

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：63903

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K23431

研究課題名（和文）冷却原子の個別観測と事後選択的統計処理に基づく開放量子多体系の研究

研究課題名（英文）Investigation of open quantum many-body systems based on the individual measurement of cold atoms and the post-selective statistical processing

研究代表者

富田 隆文 (Tomita, Takafumi)

分子科学研究所・光分子科学研究領域・特任助教

研究者番号：50846392

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、光ピンセット配列中の冷却原子気体を用いて、個別観測と事後選択的統計処理に基づく開放量子多体系の理解を目標とした。初めに、本実験を行うための装置を開発し、原子間距離を精密に制御した大規模光ピンセット配列中に、振動基底状態まで冷却されたルビジウム原子を導入し、個別観測することに成功した。さらに、光ピンセットが原子に対して及ぼす散逸の影響を定量的に評価した。また、2原子をリユードベリ状態へと励起し、原子間にナノ秒スケールの超高速相互作用を誘起させることに成功した。これらの要素技術を統合することによって、今後開放量子多体系のダイナミクスを追跡することが可能になる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発された要素技術を組み合わせることで開放量子多体系のダイナミクスを追跡することで、近年発展を見せる非エルミート系理論の実験的検証や、統計的混合状態では見られない非従来型ダイナミクスの観測が可能になる。また今回実現した光ピンセット配列系は、量子コンピュータ技術として応用可能である。実際、超高速原子間相互作用は、2量子ビット操作の資源として使うことができることから、将来の量子コンピュータ社会実装へとつながり得る。また、光ピンセットに関する光学技術の開発によって得られた成果は、冷却原子実験に対してのみならず、光ピンセットを用いる他の研究分野に対しても有用な知見を与えると期待される。

研究成果の概要（英文）：The goal of this study was to understand open quantum many-body systems based on the individual measurement and post-selective statistical processing using cold atoms in an optical tweezers array. First, we developed the experimental apparatus and succeeded in loading rubidium atoms, which are cooled down to the motional ground state, in a large-scale optical tweezers array with precisely controlled interatomic distances. Then, we quantitatively evaluated the effect of dissipation from the light of optical tweezers on the atoms. We also succeeded in exciting two atoms to the Rydberg state and inducing nanosecond-scale ultrafast interactions between the atoms. The integration of these elemental technologies will enable us to investigate the dynamics of open quantum many-body systems in the future.

研究分野：冷却原子

キーワード：冷却原子 開放量子系 光ピンセット 光学

1. 研究開始当初の背景

量子系において散逸過程は、固体物質から量子ビット系に至るまで普遍的に現れる現象である。周囲の環境との相互作用によって生じる散逸過程は、励起状態からの緩和や粒子ロスに代表されるような、異なる量子状態へと不連続的に移行変わる量子ジャンプを引き起こす。これまで、単一原子 2 準位系や光共振器中の光子などの少量量子系については、個々の量子ジャンプを追跡する実験的研究が行われてきたのに対し、量子多体系については、個々の量子ジャンプに着目したダイナミクス = 量子トラジェクトリには注目せず、系はあらゆる量子ジャンプを積算した統計的混合状態として時間発展するという取り扱いが一般的であった[1]。

散逸の結果生じた異なる量子ジャンプに応じて状態を分類し、量子トラジェクトリを追跡できる場合、そのダイナミクスは統計的混合状態のダイナミクスと本質的に異なる振舞いを見せると期待される。この新しい枠組みは、近年理論面において非平衡統計力学の分野で発展を見せている。一方で、それらを検証すると同時に新たな示唆を与えるような実験系の構築には至っていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、冷却原子気体を用いて、量子多体系に対して散逸が及ぼす影響を単一原子レベルで観測し結果を事後選択的に解析することで、統計的混合状態では捉えることができない量子トラジェクトリごとのダイナミクスを実験的に明らかにすることである。光ピンセット配列による効率的な原子のトラップと冷却により、高速にデータを取得することで、実現確率が極めて低いイベントをサンプリングし統計的に解析する。これにより、開放量子多体系のダイナミクスを統計的混合状態で記述するという従来研究されてきた枠組みを超え、散逸が及ぼす非自明な効果を解明する。また、近年理論的に盛んに研究が進められている非エルミートハミルトニアンに従うダイナミクスを実験的に初めて実現することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 光ピンセット配列を用いた冷却原子実験系の開発

初めに、本研究を行うための実験装置を開発した。光ピンセット配列の導入および原子の個別観測が可能な真空チャンバーを構築し、単一ルビジウム(Rb)原子を導入した。磁気光学トラップで捕獲された熱的な原子を光ピンセットへと導入するため、原子の熱的な振動が大きい。熱的な振動は、本研究で想定している原子のサイト間のトンネリングに乱雑さを生むため、ラマンサイドバンド冷却を実装した。

(2) 光ピンセット配列の精密制御及び光プロファイル測定手法の開発

(1)で開発した光ピンセット配列を用いた実験系で行う実験の結果を、理論的予測と定量的に比較できるよう、光ピンセット配列のポテンシャルは可能な限り精密に制御する必要がある。そこで、原子間距離に対応する、光ピンセットトラップ間の距離の制御手法を開発した。また、実現した光ピンセットの光プロファイルの測定手法を開発した。

(3) 光ピンセット中の原子の散逸メカニズムの解明

原子が受ける散逸の影響を定量的に評価した。具体的には、光ピンセット光自体が原子に対して及ぼす光散乱により、原子の超微細構造状態がどのように変化するか定量的に評価した。

(4) 光ピンセット中の原子間にはたらく長距離・超高速相互作用の制御

(2)で実現された精密制御下での光ピンセット配列を用いて、原子間の長距離相互作用の実現及びその制御を行った。これにより、個々の原子が独立して存在する量子系ではなく、互いが相互作用する量子多体系の実現及びその定量的予測が可能となる。

4. 研究成果

(1) 光ピンセット配列を用いた冷却原子実験系の開発

初めに、本研究を行うための実験装置を開発した。原子の個別観測を可能とする真空容器、光ピンセット構築及び単一原子観測に用いる高開口数(NA=0.75)対物レンズ光学系を開発し、それらを統合した冷却原子系を開発した。高開口数であることに伴い、光学系の微調および収差の定量的評価・除去のための特殊なマウント構造を設計・開発した。この装置を用いて、冷却 Rb 原子を捕獲することに成功した。さらに、空間光変調器を用いて波面成形されたレーザー光により光ピンセット配列を形成し、最終的に 800 サイト・400 原子という世界最大レベルの大規模配列を形成することに成功した。個々の原子からの蛍光を独立に測定可能な個別観測にも成功した。また、原子の冷却およびイメージングを行うために照射するレーザー光の各種パラメータを最適化することにより、1 回の実験が 100ms 程度で完了する高速データ取得を実現した。これは、量子縮退気体を光格子へ導入して行うこれまでの冷却原子量子開放多体系実験[2]と比べて 2 桁高速であり、大規模なデータを取得し統計的に事後処理を行うという本研究にとって最適な系である。

さらに、光ピンセットポテンシャルの振動基底状態への冷却のためのラマンサイドバンド冷却の実装に成功した。光ピンセット光軸方向と動径方向の両方に適用し、平均振動量子数 $n=0.1$

程度まで冷却した。

(2) 光ピンセット配列の精密制御及び光プロファイル測定手法の開発

空間光変調器を駆使して個々のトラップをガウシアンビームの高次モードであるエルミート・ガウシアンビームに変えることで、各トラップを2個で1組のペアトラップに分割し、世界最小レベルの約1.2ミクロン間隔で多数の原子を配置することに世界で初めて成功した(図1)。光ピンセットトラップを可能な限り近接させることは、本研究で想定していた、光ピンセットトラップ間の原子間のトンネリングを実現するうえで重要であり、その要素技術を確立したと言える。

また、このようなミクロンスケールで空間的に変調されている光パターンは、光学系の収差等で容易に設計パターンから崩れてしまう。このため、原子位置での光パターン形状をその場観測することが重要である。そこで、光ピンセット中の単一原子をプローブとして、原子付近に用意した光パターンの空間プロファイルを撮像する手法を開発し、光パターンにより生じるライトシフトに起因した $|F, m_F=1, 0\rangle \leftrightarrow |2, 0\rangle$ 時計遷移周波数の変調を、光パターンに対して原子位置を相対的に走査しつつ測定することにより、原子付近に用意した光パターンの空間プロファイルを撮像することに成功した(図2, 論文準備中)。走査プローブである単一原子を光ピンセットポテンシャルの振動基底状態まで冷却し、原子波動関数の空間広がりを30nm程度まで抑えることで、回折限界を超えた分解能での撮像を可能にした。

(3) 光ピンセット中の原子の散逸メカニズムの解明

光ピンセット中に捕捉された原子が受ける散逸を定量的に評価した。当初の計画では、散逸を誘起するレーザー光(散逸光)を別途照射することで人工的に原子ロス等の散逸を加えることを想定していたが、散逸光が無い状態でも、光ピンセット光自体が原子に対して光散乱を与え散逸を誘起していることが明らかになった。したがって、これを定量的に明らかにすることを目標とした。Rb原子の電子基底状態 $5S_{1/2}$ の超微細構造状態 $|F=2, m_F=0\rangle$ 、 $|F=1, m_F=0\rangle$ を2準位系とし、光ピンセット光自体が原子へ与える光散乱レートおよびコヒーレンス時間 T_1, T_2 を測定した。

(4) 光ピンセット中の原子間にはたらく長距離・超高速相互作用の制御

独立した量子系ではなく、互いが相互作用する量子多体系を作り出すために、原子間の相互作用を誘起する必要がある。(2)で実現した、原子間距離を1.5ミクロンから5ミクロンまで自由に調節可能な光トラップ手法を用いて、2原子を1ミクロン程度にまで近接させ、両方をリユードベリ状態へと励起することで、2原子間のナノ秒スケールの超高速相互作用を観測することに世界で初めて成功した(図3)。2個の単一原子の双方をパルスレーザーにより高効率にリユードベリ励起し、共鳴型双極子-双極子相互作用(Förster共鳴)を誘起することで、ナノ秒スケールのエネルギー移動を制御し、観測した[3](論文投稿済み)。

本研究で達成された成果は、本研究所期の目的を実現するうえでの要素技術であるが、それらを統合した開放量子多体系におけるダイナミクスの観測には至らなかった。一方で、当初予想していなかった光プロファイル撮像技術の開発、光ピンセット自体が与える散逸の定量的評価、超高速相互作用の実現などの豊富な成果を生み出すことにつながった。

<引用文献>

- A. J. Daley *Advances in Physics* **63**(2), 77 (2014).
- T. Tomita *et al.*, *Science Advances* **3**, e1701513 (2017).
- Y. Chew *et al.*, arXiv: 2111.12314.

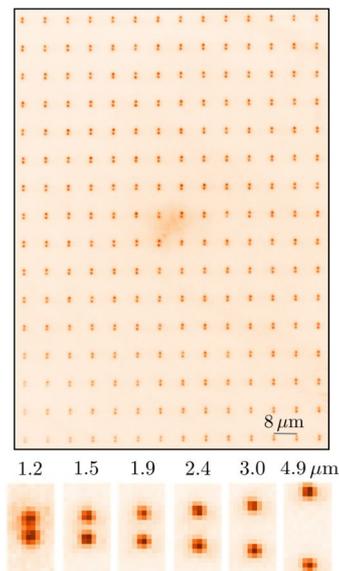


図1. 高次モードを用いたペアトラップ配列にトラップされた原子からの蛍光画像(平均画像)

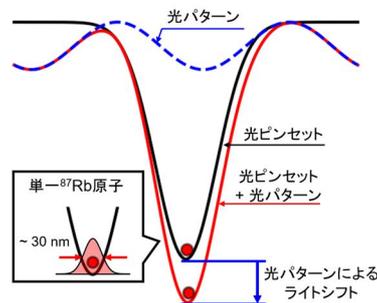


図2. 光ピンセット中の単一原子をプローブとした光パターンプロファイル撮像手法の概念図。光パターンにより追加で生じるライトシフトを測定する。

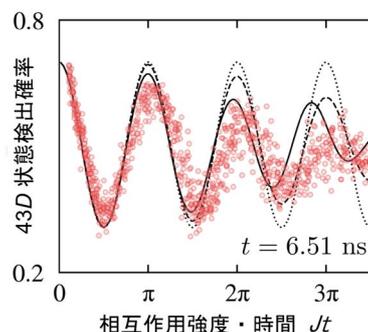


図3. リユードベリ原子間の超高速相互作用。相互作用強度に応じて、特定のリユードベリ状態(43D状態)の検出確率が振動する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 富田隆文, Rene Villela, 周諭来, Tirumalasetty Panduranga Mahesh, 酒井寛人, 西村啓佑, 安藤太郎, Sylvain de Leseleuc, 大森賢治
2. 発表標題 光ピンセット中の単一原子を用いた超高解像度光プロファイル撮像
3. 学会等名 日本物理学会2022年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rene Villela, T. Tomita, Y. Chew, Mahesh T.P, S de Leseleuc, K Ohmori
2. 発表標題 Coherence time of the spin degree of freedom of neutral atoms in optical tweezers
3. 学会等名 日本物理学会2022年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 周諭来, 富田隆文, Mahesh Tirumalasetty Panduranga, 素川靖司, Sylvain de Leseleuc, 大森賢治
2. 発表標題 2つの単一リュードベリ原子間におけるナノ秒スケールの超高速エネルギー交換
3. 学会等名 日本物理学会2022年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sylvain de Leseleuc, Takafumi Tomita, Chew Yeelai, Tirumalasetty Panduranga Mahesh, Seiji Sugawa, Kenji Ohmori
2. 発表標題 Raman-sideband cooling of 800 atoms to the quantum ground-state of optical tweezers
3. 学会等名 日本物理学会2022年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 周諭来, Sylvain de Leseleuc, 富田隆文, Mahesh Tirumalasetty Panduranga, 孟增明, Vineet Bharti, 素川靖司, 武井宣幸, 岡野泰彬, 千葉寿, 酒井寛人, 大林寧, 瀧口優, 安藤太郎, 大森賢治
2. 発表標題 冷却Rb原子の無欠陥な任意配列の実装
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富田隆文
2. 発表標題 Rydberg原子配列で広がる量子シミュレーション・コンピューテーションの可能性
3. 学会等名 第2回冷却原子研究会「アトムの会」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富田隆文
2. 発表標題 リュドベリ原子量子シミュレータ・コンピュータ
3. 学会等名 量子情報春の学校2021(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Tomita, S. de Leseleuc, Y. Chew, M. T. Panduranga, S. Sugawa, N. Takei, H. Sakai, Y. Takiguchi, T. Ando, K. Ohmori
2. 発表標題 Towards realization of a Rydberg quantum simulator with optical tweezer arrays for observation of ultrafast many-body dynamics
3. 学会等名 TCQC2019(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Tomita, S. de Leseleuc, Y. Chew, M. T. Panduranga, S. Sugawa, N. Takei, H. Sakai, Y. Takiguchi, T. Ando, K. Ohmori
2. 発表標題 Towards observation and manipulation of ultrafast many-body dynamics of Rydberg atoms in optical tweezers arrays
3. 学会等名 Gordon Research Conference, Quantum Control of Light and Matter (国際学会)
4. 発表年 2019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

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