

令和 5 年 4 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18593

研究課題名（和文）連続変数光量子シミュレータで探る波束の量子干渉ダイナミクス

研究課題名（英文）Investigation of quantum dynamics of wave packets with a continuous-variable optical quantum simulator

研究代表者

武田 俊太郎（Takeda, Shuntaro）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：80737304

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多彩な物理・化学現象を解き明かす新しいシミュレーションツールの開発に挑んだ。具体的には従来、量子系の粒子数・スピンなどの離散変数のシミュレーションに用いられていた「量子シミュレーション」の手法を発展させ、連続変数（位置・運動量や振幅・位相など）のシミュレーションにも適用可能な新しい量子シミュレータを開発した。これにより、調和ポテンシャル中での波束の振る舞いをシミュレートすることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回開発したシミュレータをさらに発展させることで、従来の離散変数のシミュレータには不向きだった、連続変数に関わるシミュレーションが自然な形で実装できる。これにより、振幅や位相などの連続変数に関わる多彩な物理・化学現象の解明に大きく貢献しうる。さらに、連続変数は離散変数よりも高い自由度を持つため、比較的小規模な量子シミュレータでも高次元のシステムをシミュレート可能であり、光量子技術の実社会応用の1つになりうると期待される。

研究成果の概要（英文）：This project aimed at developing a new simulation tool to investigate various physical and chemical phenomena. Specifically, we developed a quantum simulator for continuous variables (position, momentum, amplitude, phase, etc.) by extending the conventional quantum simulator for discrete variables such as the number of particles and spins in quantum systems. With this simulator, we have succeeded in simulating the behavior of wave packets in harmonic potentials.

研究分野：量子光学

キーワード：量子シミュレーション 光量子情報処理 連続量量子情報処理

### 1. 研究開始当初の背景

磁性や超伝導などの物性、化学反応、光に対する物質の応答まで、身の回りのあらゆる物理・化学現象は量子力学の法則に支配されている。これらの現象の起源を解き明かす重要なアプローチの1つは、コンピュータシミュレーションにより量子系の振る舞いを数値計算することである。しかし、この計算は量子系の粒子数が増えると計算時間が指数関数的に増大するため、数十粒子程度の小規模な量子系しか扱えないことが多い。

近年、量子系を効率よくシミュレートする別の方法として、その量子系と同じハミルトニアンに従う別の人工的な量子系で模擬実験を行う「量子シミュレーション」の研究が進んでいる。例えば、固体中の電子の運動を、電子と同じハミルトニアンに従う冷却原子にマッピングしてシミュレートする実験が報告されている。他にもイオンや超伝導回路での量子シミュレーション実験の先例があるが、いずれも量子系の粒子数やスピンなど離散変数のシミュレートに限られる。この手法は連続変数(位置・運動量や振幅・位相など)が関わる現象のシミュレーションには適さず、適用範囲が制限されている。

そのような連続変数の情報を量子系で扱うには、典型的な量子ビットの手法ではなく、連続量の量子情報処理の手法を用いるのが自然である。研究代表者はこれまで、光の振幅・位相を用いた連続量の量子情報処理のための高効率演算技術を開発すると同時に、大規模化が可能な独自の光量子コンピュータ方式を考案・開発してきた。これにより、近年では比較的小規模な光量子情報処理が実現できるレベルに達している。この技術を利用することにより、連続変数の量子シミュレーションを実現できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、現状の離散変数のみに限定された量子シミュレーションの限界を突破するため、光を用いて連続変数を直接シミュレートする新しい量子シミュレータを提案し、その原理実証に挑んだ。本研究で、連続変数ならではの量子効果が初めてシミュレートできれば、連続変数量子シミュレータという新しい研究領域を切り拓く第一歩になると期待される。

本シミュレータが実現すれば、振幅や位相情報などの連続変数が関わる多彩な物理・化学現象の解明に大きく貢献しうる。例えば原子集団のコヒーレントな光放射現象や相互作用する振動子系における同期現象が効率よくシミュレートできる他、場の量子論における散乱振幅の計算が指数関数的に高速化することも知られている。

さらに、連続変数は離散変数よりも高い自由度を持つため、比較的小規模な量子シミュレータでも高次元の量子系をシミュレートでき、量子技術の近未来の実社会応用の1つになりうるとも考えられる。離散変数、例えば量子ビットの量子情報処理の場合、多数の量子ビットを用いて高次元の情報を処理しないと古典情報処理は超えられない。一方、連続変数ではたった1モードの無限次元の自由度を生かして多くの情報量を処理できる。このため、連続変数の量子シミュレータは小規模なものでも実社会応用できる情報処理性能を発揮しうる可能性がある。このため、本研究は連続量の光量子情報処理技術を、近未来の実用的アプリケーションへとつなげる道筋の1つとも考えられる。

### 3. 研究の方法

本研究の究極的な目標は、光を用いて任意のハミルトニアンをシミュレートできる連続変数量子シミュレータの実現である。今回は第一歩として、シンプルかつ量子力学的効果がみえる現象である「調和ポテンシャル中における1粒子のガウス型量子波束のダイナミクス」をシミュレートすることにした。波束は、不確定性原理によって位置と運動量の間量子揺らぎを持ちながら、調和ポテンシャルの坂を下るように運動していく様子が確認できるはずである。

このため、以下のような実験システムを開発した(図1)。まず、波束の初期状態を準備するため、光パラメトリック発振器を開発し、そこからスクイーズド状態を出力した。スクイーズド状態は、1粒子の位置と運動量間の揺らぎについて、不確定性関係を保ちながら、片方の揺らぎを小さくした状態に相当する。今回開発したシステムでは、光パラメトリック発振器に用いるポンプ光の強度を適切に選ぶことで、揺らぎの度合いを調整し、シミュレートしたい好きな波束を準備することができる。

次に、初期状態の光に、時刻 $t$ でのあるハミルトニアン $H$ のもとでの時間発展を表すユニタリ変換 $\exp(-iHt)$ を施す光回路を実現した。調和ポテンシャルの場合、実現すべきユニタリ変換は1モードガウス型ゲートと呼ばれる操作に相当し、それは位相シフト操作とスクイーズ操作を組み合わせて実現できることが知られている。さらに、今回は波束のダイナミクスを調べるために $t$ を変えながらゲートを実装できる必要があるため、光回路をプログラマブルに構築した。これにより、任意の時刻における時間発展を実装できる光回路が実現した。

さらに、終状態の波束の状態を測定するため、ホモダイン測定システムを構築した。同じ条件で繰り返し上記のシステムを動作させ、終状態の位置の分布を測定することで、終状態の波束の

確率分布を知ることができる。

以上のセットアップにより量子波束のダイナミクスが正しくシミュレートできることを確認できれば、連続変数量子シミュレータの基本原理が実証されることになる。

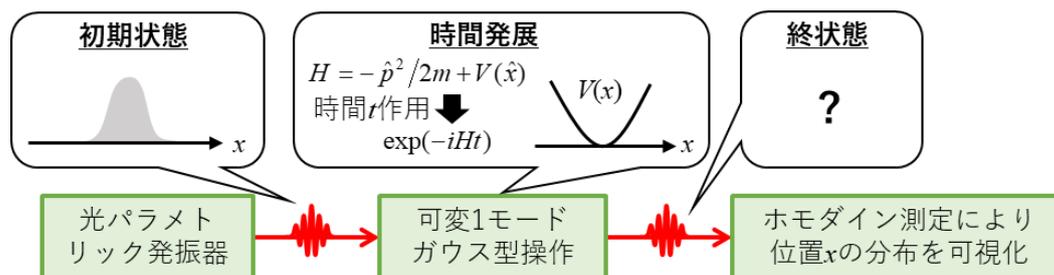


図1：研究方法

#### 4. 研究成果

完成したシステムを用いて、実際に様々な時間ステップ  $t$  における波束の終状態を測定し、期待通りの時間発展がシミュレートできることを確かめた。この結果は、理論予測とも良く一致した。時間発展により、波束の位置の量子揺らぎが、真空の量子揺らぎよりも大きな状態から小さい状態へと移り変わる様子も観測され、量子的な領域でシミュレーションできていることが明らかになった（結果の具体例は図2の通り）。

さらに、この調和振動子中での波束のダイナミクスを応用することにより、与えられたポテンシャル  $V(x)$  の最小点の位置  $x$  を探索するような、「最小化問題を解く」という用途にも本システムが利用できることが分かった。この用途では、初期状態を  $x$  成分の揺らぎが最も大きくなる状態として準備し（アンチスクイーズした状態）、時間発展の時間幅  $t$  を変えながら繰り返しシミュレーションを繰り返す。最終的に波束の分布が最もポテンシャルの最小点付近に集中するように時間幅  $t$  を最適化することで、最小点の位置が探索できた。以上の成果を論文にまとめ、現在投稿中である（arXiv:2206.07214）。また国際学会でも本成果を口頭発表した。

今回の成果は、1粒子のガウス型波束が調和ポテンシャル中で運動する場合の、もっとも単純な連続量の量子シミュレーションであると言える。しかし、本研究を拡張すれば、原理的には任意のハミルトニアンをシミュレートでき、さらには相互作用する多粒子系への拡張も可能になる。また、光特有の技術で他の量子シミュレータにはない全く新しい機能を提供できる可能性がある。今後は、この量子シミュレータをさらに発展させ、より高度なシミュレーションへと展開していく予定である。

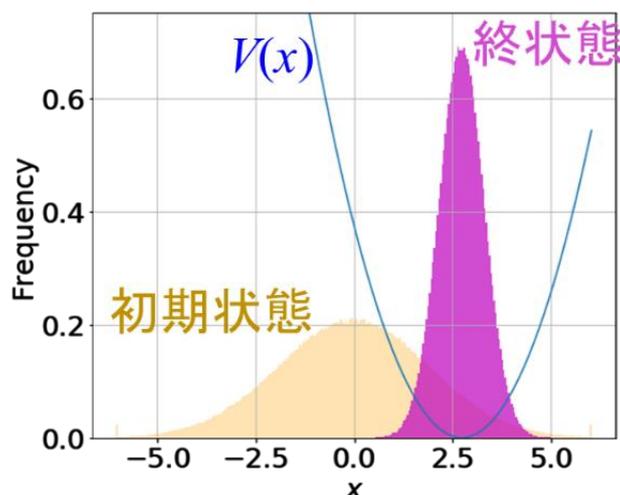


図2：シミュレーション結果の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 0件）

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>榎本雄太郎, 穴井啓太郎, 武田俊太郎     |
| 2. 発表標題<br>1モードガウス型光量子計算回路のパラメータ更新 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第77回年次大会         |
| 4. 発表年<br>2022年                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>武田俊太郎                        |
| 2. 発表標題<br>ループ型光量子コンピュータ                |
| 3. 学会等名<br>第44回量子情報技術研究会 (QIT44) (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2021年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>武田俊太郎                         |
| 2. 発表標題<br>量子コンピュータの現状と展望                |
| 3. 学会等名<br>応用物理学会 第49回薄膜・表面物理セミナー (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2021年                          |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>武田俊太郎                     |
| 2. 発表標題<br>光量子コンピュータの基礎から最前線まで       |
| 3. 学会等名<br>川崎市主催 ナノテクノロジーセミナー (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2021年                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>武田俊太郎                       |
| 2. 発表標題<br>光量子コンピュータの現状と展望             |
| 3. 学会等名<br>2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年                        |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>武田俊太郎                            |
| 2. 発表標題<br>光量子コンピュータの現状と展望                  |
| 3. 学会等名<br>2021年度量子情報工学研究会 量子情報工学の最前線（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>武田俊太郎               |
| 2. 発表標題<br>光量子コンピュータの現状と展望     |
| 3. 学会等名<br>第142回サイテックサロン（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年                |

|                                 |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名<br>武田俊太郎                |
| 2. 発表標題<br>光量子コンピュータの現状と展望      |
| 3. 学会等名<br>第40回電子材料シンポジウム（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年                 |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>武田俊太郎                                      |
| 2. 発表標題<br>光量子コンピュータの現状と展望                            |
| 3. 学会等名<br>東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構設立15周年記念シンポジウム（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年                                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>武田俊太郎                              |
| 2. 発表標題<br>量子コンピュータのハードウェア開発最前線               |
| 3. 学会等名<br>企業研究会 第16期ソフトウェア開発マネジメント交流会議（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>武田俊太郎                        |
| 2. 発表標題<br>光量子コンピュータの基礎と研究開発動向          |
| 3. 学会等名<br>2021年度 第4回 光材料・応用技術研究会（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2022年                         |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|