

【記者説明会】

数万量子ビットの
量子コンピュータでも、
現行コンピュータを超える速度で
実用アルゴリズムを実行する方法
を確立

～エラー訂正に基づく
独自計算アーキテクチャの
計算規模を大幅に拡大～

2024年8月28日
国立大学法人大阪大学
富士通株式会社

量子コンピュータの解説、および 量子コンピュータ実現に向けた大阪大学の取り組み

発表者：国立大学法人大阪大学 量子情報・量子生命研究センター 副センター長
兼) 大阪大学大学院 基礎工学研究科 システム創成専攻 電子光科学領域
量子コンピューティング研究グループ 教授
藤井啓祐

- 量子力学的効果を利用して、計算の飛躍的な高速化を実現

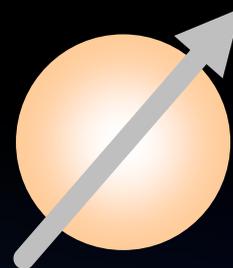
現行のコンピュータ

0か1のどちらかの状態



量子コンピュータ

0と1の重ね合わせ状態を取れる



2^N の状態の計算を順番に実行

Nビット
の計算

2^N の状態を同時に表現し、
量子もつれを利用して解をあぶりだす

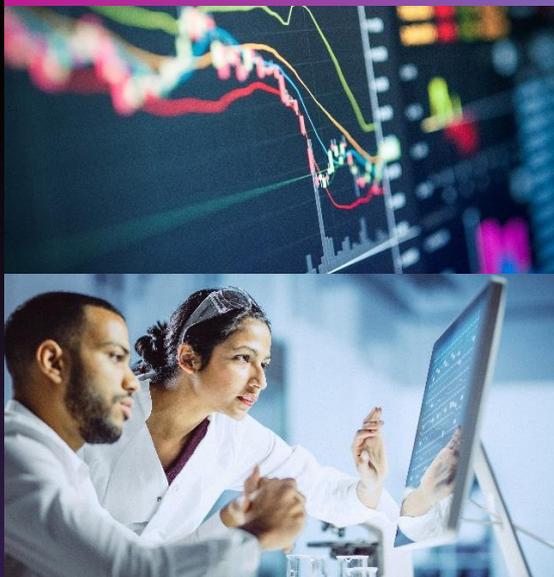
指数関数的な高速化

- 現行のコンピュータでは原理的に高精度／高速計算が困難な、量子化学計算や複雑系の計算など

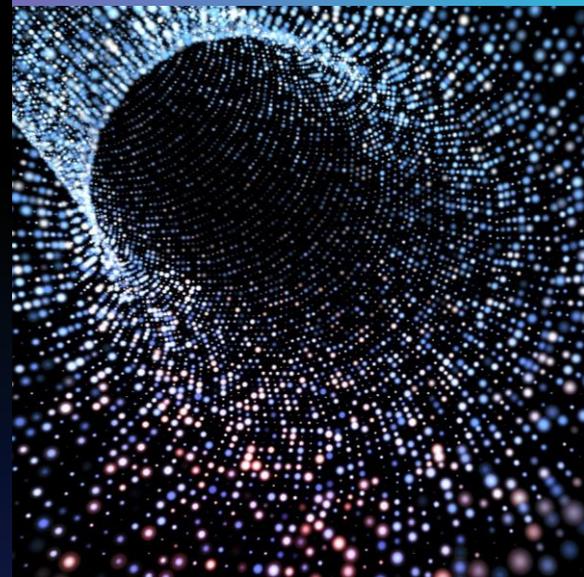
新しい材料や医薬の発見



金融や経済の動向予測



産業を変革する新原理の発見



量子エラー訂正の必要性

- **量子エラー**：量子ビットの状態がノイズにより変わり、計算を間違ふこと

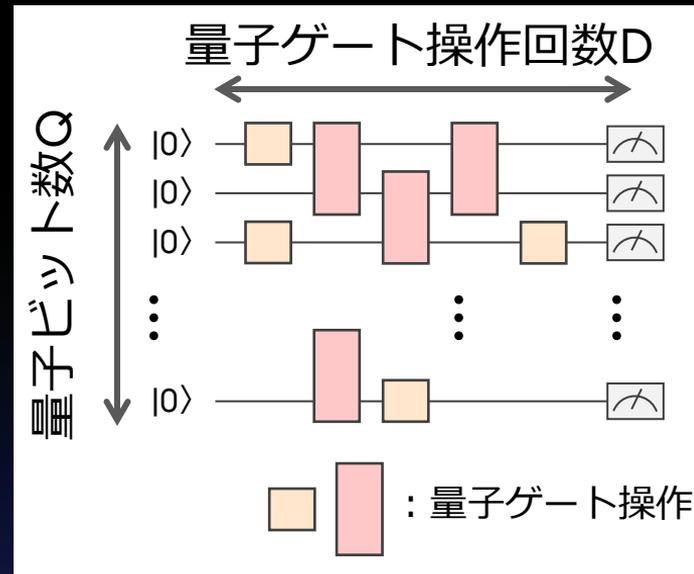
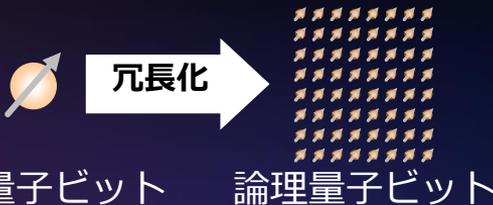
- ノイズ要因：外部環境(熱雑音など)、操作信号(揺らぎや相互作用など)

- **計算の正確さ = (量子ビットの正確さ)^(Q×D)**

- 例) $(0.999)^{(50\text{qubit} \times 20\text{回})} = 0.368$

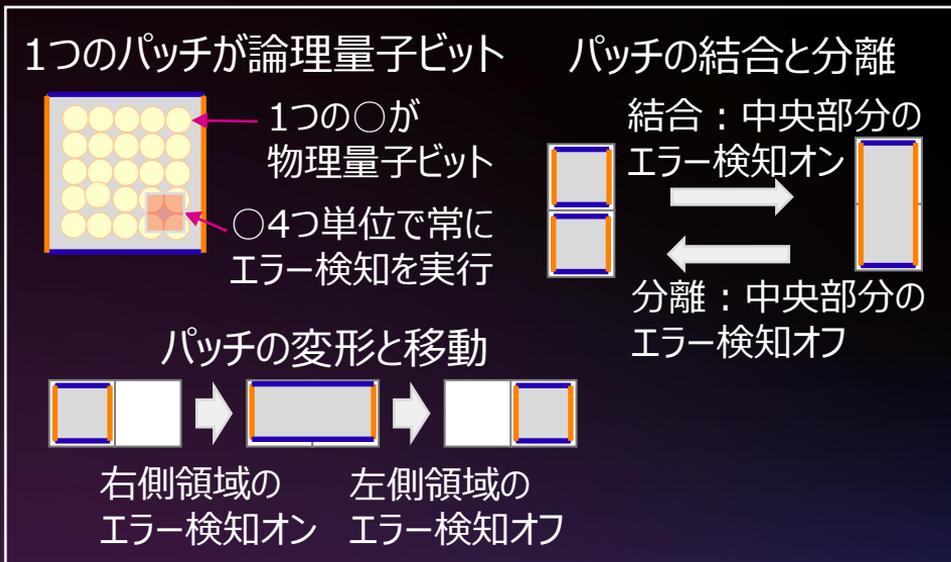
- **量子エラー訂正**：冗長化により情報を守る

- 複数の物理量子ビットから1つの論理量子ビットを形成

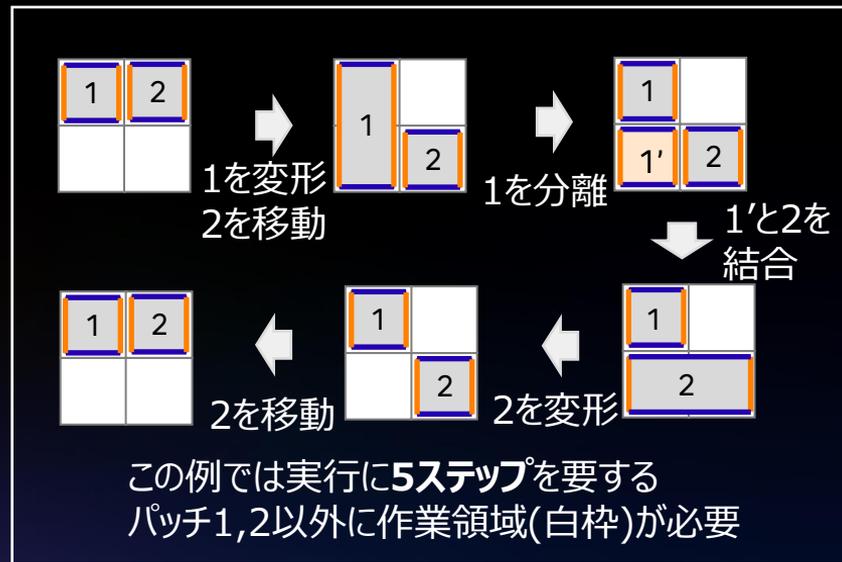


● Lattice surgery^{※1}と呼ばれる非常に複雑な操作で定義される

Lattice surgery基本操作^{※2}



論理CNOTゲート(2量子ビット操作)の例



※1 C. Horsman, et al., *New Journal of Physics*, **14**, 123011 (2012).

※2 表面符号 (A. Kitaev, *Ann. Phys.*, **303**, 2 (2003).) を仮定

●量子情報・量子生命研究センター「QIQB」を設立(2020年3月)

- 幅広い分野での研究に取り組む

- 量子コンピューティング、量子情報融合、量子情報デバイス、量子通信・セキュリティ、量子計測・センシング、量子生命科学

- これらの分野間、および、他の学問分野との学際融合研究を推進

- 国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の「共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT)」における量子技術分野で、**量子ソフトウェア研究拠点**として採択



- 量子コンピュータテストベッドから、制御装置、基盤アルゴリズム、応用ライブラリーに至るまで、量子コンピュータフルスタックを構築
- 40を超える企業の参加と、全国から参加する学生に教育プログラム提供
→量子人材育成

日本の量子技術イノベーション戦略の一端を担う

量子コンピュータ実現に向けた 富士通の取り組みと開発技術について

発表者：富士通株式会社 富士通研究所 フェロー兼量子研所長
佐藤信太郎

富士通の量子コンピューティング研究開発戦略

- 量子デバイスから基盤ソフト、アプリまですべての領域に、世界有数の研究機関と取り組む
- ソフトウェア技術に注力する一方、ハードは幅広く可能性を追求
- 量子シミュレータを活用し、エンドユーザーと早期からアプリケーション開拓に取り組む

量子アプリケーション



材料



創薬



金融、など、エンドユーザーとの共同研究を推進

富士フィルム、東京エレクトロンなど

デルフト工科大

量子基盤ソフトウェア

QunaSys
アルゴリズム

キーサイトテクノロジー
エラー緩和技術

大阪大学
エラー訂正技術

量子プラットフォーム

ミドルウェア

コンパイラ

クラウド技術

量子状態制御

理化学研究所
超伝導方式

デルフト工科大
ダイヤモンドスピン方式

其他方式
幅広く検討

量子デバイス／集積

●大阪大学と富士通の連名でプレスリリース(2021年10月1日)

大阪大学と富士通、誤り耐性量子コンピュータの研究開発体制を強化

「富士通量子コンピューティング共同研究部門」を設置

大阪大学内に
「富士通スモール
リサーチラボ」も設置

国立大学法人大阪大学^(注1) (以下、大阪大学)と富士通株式会社^(注2) (以下、富士通)は、量子情報および量子生命研究を推進する大阪大学の「量子情報・量子生命研究センター (Center for Quantum Information and Quantum Biology、以下、QIQB)」内に、両者の共同研究部門として「富士通量子コンピューティング共同研究部門」を10月1日に設置しました。

●目的：誤り耐性量子計算(FTQC)に向けた量子ソフトウェアの研究開発

- 量子エラー訂正アルゴリズム、その性能評価技術、量子技術分野の人材育成

これまでの共同研究成果

- 独自の量子計算アーキテクチャ（STARアーキテクチャ※1）を確立
- 大阪大学と富士通の連名でプレスリリース・共同記者会見を実施(2023年3月23日)※2

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

一万程度の中規模な物理量子ビット数でも高精度な量子エラー訂正を実現

国立大学法人大阪大学^(注1)（以下、大阪大学）量子情報・量子生命研究センターと富士通株式会社^(注2)（以下、富士通）は、このたび、量子コンピュータの実現に不可欠な量子エラー訂正に必要な物理量子ビット^(注3)数を大幅に低減することで、現行コンピュータの計算性能を超える量子コンピュータの実用化を早めることが可能な高効率位相回転ゲート式量子計算アーキテクチャを確立しました。



※1 Space-Time efficient Analog Rotation quantum computing architecture (STAR architecture)

※2 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：富士通 (fujitsu.com)

●従来より少ない量子ビットで実用量子計算を可能にする技術

- 量子計算に欠かせない「位相回転※」を効率的に実行することで 必要な量子ビット数・量子ゲート操作回数を1桁以上削減
- ただし、位相回転ゲートのエラーを訂正できないため、精度は限定的

量子ビットの位相回転



基本量子ゲートセット



※ 量子ビットを任意の位相角だけ回転させる操作。従来手法では固定角の回転 (T, Hゲート) を何回も繰り返す必要がある。

STARアーキテクチャの実用化に向けた取り組み

- ① 計算規模拡大のための位相回転ゲートの精度向上
- ② 実問題適用のための実装方法の検討

取り組みの目的および効果

●目的

- STARアーキテクチャの計算規模を拡大し、実用計算への適用を可能にする

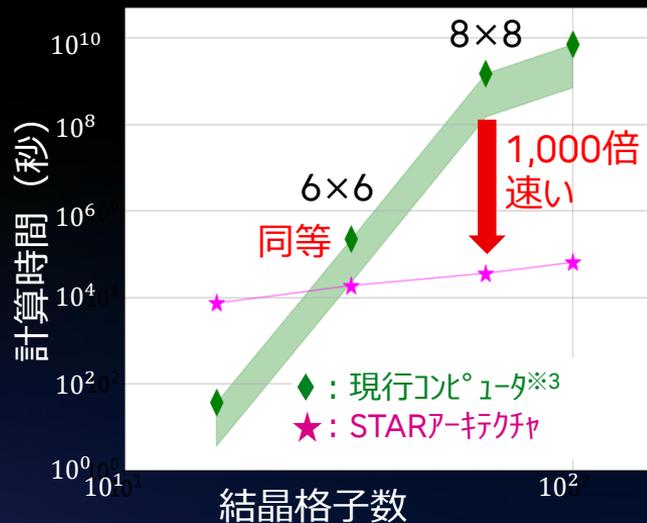
●効果

- 数万量子ビットで量子優位性^{※1}の達成が可能^{※2}
- 6×6結晶格子では4万量子ビットで現行コンピュータと同等
- 8×8結晶格子では6万量子ビットで現行コンピュータよりも1,000倍速い計算（5年→10時間）が可能の見積り

※1 実用計算で現行コンピュータの計算速度を超えること

※2 ハバードモデル（高温超伝導体の解析に使われるモデル）解析に必要な量子ビット数と計算時間を見積った結果。STARアーキテクチャではより汎用的なモデルにも適用可能

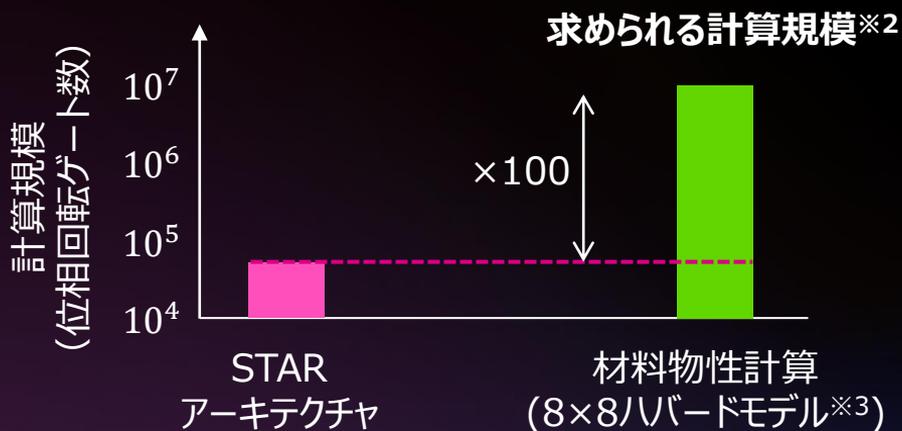
※3 N. Yoshioka, et al., *npj Quantum Inf* **10**, 45 (2024). を参考に作成、線の幅は並列計算による改善幅を示す



① 計算規模拡大のための 位相回転ゲートの精度向上について

●位相回転ゲートの精度は高いが、実用計算ではさらに高い精度が必要

- 材料物性計算※¹で必要となる計算規模には2桁以上足りない



**実用的な計算を行うには
位相回転ゲートの精度向上が必須**

※¹ 金属や半導体などの産業用材料の特性を、計算モデルを用いて分析・予測すること

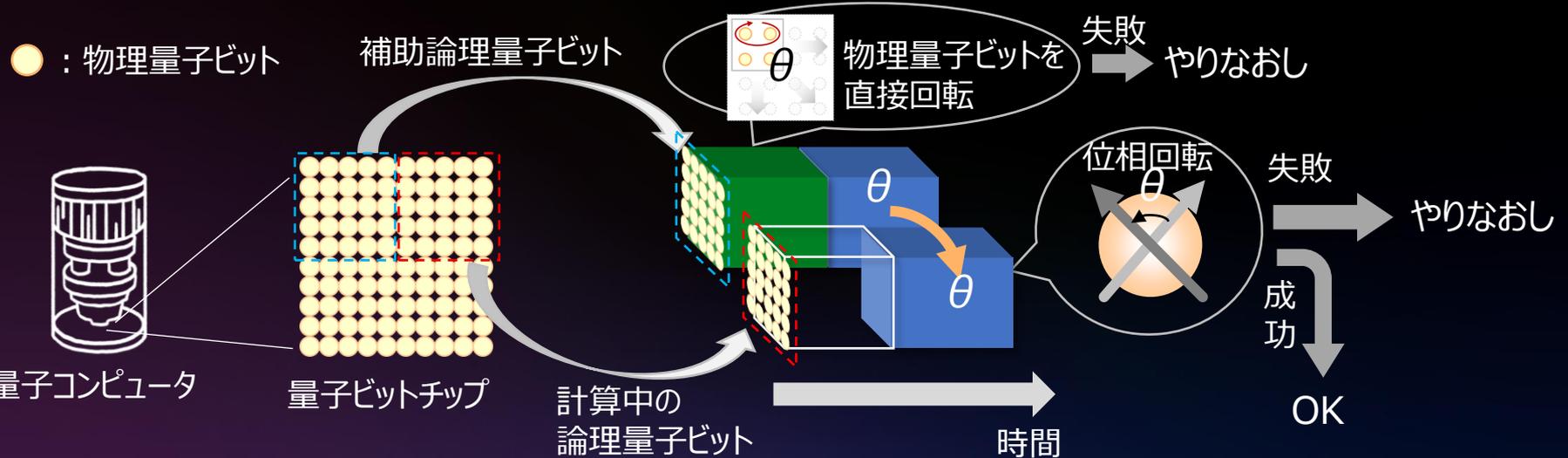
※² 電子エネルギーの推定に必要な位相回転ゲート数

※³ 高温超伝導の解析に使われ、電力インフラの送電ロス低減などにつながる

これまでの位相回転ゲート

- 補助量子ビットで位相角を生成し、計算中の量子ビットに転送する※1
- 正しく回転されるまでやりなおす※2

位相回転ゲートの時間経過を描画
(緑：位相角生成、青：位相角転送)

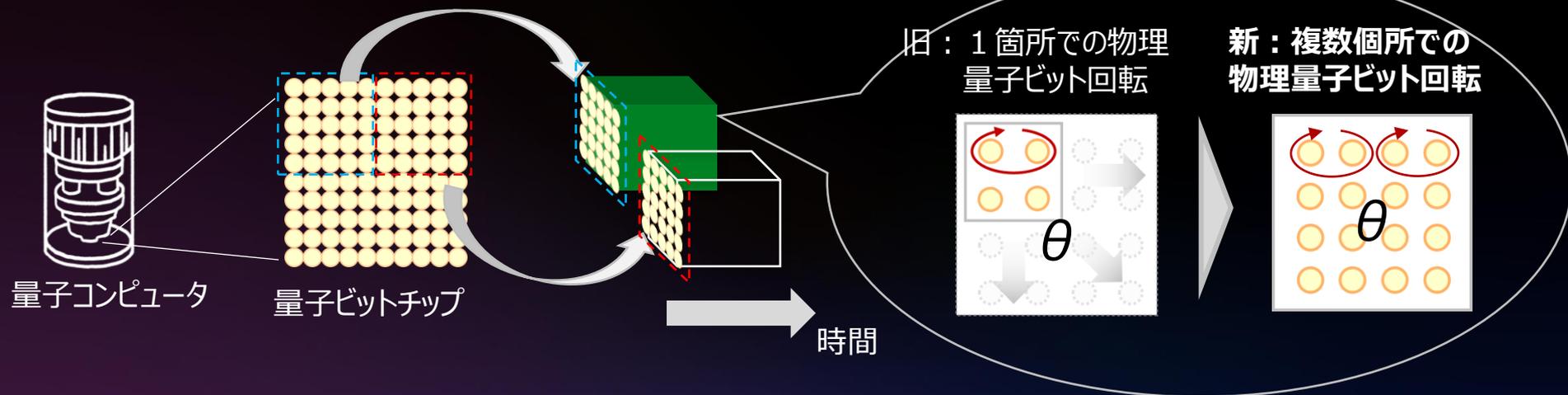


※1 計算中の量子ビットの状態を壊さないよう、補助量子ビットを経由する
※2 位相角生成、転送ともに一定確率で失敗する可能性がある

位相回転ゲートの精度向上

●新しい位相角生成の技術を開発

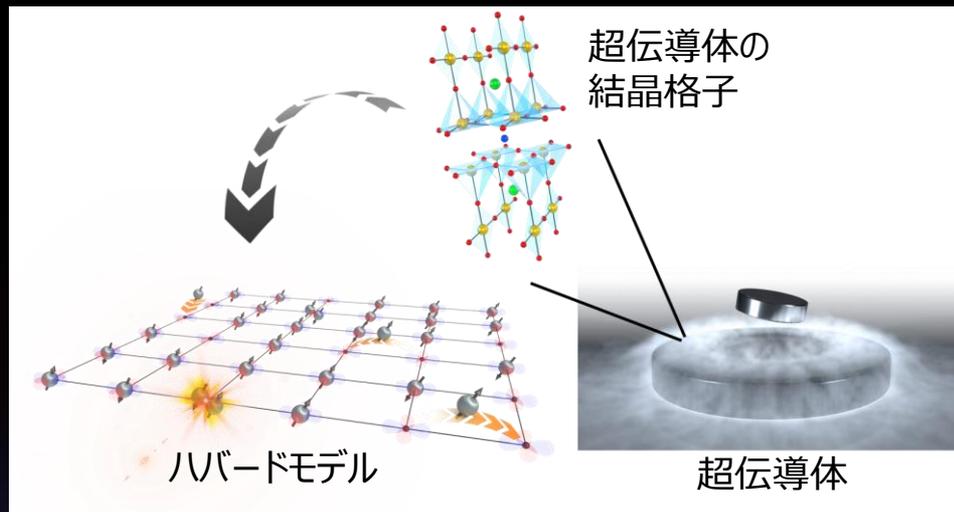
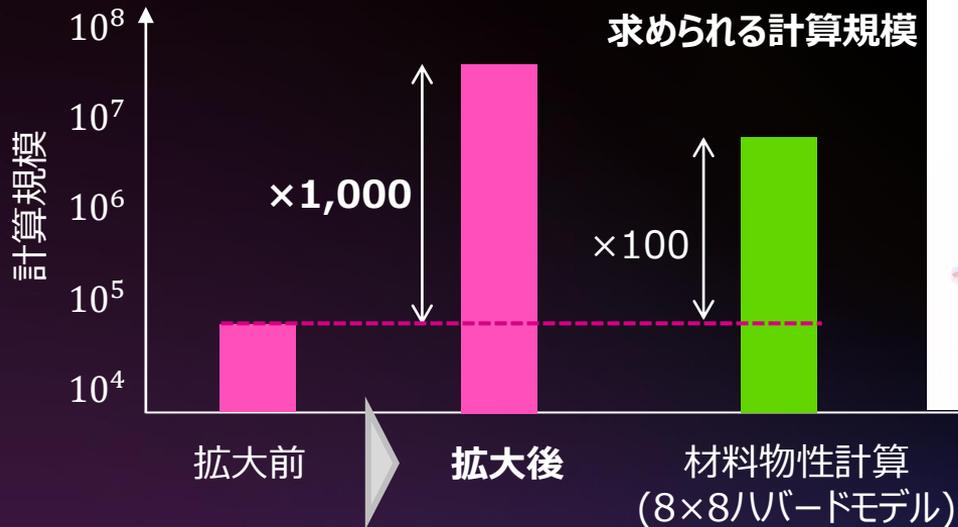
- これまで困難だった物理量子ビットの回転を冗長化する手法を開発し、一つの回転エラーが位相角に及ぼす影響の軽減に成功



位相回転ゲートの精度を飛躍的に向上させ、
計算規模（位相回転ゲート数）を1,000倍拡大

計算規模拡大の効果

- これまでSTARアーキテクチャでは不可能だった材料物性計算（ハバードモデル）の解析に見通しが立った

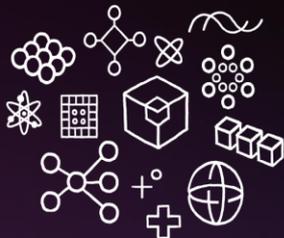


ハバードモデル解析が実現すれば、
新たな高温超伝導材料の発見や
送電コスト削減などにつながる

② 実問題適用のための実装方法の検討について

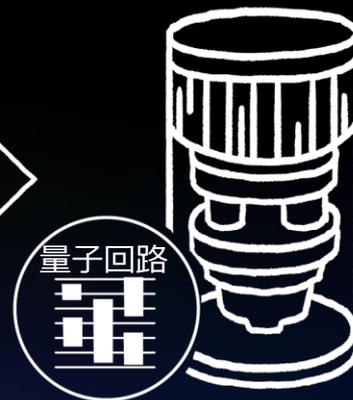
- 量子計算アーキテクチャはあくまでも基本的な計算ルールの提案のみ
 - 具体的な計算問題を解くには、STARアーキテクチャのルールに沿った量子ビットの操作手順を明らかにする必要がある

量子アルゴリズム



ユーザ

基本量子ゲート

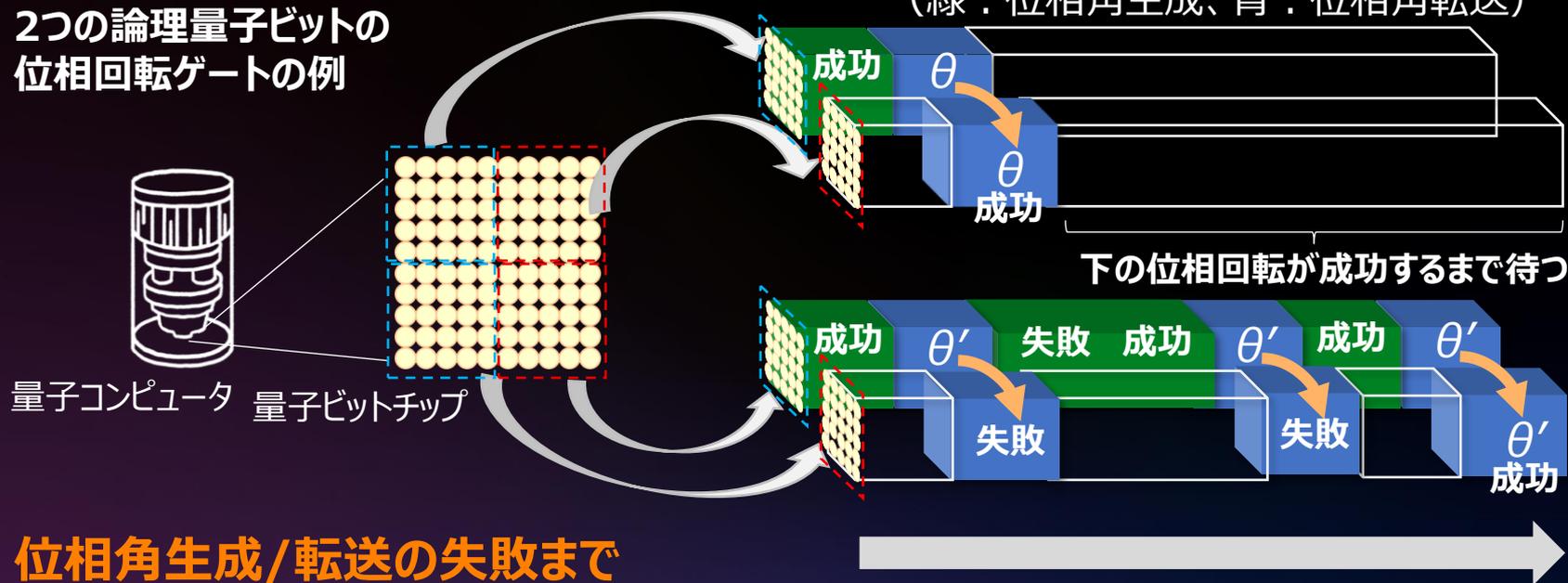


量子コンピュータ

● 位相回転ゲートは複雑であり、単純な実装では計算速度が低下する

(緑：位相角生成、青：位相角転送)

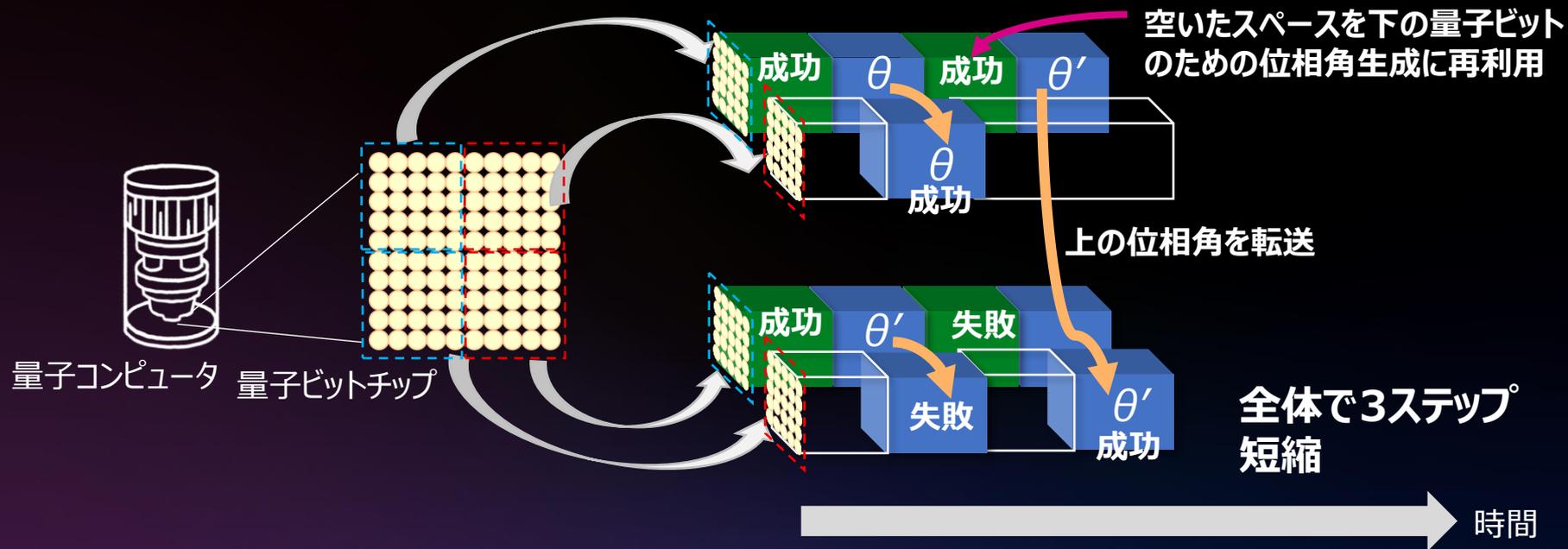
2つの論理量子ビットの
位相回転ゲートの例



位相角生成/転送の失敗まで
考慮した効率的な操作スケジュールが必要

位相回転の高速化技術 (1/2)

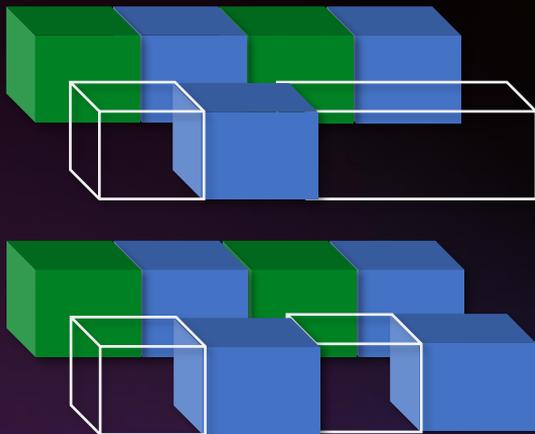
- 量子ビットを動的に活用して位相角生成/転送失敗の影響を低減させる



位相回転の高速化技術 (2/2)

●最適な位相回転ゲートの並列実行を実現

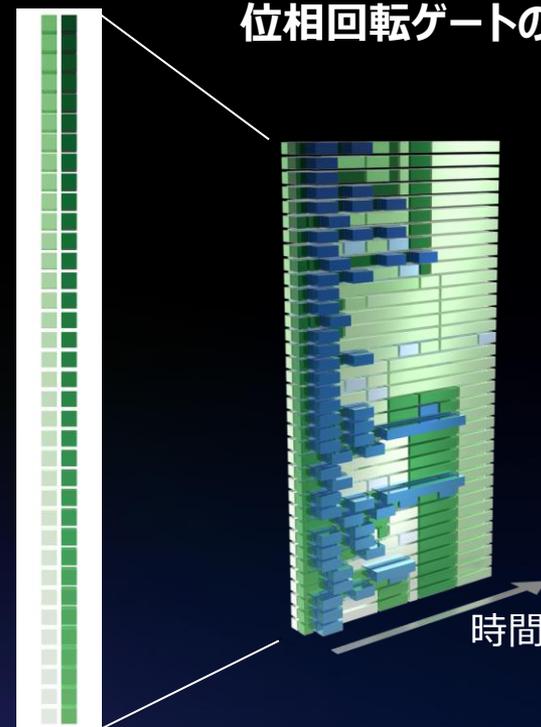
2つの論理量子ビットの
位相回転ゲートの例



複数個に拡張

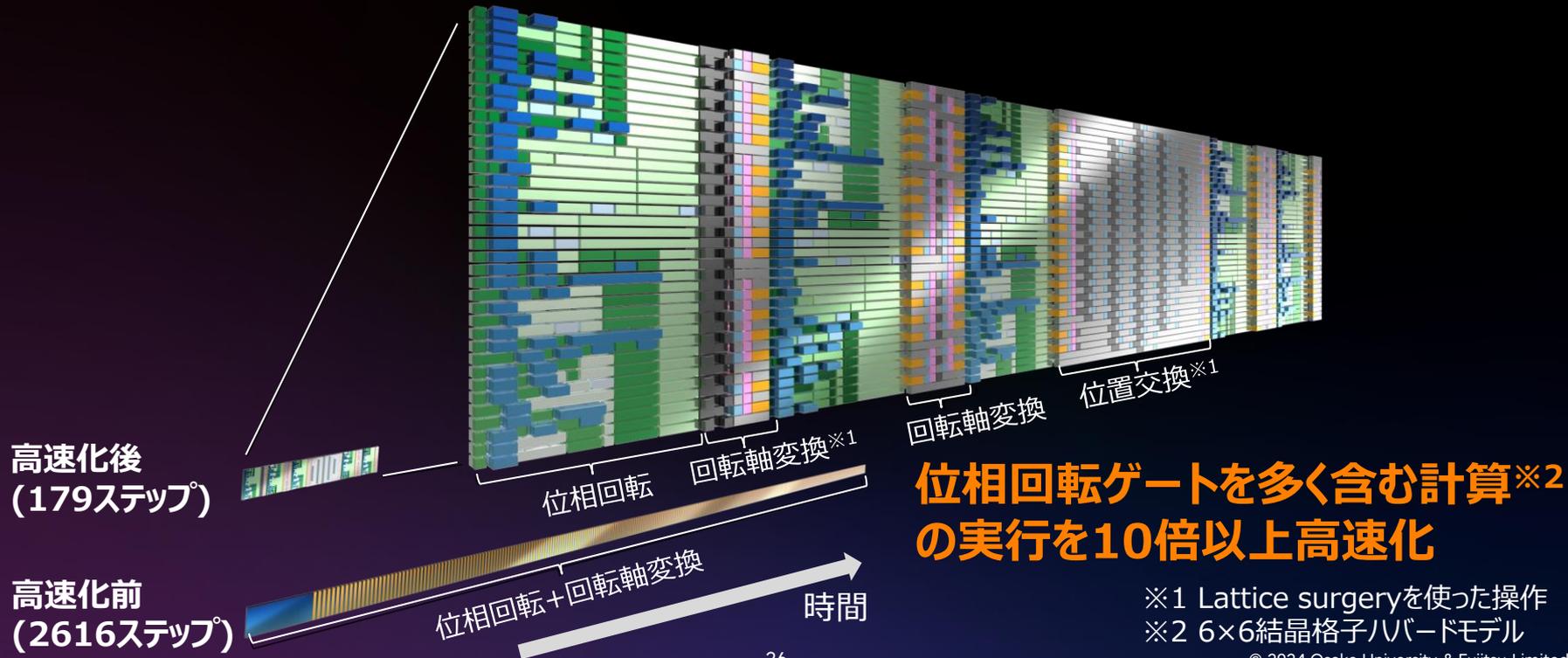


36個の論理量子ビット
位相回転ゲートの例



高速化の効果

- 位相回転ゲートの並列実行やその他操作の高速化を実施し、量子計算全体の実行時間を短縮



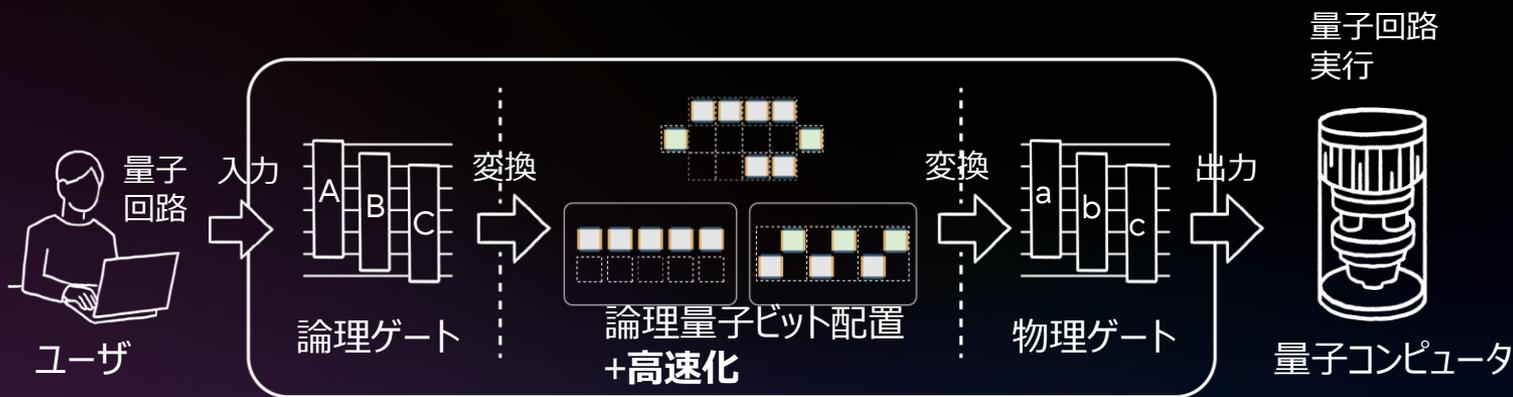
※1 Lattice surgeryを使った操作

※2 6×6結晶格子ハバードモデル

© 2024 Osaka University & Fujitsu Limited

● STARアーキテクチャに基いた、量子ビットの具体的かつ効率的な操作手順を自動生成する量子回路ジェネレータ※1を構築

- 論理ゲートから物理ゲートまでを一気通貫に変換



Early-FTQC時代※2を見据えたSTARアーキテクチャの実装法を確立

※1 STARアーキテクチャ専用の高並列量子回路ジェネレータ

※2 数万程度の量子ビットしかなく、誤り耐性量子計算が十分に実現できないと考えられている時代

取り組み①②の効果

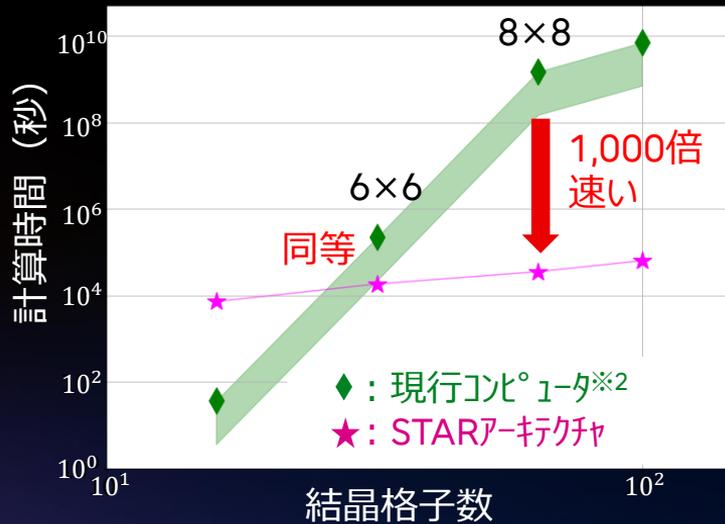
ハバードモデルの計算リソース見積り

●数万量子ビットで量子優位性の達成が可能※1

- 6×6結晶格子では4万量子ビットで現行コンピュータと同等
- 8×8結晶格子では6万量子ビットで現行コンピュータよりも1,000倍速い計算（5年→10時間）が可能の見積り

6万量子ビットはFTQCで典型的に必要とされている100万よりも1桁少ない※3

早ければ2030年頃に到来が预期される
Early-FTQC時代における
量子優位性への道筋を初めて示した



※1 STARアーキテクチャではより汎用的な模型にも適用可能

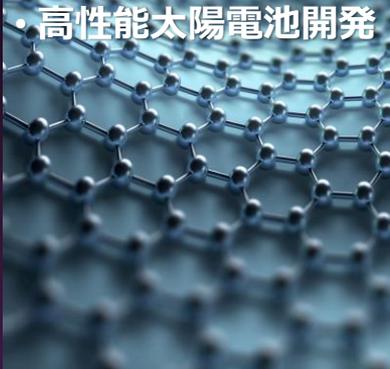
※2 N. Yoshioka, et al., *npj Quantum Inf* 10, 45 (2024). を参考に作成、
線の幅は、並列計算による改善幅を示す

※3 これまでのFTQCで同じ問題を解くための量子ビット数と比較すると約1/3

- STARアーキテクチャをさらに発展させるとともに、世界に先駆けて量子コンピュータ実機での実用量子計算を実現する

材料物性計算・量子化学計算

- ・次世代バッテリー開発
- ・材料設計（自動車・航空機・宇宙関連）
- ・高性能太陽電池開発
- ・クリーンアンモニア製造
- ・高効率水素エネルギー生成（人工光合成）



量子機械学習

- ・高度な最適化問題の解決（創薬・金融・物流）
- ・AIの高速化・省エネルギー化



Thank you!