

ムーンショットプログラム目標6 公開シンポジウム2022

2022年3月11日

プロジェクト成果報告

誤り耐性型量子コンピュータにおける 理論・ソフトウェアの研究開発

プロジェクトマネージャー： 小芦 雅斗

東京大学大学院工学系研究科・教授

ムーンショットプログラム目標 6

超伝導量子回路の集積化技術の開発

イオントラップによる光接続型誤り耐性量子コンピュータ

誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発

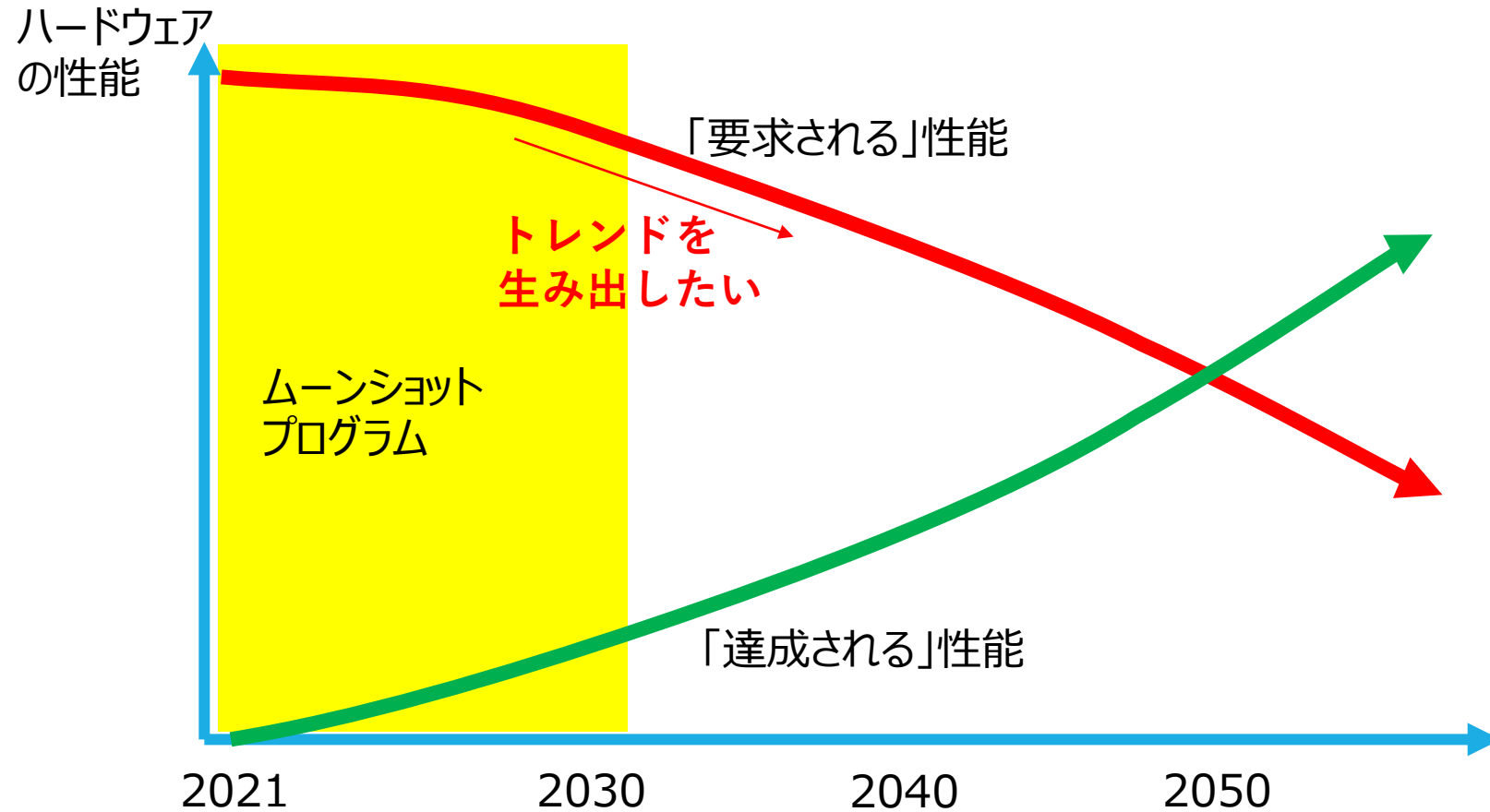
大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発

量子計算網構築のための量子インターフェース開発

ネットワーク型量子コンピュータによる量子サイバースペース

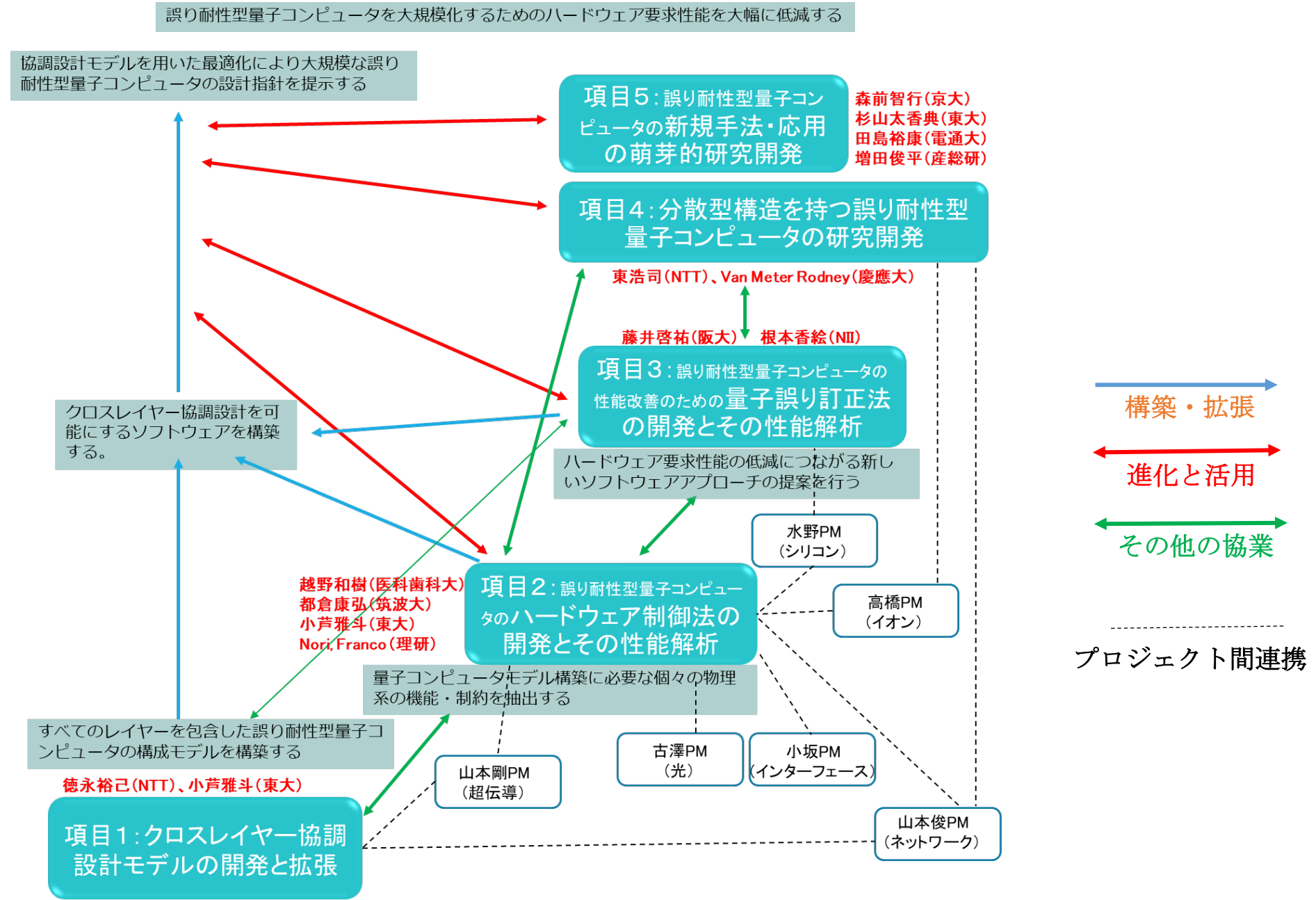
理論・ソフトウェア

「誤り耐性型量子コンピュータにおける理論・ソフトウェアの研究開発」



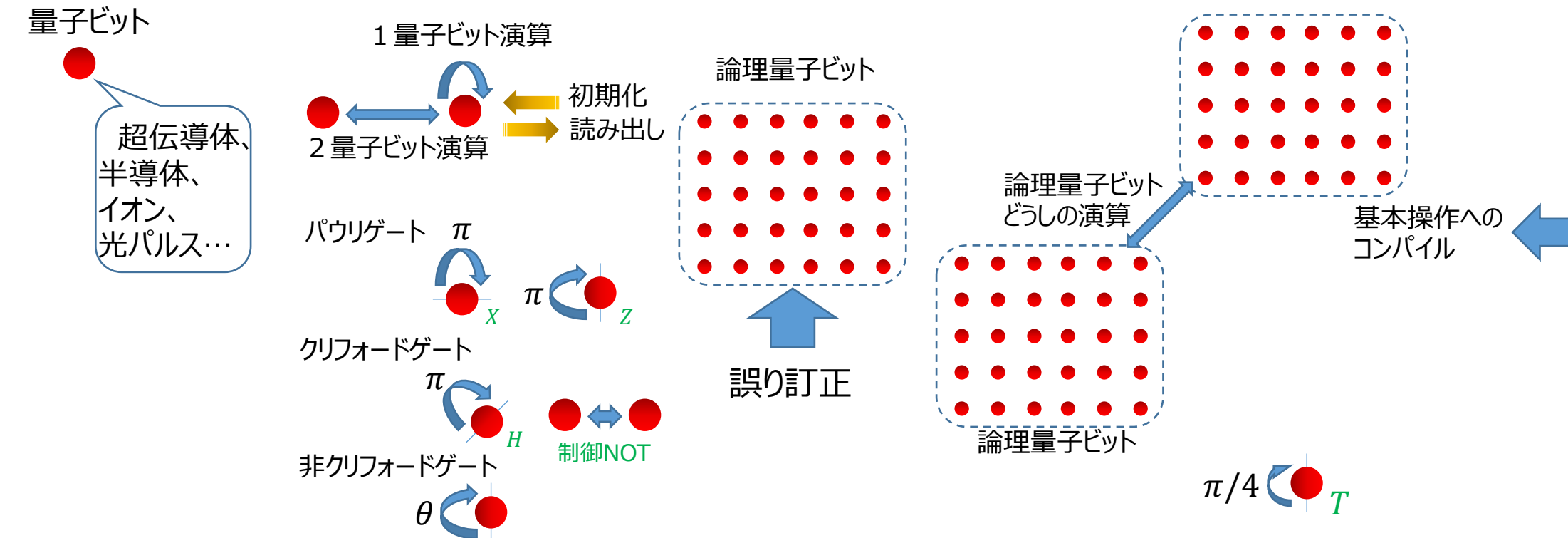
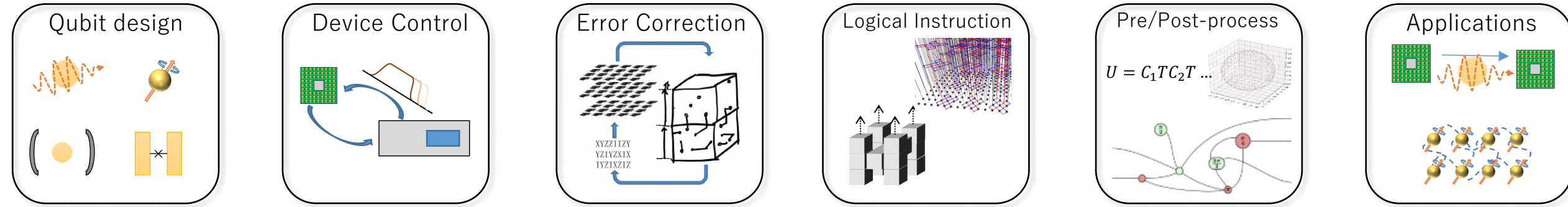
理論ソフトウェアPJのミッション：誤り耐性型量子コンピュータを大規模化するためのハードウェア要求性能を大幅に低減する

-

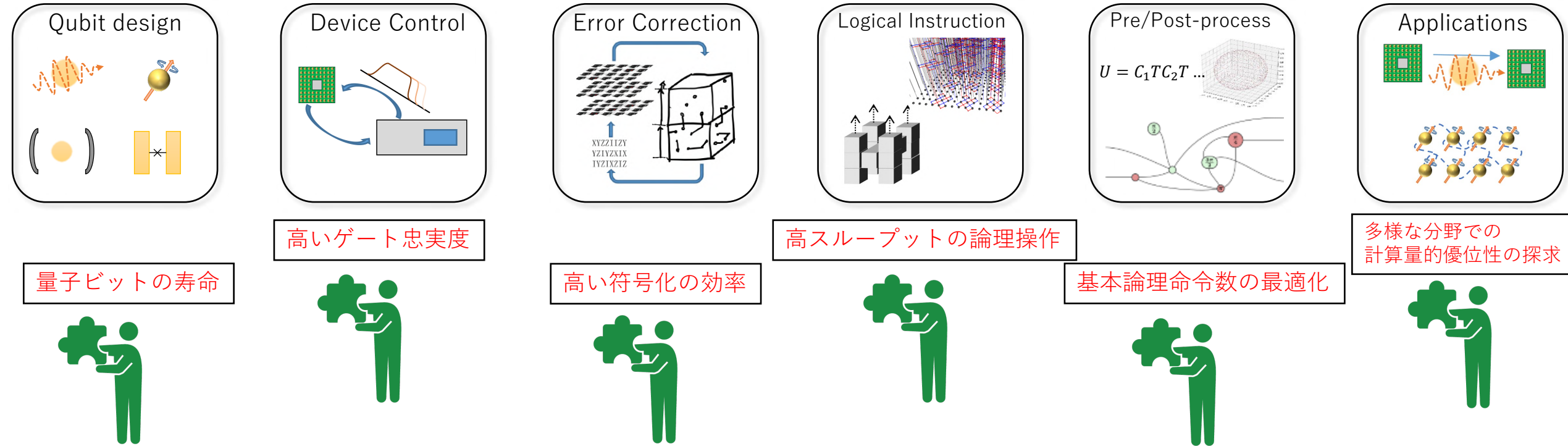


誤り耐性型量子コンピュータのレイヤー

- 誤り耐性量子コンピュータは、多岐にわたる技術レイヤーを持つ



- 誤り耐性量子コンピュータは、多岐にわたる技術レイヤーを持つ

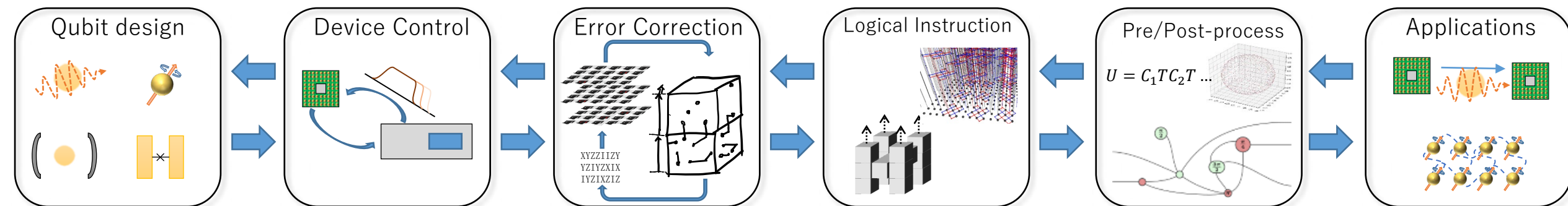


代表的なレイヤごとの良さの指標の例

単一レイヤーで単一の指標を良くしよう、という研究はできるが…

- 指標は通常複数ある
- トレードオフ関係にはレイヤーをまたいで決まるものがある
- 本当は、全体としての性能にどう影響するか、を知りたい

- クロスレイヤー協調設計モデルの主要な用途:
 - 量子計算の技術レイヤをまたぐトレードオフ関係を把握する。
 - 個別のレイヤーでの性能改善が全体に与える影響を評価する。
 - 各レイヤーの成果を集約し現在のState-of-the-artとなる量子計算機を設計する。
- クロスレイヤー協調設計モデルの構成:
 - 各レイヤーでパラメータ依存関係を細かく評価するソフトウェア
 - 用途に合わせて評価ソフトウェアを呼び出し最適化計算を行うモジュール
 - 全レイヤーをまたぐ依存関係を扱うため、各レイヤーで代替となる標準的モックアップ



各レイヤーの評価ソフトウェア

量子デバイスの設計パラメータ

チップやパッケージのCADパラメータ、ジョセフソン接合の臨界電流、材料パラメータ



評価ソフトウェア：電磁界シミュレータ/ハミルトニアン導出

物理量子ビットの特性

共鳴周波数、寿命、素子間の結合定数、非調和度

+ 制御パルス形状、環境パラメータ

パルス形状の設計パラメータ、温度、外部からの位相擾乱



評価ソフトウェア：パルスシミュレータ / 操作のトモグラフィ
(QuTIPなど)

物理操作の特性

操作時間、量子操作の写像 (CPTP写像/Instrument)

+ 符号化とエラー推定

エラー訂正符号、符号距離、復号アルゴリズム



評価ソフトウェア：量子回路シミュレータ / 復号ルーチン群
(qulacsなど)

論理量子ビットの特性

論理ビットあたりの物理量子ビット数、符号のパリティ測定周期、サイクルあたりの論理エラー率

+ 論理基本命令の実装方法

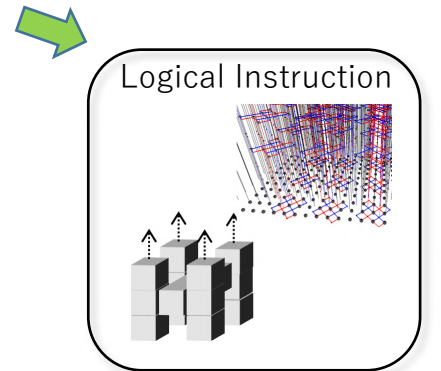
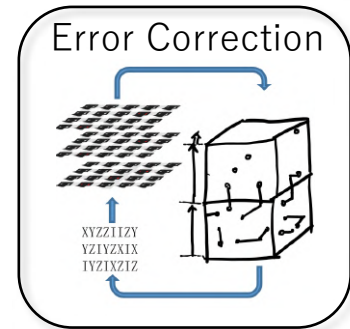
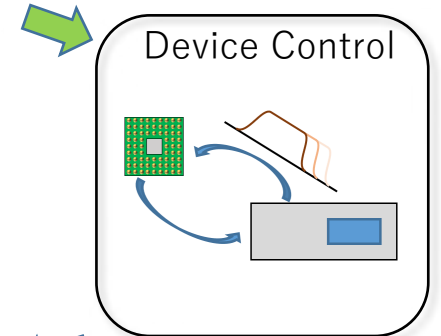
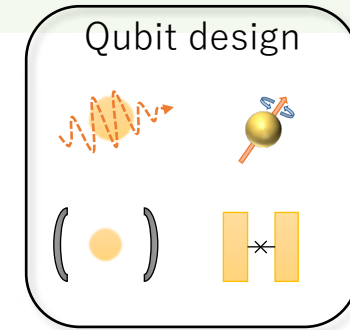
複数論理量子ビット操作の手法選択、魔法状態蒸留の設計、操作のスケジューリング



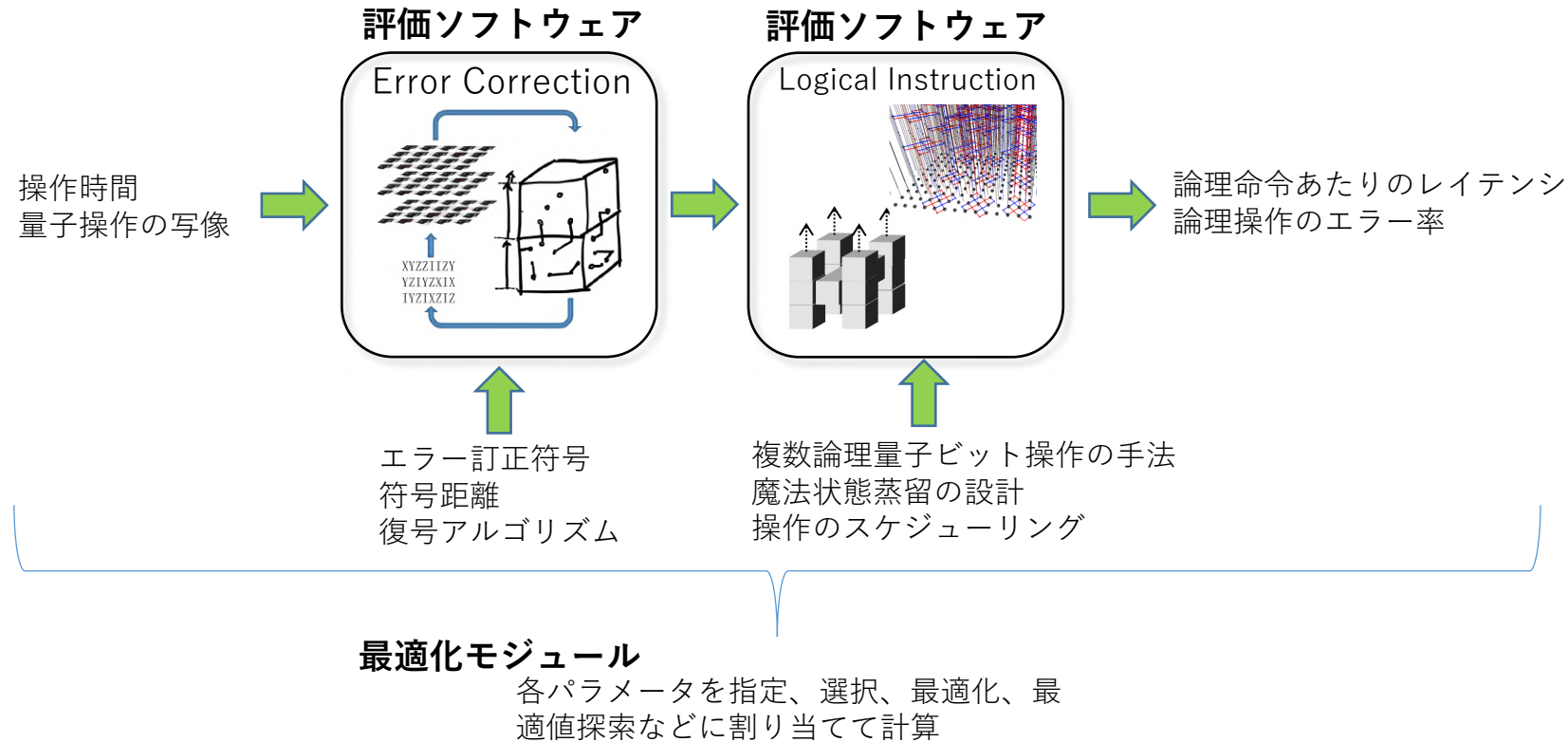
評価ソフトウェア：符号上の論理操作の設計ツール / 制御回路のタイミング解析

論理操作の特性

論理命令あたりのレイテンシ、論理操作のエラー率

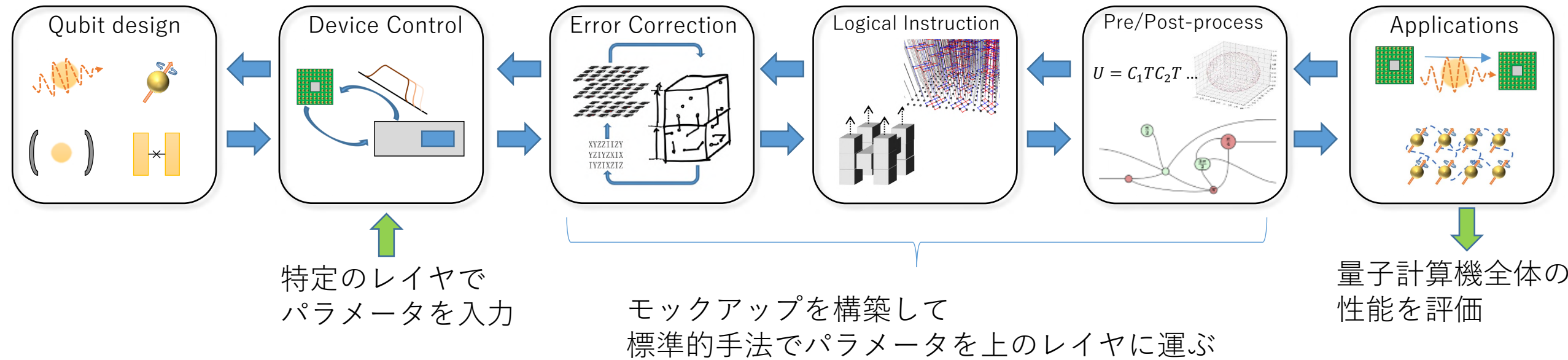


- 用途に応じ、最適化モジュールが評価ソフトウェアを用いてパラメータ間の定量的な関係を取り出す。



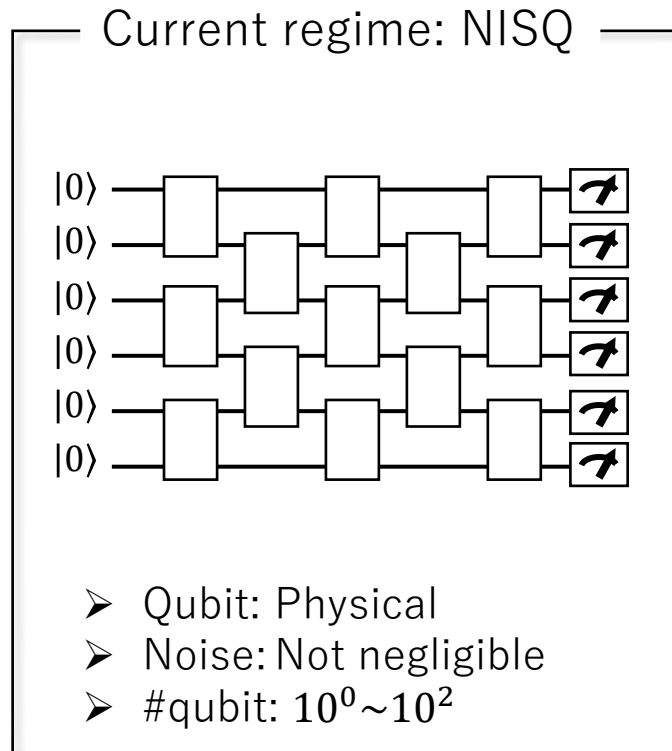
評価ソフトウェアを用いて、
対象となる単一のレイヤや複数レイヤで対象となるパラメータを探索しターゲットの値を最適化

- 特定レイヤのパラメータ改善が全体に与える影響をベンチマーク



低オーバーヘッドな誤り抑制手法の提案

Suzuki, Endo, Fujii, Tokunaga, arXiv:2010.03887.

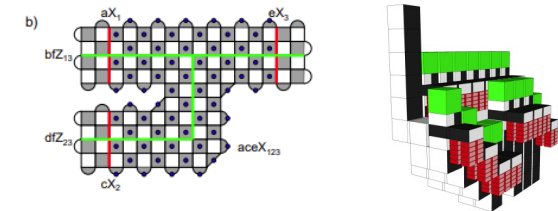


Intermediate regime: Early FTQC

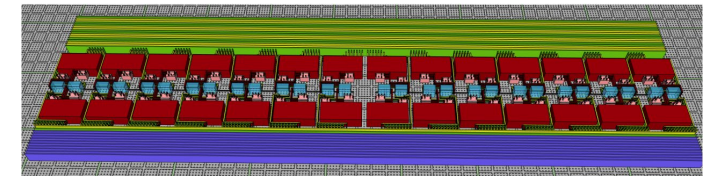
限られたリソースをもとに
誤り訂正によって論理エラーを低減

- Qubit: Logical
- Noise: Small but not negligible
- #qubit: $10^3 \sim 10^5$

Future: Long-term FTQC



Picture from A. G. Fowler and C. Gidney., arXiv:1808.06709 (2018).



Picture from C. Gidney and M. Ekerå., arXiv:1905.09749 (2019).

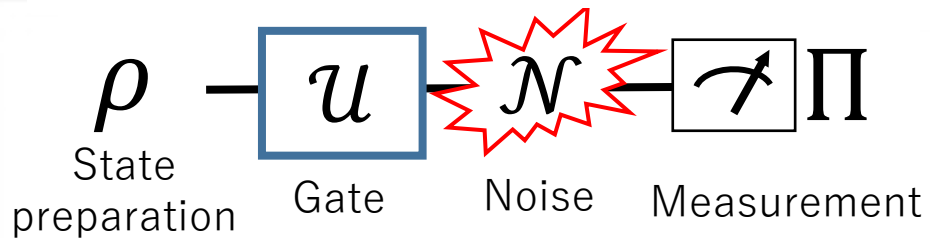
- Qubit: Logical
- Noise: Negligible
- #qubit: $10^6 \sim 10^8$

Error mitigation (Noiseの特性に応じて補正をかける) 手法を、
FTQCの特徴にうまく合わせて適用する

低オーバーヘッドな誤り抑制手法の提案

Error Mitigation: 素性のわかっている雑音の影響を、期待値推定から取り除く

Without probabilistic error cancellation



What we want to know:

$$\langle \Pi \rangle_{\text{ideal}} = \langle \langle \Pi | \mathcal{U} | \rho_0 \rangle \rangle$$

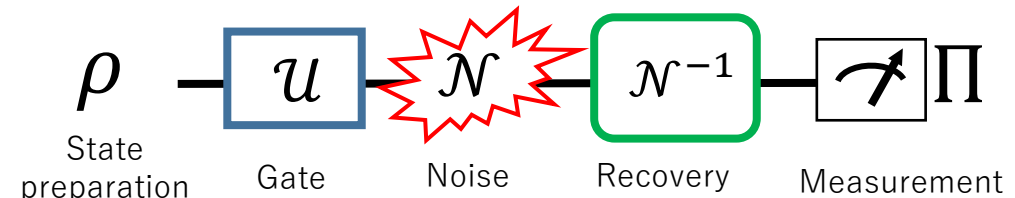
What is actually obtained:

$$\langle \Pi \rangle_{\text{noisy}} = \langle \langle \Pi | \mathcal{N} \mathcal{U} | \rho_0 \rangle \rangle$$

ノイズの特性を完全に知っていれば、
ノイズのない場合の期待値を
量子ビットを追加せずに偏りなく計算できる。

- 期待値推定のためのサンプリング回数は増加

With probabilistic error cancellation



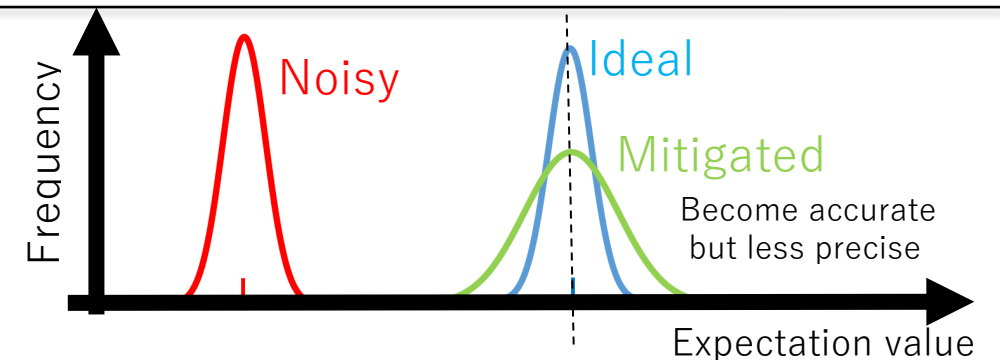
$$\langle \Pi \rangle_{\text{qem}} = \langle \langle \Pi | \mathcal{N}^{-1} \mathcal{N} \mathcal{U} | \rho_0 \rangle \rangle = \langle \langle \Pi | \mathcal{U} | \rho_0 \rangle \rangle$$

$\mathcal{N}^{-1}$ は物理的過程ではないが、物理的過程の線形和には書ける。

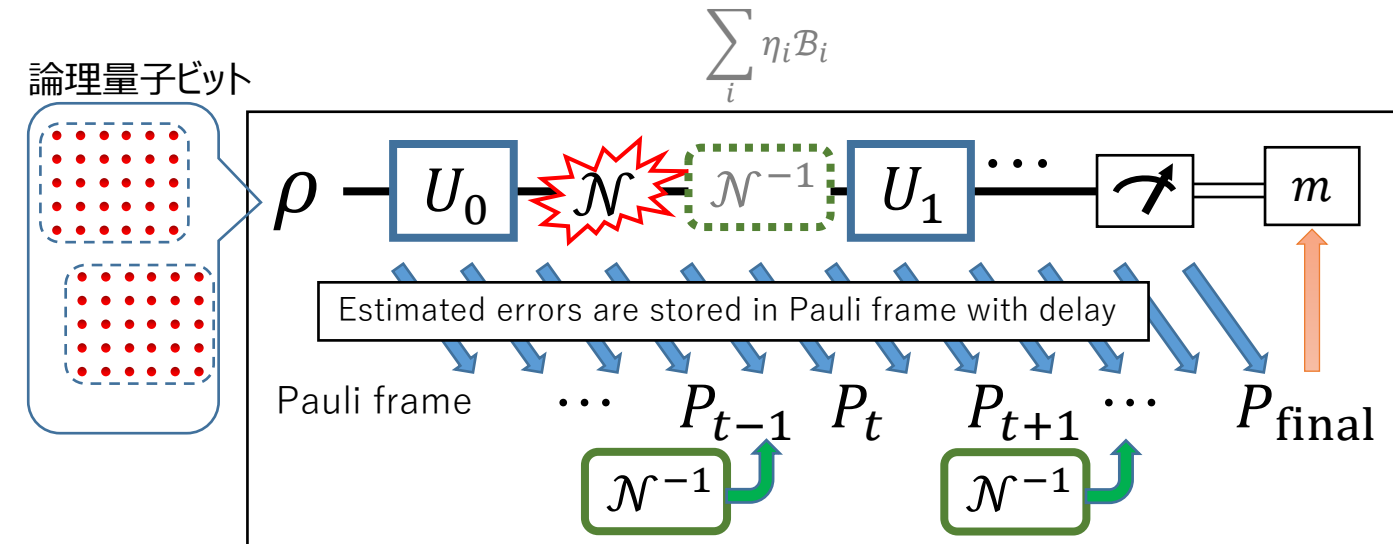
$$\mathcal{N}^{-1} = \sum_i \eta_i \mathcal{B}_i \text{ for } \eta_i \in \mathbb{R} \text{ and } \mathcal{B}_i \text{ is physical}$$

$$\langle \Pi \rangle_{\text{qem}} = \sum_i \eta_i \left(\rho - \boxed{\mathcal{U}} - \text{Noise } \mathcal{N} - \boxed{\mathcal{B}_i} - \text{Measurement} \right)$$

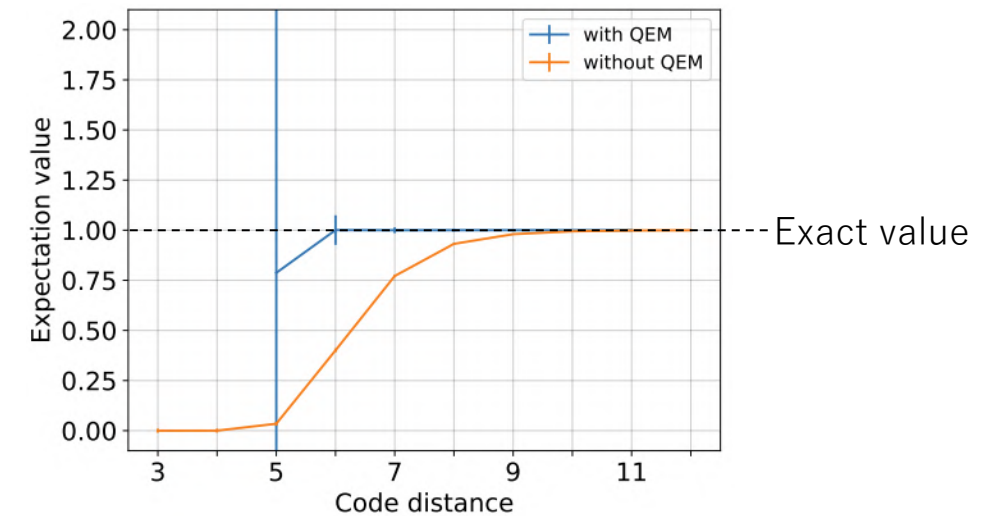
Attach coef. in post-processing Probabilistic gate insertion



低オーバーヘッドな誤り抑制手法の提案



Suzuki, Endo, Fujii, Tokunaga, arXiv:2010.03887.



より小さな符号で同等の精度が得られる。

誤り耐性量子コンピュータの特徴

- 論理量子ビットに対する回路はクリフォードゲートが連続する部分を持つことが多い。
- 論理量子ビットに生じるエラーはパウリエラーで良く近似できる

S. Bravyi, et al., *npj Quantum Information* 4.1 (2018): 1-6.

→ 量子回路は全く同じで、古典計算処理だけでエラー抑制を実行できる。

さらに、Solovay-Kitaev分解の打ち切り誤差に適用してT gatesを節約

Arbitrary unitary gate

Sequence of Clifford+T

$$\rho - [U] - = \rho - [C_0] - [T] - [C_1] - [T] - \dots - [C_m] - [U_\delta] -$$

- Certified Deletionを用いたZero-knowledge Proof (QMA) のセキュリティ強化

Hiroka, Morimae, Nishimaki, Yamakawa, arXiv:2109.14163.

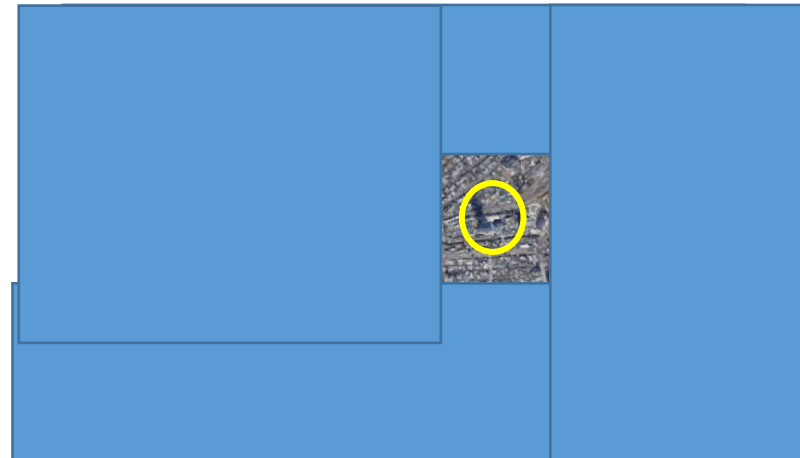
鍵配送よりも高度な量子暗号プロトコルを、
誤り耐性量子コンピュータを用いて実現

古典計算機とのスピード比較とは無関係に
独自の有用性を持つ応用として重要

Zero-knowledge Proof 太郎



この写真にはこの
建物がある



花子



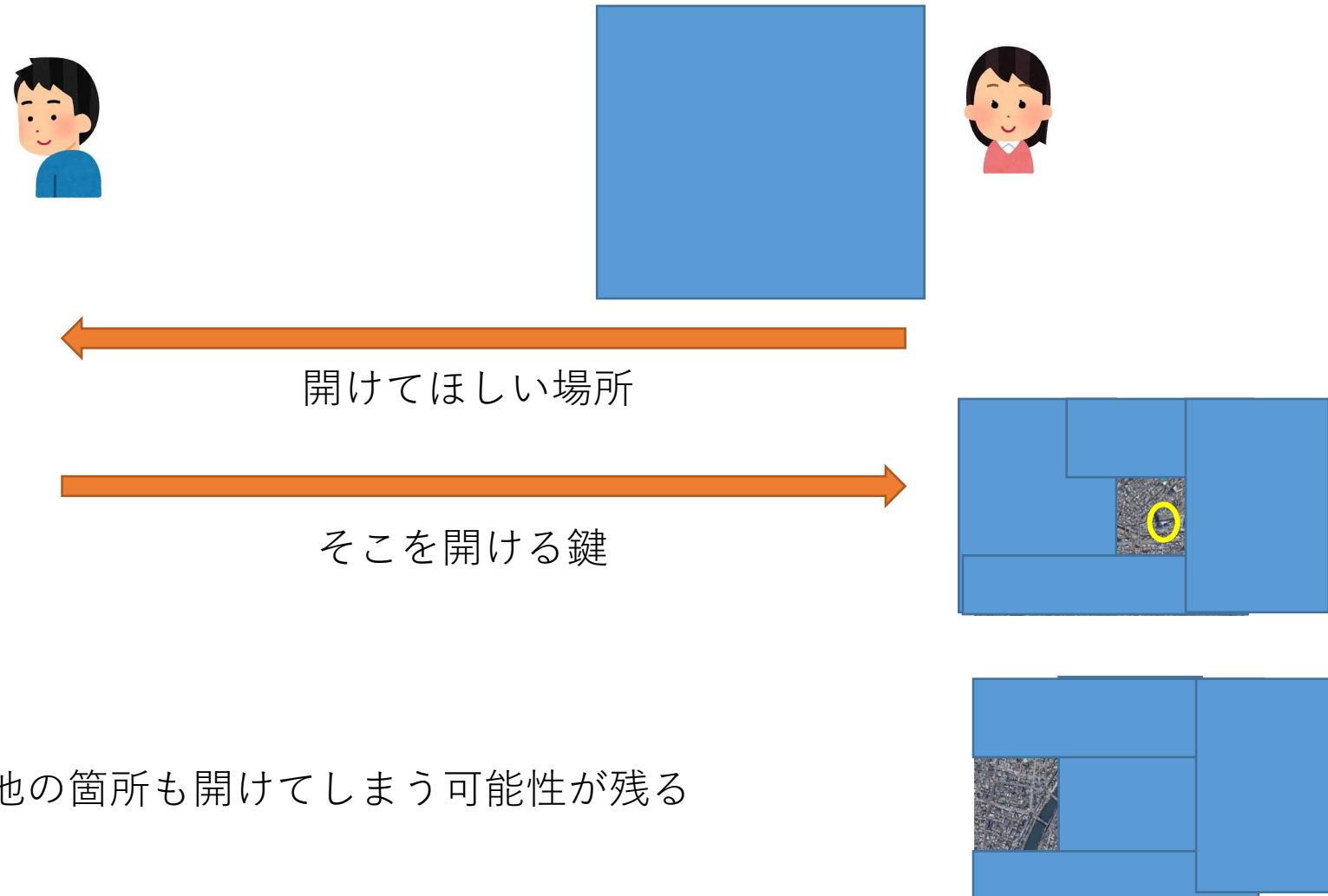
証明せよ

「確かにウォーリーがいると確認」
「ウォーリーの場所是不わかるない」
(計算量的安全性)

- Certified Deletionを用いたZero-knowledge Proof (QMA)のセキュリティ強化

Hiroka, Morimae, Nishimaki, Yamakawa, arXiv:2109.14163.

Zero-knowledge Proofの例

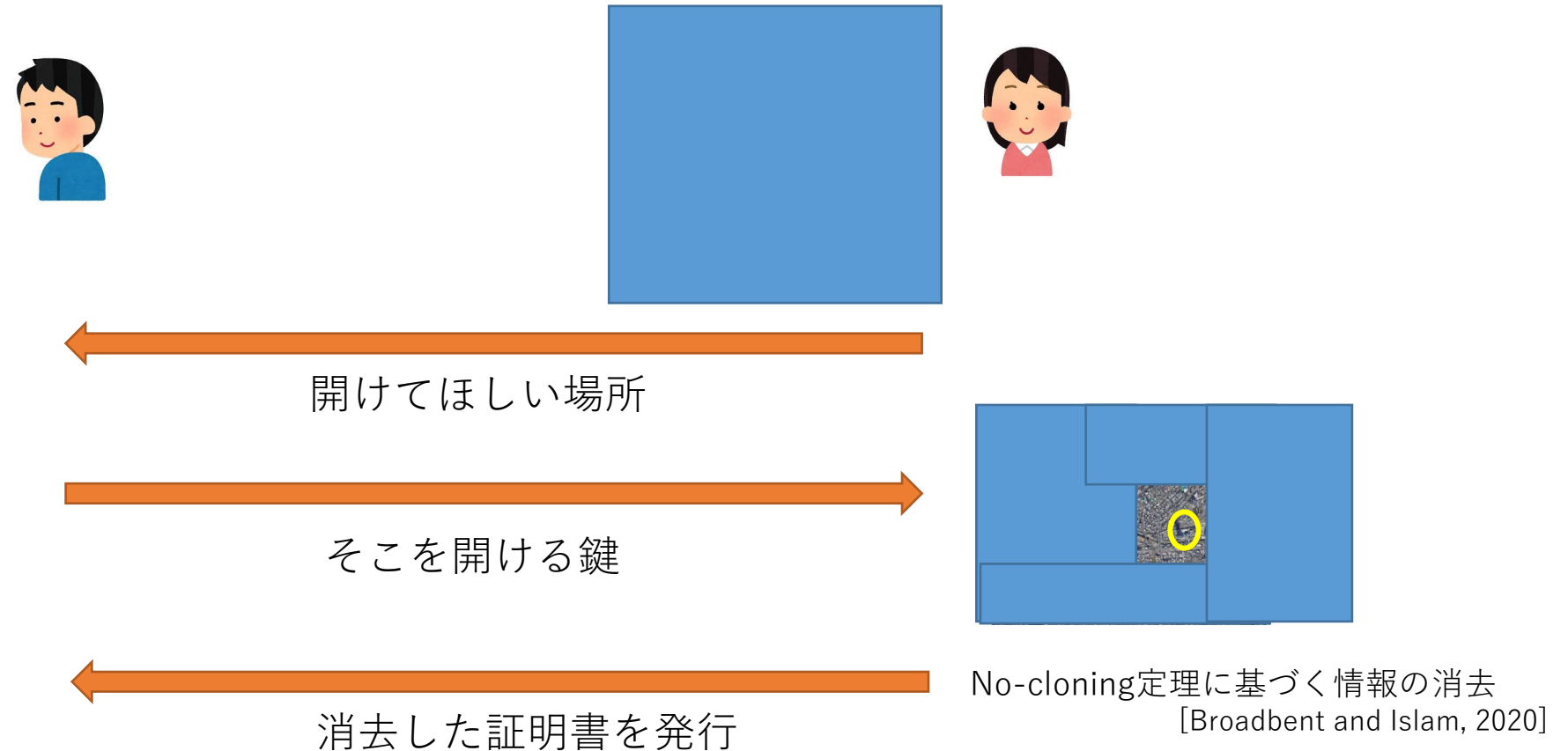


計算量的安全性：

花子は後で時間をかければ他の箇所も開けてしまう可能性が残る

- Certified Deletionを用いたZero-knowledge Proof (QMA)のセキュリティ強化

Hiroka, Morimae, Nishimaki, Yamakawa, arXiv:2109.14163.



将来どんなに計算能力が上がっても、ゼロ知識は保証される



計算量の仮定を一時的にしか要求しない、Everlasting zero-knowledge proofへと強化

- 誤り耐性量子コンピュータ開発設計には、その動作をシミュレートし予言できるツールが不可欠
- そもそもの目標が「古典計算機でシミュレートできない」ことが特徴の装置であるため、現実的な時間で有意義な結果をもたらすシミュレーションツールの構築は非自明かつ重要

- シミュレートが難しいコヒーレントなエラー（パウリでないエラー）のもとでの量子誤り訂正の性能評価手法を新たに提案。クリフォード回路のモンテカルロサンプリングに帰着させるアイデアにより、1000量子ビットも視野に（阪大）

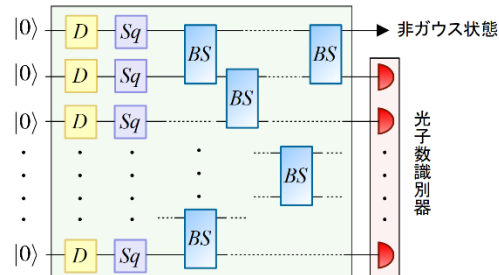
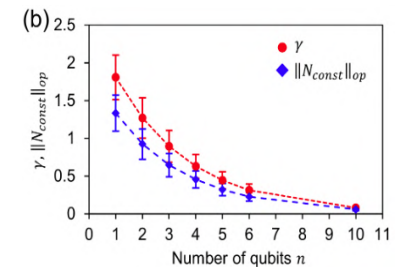
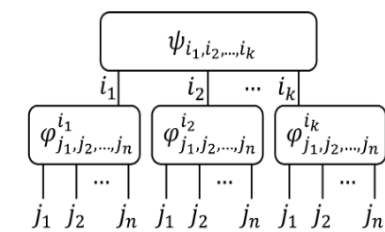
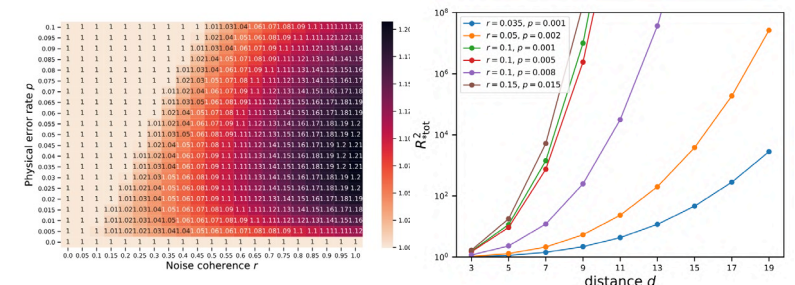
S. Hakkaku, K. Mitarai, K. Fujii, *Phys. Rev. Research* **3**, 043130 (2021).

- シミュレート可能な実効的な量子ビット数を増加させる手法として知られるハイブリッド量子-古典テンソルネットワーク法の適用範囲を、物理量の期待値から遷移行列などの他の重要な量へと拡張（NTT）

S. Kanno, S. Endo, Y. Suzuki, Y. Tokunaga, *Phys. Rev. A* **104**, 042424 (2021).

- 光による量子コンピュータに必要な非ガウス状態の生成手法であるOptical quantum state synthesizer (OQSS) では、精度に対して計算時間が指数増加する問題があったが、多項式増加で済むシミュレーション技法を開発（東大）

K. Fukui et al., arXiv:2109.01444



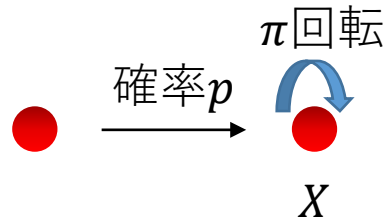
目的：クリフォード回路の測定結果
の期待値の見積もり

例：誤り訂正後の論理エラーの見積もり



確率サンプリングによる
効率的なシミュレーションが可能

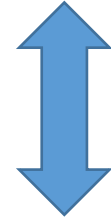
パウリエラー



状態変化

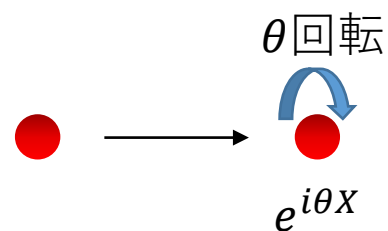
$$|0\rangle\langle 0| \rightarrow (1-p)|0\rangle\langle 0| + p|1\rangle\langle 1|$$

例：環境系との相互作用



$p = \sin^2 \theta$ であっても性質が異なる
($\theta = \text{Arcsin } \sqrt{p}$)

コヒーレントエラー



状態変化

$$|0\rangle\langle 0| \rightarrow \cos^2 \theta |0\rangle\langle 0| + \sin^2 \theta |1\rangle\langle 1| + \cos \theta \sin \theta (i|1\rangle\langle 0| - i|0\rangle\langle 1|)$$



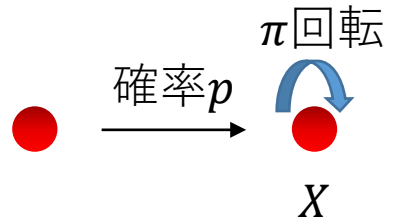
非対角項を直接計算しようとする
と、計算時間が指数的に増加する
ため50量子ビット程度が限界

例：ゲートの回転角の不正確性

目的：クリフォード回路の測定結果
の期待値の見積もり

例：誤り訂正後の論理エラーの見積もり

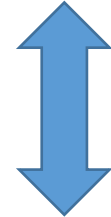
パウリエラー



例：環境系との相互作用

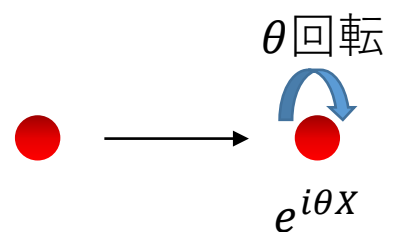
状態変化

$$|0\rangle\langle 0| \rightarrow (1-p)|0\rangle\langle 0| + p|1\rangle\langle 1|$$



$p = \sin^2 \theta$ であっても性質が異なる
($\theta = \text{Arcsin } \sqrt{p}$)

コヒーレントエラー



例：ゲートの回転角の不正確性

状態変化

$$|0\rangle\langle 0| \rightarrow \cos^2 \theta |0\rangle\langle 0| + \sin^2 \theta |1\rangle\langle 1| + \cos \theta \sin \theta (i|1\rangle\langle 0| - i|0\rangle\langle 1|)$$

確率サンプリングによる
効率的なシミュレーション
が可能な物理過程

2種のエラーが混在する過程 $u = \sum_i q_i \mathcal{W}_i$

$r := \frac{\theta}{\text{Arcsin } \sqrt{p}}$
コヒーレントエラー
の相対的大きさ

$$p_i := |q_i| / \sum_i |q_i|$$

でサンプリングして
期待値を計算

計算コスト $\sim \left(\sum_i |q_i| \right)^{2 \times \text{回路のサイズ}}$

quasi-probability法による誤り訂正のシミュレーション

S. Hakkaku, K. Mitarai, K. Fujii, Phys. Rev. Research **3**, 043130 (2021).

$$\sum_i |q_i|$$

目的：クリフォード回路の測定結果
の期待値の見積もり

例：誤り訂正後の論理エラーの見積もり

確率サンプリングによる
効率的なシミュレーション
が可能な物理過程

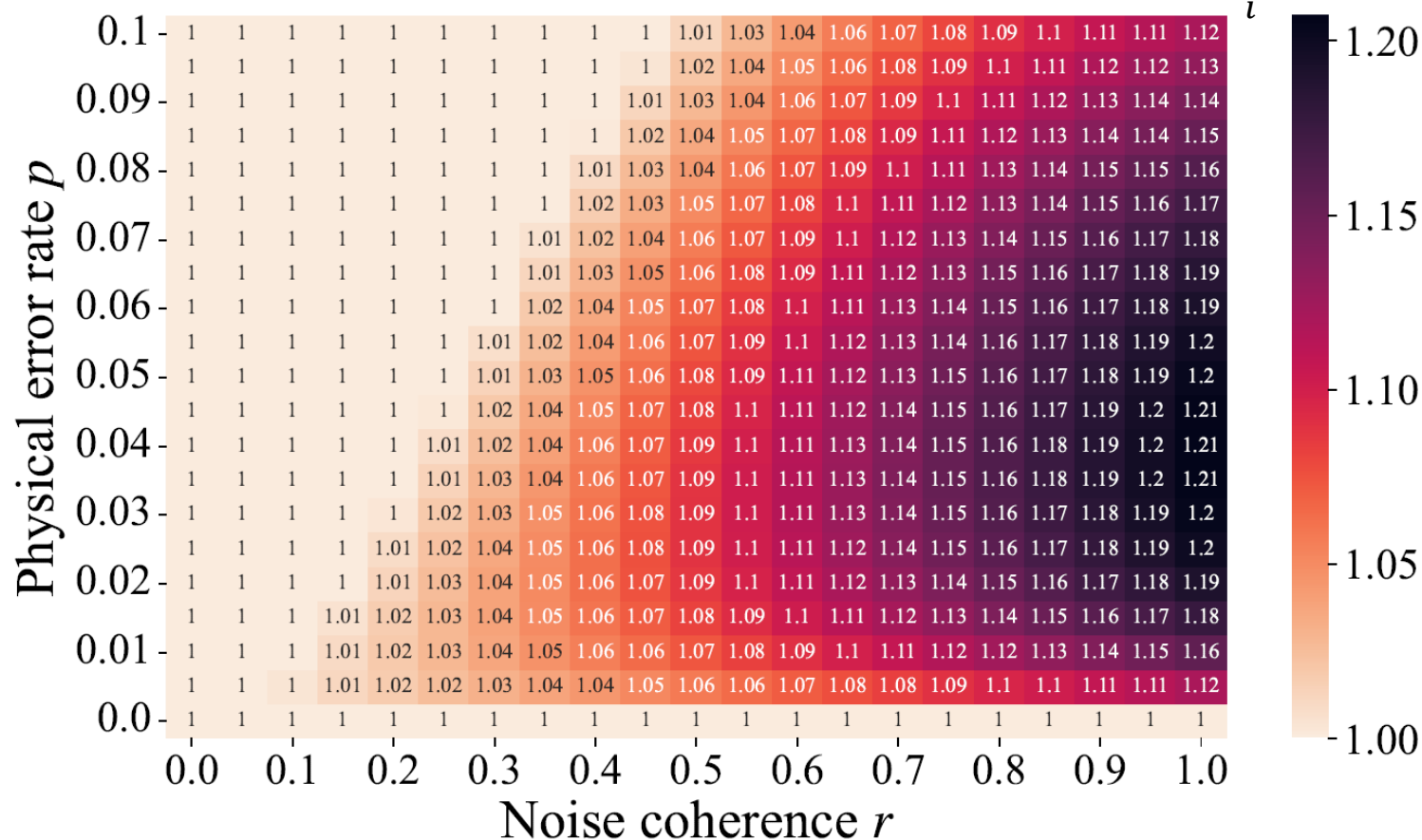
2 種のエラーが混在する過程 $u = \sum_i q_i \mathcal{W}_i$

$r := \frac{\theta}{\text{Arcsin} \sqrt{p}}$
コヒーレントエラー
の相対的大きさ

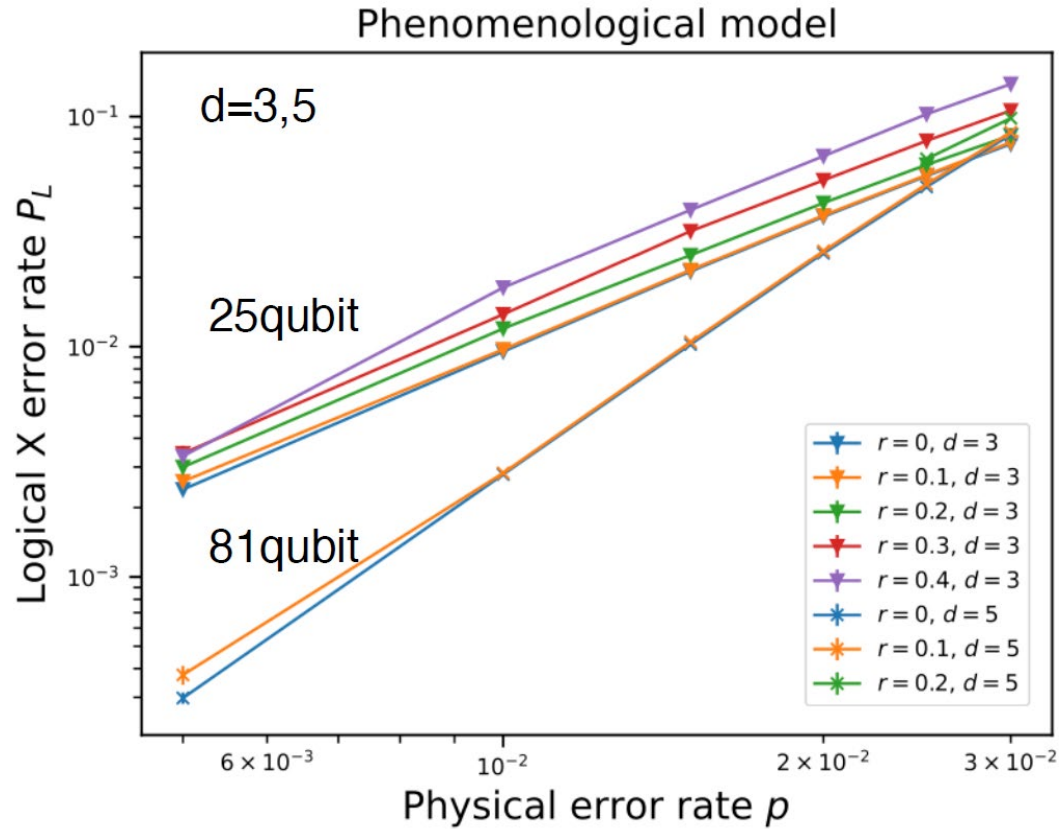
$$p_i := |q_i| / \sum_i |q_i|$$

でサンプリングして
期待値を計算

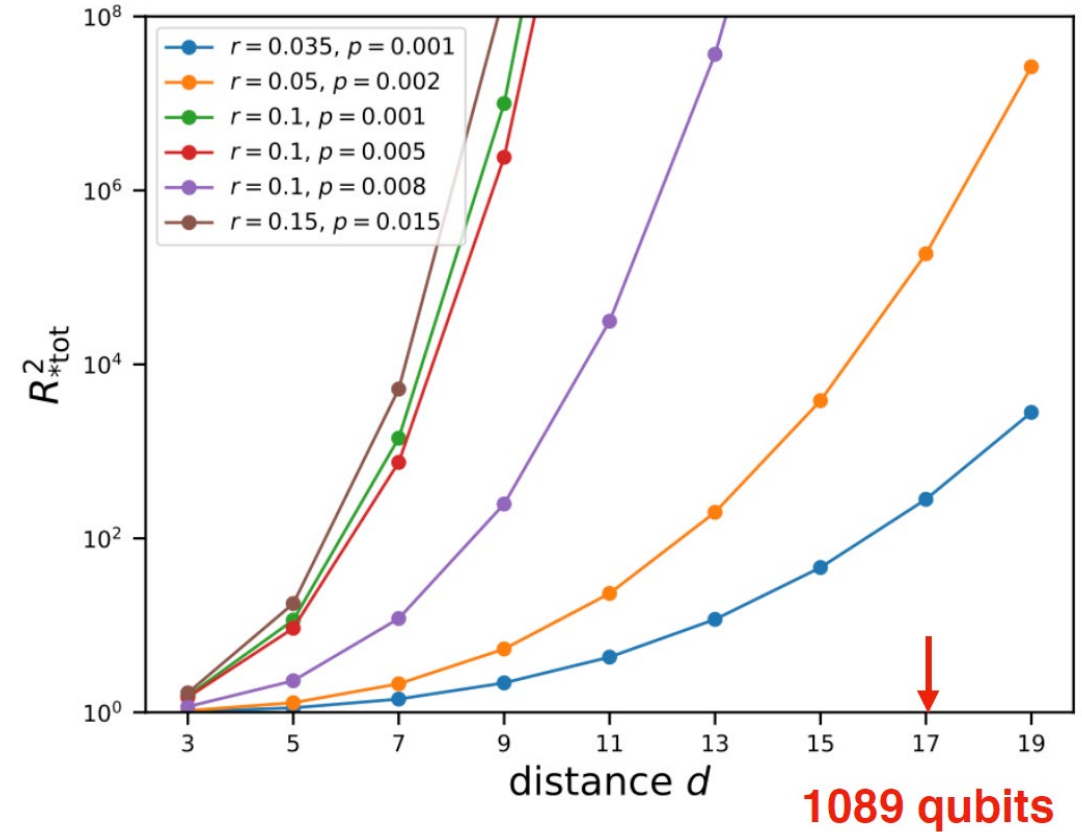
計算コスト $\sim \left(\sum_i |q_i| \right)^{2 \times \text{回路のサイズ}}$



S. Hakkaku, K. Mitarai, K. Fujii, Phys. Rev. Research **3**, 043130 (2021).



誤り訂正手法の性能見積もり



符号のサイズと計算コスト