

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01836

研究課題名（和文）リユードベリ原子を用いたアナログ量子計算プラットフォームの開発

研究課題名（英文）Development of a platform for analog quantum computation using Rydberg atoms

研究代表者

中川 賢一（Nakagawa, Ken'ichi）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授

研究者番号：90217670

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、マイクロ光トラップアレイ中のリユードベリ状態のルビジウム(Rb)原子を用いて量子シミュレーションやアナログ量子計算を実現するためのプラットフォームとして利用可能な実験装置を開発することを目的としたものである。本研究ではこの実験装置の実現に必要な要素技術として原子をリユードベリ状態に励起するため励起用レーザー光源システムおよび多数の原子の無欠損原子アレイを生成するシステムの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られたリユードベリ励起用レーザーシステムおよび無欠損原子アレイ生成技術を用いて現在の冷却リユードベリ原子を用いた量子シミュレーターの性能を大きく向上する事により、大規模な量子シミュレーションやアナログ量子計算が実現可能な実験システムが実現可能となる。このような実験システムは冷却原子を用いた量子計算および量子物理の研究の発展に大きく貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：We have developed an experimental platform for the quantum simulations and the analog quantum computing based on cold Rydberg atoms in optical trap arrays. We have developed the frequency stabilized laser systems for the Rydberg atoms and the atom manipulation system for the defect-free atom arrays,

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：量子シミュレーション 量子計算 リユードベリ原子 冷却原子 量子もつれ

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、量子力学の「重ね合わせ」および「量子もつれ」という性質を用いた超並列計算によって従来の計算機の計算能力をはるかに凌駕する計算機を実現しようという量子コンピューターに多くの関心が集まっており、各国で活発に研究開発が行われている。特に IBM、グーグルなどの情報産業の企業においても超伝導素子を用いた量子コンピューターの開発が精力的に行われており、数年の間に 50~100 量子ビットのシステムを作って、量子計算によって古典的な計算機の性能の限界を超える性能を実現する、いわゆる量子超越性の実現を目指している。2019 年 10 月に、グーグルが 53 個の量子ビットを用いてこの量子超越性を実現したとの報告があり、大きく注目された。一方、量子ゲート操作に基づく汎用量子コンピューターを実現するには、量子誤り訂正の実現が不可欠で、これには非常に多くの量子ビットが必要となり、この実現にはまだ多くの年月がかかるものと予想されている。このような中、従来の計算機シミュレーションでは計算困難な量子多体系を人工的な量子多体系で模倣して調べる量子シミュレーションが注目され、冷却原子、イオントラップ、超伝導素子を用いた量子シミュレーターが既の実演されている。この量子シミュレーターは、量子ゲート操作に基づく汎用量子計算に比べてデコヒーレンスの影響を受けにくく、50~100 個の粒子からなる量子多体系を用いて量子超越性が十分実現できると考えられる。この中でもリュードベリ(Rydberg)状態と呼ばれる高い励起状態の原子を用いた量子シミュレーターは、個々の原子の量子状態を独立に観測および操作可能で、また原子を任意の空間配置に並べて配置可能であるため、多くの興味ある量子多体系の性質を詳細に調べることが可能になると期待されている。原子をレーザーで主量子数が 50 以上のリュードベリ状態に励起すると、励起原子間には大きな相互作用が生じ、近傍の原子の励起が抑制されるリュードベリ・ブロック効果が起こる。このため、複数の原子を同時に励起してもその中の 1 個の原子のみが励起された状態の重ね合わせ状態である量子もつれ状態を作ることができる。我々のグループでは、このようなリュードベリ原子間の大きな相互作用を利用して、数 μm 間隔で並べられた原子を用いて隣接するスピン間で反強磁性的な相互作用する量子スピン系の量子シミュレーションを実現している(図 1)¹⁾。このリュードベリ原子が数 10 個からなる量子多体系を用いると、従来の計算機の性能限界を超える量子超越性を実現することも十分期待できる。このような背景のもと、本研究では、このマイクロ光トラップ中のリュードベリ原子を用いた量子シミュレーターを基に、この原子数を 100 個以上に増やし、さらにレーザー光で個々の原子の量子状態を独立に操作する機構を加えて、量子多体系のシミュレーションおよびアナログ量子計算を実演するためのプラットフォーム的な実験装置を開発することを目標として研究を行うこととした。

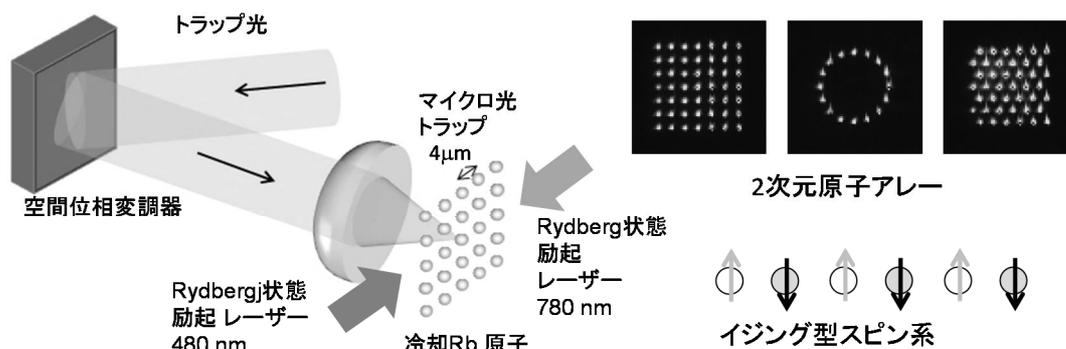


図1 冷却Rydberg原子を用いた量子シミュレーター

2. 研究の目的

本研究は、我々が開発してきたマイクロ光トラップアレー中の冷却リュードベリ原子を用いた量子シミュレーターを基に、個々の原子を独立に操作することが可能なプログラマブルな量子多体系を実現して様々なアナログ量子計算を可能にする実験装置の実現を目指すものである。このような実験装置が実現できれば、様々な量子多体系の量子シミュレーションや最適化問題などの量子計算を実行してその動作原理の検証や性能を評価するための実験プラットフォームとして利用可能になる。このような様々なアナログ量子計算を実行するための実験装置の開発を目標として研究を始めたが、2020年2月以降のコロナ禍による研究の中断および研究環境の変化やこの分野の研究動向のその後の進展を考慮して当初の研究目標を若干変更した。このため本研究ではアナログ量子計算用の実験プラットフォームを実現するのに必要となる要素技術の開発を主な目的とした。

今までの冷却リュードベリ原子を用いた量子シミュレーターの問題点の一つに、無欠損原子アレーの原子の数が 10 個以下に制限されている点が挙げられ、これを 100 個程度まで増やす技術の開発が重要な研究課題である。既にマイクロ光トラップアレー中の原子を高速に並び替え

て 50 個以上の無欠損原子アレーを実現する方法がいくつか考案されているが²⁾、これを実現するには、数 10 個の原子を並べ替える手順を高速で探索し、この手順に従って原子を 1 個ずつ移動する必要があるため、原子の個数を増やすのに限界がある。そこで本研究では、空間位相変調器を用いて複数の原子を同時に並び替えることにより短時間に並び替える方法を開発することとした。この方法が実現できれば、100 個以上の無欠損原子アレーを高効率で短時間に生成することが可能になり、これを用いた量子多体系の多彩な量子シミュレーションが実現可能となる。また量子多体系のシミュレーションにおいては、原子数を増やすに従って外乱等によるデコヒーレンスの影響が指数関数的に増大し、系のコヒーレントな時間発展が制限されシミュレーションの忠実度が大きく下がってしまう。今までの量子シミュレーターの実験においては、原子をリユードベリ状態に励起するレーザーの位相雑音や励起状態からの自然放出がコヒーレント相互作用時間を制限していることが明らかになっている³⁾。このため、本研究ではリユードベリ状態に励起するレーザー光源を改良することにより、より長いコヒーレンス時間を実現することを目標にレーザー光源の開発を行うこととした。

3. 研究の方法

リユードベリ原子を用いた量子シミュレーターの原子数を 100 個以上に拡張してアナログ計算用のプロットフォームを実現するため、二つの項目について研究を行った。その一つはリユードベリ状態への励起用レーザー光源の開発で、長いコヒーレント相互作用時間を実現して量子シミュレーションの精度を向上するのが目的である。二つ目は空間位相変調器を用いた原子の並び替えによる無欠損原子アレー生成技術の開発で、現在の量子シミュレーターで実現可能な無欠損原子アレーの原子数を 10 個から 100 個以上に増やすのに必要となる技術である。

(1) リユードベリ状態励起用周波数安定化レーザーの開発

量子シミュレーターにおいて長いコヒーレント相互作用時間を実現するため、波長 420nm と 1013nm の 2 台の半導体レーザーを用いた Rb 原子のリユードベリ状態励起用のレーザー光源の開発を行った(図 3)。以前の量子シミュレーションの実験においては、Rb 原子をリユードベリ状態 ($nD_{5/2}$; $n=50\sim 80$) に励起するのに波長 780nm と 480nm の 2 台のレーザーによる二光子遷移を用いていたが、中間準位 $5P_{3/2}$ 状態からの自然放出の影響が無視できなく、相互作用時間が数 μs に制限されていた。また利用可能な 480nm のレーザーの光パワーに上限があり、レーザーの離調を大きくできないことにより相互作用時間を制限していた。このため、本研究では、中間準位として $6P_{3/2}$ 状態を利用して波長 420nm および 1013nm の 2 台のレーザーを用いてリユードベリ状態に励起する方式を用いた励起用レーザー光源の開発を行った。 $6P_{3/2}$ 状態は $5P_{3/2}$ 状態に比べて自然放出レートが約 1/4 であるので、相互作用に与える自然放出の影響を小さくすることができる⁴⁾。また波長 1013nm のレーザーの光出力は半導体光増幅器を用いて 1W 以上に増幅することができるため、大きな離調を取ることににより、長いコヒーレンス時間を実現可能になる。

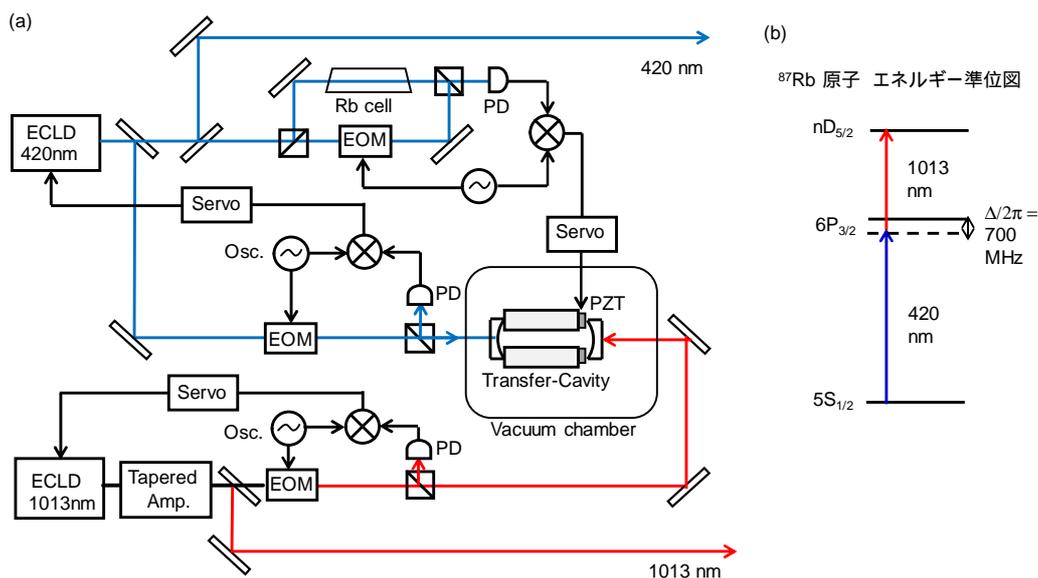


図 2 リユードベリ状態励起用レーザー光源。(a) レーザー光源の構成。(b) Rb 原子のリユードベリ状態($nD_{5/2}$, $n=50\sim 80$)への二光子吸収遷移。

(2) 欠損が無い原子アレーの実現のための原子の並び替え技術の開発

今までのマイクロ光トラップアレーの原子のローディング方法は、光誘起衝突による原子数制御の方法では、各トラップに単一原子がトラップされる確率は最大 50% になるため、トラップ数 N が大きくなるにつれて欠損が無いトラップアレーが実現できる確率が $1/2^N$ と指数関数的

に減少する。このため、 $N=10$ 以上では実質的に無欠損原子アレーを作ることは難しい。これに対して欠損があるトラップアレーの中の原子を並び替えて無欠損原子アレーを作る方法が実現されている(図3)。そこで本研究では、空間位相変調器を用いて複数の原子を同時に移動して並び替える方法を開発することにした。従来の音響光学偏向器(AOD)を用いて原子を1個ずつ移動して並び替える方法は、原子アレーの原子数が比較的少ない場合には効率が高いが、原子数が増えるにつれて移動回数および並び替え時間がかかり、並び替えの成功確率が低下する。このため、同時に複数の原子を動かして並び替える方法が実現できれば今後の大規模な原子アレーを用意する場合に有用である。そこで本研究では、正方格子の原子アレーに対して同時に複数の原子を移動する場合の効率的な原子の並び替え方法を開発することとした。

4. 研究成果

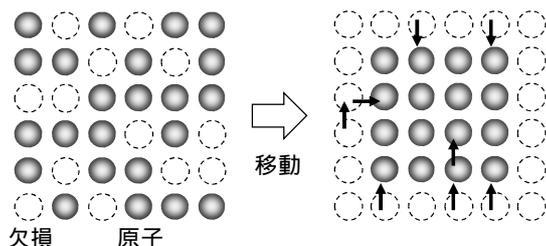


図3 原子の並び替えによる無欠損原子アレーの実現。

(1) リュドベリ状態励起用周波数安定化レーザーの開発

波長 420nm と 1013nm のレーザーは干渉フィルターを用いた外部共振器半導体レーザーを開発し、これを共通の基準光共振器に周波数安定化してレーザーの周波数雑音の低減を行った。用いた基準光共振器の共振線幅は 420nm および 1013nm に対してそれぞれ 730kHz および 230kHz であった。両方のレーザーをこの基準光共振器に Pound-Drever-Hall 法により周波数安定化を行ったところ、各レーザーの周波数雑音をほぼ目標のレベルまで低減されていることが確認できた(図4)。今後は制御帯域をさらに広げて制御利得を上げることにより、量子シミュレーションにおいて重要となる 100kHz ~ 1MHz の周波数領域における周波数雑音をさらに低減して長いコヒーレンス時間が達成できるものと考えられる。

一方、レーザーの長期の周波数安定度を向上するため、Rb 原子の $5S_{1/2}$ - $6P_{3/2}$ 遷移を基準として変調移行分光を用いて誤差信号を得てこの基準光共振器に負帰還制御を行ってレーザーの絶対周波数の安定化を行った。その結果、レーザーの 100 秒以上の長期の周波数安定度としては 100kHz 以下が実現された(図5)。このためリュドベリ状態励起用光源に必要なとされる短期および長期の周波数安定度が高いレーザー光源を実現することができた。

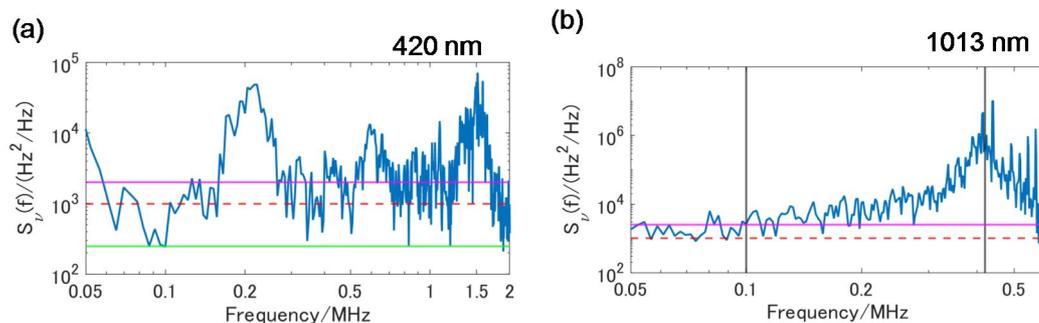


図4 半導体レーザーの周波数安定化。(a)、(b)はそれぞれ 420nm、1013nm 半導体レーザーの周波数制御後の周波数雑音のパワースペクトル密度 $S_v(f)$ を示す。

(2) 無欠損原子アレー生成のための原子の並び替え手順の最適化

複数の原子を同時に移動して並び替える方法によって 9×9 のトラップアレー中の原子から 5×5 の正方格子の無欠損原子アレーを生成する場合を考え(図6)、その並び替え手順を最適化する方法を考案し、その方法の成功確率の評価を行った。

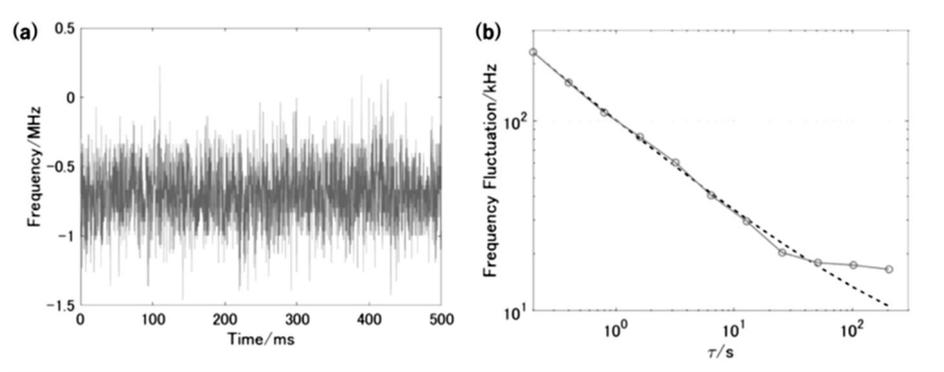


図 5 基準光共振器の絶対周波数の安定化。(a), (b) はそれぞれ周波数制御の誤差信号および各積分時間に対する周波数安定度(アラン変位)を示す。

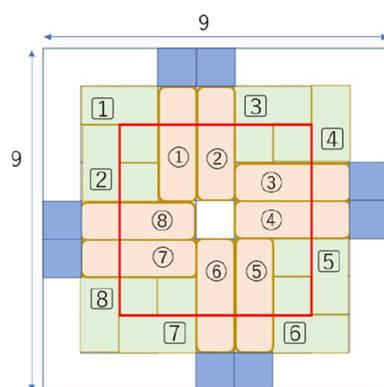


図 6 複数原子の同時並び替えによる高効率無欠損原子アレーの生成。
9×9 のトラップから 5×5 の無欠損正方格子を生成する場合を示す。

内部の 7×7 の正方格子に対して L 字型と直線型の二種類のブロックに分解して考え、同じ形状のブロックに対しては共通の並び替え手順を適用することにより全原子の並び替え手順の求め方の簡単化および高速化を実現した。最初に 9×9 個の各トラップにそれぞれ 50% の確率で単一原子が存在するものと仮定し、全ての初期原子配置に対して上記の方法で並び替えを行った場合の成功確率を計算機シミュレーションにより評価を行った。この結果、全ての初期原子配置に対してその約 5% の配置に対して並び替えが成功することが明らかになった。これは冷却原子を 9×9 の正方格子にトラップするのに必要な時間を 0.1 秒とすると、約 2 秒に 1 回の割合で並び替えが成功する原子配置が現れることを意味し、量子シミュレーションの実験を行うには十分短い時間である。この確率は他の並び替え方法に比べて若干低い、各並び替えの手順に対して空間位相変調器の位相パターンを予め計算して保存してこれを実際の並び替えの際に参照して利用することができるため、従来の方法のような多数の PC により並列計算処理などが不要となる利点がある。今後は、この方法を用いて実際に空間位相変調器を用いた原子の並び替えを行ってその性能を評価することが課題である。

以上、要素技術の開発ができたことにより、今後はこれらの技術を用いて量子シミュレーターを改良してアナログ量子計算が可能なプラットフォームを実現することが可能となった。

< 参考文献 >

- 1) H. Tamura, T. Yamakoshi, and K. Nakagawa, Analysis of coherent dynamics of a Rydberg-atom quantum simulator, Phys. Rev. A 101, 043421 (2020).
- 2) D. Barredo, S. de Léséleuc, V. Lienhard, T. Lahaye, A. Browaeys, An atom-by-atom assembler of defect-free arbitrary two-dimensional atomic arrays, Science 354, 1021 (2016).
- 3) S. de Léséleuc, D. Barredo, V. Lienhard, A. Browaeys, and T. Lahaye, Analysis of imperfections in the coherent optical excitation of single atoms to Rydberg states, Phys. Rev. A, 97, 053803 (2018).
- 4) H. Levine, A. Keesling, A. Omran, H. Bernien, S. Schwartz, A. Zibrov, M. Endres, M. Greiner, V. Vuletić, and M. Lukin, High-Fidelity Control and Entanglement of Rydberg-Atom Qubits, Phys. Rev. Lett. 121, 123603 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 奥野央志、吉田佑策、石橋裕生、中川賢一
2. 発表標題 トランスファー共振器を用いたRb原子のRydberg状態 励起用レーザーの開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田佑策、石橋裕生、中川賢一
2. 発表標題 空間光変調器を用いた無欠損な原子アレイの作成方法の開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石橋裕生、飯倉佑樹、中川賢一
2. 発表標題 電磁誘起透明化によるRb原子の5S-6P-nD二光子吸収遷移の観測
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石橋裕生、飯倉佑樹、中川賢一
2. 発表標題 Rb原子のRydberg状態二光子励起用レーザーの周波数安定化
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023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
---------	---------