2024年3月27日

ムーンショット目標6「2050年までに、経済・産業・安全保障を 飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」 公開シンポジウム



## ナノファイバー共振器QEDによる 大規模量子ハードウェア

### 早稲田大学 理工学術院 青木隆朗





# 誤り耐性型汎用量子コンピュータ

### ■ 量子コンピュータハードウェア方式









F. Arute et al., Nature 574, 505 (2019)



C. Monroe and J. Kim, Science 339, 1164 (2013)



C. Vigliar *et al.*, Nat. Phys. 17, 1137 (2021)





D. Bluvstein *et al.*, Nature 604, 451 (2022)





N. Lee *et al*, Appl. Phys. Lett. 116, 162106 (2020)

- 誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現には、量子誤り訂正が可能で、かつ、10<sup>6</sup>~10<sup>8</sup>物理量子ビット規模まで量子ビット数を拡大できるハードウェア方式が求められる
- いかなるハードウェア方式においても、単ユニットで10<sup>6</sup>~10<sup>8</sup>物理量子ビット規模まで拡大することは極めて困難であることが予想され、スケーラブルな分散型量子計算方式の開発が望まれる

# 誤り耐性型汎用量子コンピュータ

### 分散型量子コンピュータ



 多数の小規模な量子コンピュータを 接続してネットワーク化し、大規模な 量子コンピュータを実現



https://www.eurekalert.org/news-releases/758461

#### 超伝導の場合、伝送路を含む系全体を 極低温に冷却する必要



C. Monroe and J. Kim, Science 339, 1164 (2013)

 イオントラップの場合、光子干渉の検出 による確率的な方式のため効率が悪い

## 共振器QEDの可能性



- 原子と光子のハイブリッド系
- 量子情報科学分野の黎明期より量子コンピュータの 有望な動作原理として理論研究の主要な対象
- 近年、空間光学共振器を用いた実験で量子ゲートの原理実証が進む



### 共振器QEDの可能性





T. Pellizzari et al., PRL 75, 3788 (1995)

個々の原子と共振器の結合を強く保ったまま共振器内に多数の原子を配置し、 それらに個別にアクセスできれば、多量子ビットの量子コンピュータとして機能する

従来方式(空間光学共振器)では困難



J. R. Buck, Ph.D. thesis, Caltech (2003)

### 共振器QEDの可能性



さらに、複数の共振器QED系を低損失に接続できれば、分散型量子コンピュータが可能になる

#### 従来方式(空間光学共振器)では困難



J. R. Buck, Ph.D. thesis, Caltech (2003)

### 本プロジェクト: ナノファイバー共振器QED方式量子コンピュータ



ナノファイバー共振器



ナノファイバー共振器QED系



### ナノファイバー共振器QED系

### 原子量子ビットの収容・アドレス技術



x (µm)



z (µm)

y (µm)







1量子ビットゲート(他の中性原子方式、イオントラップ方式と同様)





- | 2量子ビットゲート/多量子ビットゲート
- 方式1: Duan-Kimble ゲート L. –M. Duan *et al.*, PRA 72, 03233 (2005)



- 光子反射による制御位相フリップゲート
- 任意に選んだN原子間に適用可能(全結合型)
- 離れた共振器に分散したN原子間に適用可能



### 動作原理

- 2量子ビットゲート/多量子ビットゲート
  - 方式2:スピン相互作用型ゲート C. Hung et al., PNAS 113, 4336 (2016)



- 仮想光子の交換によるスピン相互作用
- 全結合型、並列操作可能
- 任意のスピンハミルトニアンが実現可能
- 量子シミュレーションにも応用可能



### 本プロジェクト: ナノファイバー共振器QED方式量子コンピュータ



## 研究開発体制



• 量子コンピュータハードウェアを総合的に開発、NanoQTにより社会実装を推進





#### 単一原子トラップ、イメージングによる読出技術



### 原理実証/分散化技術

Cs原子 1号機

#### • 二重チャンバー化による共振器劣化抑制、真空度向上

- 2D MOT generated in Dec. 2023
- Push beam and 3D MOT end of Jan. 2024
- 3D MOT within a few mm from nanofiber
- No degradation for nearly 2 months
- Pressure remains at 10<sup>-7</sup> Pa despite MOT















Cs原子 2号機



・ バックグラウンドフリーイメージング技術の開発



### 原理実証/分散化技術

Yb原子 1号機

#### (2026年~本格稼働に向けた設計・立ち上げ)









#### ナノファイバー共振器開発(保管・交換技術)









#### ナノファイバー共振器開発(保管・交換技術)











## 大規模化技術







## 大規模化技術



## 周波数安定化光源



#### 干渉フィルター型ECDL

- No moving parts  $\rightarrow$  compact and robust
- > 1 GHz frequency sweeping without a mode-hop.
- PZT-frequency coefficient: ~12 MHz/V



✓ X. Baillard, et al., Opt. Commun. 266, 609 (2006).



### 位相ロック

- The ECDL could be phase-locked to the optical frequency comb referenced to UTC (NMIJ).
- The mode number of the comb observing the beat signal with the ECDL can be determined from the D<sub>2</sub> line of Cs atom. (Absolute frequency is easily determined.)





#### [1] 共振器QEDを用いた光子生成、量子ゲートなどの要素技術の提案・評価

- デバイス要素技術側の工夫により、量子計算のトータルリソースを低減
- 複数の原子を含む中規模構成の操作性向上

[2] 共振器QED系に対して主要な誤り耐性量子計算方式を適応した時の性能評価

- 共振器QEDベースの誤り耐性量子計算の基本性能評価
- 設計の構造や物理的特徴を取り込んだエラー推定アルゴリズムやデコーダーの改善



[1] 共振器QEDを用いた光子生成、量子ゲートなどの要素技術の提案・評価

• 多準位原子エンジニアリングによる光子生成性能向上

[S. Kikura et al., arXiv:2403.00072]





#### [1] 共振器QEDを用いた光子生成、量子ゲートなどの要素技術の提案・評価

・ 共振器内原子間ゲートの速度上限評価 [A. Suenaga et al., JPSJ (to be published)]



• 原子·光子間ゲートに最適な共振器設計 [T. Utsugi et al., arXiv:2211.04151]



原子・光子間ゲートを用いた量子計算に最適な 共振器の実効面積と共振器長の関係を導出

🕐 NTT

[2] 共振器QED系に対して主要な誤り耐性量子計算方式を適応した時の性能評価

・ 共振器QEDネットワークによる誤り耐性量子計算の性能評価

[R. Asaoka et al., APS 2023]





- 複数の共振器QEDネットワーク構造 による表面符号構成方法提案と誤り 耐性閾値評価
- 構造の特徴を取り入れたエラー推定 アルゴリズムの改善による閾値改善

まとめ



独自のナノファイバー共振器QED技術に基づき、大規模化と分散化が可能な新方式の量子 コンピュータハードウェアを開発するとともに、社会実装を推進する。

- 原理実証・分散化: 少数(~10)量子ビットの原理実証機2台を並行して立ち上げ
- 大規模化: 1,000量子ビット収容に向けた1,000スポット光ピンセットアレー技術の開発
- 周波数安定化光源:協定世界時基準の光コムへの位相ロック、Yb原子用光源の開発
- 誤り耐性理論:要素技術の提案・評価、主要な誤り耐性量子計算方式での性能評価



