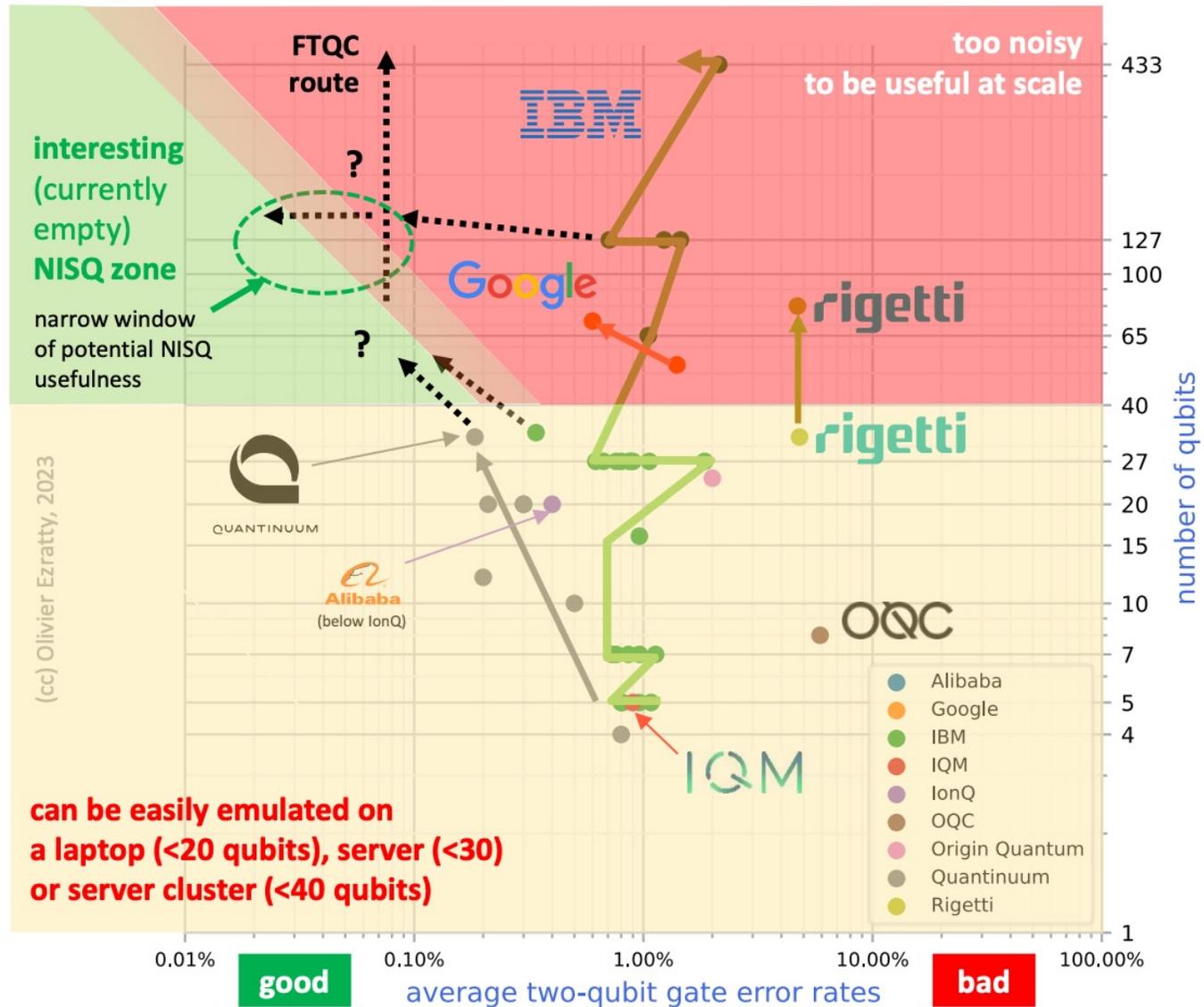
Harvard 他

[[8, 3, 2]] Block code



D. Bluvstein et al., Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays, Nature (unedited, arXiv:2312.03982) (2023).

NISQはどこへ行く？



NISQ応用の現状 (by J. Preskill)

私たちが今持っているもの

NISQは科学的探査にとって価値がある。しかし、同じ問題を解決するための最良のアルゴリズムを実行する最良の古典的ハードウェアと比較した場合に、量子の利点の実証された商業的価値のあるNISQコンピューティング応用は提案されていない。

私たちが合理的に予測できること

量子誤り訂正符号や誤り耐性量子計算を使用しない商業的に実行可能な応用が見つかることを示す説得力のある理論的議論もない

Status of NISQ applications

What we have now. NISQ is valuable for scientific exploration. But there is no proposed application of NISQ computing with *commercial* value for which quantum advantage has been demonstrated *when compared to the best classical hardware running the best algorithms for solving the same problems.*

What we can reasonably foresee. Nor are there persuasive theoretical arguments indicating that commercially viable applications will be found that do *not* use quantum error-correcting codes and fault-tolerant quantum computing.

John Preskill, Crossing the Quantum Chasm: From NISQ to Fault Tolerance, Q2B 2023 Silicon Valley (2023).

量子誤り訂正符号

量子ビットに冗長性をもたせ、エラーを検出・訂正する

古典のハミング符号と似た考え方だが、量子コンピュータ特有の事情の考慮が必要

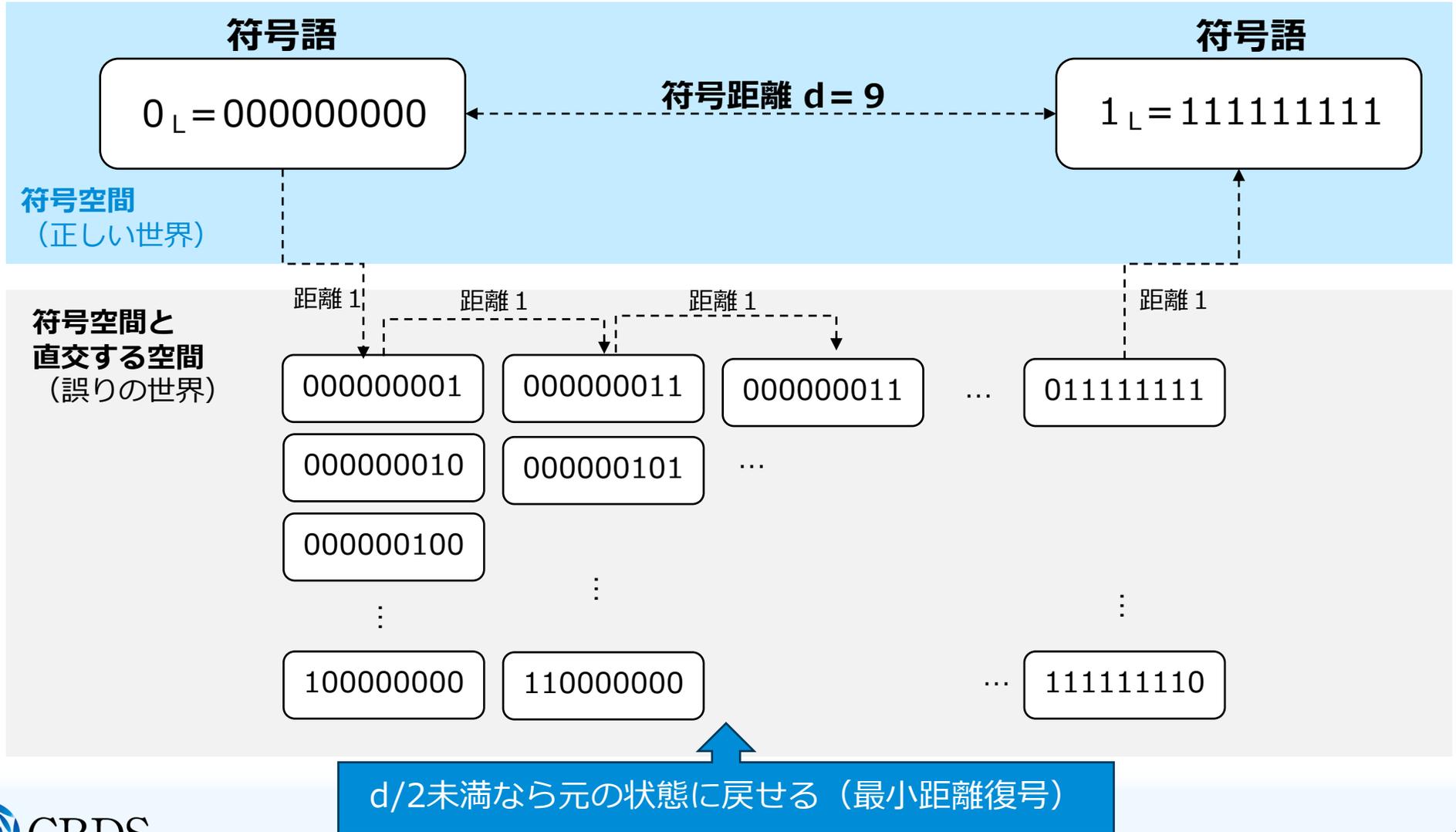
特有の事情

1. ビット反転エラーに加えて位相反転エラーが存在
2. 任意の量子状態のコピー保存は不可（No-Cloning定理）
3. 計算実行中のレジスタを護る必要がある（符号化されたまま演算）
4. エラー種類・位置を確認するには測定が必要だが重ね合わせ状態が壊れる
5. エラー訂正のためのゲート操作も高い確率で誤る

よく使われるQECフレームワーク

$[[n, k, d]]$
n:物理ビット数、k:論理ビット数、d:符号長
($(d - 1) / 2$ の誤りを訂正できる)

例) $[[9, 1, 9]]$ 反復符号



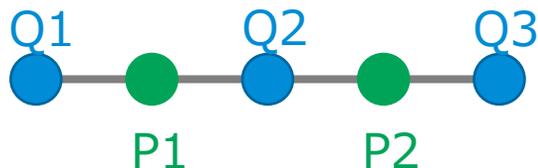
[補足] パリティチェック

エラーそのものを測定せず、パリティ測定結果からエラー位置を推定

補助ビットP1, P2にQ1-Q2, Q2-Q3のパリティ値をCNOTゲートで書き込む

Q1~3の状態が $|0\rangle$ か $|1\rangle$ かの情報を**使わず**にP1, P2の測定結果からエラーの位置を推定

データ量子ビット



補助量子ビット

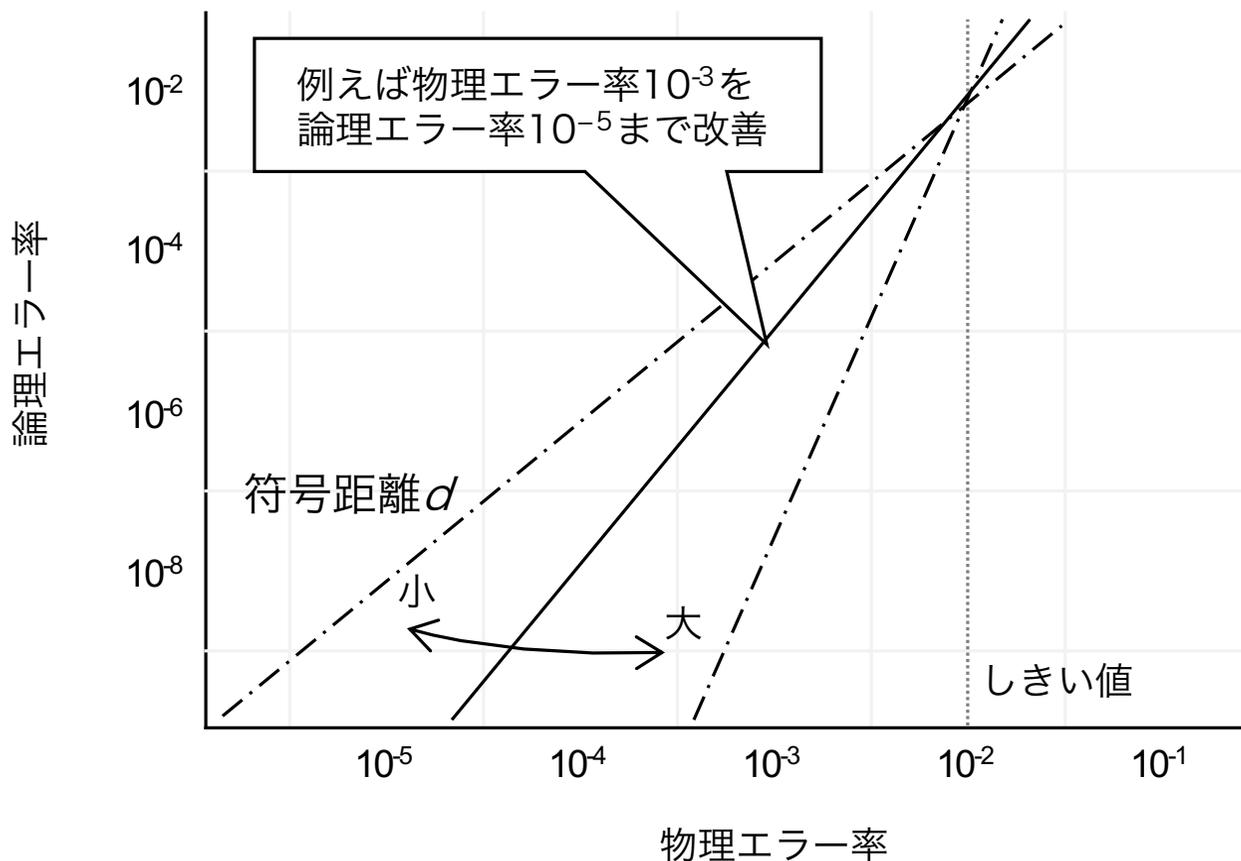
Q1	Q2	Q3	P1	P2	
$ 0\rangle$	→ エラーなし				
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	→ Q1にエラー
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	→ Q2にエラー
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	→ Q3にエラー
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	

エラー位置の推定問題 = 最小重み完全マッチング問題 (MWPM) には古典多項式アルゴリズムが存在。

[補足] しきい値

符号距離を伸ばせば、エラーは指数関数的に抑えられる（か否か）

エラーの検出・訂正にもエラーが生じるため、物理エラー率があるしきい値を下回らない限りは、量子誤り訂正の効果は得られない。



表面符号（2次元トポロジカル符号）

しきい値が低い

符号を使うために要求される最低の物理エラー率が他の符号と比べて高い（1%程度）

実装が容易

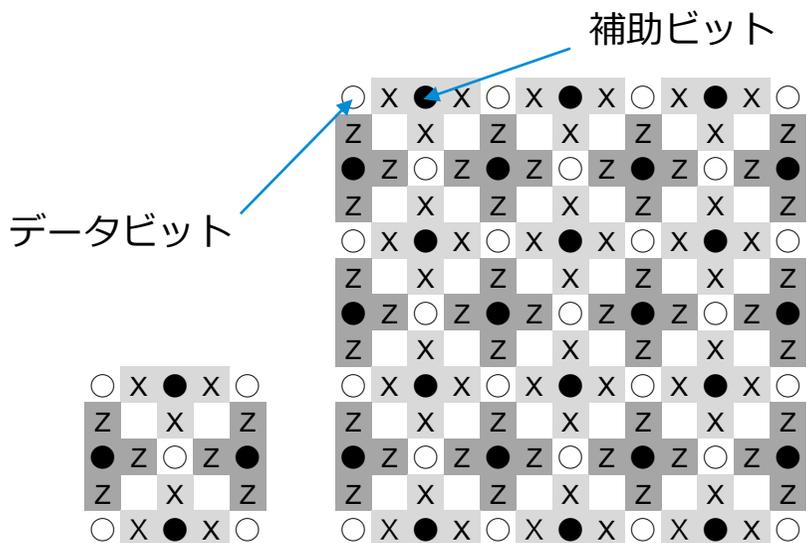
最近接の2量子ビットゲートしか必要としない。
構造も単純の繰り返し。

拡張性

格子を大きくすると符号距離が伸びる。

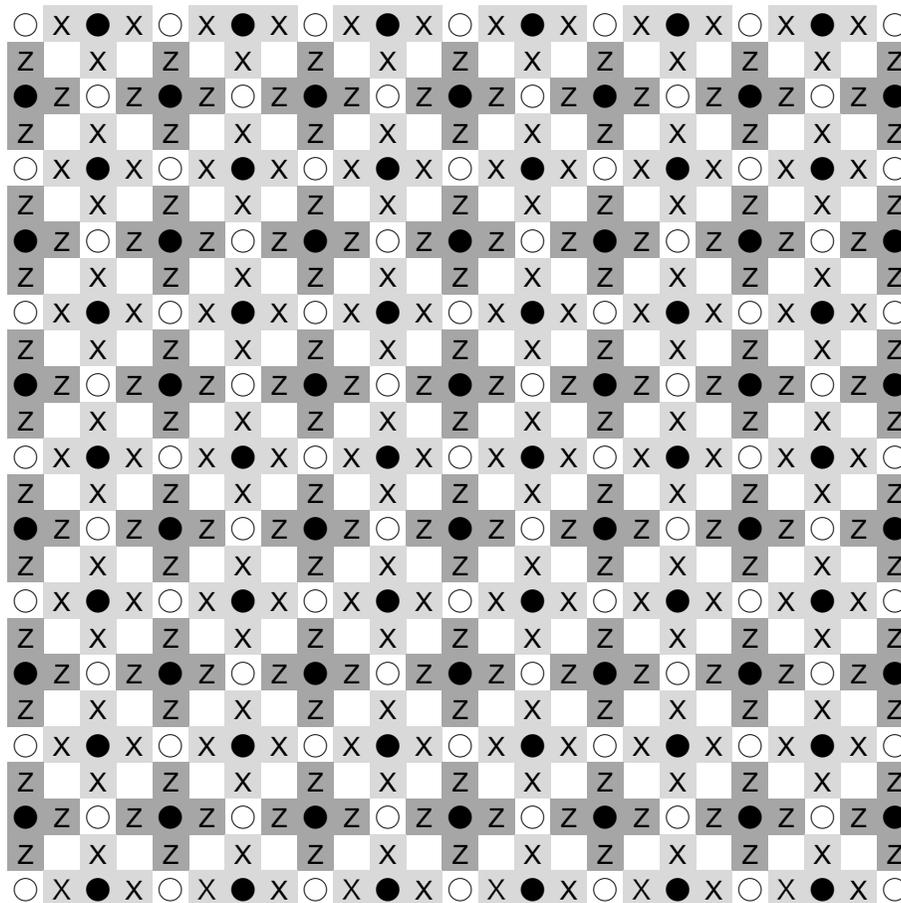
$[[n, k, d]]$

n:物理ビット数、k:論理ビット数、d:符号長
($(d - 1) / 2$ の誤りを訂正できる)



$[[5, 1, 2]]$

$[[25, 1, 4]]$



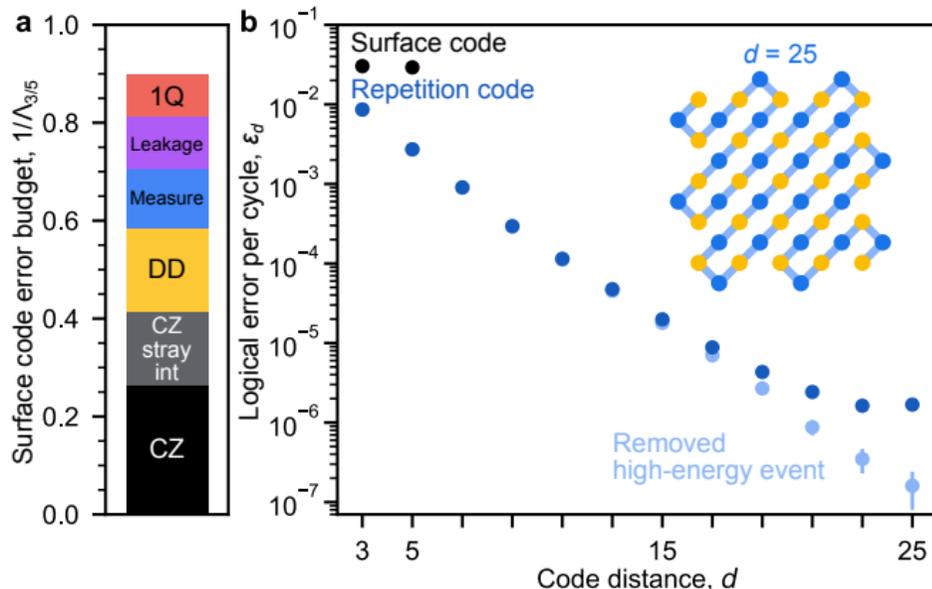
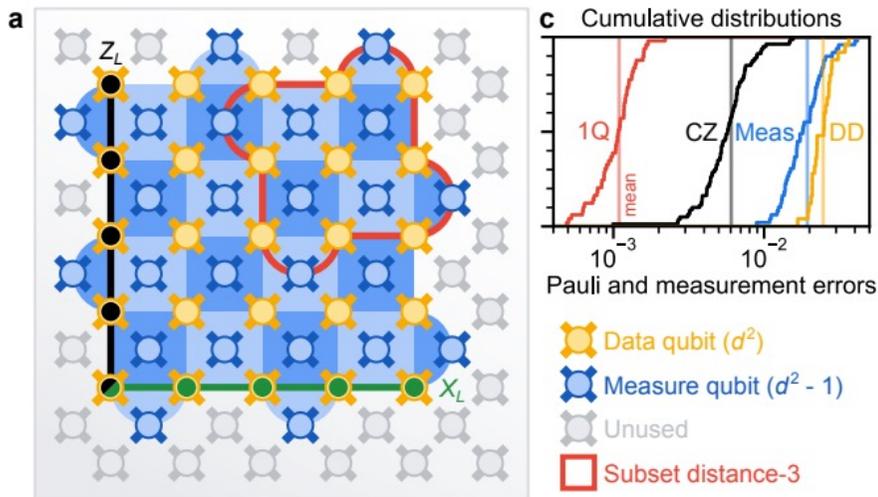
$[[85, 1, 7]]$

量子誤り訂正の実証 (Google)

[[n, k, d]]

n: 物理ビット数、k: 論理ビット数、d: 符号長
 ((d - 1) / 2の誤りを訂正できる)

表面符号 [[9, 1, 3]]-[[25, 1, 5]] @17~49量子ビット
 (反復符号 [3, 1, 3]-[25, 1, 25])



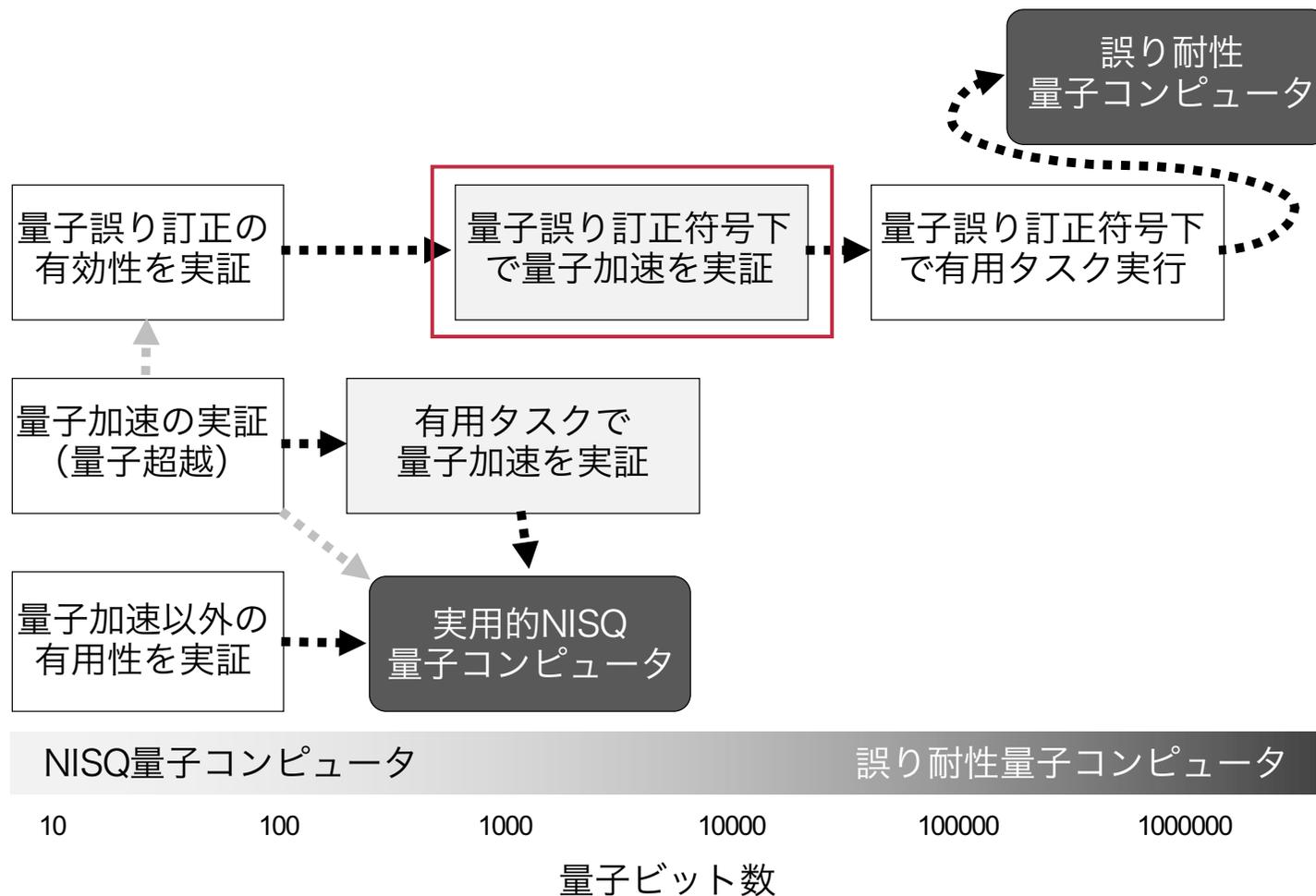
論理エラー (X_L, Z_L の平均エラー率)

d=3: 3.028 ± 0.023 %

d=5: 2.914 ± 0.016 %

次のマイルストーン？

量子誤り訂正符号下での量子超越の実証



FTQCでランダム量子回路

FTQCリソース見積もり

	サンプリング [1]	物性物理 [2]	量子化学 [3]	素因数分解 [4]
具体的 タスク	60ビット ランダム量子回路 (10%忠実度)	2次元 J_1 - J_2 ハイゼンベルグモデル (10x10格子)	FeMoco の基底状態	2048ビット整数 の素因数分解
物理量子 ビット数	2.5×10^4	5×10^5	4×10^6	2×10^7
実行時間	0.25 sec	14 Hours	4days	8 hours

HWの仮定：

物理量子ゲート忠実度99.9%、5 dB/distance、表面符号サイクル 1MHz、適応的測定 100kHz

[1] C. Gidney, Estimating the Fault Tolerant Cost of Classically Intractable Quantum Computations, Talks at Simon Institute (Feb. 27, 2020)

[2] N. Yoshioka et. al., Hunting for quantum-classical crossover in condensed matter problems, arXiv:2210.14109 (2022).

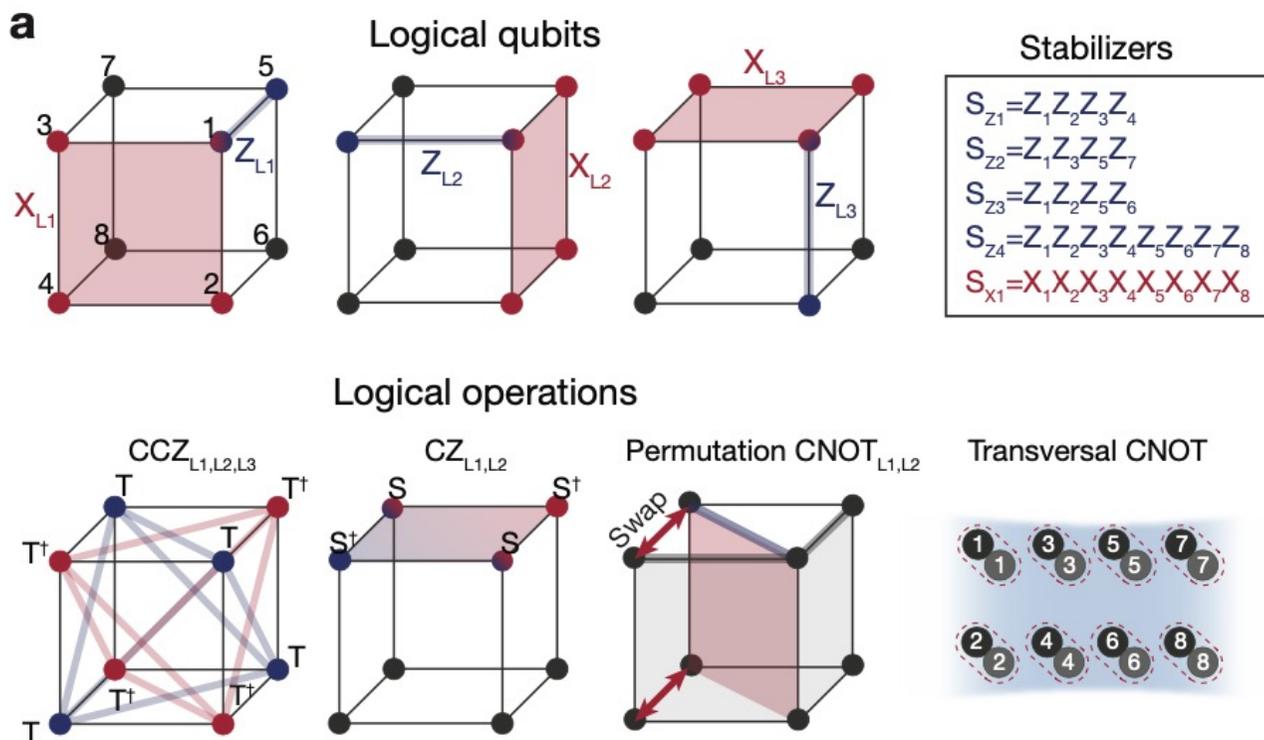
[3] M. Reiher et al., Elucidating reaction mechanisms on quantum computers, PNAS 114 (29), 7555-7560 (2017).

[4] C. Gidney and M. Eker, How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits, Quantum 5, 433 (2021).

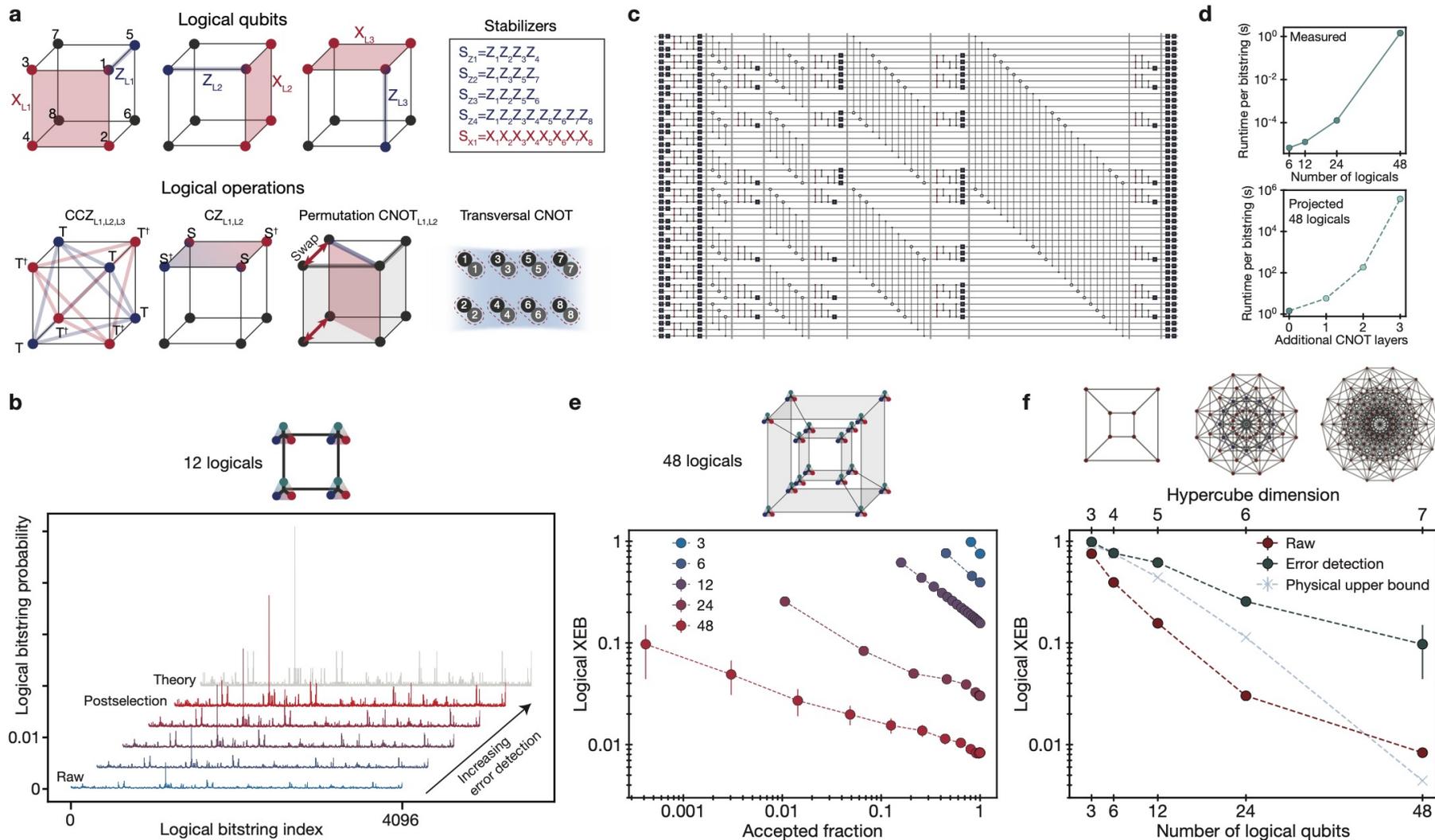
論理量子ビットによるIQP回路実行

[[8,3,2]] ブロック符号

- 各ブロック内で{CCZ、CZ、Z、CNOT}ゲートをトランスバーサルに実現
- ブロック間でトランスバーサルCNOTを実行可能



論理量子ビットによるIQP回路実行



[補足] IQP回路

Instantaneous Quantum Polynomial

万能ではない「弱い」量子コンピュータでも多項式時間で古典シミュレートできないことを利用して量子超越を実験検証する方法。

アルゴリズム	量子コンピューターでの計算	古典計算が効率的に行えないと考えられる理由（仮定）	実験検証	有用性
因数分解	難しい	RSA暗号が破られる	易しい	あり
ボソンサンプリング	易しい	多項式ヒエラルキーの崩壊	難しい	なし
低デプス回路	ほどほど	多項式ヒエラルキーの崩壊	難しい	なし
IQP	ほどほど	多項式ヒエラルキーの崩壊	場合による	なし
QAOA	ほどほど	多項式ヒエラルキーの崩壊	難しい	おそらく
ランダム量子回路	ほどほど	多項式ヒエラルキーの崩壊	難しい	なし
断熱最適化	易しい	不明	難しい	おそらく
アナログシミュレーション	易しい	特異的	難しい	しばしば

[補足] トランスバーサルなゲート

- 符号によっては1論理ビットの操作 U に対応する $O(d)$ 量子ビットの量子操作 U' が $O(1)$ ステップで完了できるような U が存在する。こうした符号上でも効率的に実現可能な論理ビットに対する操作を**トランスバーサルな操作**と呼ぶ。
- もし、トランスバーサルなゲートだけで万能ゲートセットを構築すれば効率的に符号上で万能量子計算が行えるが、残念ながら**そのようなスタビライザー符号は無い**ことが証明されている。

量子誤り訂正符号

[Kitaev surface code](#)

[Two-dimensional color code](#)

[\[\[8,3,2\]\] CSS code](#)

トランスバーサルなゲート

Transversal Pauli gates exist and are based on non-trivial loops on surface. Transversal Clifford gates can be done on folded surface codes [\[15\]](#)

ransversal CNOT can be implemented via braiding [\[23\]](#).

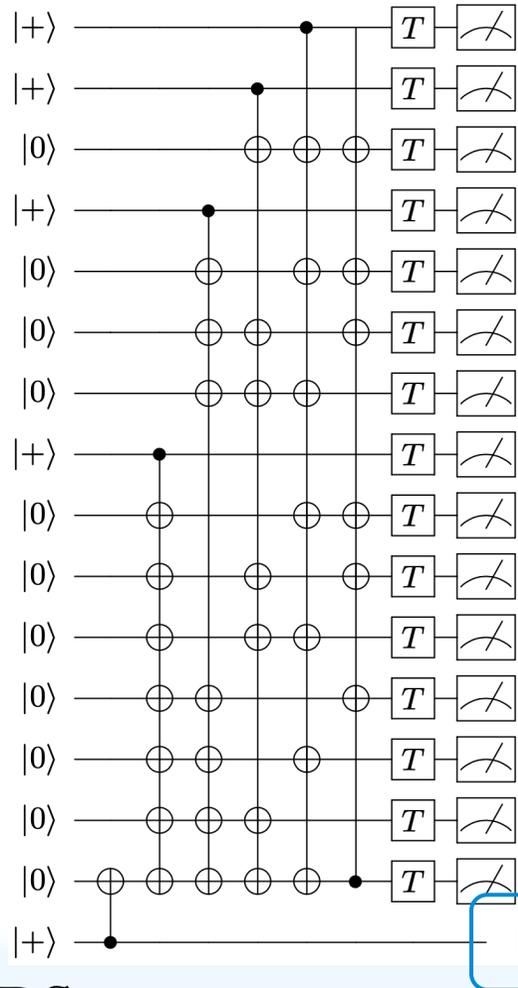
CZ gates between any two logical qubits [\[35\]](#) and CCZ gate [\[35–37\]](#).

https://errorcorrectionzoo.org/list/quantum_transversal

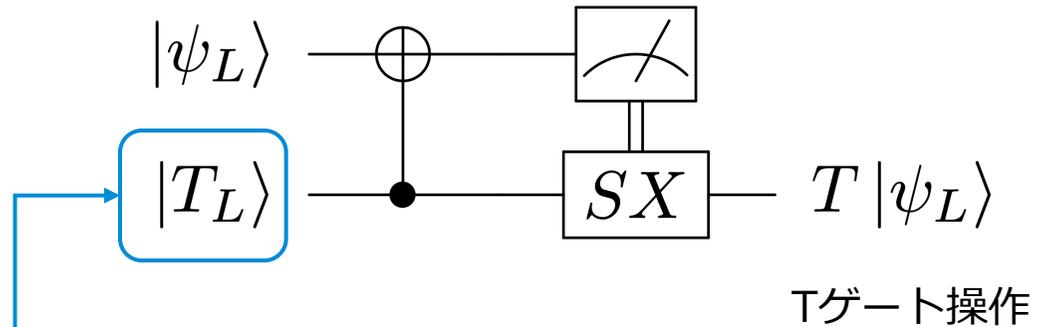
非トランスバーサルゲートの論理ゲート実装

例) 2次元表面符号でのTゲート (万能ゲートセットとして必須)

魔法状態蒸留



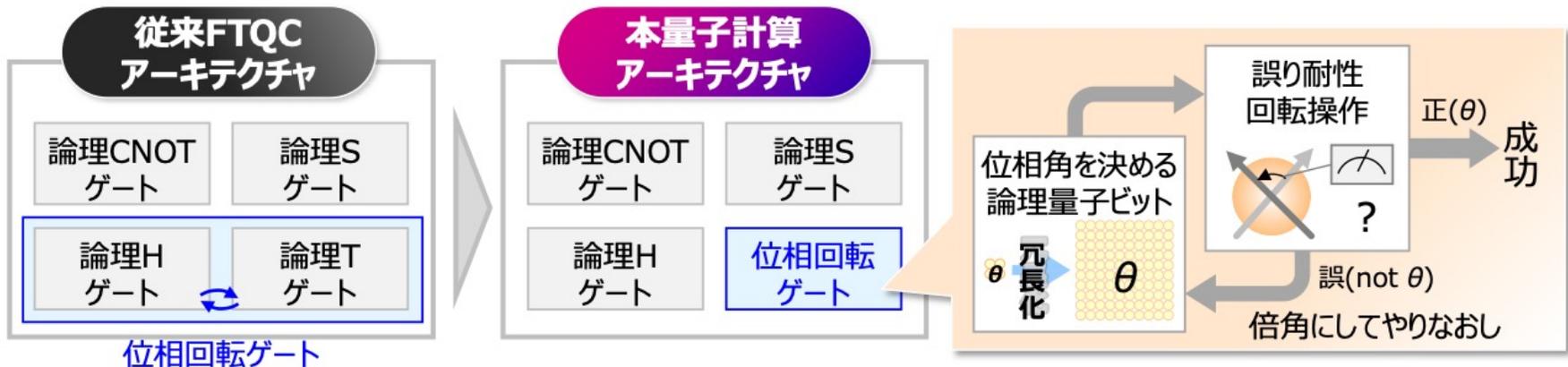
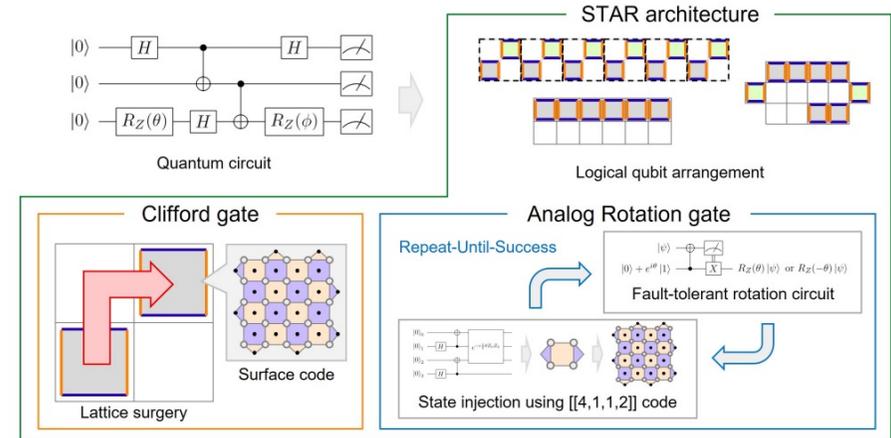
ゲートテレポーテーション



Early-FTQC

STARアーキテクチャ (阪大、富士通)

- 論理Tゲートを使わず、任意角度の位相回転ゲートを実行
- 物理量子ビットを従来比1/10以下に低減。任意回転の実行に必要なゲート操作回数を従来比1/20程度に低減。
- 10000物理量子ビット=64論理量子ビットと、オーバーヘッド改善。



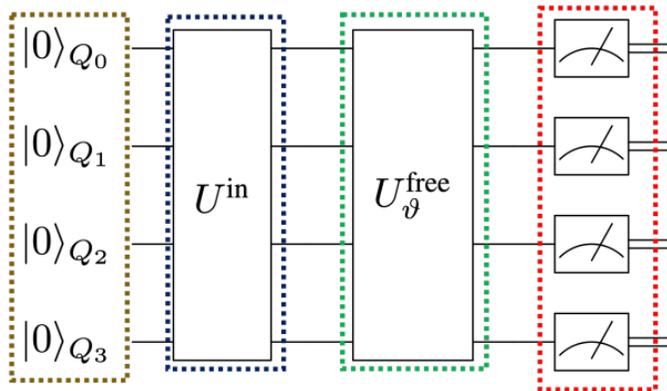
量子コンピュータの実用化を早める新たな量子計算アーキテクチャを確立 (2023年3月23日)

<https://pr.fujitsu.com/jp/news/2023/03/23.html>

Y. Akahoshi et al., Partially Fault-tolerant Quantum Computing Architecture with Error-corrected Clifford Gates and Space-time Efficient Analog Rotations, arXiv:2303.13181 (2023).

量子センシングと量子コンピューティング

量子センシングを量子計算の枠組みで捉えなおすと…



Quantum metrology

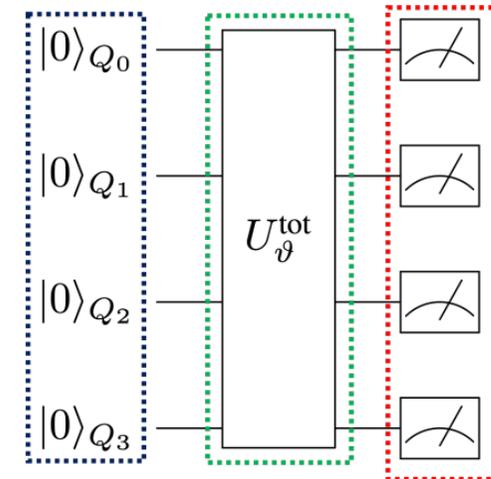
(QM1) state preparation

(QM2) initialization

(QM3) free evolution

(QM4) measurement/readout

correspondence



Quantum computing

(QC1) state preparation/initialization

(QC2) running quantum algorithm

(QC3) measurement/readout

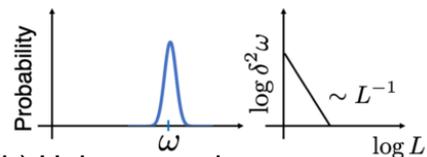
Y. Hama, H. Nishi, Quantum-Error-Mitigation Circuit Groups for Noisy Quantum Metrology, arXiv:2303.01820 (2023).

量子センシングでの量子誤り抑制の重要性

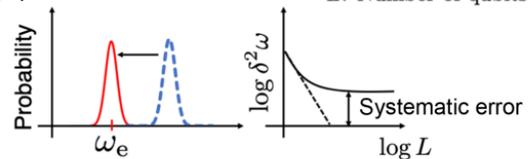
NTT

仮想蒸留法で系統的エラーを高精度に抑制。量子ビット数に対するスケーリングを復活。

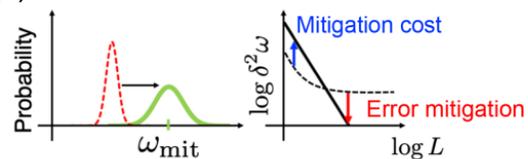
(a) Perfectly known noise



(b) Unknown noise



(c) Unknown noise with QEM



K. Yamamoto et al., Error-Mitigated Quantum Metrology via Virtual Purification, Phys. Rev. Lett. 129, 250503 (2022).

Sandbox AQ

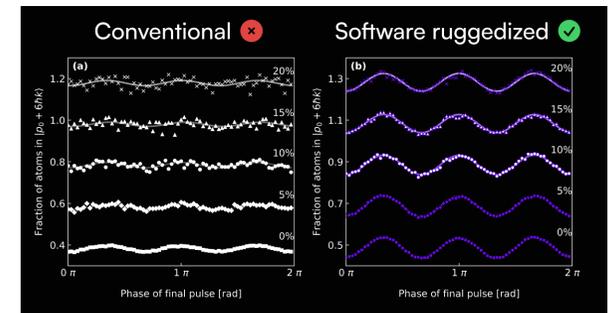
AIでノイズを除去し、量子磁気センサの信号処理速度と精度を大幅に向上。C-17Aでの地磁気航法の実証実験に成功。



<https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/3408951/magnav-project-successfully-demonstrates-real-time-magnetic-navigation/>

Q-CTRL

AI自動化や信号処理を組み合わせた「Software-defined 量子センサ」を提案。



J. C. Saywell et al., Enhancing the sensitivity of atom-interferometric inertial sensors using robust control, Nature Communications 14, 7626 (2023).

まとめ

量子性をフルに活かすには量子誤り抑制・訂正が重要

量子計測・センシング

量子干渉・量子もつれを使ってセンサーを高精度化・高感度化



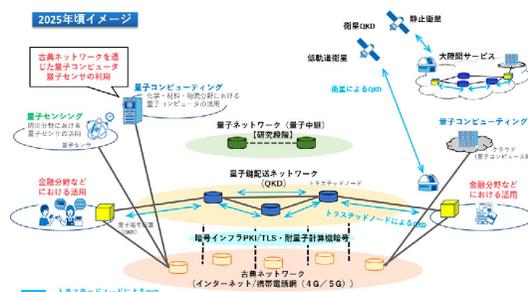
<https://www.qms.e.titech.ac.jp/>



<https://www.qst.go.jp/site/q-leap/>

量子暗号・量子通信

不確定性原理・量子もつれを使って通信・ネットワークの安全性を向上



<https://www2.nict.go.jp/idi/>



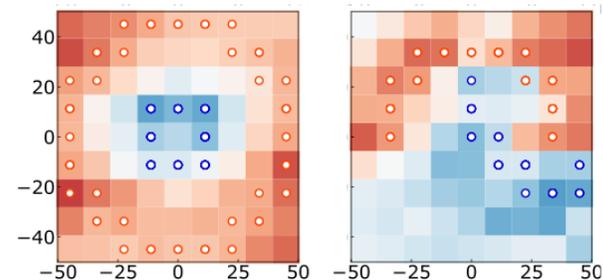
<https://quantum-internet.team/>

量子コンピューティング

量子干渉・量子もつれを使ってコンピューターを高速化・省エネ化



<https://rqc.riken.jp/>



https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2021/20210608_1