

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05596

研究課題名(和文) 光格子変調による原子波束の選択的量子操作

研究課題名(英文) Selective quantum manipulation of atom wave packet by amplitude modulation of the optical lattice

研究代表者

渡辺 信一 (Watanabe, Shinichi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：60210902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー光で形成した光格子に極低温原子を捕らえ、レーザー振幅を変調することで、原子波束を操作する技術が確立されている。本研究では確率論的な振幅変調によって、原子を特定の励起バンド状態へ選択的に励起する実験手法を量子シミュレーションによって調べ、ほぼ100%の確率で標的状態を形成する最短時間パルス配列を見出した。また、原子の量子もつれ状態形成については、ボース・ハバード模型を対象に、機械学習の畳み込みニューラルネットワークを密度行列の計算に応用し、有限温度密度行列計算の優れた実施例を示した。これらの成果は、量子情報や量子コンピューターに象徴される高度な量子系の制御技術開発において有用である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

20世紀初頭に量子論が完成したのち、研究の対象は積極的に量子系を操作する技術の開発へと進んだ。特に、レーザー冷却された極低温原子は、量子情報や量子コンピューターなどのキーワードに象徴される高度な量子技術へと応用された。光格子は原子を捕獲し、その状態を制御する目的で導入されて久しく、本研究では特に原子波束の運動量状態を制御する手段として有効に用いられた。実験においても、量子操作を駆使した原子干渉計は高精度で重力加速度を計測する技術へと発展した。本研究はこのような高度な技術に関わる量子現象の理論的研究および関係する実験技術の開発に貢献するもので意義がある。

研究成果の概要(英文)：Techniques are now available for manipulating the wave packet of ultracold atoms by first trapping them in an optical lattice which is formed by counter-propagating laser beams, and then by modulating the laser amplitude. In this study, we investigated the experimental method to selectively excite an atom to a specific excited-band by stochastic amplitude modulation, and found the shortest pulse sequence that forms a target state with almost 100% certainty. Regarding the formation of quantum entangled states of atoms, a convolutional neural-network employed in machine learning was applied to the calculation of the density matrix for the Bose-Hubbard model, and an excellent example of finite-temperature density-matrix calculation was demonstrated. These results are useful in the development of advanced quantum system-control technology as symbolized by quantum information and quantum computers.

研究分野：原子・分子・光物理学

キーワード：光格子 原子波束 励起バンド状態 選択的励起 ニューラルネットワーク ボース・ハバード模型 原子干渉計 フラッグ回折

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

20世紀初頭における様々な量子現象の発見とその理論的解釈を通じて、1930年代には量子論が完成した。20世紀後半から現在にかけては積極的に量子系を操作する技術の開発が進み、量子情報、量子コンピューター、量子シミュレーターなどのキーワードに象徴される高度な量子技術の展開が注目を集めている。原子系においてはレーザーの開発を通じてレーザー冷却および蒸発冷却された系を用いた量子操作が盛んに研究されてきた。本研究テーマである“光格子変調による原子波束の選択的量子操作”はそのような量子操作に関わる量子現象の理論的研究および関係する実験技術の開発を目的としている。

要求される技術は系の量子コヒーレンス(干渉性)が維持されている時間内で、量子ビット(qbit)を操作することである。対象とするqbitの定義は系の特性に依存する。通常、単一qbitの操作は2準位系の操作で行い、qbit対の操作(もつれ状態)はqbit間の相互作用を用いて行われる。qbitの物理的な実装とその操作については、光子、原子、イオン、ジョセフソン接合などを用いた複数の系が提案されてきた。本研究は、極低温原子(BEC)をレーザー光の干渉で作る光格子に捕らえて、格子の深さを変調(振幅変調)する、または位相を変化させる(位相変調)ことで原子の重心運動を制御し、特定の状態の原子占有率を熱的に励起せずに操作する方法を扱う。原子が2準位系ならこれをqbitにとり、その有効スピンをを用いたspin-spin相互作用によってentanglementを操作できる(例えばIsingモデル)。しかし、ここでの主眼は、状態占有率の制御による初期状態の設定である。また、entanglementのモデルとしては、原子間の斥力による多体効果を用いるボース・ハバード模型を扱う。この理解のもとで、対象とする原子はボゾンとする。

本研究では、主に多数のqbitの初期化を念頭に行われた実験に刺激を受けて、渡辺が山越の協力のもとで光格子変調を用いた波束の選択的操作の理論シミュレーションを行った。もつれ状態に関連する相互作用の研究としては、斎藤がボース・ハバード模型にニューラルネットワークの技術を応用して量子多体問題の新しい解析方法を考察した。中川は1-qbitの操作に相当する原子重力加速度計の実験の開発を進め、量子操作を可搬な技術に高めるための研究を行った。

2. 研究の目的

(1) 渡辺は山越の協力のもとで、緩やかな調和振動子型トラップポテンシャルの掛かった光格子中に冷却原子が置かれているという設定で、原子波束の時間発展を解析した。エネルギーバンド状態の中で時間発展する波束の特徴を理解することを一つの目的とした。中国の実験グループ[Yueyang Zhai *et al.*, Phys. Rev. A 87, 063638 (2013)]が確率的に振幅変調パルス当てて、特定の励起バンドをほぼ100%の確率で生成したことを受けて、そのメカニズムを理解し最小時間で特定の初期状態を準備する振幅変調パルス列を求めることを目的とした。

(2) 斎藤は、光格子中のボース粒子系の量子多体状態を求める数値計算手法の開発を目的とした。この系の量子多体状態はボース・ハバード模型で近似的に記述されるが、ボース・ハバード模型を解析する方法はこれまで、厳密対角化や密度行列繰り込み群、平均場近似など限られた方法しかなかった。本研究では、機械学習と人工ニューラルネットワークを用いた新しい手法の開発を目的とした。

(3) 中川は、原子波のブラッグ回折による大きな運動量移行を用いて、高い検出感度が実現可能な原子干渉計の開発を目指した。

3. 研究の方法

初期状態を設定するにあたって、光格子中の原子の運動によるバンド状態の占有率を考える必要がある。1粒子問題についてはボゾン原子系とフェルミ原子系の理論的取り扱いに大きな差異はない。qbitとしては1サイトを最大1個の原子が占有する2準位系フェルミ原子がqbitの操作の対象としては理想的であるが、本研究の関心が占有率のみにあることから、簡素化のために、ボゾン原子を対象として基本的な性質を調べた。

(1) 渡辺らは、様々な初期条件を発生させ、TDSE法(時間に依存するシュレーディンガー方程式を数値的に忠実に解く手法)によってシュレーディンガー方程式の解を求め、最小時間で目的の指定した励起バンドを生成する変調パルス列を総当たりに求める。

(2) 斎藤の研究では、人工ニューラルネットワークを量子多体状態の変分波動関数として用いた。ニューラルネットワークへの入力を粒子の配置、出力をそれに対応した波動関数の値とし、求めたい波動関数が出力されるようにネットワーク最適化を行う。この手法は近年スピ系で提案されたものだが、それをボース粒子系の問題に拡張する。

(3) 中川は、レーザー冷却用の半導体レーザーの開発および真空チャンバーの製作を行う。原子波のブラッグ回折による大きな運動量移行によって、高い検出感度を持つ原子干渉計を組み立てる。

4. 研究成果

(1) 渡辺は研究協力者である山越の協力を得て、まず様々な波束の中から周期性を持つものを見つけ出し、詳しく調べた。典型的な例は4つのバンドを跨ぐことから4バンド周期波束(4B PWP)と命名した。図1は4B PWPが振幅変調周期で共鳴的に遷移する箇所を擬運動量空間と共役の実空間で示したものである。この波束は極めて安定であるので、格子のサイトへのアクセスのタイミングを制御する上で有用である。また、さらに詳しい分析によって、この軌道は2つのフロケ状態の線形結合として評価でき、両者の相互作用を変えることで挙動を制御することも分かった。

次に、確率論的に特定の励起バンドへ遷移させる励起するパルス列を求めた。光格子は2色のレーザー光による超格子を想定した。目標のパルス列の中で99%を超える選択性で第1励起バンドへの遷移を誘起するものを見出した。励起に要する時間も100 μ 秒でこれまで知られるものよりも短時間で励起が完了することが示された。なお、この系には2つのバンドが縮退するDirac点が存在する。Dirac点近傍では超安定でかつコヒーレンスと等時性を長時間維持する波束が形成されることも示した。

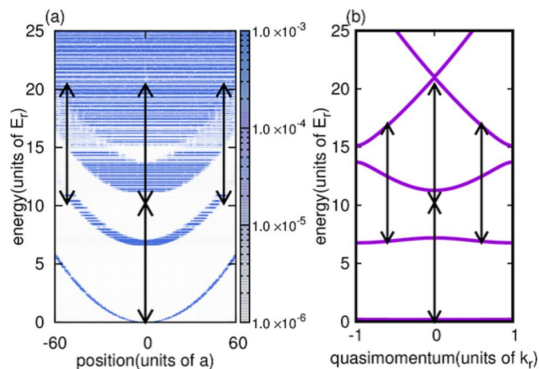


図1. 周期軌道4B PWPの実空間(左)と擬運動量空間(右)での遷移点を矢印で示す。文献[1]より

[1] T. Yamakoshi, F. Saif, and S. Watanabe, Phys. Rev. A 97, 023620 (2018)

(2) 斎藤は、ボース・ハバード模型の基底状態をニューラルネットワークによって求める研究を行った。基底状態を求めるには、系のエネルギーをコスト関数として、最急降下法などでネットワークパラメータを最適化し、コスト関数を最小化する。まず、最も単純な、隠れ層が一層の全結合ネットワークを用いて数値計算を行ったところ、従来のグッツウィラー近似よりも高い精度で基底状態が求まることを確かめることができた[2]。次に、隠れ層の数が複数の全結合ネットワークや畳み込みニューラルネットワークを用いて同様の計算を行った[3]。その結果、全結合ネットワークの場合は隠れ層の数を増やすとネットワークが複雑化しすぎて最適化の精度が上がらないことが明らかになった。これに対して、畳み込みニューラルネットワークを用いると、複数の隠れ層の場合にも最適化はスムーズに進み、全結合ネットワークに比べて高い精度が得られることがわかった。これは、畳み込みニューラルネットワーク内でパラメータ数が少数に抑えられ、効率的に系の状態を表現できることによる。

さらに、ボース・ハバード模型の有限温度状態を得る新しい方法を開発した[4]。有限温度状態は密度行列で表現されるため、行と列に対応した2チャンネル入力の3層畳み込みニューラルネットワークを用いた。無限大温度の状態を表す自明な密度行列から出発し、虚時間発展をさせることで有限温度状態に達するという方法を採用した。厳密対角化によって得られた結果と比較して、高い精度で有限温度状態が得られていることがわかった。

[2] H. Saito, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 093001 (2017).

[3] H. Saito and M. Kato, J. Phys. Soc. Jpn. 87, 014001 (2018).

[4] N. Irikura and H. Saito, Phys. Rev. Res. 2, 013284 (2020).

(3) 中川はまず光格子ポテンシャル中の原子干渉計の理論的な解析を行った。またこれを基に原子干渉計の実験を行うため、レーザー冷却用の半導体レーザーの開発および真空チャンバーの製作を行った。そして、主に原子波のブラッグ回折による大きな運動量移行を用いて、高い検出感度が実現可能な原子干渉計に関して考察を行い、実験で検証するため、レーザー冷却したRb原子の原子干渉計の実験装置を開発した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamakoshi Tomotake, Watanabe Shinichi	4. 巻 99
2. 論文標題 Fast and selective interband transfer of ultracold atoms in bichromatic lattices permitting Dirac points	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 013621 ~ 013621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.013621	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Saito Hiroki	4. 巻 87
2. 論文標題 Method to Solve Quantum Few-Body Problems with Artificial Neural Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074002 ~ 074002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.074002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamakoshi Tomotake, Saif Farhan, Watanabe Shinichi	4. 巻 97
2. 論文標題 Significantly stable mode of the ultracold atomic wave packet in amplitude-modulated parabolic optical lattices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 023620/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.023620	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Masaya Kato, Xiao-Fei Zhang, and Hiroki Saito	4. 巻 95
2. 論文標題 Vortex pairs in a spin-orbit coupled Bose-Einstein condensate	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 043605/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.043605	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Naoki Irikura and Hiroki Saito	4. 巻 2
2. 論文標題 Neural-network quantum states at finite temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013284/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.013284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 渡辺 信一
2. 発表標題 高温から低温に至る原子と光の物理と計算
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 入倉直輝, 衛藤雄二郎, 平野琢也, 斎藤弘樹
2. 発表標題 スピン1・スピン2BECの混合系における基底状態の相図
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山越智健, 渡辺信一
2. 発表標題 振幅変調された光格子および調和トラップ中での安定な回帰波束
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Yamakoshi and S. Watanabe
2. 発表標題 Quantum revivals of ultracold atomic wave packets in an amplitude-modulated parabolic optical lattice
3. 学会等名 The 24th Congress of the International Commission for Optics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤雅也, Xiao-Fei Zhang, 斎藤弘樹
2. 発表標題 スピン軌道相互作用するBECにおける量子渦対
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石川悠, 羽石暁, 山崎智樹, 吉田佑策, 中川賢一
2. 発表標題 可搬型原子重力加速度計の開発I
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 羽石暁, 石川悠, 山崎智樹, 吉田佑策, 中川賢一
2. 発表標題 可搬型原子重力加速度計の開発II
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 入倉直輝, 斎藤弘樹
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた有限温度系の量子多体状態の計算
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	斎藤 弘樹 (Saito Hiroki) (60334497)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授 (12612)	
研究分担者	中川 賢一 (Nakagawa Ken'ichi) (90217670)	電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授 (12612)	
研究協力者	山越 智健 (Tomotake Yamakoshi)		