

研究開発テーマ名

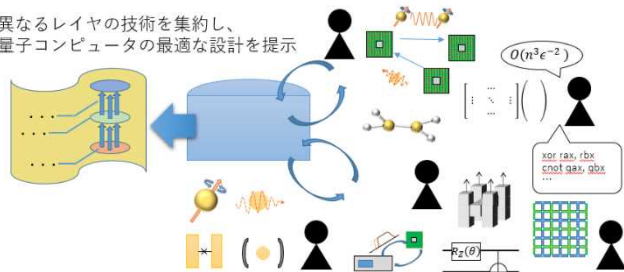
# クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

本研究開発テーマでは誤り耐性型量子コンピュータの設計を効率的に行う枠組みを構築します。通常の計算機には計算機の全体像を切り分け最適な設計を探索する種々の枠組みがありますが、誤り耐性型量子コンピュータにはこうした基盤が存在しません。このことが長期的な計画の立案や将来必要となる技術を取組みした開発を困難にしてきました。この問題を解決するため、本研究開発テーマでは誤り耐性型量子コンピュータで技術的なレイヤーを超えた協調設計を可能にするソフトウェア基盤「クロスレイヤー協調設計モデル」を構築します。このシステムを活用することで、誤り耐性型量子コンピュータの全体像を見据えた研究開発や、今後必要となる技術や要求性能を先読みした研究テーマの設定が可能となります。こうした取り組みはムーンショット目標6が目指す実用的な誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を計画的に行う上で重要となります。

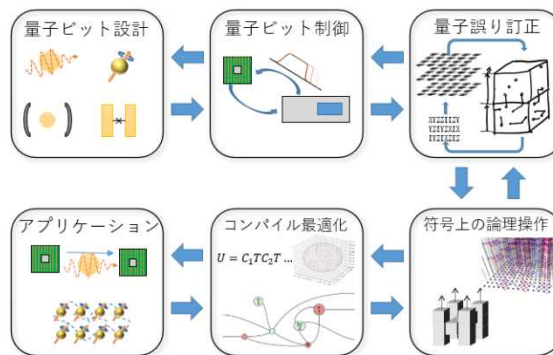
異なるレイヤーの技術を集約し、量子コンピュータの最適な設計を提示



クロスレイヤー協調設計モデルの構想図

クロスレイヤー協調設計モデルの開発は以下のような手続きで進めます。まず、誤り耐性型量子コンピュータで必要となる要素を技術レイヤーごとに分解し、各レイヤーに

おいて誤り耐性型量子コンピュータを構成するのに必要な構成要素を列挙したミニマルモデルを構築します。このモデルをもとに将来的な技術的課題を洗い出し、他項目の研究者と連携して課題を一つずつ解決します。そこで得られた結果をミニマルモデルに肉付けする形で還元し、複数の技術を組み合わせた現実的で洗練された量子コンピュータを設計する仕組みを組み上げます。



クロスレイヤー協調設計モデルにおける技術レイヤー

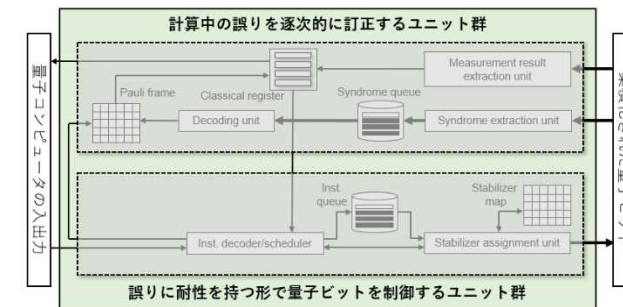
### 2. 2022年度までの成果

- ① 超伝導量子ビットを前提としたミニマルモデルの構築
- ② 量子計算機の実行時間や速度の評価
- ③ 量子計算機のアーキテクチャと回路設計
- ④ 量子計算機の性能改善手法の提案

2022年までの主要な成果は、各レイヤーにおける要素を技術的に評価する基盤であるミニマルモデルの構築（成果①）、および、これを活用した早期に実用化が期待されるアプリケーションの性能評価（成果②）です。また、これらの評価基盤を土台としてロジックを緻密化し、主要な制御回路を具体的に設計し性能を評価しました（成果③）。設計の結果として計算機のボトルネックとなる箇所や、理想的な仮定の下では動作するが性能のばらつきや時間変化とい

った現実的な特性に脆弱な箇所があらわになりました。これを踏まえ、量子計算の設計に必要な資源のバランスをとり実用的な環境で高速に動作させるためのアーキテクチャとコンパイラ最適化の手法を提案しました（成果④）。これらの成果をもとに、得られたベンチマークを通常の計算機と比較し、量子計算機で優位性を得るために必要な資源量をシステムレベルで初めて定量的に見積もりました。

本課題の成果はレイヤーごとに網羅的に設計された評価基盤により可能となったものです。この成果は開発目標の具体化と性能の改善を可能にただけでなく、技術的なレイヤーを跨いだ設計探索や計算機、物理、回路設計分野などとの深い連携の実現にも貢献しています。



量子誤り訂正を行う制御機構の構造図

### 3. 今後の展開

引き続き計算機設計や回路集積化に取り組むグループとの連携を密にして、量子計算機の開発と性能改善に取り組みます。また、超伝導以外の量子デバイスのグループと連携を密にして超伝導の設計を横展開し、クロスレイヤー協調設計モデルの実現に向けた取り組みを進めます。これにより誤り耐性量子計算の柔軟かつ具体的な設計を可能にするとともに、その課題の解決にいち早く取り組みます。

研究開発テーマ名

# 誤り耐性型量子コンピュータのハードウェア制御法の開発とその性能解析

## 2022年度までの進捗状況

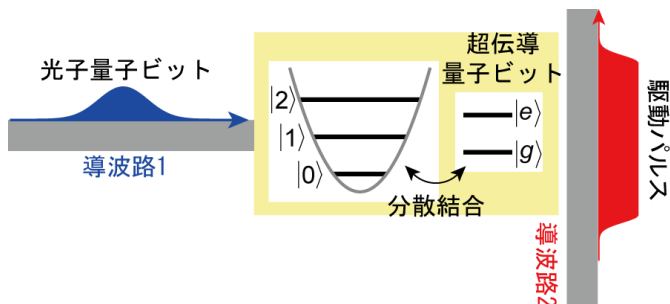
### 1. 概要

本研究開発テーマでは、誤り耐性型量子コンピュータを構築するために有望な候補となる物理系について、物理系の特性の理解を定量的に進めるとともに、特性を生かした新しい実装方式の提案を行っています。また、デバイス技術の研究推進に有用なシミュレーターや最適化手法などのソフトウェア技術開発も並行して行っています。

### 2. 2022年度までの成果

#### ①超伝導-マイクロ波光子間の量子ビット交換

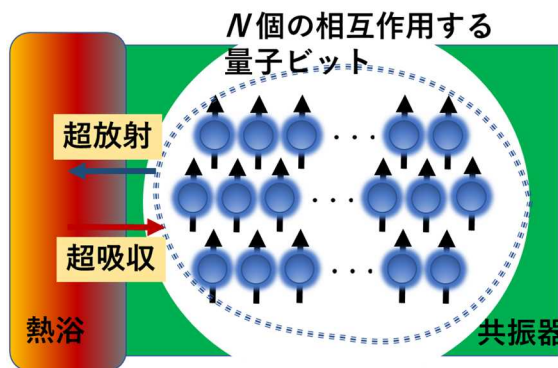
真に有用な量子コンピュータを実現するには、伝播性のある量子ビットを用いて離れた固体量子ビット間を接続する「分散型量子計算」が不可欠です。本成果では、その要素技術である、超伝導量子ビット-マイクロ波光子量子ビット間の状態交換（SWAP ゲート）を確認する手法を理論提案し、実験グループとの共同研究により実証しました。本ゲートの特長は、超伝導量子ビットに光子量子ビットを反射



させるだけで、簡便にゲート動作が行える点です。光子→原子（原子→光子）状態転送の平均忠実度は 0.829 (0.801) に達しました。この値は量子ビット寿命を伸ばすことにより更に改善することができます。

#### ②量子コンピュータに有用な新奇物理過程の開拓

量子ビットが高度に集積化されると、系と外部系間の熱のやりとりを制御することが重要となります。これまでに、多くの量子ビットが揃ってエネルギーを放出する超放射という量子力学的な効果が知られていました。本成果では、量子ビット間の相互作用、および結合する外部系をうまく設計することにより、超放射の逆過程である「超吸収」が

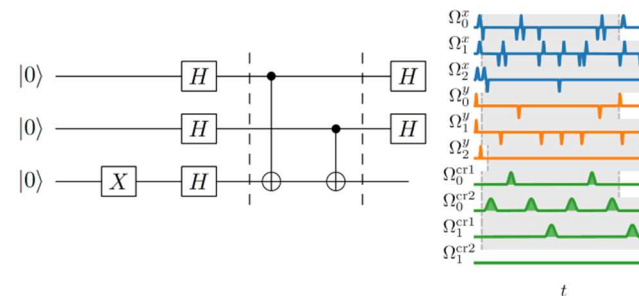


超伝導量子ビットなどを用いて実現可能であることを理論的に明らかにしました。さらに、原理的な限界として、関係する量子ビット数を  $N$  とすると、外部系への熱流は最大  $N$  の三乗でしかスケールしないことも明らかにしました。この過程は、量子コンピュータにおいて、量子ビット系の冷却や初期化の効率向上などへの応用が期待できます。

[Phys. Rev. Lett. 2022; Phys. Rev. Lett. 2023]

#### ③量子コンピュータ開発支援ツールの拡充

QuTiP (the Quantum Toolbox in Python)は、開放量子系のダイナミクスをシミュレートするオープンソースの数値計算パッケージです。広く世界で使われており、2022年には累計100万を超えるダウンロードを記録しました。量子コンピュータの研究用に QuTiP をより使いやすくするための新しいパッケージ (qutip-qip) をリリースしました。これにより、ノイズを含む量子回路の制御パルスレベルのシミュレーションが可能になりました。[Quantum 2022]



### 3. 今後の展開

超伝導量子ビットに対して、量子フィルタの数を増やし周期的に並べることで、より効率的に量子ビットを保護する方法を探索します。量子ビットの制御、測定、速度限界・散逸現象についても明らかにしていきます。また、開発支援ツールの拡充を幅広くすすめます。

研究開発テーマ名

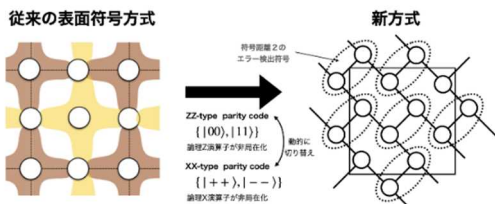
# 誤り耐性型量子コンピュータの性能改善のための量子誤り訂正法の開発とその性能解析

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

誤り耐性量子コンピュータ(FTQC)のハードウェア要求性能を緩和し、その性能を向上させるためには、各レイヤーにおいて既存の手法の組み合わせにとどまらず、新たな手法の選択肢を追加することが誤り耐性量子コンピュータの実現の加速において必須です。本研究開発テーマでは、様々なアプローチで量子誤り訂正手法や誤り耐性量子計算アーキテクチャの新規手法を開拓します。

### 2. 2022年度までの成果



①物理制約を緩和する新たな量子誤り訂正法  
量子ビットの接続性を下げることによって、各量子ビットの周波数割り当てが容易になり、高精度な量子演算を実現することができます。本研究では、通常4つの隣接する量子ビットとの接続が必要であった表面符号方式に対して、うまく小規模なエラー検出符号を組み合わせることで、隣接する3つの量子ビットへの接続によって量子誤り訂正を実行する新手法を構築しました。エラー検出機能も追加しているため、エラー耐性が高いことも数値計算によって確認されました。また、ここで得られた知見を生かし、表面符号よりも高い対称性を持ったカラー符号などのエラー耐性の改善を進めており、表面符号に代わる新たな選択肢を提供します。

### ②NISQとFTQCのギャップを埋める研究

全てのエラーを許容して計算を行う NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum computer) (~100 量子ビット) と全てのエラーを完全に誤り訂正する FTQC (~100 万量子ビット) との間には、有効に利用できる量子ビット数、もしくは、必要となる量子ビット数に数桁ものギャップが存在します。本研究では、それらのギャップを埋めるための研究を行ってきました。

ソフトウェアアプローチとしては、従来 NISQ 向けに考えられてきた量子誤り抑制法をエラー訂正符号に符号化された論理量子ビットに適用する枠組みを構築し、小規模の符号でも十分高い計算精度が達成できることを示しました。最も有効に提案手法が機能する領域では必要となる物理量子ビット数が 80%も削減できることが明らかとなりました。[PRXQuantum, 2022]

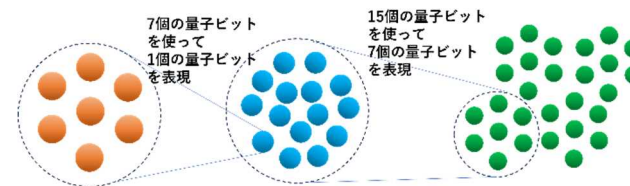


また、アーキテクチャアプローチとしては、エラー訂正が比較的容易なクリフォード演算のみをエラー訂正で守り、非クリフォード演算はエラー検出によって高精度で補助状態を生成して一部エラーを許容して実行する、準誤り耐性量子計算アーキテクチャを新たに構築しました。エラー確率が  $10^{-4}$  の物理量子ビットを 1 万個使うだけで、深い計算での計算能力の指標である量子体積 (Quantum Volume)  $2^{64}$  を達成できることが示され (NISQ では  $2^{37}$  が限界)、スパコンでもシミュレーションが難しい深い計算を 1 万量子ビ

ット規模でも達成できることが示されました。

### ③大規模誤り耐性量子計算の究極の効率の探求

誤り耐性量子計算は、量子ビットを余分に使い、訂正のための計算ステップを追加することで、徐々に発生する誤りと戦います。大規模化した誤り耐性量子計算で、この空間的、時間的に余分なコストであるオーバーヘッドをどこまで小さくできるのか、というのは、誤り耐性量子計算の基礎的な重要問題のひとつです。本研究では、新しい方式として、簡単な符号を、サイズを大きくしながら入れ子にする手法を提案しました。そして、この手法の時間空間オーバーヘッドが、既存のどの手法よりも小さいことを示しました。



### 3. 今後の展開

新規量子誤り訂正法の提案では、表面符号の改善に止まらず、カラー符号やより一般的な量子 LDPC 符号などを用いた新手法の開拓を進め、クロスレイヤー協調設計のための選択肢を増やすことを目指します。誤り抑制法の誤り耐性量子計算への応用については、現在用いている擬確率法以外の手法も NISQ 研究において提案されており、これらの応用も検討することで、さらなるオーバーヘッドの削減を目指します。また、準誤り耐性量子計算については、1 万量子ビット規模という近未来的な目標のもと、実行可能かつ優位性のあるアプリケーション探索の研究に着手します。

研究開発テーマ名

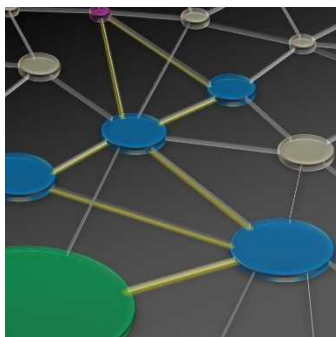
# 分散型構造を持つ誤り耐性型量子コンピュータの研究開発

## 2022年度までの進捗状況

### 1. 概要

本研究開発テーマは、分散型構造を持つ誤り耐性量子コンピュータの可能性を理論的に探究することを担っています。この研究開発テーマの達成により、分散構造を持つことで初めてスケールアップが可能な物理系を用いた量子計算や、モノリシックで開発が進む量子計算機の結合による更なるスケールアップの可能性が明らかになり、プロジェクトの目指す誤り耐性量子コンピュータの設計に新たな指針を与え、ひいてはムーンショット目標6で目指す2050年の誤り耐性型量子コンピュータの実現に貢献します。

この達成に向けては、離れた量子ビットや集積化チップとインターフェースで構成されるモジュールを通信ネットワークで結ぶ基本スキームの設計を始め、分散型に適合する量子誤り訂正符号や誤り耐性量子計算方式との結合が課題となっており、この点を挑戦的テーマとして取り組んでいます。従来とは異なり、クロスレイヤー協調設計と照らし合わせ、誤り耐性量子計算のみならず、量子通信の先端知識を導入することで、この課題の解決を目指しています。

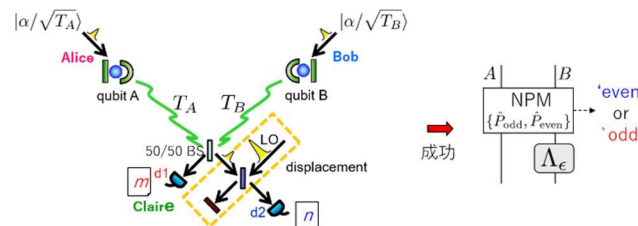


分散型構造を持つ誤り耐性量子コンピュータ

### 2. 2022年度までの成果

①コヒーレント状態伝送に基づき、一種類のエラーしか持たない量子もつれを離れた量子ビットに最適に供給する方法を同定 [K. Azuma et al., PRA **105**, 062432 (2022)]

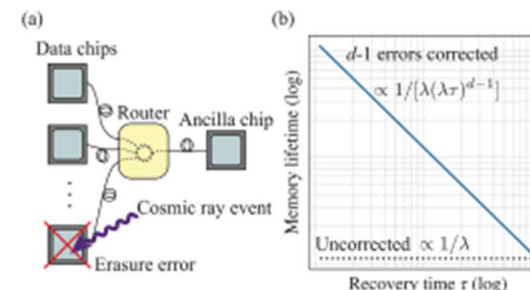
分散型誤り耐性量子計算において基本とされるのは、離れた量子ビットに対し CNOT 演算を施すことで、これは、離れた量子ビットに忠実度の高い量子もつれを供給することで実現されます [(CNOT 演算レート)  $\propto$  (量子もつれ産出レート)]。本成果では、量子ビットと量子もつれ状態にあるコヒーレント状態を、損失通信路を通じて伝送することで、離れた量子ビット対に一種類のエラーしかもたない量子もつれを供給する方式を考え、それらの方式が与え得る量子もつれの産出レートの原理限界を導出しました。その結果、遠隔非破壊パリティ測定に基づいて量子もつれを供給することが最適であることが明らかになりました。また、この最適方式のように、量子もつれ生成方式が十分効率的な場合、従来必要とされた「量子もつれ蒸留」ステップなしに分散量子計算を行う方が効率的で優れた設計である可能性が見出されました。



遠隔非破壊パリティ測定

②チップレベルの破壊的な誤りに対する分散型量子誤り訂正手法を提案 [Q. Xu et al., PRL **129**, 240502 (2022)]

大規模な量子コンピュータでは、飛来した宇宙線によるデータの破壊が問題となることが指摘されています。本成果では、分散型の構造を持つ量子コンピュータにおいて、複数のノードにまたがって量子誤り訂正を実行する方法を提案しました。複数の量子コンピュータチップを相互接続し、さらにデータ復元用のスペアノードを接続することで、ひとつのチップのあらゆるデータが破壊されたとしても、消失誤りの訂正技術により、データを回復できます。この手法により、壊滅的なデータ破壊の頻度を、例えば10秒に1回から1ヶ月に1回に削減できると見積もられます。



(a)分散構造の模式図 (b)回復操作時間と寿命の関係

### 3. 今後の展開

今後は、分散量子計算の候補となる物理系の特性を踏まえた基本スキームの現実的な理論モデルを作り込み、それを、分散型に適合する量子誤り訂正符号や誤り耐性量子計算方式に結合することで、分散型構造を持つ誤り耐性量子コンピュータの青写真を描きます。