

研究開発項目

# 1. ナノファイバー共振器 QED 方式ハードウェアの原理実証 / 4. 大規模化・分散化

## 2023年度までの進捗状況

### 1. 概要

現在、さまざまな物理系に基づく量子コンピュータハードウェア方式の研究開発が進められていますが、どの方式においても、誤り耐性型汎用量子コンピュータに必要な莫大な数の量子ビットを一つのユニットに実装することは極めて困難であると考えられています。そのため、小～中規模の量子ビットを実装したユニットを多数接続してネットワーク化する分散型量子コンピュータ技術の開発が求められています。

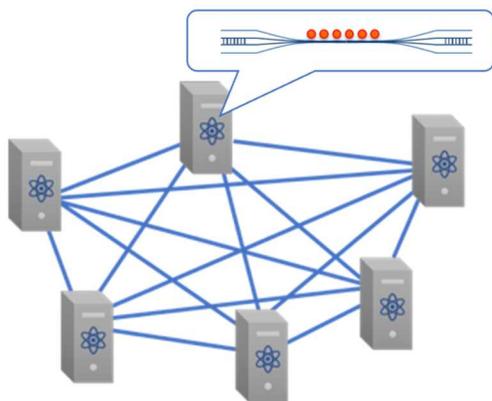


図1：分散型誤り耐性汎用量子コンピュータ

共振器量子電気力学（共振器 QED）系は原子と光子のハイブリッド量子系であり、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でした。特に、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

機能すること、また、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ことが期待されていました。これらは空間光学共振器に基づく従来の共振器 QED 系では困難でしたが、ナノファイバー共振器 QED 技術によって実現が可能になると期待されます。

本プロジェクトでは、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、社会実装を推進します。それにより、2050年には、圧倒的に大規模な量子ビット数を持つ分散型の誤り耐性汎用量子コンピュータと量子インターネットの実現を目指します（図1）。

ナノファイバー共振器 QED 系（図2）は、直径が光の波長よりも細い「ナノファイバー」を中央部に持つ光ファイバー共振器（ナノファイバー共振器）に閉じ込められた光子と、ナノファイバーの表面近傍に一列に並べられた原子とが量子力学的に相互作用する系であり、世界で唯一の独自技術により開発されました。

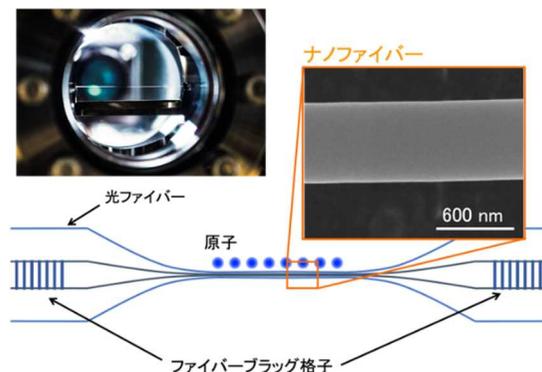


図2：ナノファイバー共振器 QED 系

### 2. これまでの主な成果

ナノファイバー共振器 QED 方式量子コンピュータハードウェアの PoC の確立に向け、少量量子ビットでの原理実証

ユニット（図3）の立ち上げを完了しました。また、分散化に向け、複数のユニットを接続するための要素技術および分散化ユニットの開発を進めました。さらに、1つのユニットに収容できる量子ビットの大規模化に向け、単一サイト分解広視野光学系を試作し、1次元原子トラップアレイ用光学系の中間像として、個別スポットが明瞭に分解された1,000以上のスポット列の形成に成功しました。

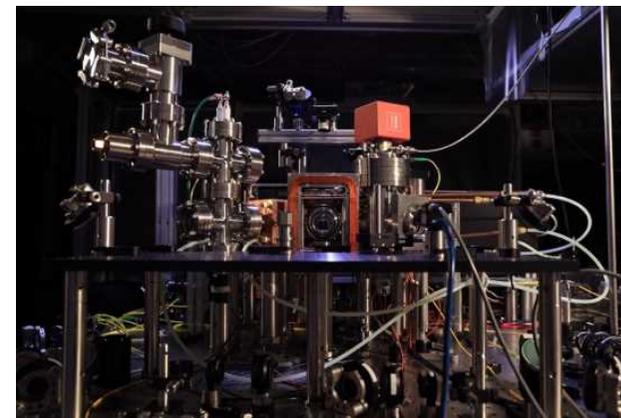


図3：原理実証ユニット

### 3. 今後の展開

ナノファイバー共振器 QED 方式量子コンピュータハードウェアの PoC 確立を目指します。また、複数ユニットの接続による分散化技術を開発するとともに、1ユニットに収容できる量子ビットの大規模化を進めます。

## 2. ナノファイバー共振器 QED 方式に適した量子誤り訂正理論

### 2023年度までの進捗状況

#### 1. 概要

実用的な問題サイズの計算を高精度で実行するためには、量子誤り訂正機構を備えた大規模な量子コンピュータが必要になります。量子誤り訂正機構とは、量子コンピュータのデータ保持を担う量子ビットに起こるエラーを随時訂正し、正しい情報を保持するための機構です。このような大規模化で考えなければいけないのが、物理プラットフォームの設計制約の中で構築可能な量子誤り訂正機構はどのようなものか、安定して量子誤り訂正機構が機能するためにはどのような精度のデバイスや制御装置が必要なのか、といった問題です。



図1：誤り訂正機構と物理プラットフォームの関係

本研究課題では、ナノファイバー共振器 QED 技術に基づく量子コンピュータ実装に合わせて上記問題を具体化し、最適な設計方針を打ち出すことを目的としています。

#### 2. これまでの主な成果

これまで我々は、(1) 共振器 QED に基づく量子計算デバイスの性能向上や最適設計の提案、(2) 共振器 QED に基づく誤り訂正機構の構築に必要な条件の解明、に取り組んできました。

(1) では、共振器にトラップされた原子量子ビット間でゲートを行う際の共振器の最適な設計の解明や共振器 QED による高性能光子生成器の提案、ゲート性能の理論的境界の評価を行いました。これらの研究は、デバイスの設計方針の指針を提示し、実験の精度をどこまで上げることが有益か、などの情報を実験側に提供しています。

(2) の研究は、安定した誤り訂正機構を構築するために実験でどのような条件を達成すべきかの指針を与えています。例えば、複数の共振器 QED ネットワーク構造を考え(図2)、それぞれについて安定した誤り訂正機構を実現するために必要な共振器性能を明らかにしました(図3)。こういった

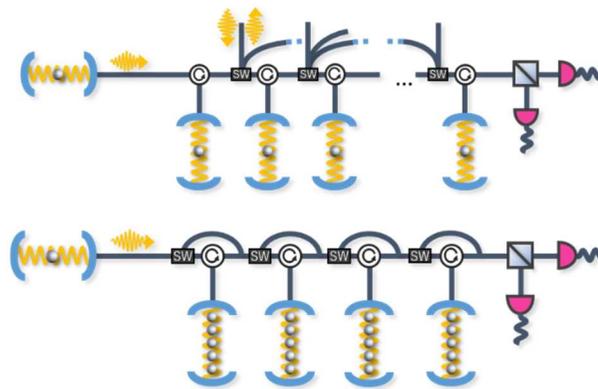


図2：様々な共振器 QED ネットワーク構造の検討

条件の提示は、大規模量子計算に必要な性能を効率的に達成するための指針となります。

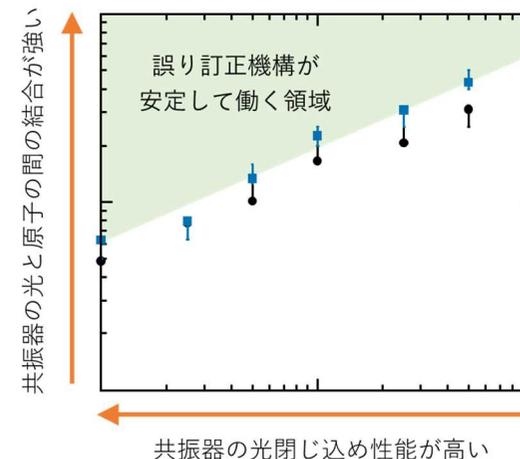


図3：安定した誤り訂正機構実現のために必要な共振器性能

#### 3. 今後の展開

今後は、引き続き量子デバイス性能を向上させる方法を検討するとともに、安定した誤り訂正機構に必要な共振器の性能をより緩和するためのアイデアや、実験での制約を満たしながらそういった機構を効率的に実現する設計を提案していきます。共振器 QED に基づく誤り訂正機構搭載型の大規模量子計算に対して具体的な設計指針を与える研究は世界でもまだ類を見ないのであり、今後より一層注目されていくと考えています。

研究開発課題

# 3. 周波数安定化光源システム

## 2023 年度までの進捗状況

### 1. 概要

量子コンピュータを社会実装するためには、高い稼働率で長時間安定に運用できるシステムの開発が必要です。ここで、レーザー冷却原子・イオンに基づく全てのハードウェア方式について、その安定な運用に必須なのが周波数安定化レーザー光源システムです。レーザー冷却原子・イオン実験では、原子・イオンの遷移に合わせたさまざまな波長のレーザーが必要です。

これらの光源はそれぞれの波長帯で一定波長に波長（周波数）安定化されており、位相雑音が極めて低く（スペクトル線幅換算で 1 Hz 以下）、かつ高い信頼性で長時間動き続ける必要があります。我々は、広い波長域で発振し、小型・長寿命な外部共振器型半導体レーザー（ECDL）を光源として選択しました。しかし一般に ECDL は、音響振動や温度変化等の外的擾乱に対する静的安定性が低く、制御なしでは大きな位相雑音を持ちます。そこで本課題では、我々の強みであるレーザーの低雑音化制御に加え、ECDL に外乱抑制のための様々な制御手法を取り入れることで小型・堅牢な低雑音光源システムを実現しようとしています。

### 量子コンピュータ用 周波数安定化レーザー

低位相雑音

長期安定動作

任意の波長に対応

図 1：量子コンピュータ用レーザーに求められる要素

### 2. これまでの主な成果

我々のグループでは以前から、光格子時計の冷却用および時計遷移観察用レーザーのために、光周波数コム（光コム）を用いた低雑音光源システムの開発を行ってきており、時計の一部として実戦投入されています。本プロジェクトではこれまでに、多くの波長で汎用的に使える ECDL 光源の開発、およびその低雑音化制御への適応性、および長期連続稼働の障害となる要因について調査してきました。

セシウム原子の D<sub>2</sub> 線波長である 852 nm において、光バンドパスフィルタを用いた ECDL を製作し、その発振モード特性、強度雑音、位相雑音、および周波数変調に対する応答特性の評価を行うとともに、光コムの一週波数成分に位相同期することに成功しました。このことは、このレーザーが線幅 1 Hz 以下になるように低雑音化制御することが可能であることを示しています。次に、長時間連続稼働に向け、ECDL を光コムに位相同期した状態でその制御信号の変動を観察したところ、環境、特に気圧変化の影響が大きいことを突き止めました。図 2 は、気圧と PZT に印可する制御電圧変動（≒未制御時のレーザー周波数変動）が強く相関していることを示しています。

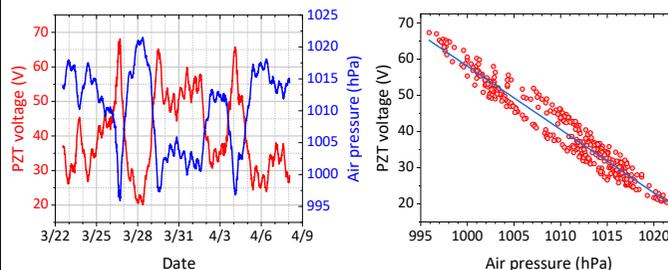


図 2：ECDL のレーザー共振器長制御用 PZT への印加電圧と気圧の時系列データ（左）、同 PZT への印加電圧と気圧の相関（右）

### 3. 今後の展開

誤り率低減のためには光源の低雑音化が特に重要になります。現在最も低雑音な光源は、光格子時計などの超精密光時計に用いられる線幅 1 Hz 以下の超低雑音レーザーです。そしてその波長変換に用いられている光コムが付加する位相雑音も極めて低く、超低雑音レーザーの位相雑音をほぼ悪化させることなく波長変換することができます。しかしながら、それでも誤り率を目標まで小さくするのに十分低雑音であるかわからないという試算もあります。

本プロジェクトでは今後、この超低雑音レーザーおよび光コム位相雑音を評価し、それが誤り率低減に十分であるか実証的に評価することを目指します。並行してさらなる低雑音化、長期連続稼働を可能にする堅牢化、そして多波長化・小型化を進めていきます。

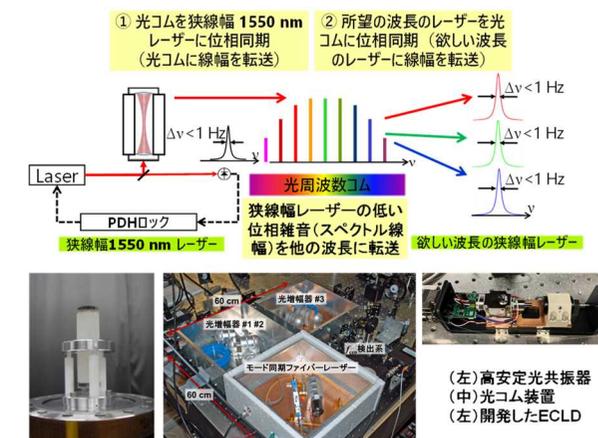


図 3：光コムによる低雑音波長変換の概念図

## 5. 社会実装

### 2023年度までの進捗状況

#### 1. 概要

ナノファイバー共振器 QED 技術は、大規模化に適した中性原子と、光ファイバーネットワークを介して分散化に適した光を用いたハイブリッドシステムを採用した、新しい形式の量子コンピューターハードウェアとして期待されています。この新形式の量子コンピューターシステムを社会に実装するためには、高稼働率と長期安定運用が不可欠です。そのため、ナノファイバー共振器 QED 系および周辺装置の技術的安定性を向上させ、産業や科学研究での実用化を目指します。また、クラウドベースのサービスを通じて量子コンピューティングパワーを提供することで、広範なユーザーがアクセス可能な量子計算サービスの提供が期待されます。

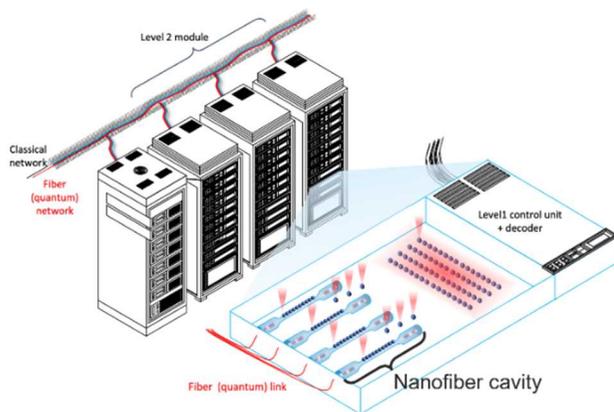


図 1：社会実装の概念図

#### 2. これまでの主な成果

高稼働率、かつ長期運用技術を確立するとともに、クラウドシステムの開発により本方式の NISQ 量子コンピューターを社会実装する目標に向け、クラウド用ハードウェアを設計すると共に、試作機開発を進めてきました。ナノファイバー共振器を核とし、中性原子を量子ビットとして用いる量子演算ユニット (QPU) と、異なる QPU 間を光ファイバーネットワーク経由で接続し、分散型の量子計算環境を実現する量子・古典インターフェイス機能の実装が不可欠です。これまでに、各 QPU をモジュール化することで、一元化された制御システムの考案・設計を行いました(図 2 参照)。これにより、システム全体の効率と信頼性の向上が期待され、原理実証機への導入、および性能検証を予定しています。また、長期運用に適した設計として、QPU を構成するレーザーや制御装置などのリモート制御化と自動安定化システムの試作機の開発・動作確認を完了しました。

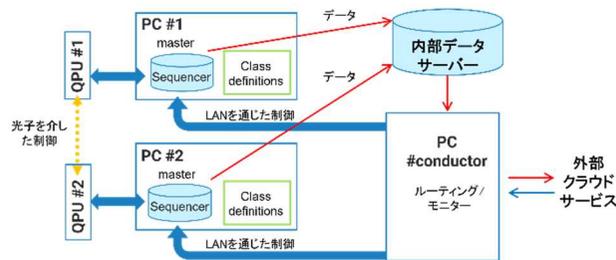


図 2：システム概要

#### 3. 今後の展開

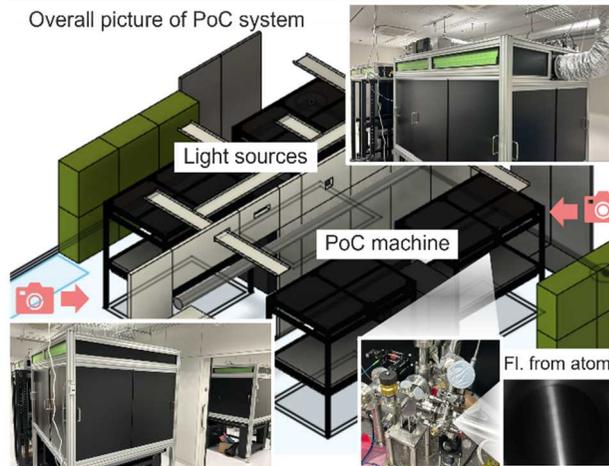


図 3：原理実証機の概要

今後は、これまでに開発されたハードウェアおよび周辺装置を効果的に管理し、統合的に制御するためのミドルウェアの開発に注力します。異なるハードウェアコンポーネント間の連携を円滑にし、システム全体の操作性と機能性を向上させることを目指します。また、新しいミドルウェアやハードウェアの改良点を実際の運用環境において試すために、原理実証機にこれらを随時導入し、実際の負荷がかかる状況でのバトルテストを実施します。これにより、理論だけではなく実践的な問題に対しても対応可能なシステムの安定性と性能の確認を実施します。