

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340095

研究課題名(和文)光格子中のリドベルグ原子を用いた量子情報処理

研究課題名(英文)Quantum information processing with cold Rydberg atoms in an optical lattice

研究代表者

中川 賢一(Nakagawa, Ken'ichi)

電気通信大学・学内共同利用施設等・教授

研究者番号：90217670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は光格子中のリドベルグ状態のレーザー冷却Rb(ルビジウム)原子を用いた量子情報処理の実現を目指して光格子トラップの生成および単一原子のトラップ技術の開発を行ったものである。格子間隔が大きな1次元および2次元光格子ポテンシャルを実現するため、空間位相変調器を用いた方法を開発し、約5 $\mu$ mの間隔で2～100個のマイクロ光トラップが生成可能となった。また複数個のトラップに原子を1個ずつ捕捉するため、光誘起衝突効果を用いてトラップ内の原子数を制御する方法を開発し、60%以上の確率でトラップに原子1個を捕捉することが可能になった。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we have developed experimental apparatus and experimental methods for the quantum information processing with cold Rydberg Rb atoms in an optical lattice. We have realized 1D and 2D optical lattice potential with large lattice spacing using a 2D spatial phase modulator. We have studied developed the loading method of single Rb atom to micro optical traps using the light induced collision. We have developed high power and frequency stabilized 480 nm lasers for the excitation of Rb atoms to Rydberg states.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：レーザー冷却 光格子 リドベルグ原子 量子もつれ 量子シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

近年、光や原子の量子力学的な性質を利用して超高速な並列計算を実現可能にする量子計算などの量子情報処理の研究に多くの関心が寄せられている。この量子情報処理を実現する系として光、原子、イオン、半導体、超伝導デバイス等、幅広く研究されているが、この中で中性原子は周囲環境の影響を受けにくいため量子状態を長時間保存でき、またレーザー等の多彩な方法でその量子状態を操作できるという特徴を持つ。しかし中性原子は基底状態では原子間の相互作用が小さいため原子間の量子もつれを実現するには原子を 100nK 以下に冷却して2つの原子間の距離を 100nm 以下に近づける必要がある。一方、中性原子に対して電荷を持つイオンの場合、イオン間には大きなクーロン相互作用が働くため、中性原子に比べて比較的容易にイオン間に量子もつれ状態が実現でき、このためイオントラップ中の数個のイオンを用いて既に簡単な量子計算が実現されている。しかしイオンの場合、イオン間の相互作用が非常に大きいためイオンの数を増やすのが難しいという問題がある。

これに対して近年、中性原子をレーザー光を用いて主量子数が数 10 以上のリドベルグ (Rydberg) 状態と呼ばれる高い励起状態に励起して、この励起状態の原子間の非常に大きな相互作用を用いて量子もつれ状態を実現してこれを量子情報処理などに応用することが提案され、最近ではこの方法が実験で実証され非常に注目されている。レーザーによって高い主量子数のリドベルグ状態に励起された原子は非常に大きな双極子モーメントを持つため、数 $\mu\text{m}$  以上離れた励起原子の間に大きな双極子・双極子相互作用が働いて近傍の原子のエネルギーが大きくシフトする。このため1個の原子がリドベルグ状態へ励起されると近傍の原子の励起が抑圧されるいわゆるリドベルグブロックードが生じ

る。これを用いるとイオントラップと同様に数 $\mu\text{m}$  程度離れた原子間に比較的容易に量子もつれ状態を実現することが可能になる。

このようなリドベルグブロックードを用いて量子計算などの量子情報に応用することを目指した研究は海外において非常に活発に行われており、関連する理論および実験の論文数が年々増え続けている。これに対して我々はJSTのCRESTの研究プロジェクト「中性原子を用いた量子演算素子の開発」(H15-H20)における先行研究において原子を1個レベルで操作する単一原子トラップの研究を行ってきた。そこで2個の原子間の量子相関を実現する方法としてリドベルグブロックードに注目し、Rb原子をリドベルグ状態に励起するためのレーザー光源の開発およびトラップ中の単一原子のリドベルグ状態への励起実験を行ってきた。このような中、2009年にアメリカのウィスコンシン大より数 $\mu\text{m}$ 以上離れた2個のRb原子間でリドベルグブロックードを確認する実験結果が報告され、その後、我々のグループでも同様の実験によりリドベルグブロックード効果を実験で確認して国際会議で報告してきた。パリ南大においては同様の方法でリドベルグブロックードを用いて2個の原子間で量子もつれ状態を実現したことが報告されている。

## 2. 研究の目的

本研究ではレーザー冷却 Rb 原子を 1 次元または 2 次元の光格子のポテンシャルサイトに 1 個ずつトラップして各原子の量子状態を独立に操作および観測できる実験系を開発することを第一の目標とする。次にこの光格子中の各サイトの Rb 原子をレーザー光でリドベルグ状態に励起して励起原子間の大きな双極子相互作用により近傍の原子のリドベルグ状態への励起が抑圧されるリドベルグブロックードを引き起こし、複数の原子間に量子もつれ状態を実現することが次の目標である。最後に光格子中の多数の量子もつ

れ原子を用いて量子計算や量子シミュレーションを行うことが最終的な目標である。この目標を達成するため、本研究では以下の3つの課題に取り組む。

(1) 空間位相変調器を用いた格子間隔が広い光格子および任意空間パターンのマイクロ光トラップアレーの実現

従来の光格子を用いた冷却原子の研究では光の定在波を用いて光格子を作っているため格子間隔が  $1\mu\text{m}$  以下と狭く、各ポテンシャルの原子を分離して観測および制御することが難しい。これに対して本研究では空間位相変調器を用いて格子間隔が数  $\mu\text{m}$  以上の周期の光格子を実現することにより、個々の原子を分離して観測し、さらに独立にレーザー光で制御することが可能となる。

(2) 光誘起衝突を用いた光格子への単一原子捕捉効率の向上

格子間隔が大きな光格子ポテンシャルの各サイトに原子を1個ずつ捕捉することは原理的にもまた技術的にも大きな課題である。従来の光格子の実験では温度が  $100\text{nK}$  以下のボース凝縮原子を用いて原子間相互作用により各サイトに1個のみが捕捉されるモット絶縁状態を実現することが可能であるが、本研究における格子間隔が数  $\mu\text{m}$  以上ある光格子ではこれは非常に難しい。そこで本研究では光誘起衝突を用いてトラップ内の原子数を1個に制御する方法を開発する。従来の光誘起衝突を用いた方法では単一原子を得る確率の上限が50%なので、これ以上の確率が得られる新しい方法を開発する。

(3) Rb 原子のリドベルグ状態励起用高出力周波数高安定化レーザー光源の開発

光格子中の Rb 原子をリドベルグ状態へ励起するには波長  $780\text{nm}$  と  $480\text{nm}$  の2つの光による二光子吸収が用いられる。このうち  $780\text{nm}$  の光は半導体レーザーが利用可能であるが、 $480\text{nm}$  の光は既存の青色半導体レーザーでは出力パワーが低いため、 $960\text{nm}$  の半

導体レーザーの第二高調波を用いる必要がある。そこで本研究では光格子中の Rb 原子のリドベルグ状態への励起に必要とされる出力パワー  $100\text{mW}$  以上、線幅  $100\text{kHz}$  以下、絶対周波数の精度  $1\text{MHz}$  以下の波長  $480\text{nm}$  の励起用レーザー光源を開発することとした。

### 3. 研究の方法

本研究では先の研究目的で示した三つの課題を平行して行うこととした。以下に各課題に対する研究方法を示す。

(1) 空間位相変調器を用いたマイクロ光トラップアレーの実現

格子間隔が数  $\mu\text{m}$  以上の周期ポテンシャルや任意の空間パターンの複数のマイクロ光トラップを生成するため、レーザー光を液晶を用いた2次元空間位相変調器(浜松ホトニクス社製 X10468、画素数  $800 \times 600$  pixels)を用いて回折させ、これを非球面レンズ( $f = 8\text{mm}$ ,  $\text{NA} = 0.5$ )で集光して任意の空間パターンの複数のマイクロ光トラップを生成する(図1)。

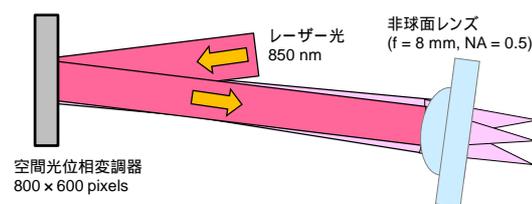


図1 空間位相変調器を用いた複数マイクロ光トラップの生成

(2) マイクロ光トラップ内への単一原子のローディング

マイクロ光トラップによる単一原子の捕捉の実験は以前の研究で用いた既存の実験装置を改良して行った(図2)。超高真空ガラスセル中で磁気光学トラップを用いて1~10個のレーザー冷却  $^{87}\text{Rb}$  原子を捕捉し、原子からの蛍光はガラスセル内の高 NA 非球面レンズで集めて、冷却 EMCCD カメラおよび APD によるシングルフォトン検出器を用いて観測

する。マイクロ光トラップは波長  $1.064 \mu\text{m}$  のレーザー光を蛍光観測用に用いた非球面レンズによってビーム半径  $2 \mu\text{m}$  以下に集光することによって得る。

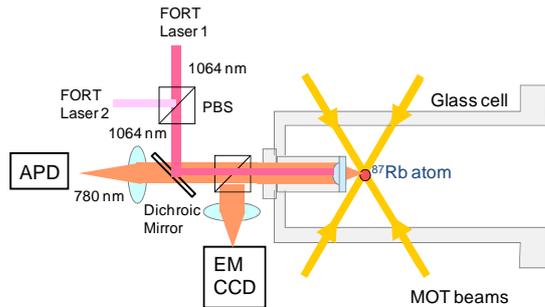


図2 マイクロ光トラップによる単一 Rb 原子の捕捉のための実験系

(3) リドベルグ状態励起用高出力・周波数安定化レーザーの開発

Rb 原子の基底状態  $5S_{1/2}$  から主量子数のリドベルグ状態  $nS_{1/2}$ 、 $nD_{5/2}$  ( $n=60-80$ ) への励起には波長  $780\text{nm}$  と波長  $480\text{nm}$  の二つのレーザー光による二光子吸収を用いる。波長  $780\text{nm}$  の光は外部共振器半導体レーザー (ECLD) を用い、波長  $480\text{nm}$  の光は波長  $960\text{nm}$  の外部共振器半導体レーザーの第二高調波発生 (SHG) を用いる (図 3)。波長  $780\text{nm}$  のレーザー光は Rb 原子の飽和吸収線を基準として周波数安定化を行う

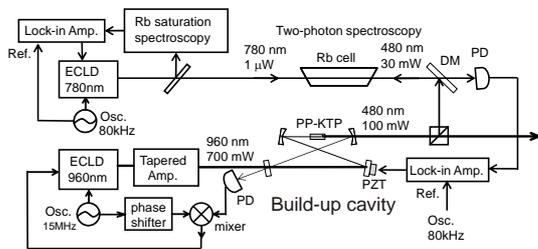


図3 青色  $480\text{nm}$  高出力・周波数安定化レーザー光源

4. 研究成果

今回の研究において得られた研究成果を先に示した各項目ごとに以下に記す。

(1) 空間位相変調器を用いた光格子ポテン

シャルの生成

先の図 1 で示した方法で 2 次元空間位相変調器を用いて波長  $850\text{nm}$  のレーザー光を回折してこれを集光し、これを CCD カメラで測定してその光強度分布を評価した (図 4)。最適な光格子ポテンシャルが得られるように計算機を用いて位相変調データの最適化を行い、ほぼ均一な深さの光格子ポテンシャルを得ることが可能となった。またナイフエッジ法を用いて個々の集光ビームの径の評価を行い、ビーム半径  $2 \mu\text{m}$  以下に集光されていることを確認した。

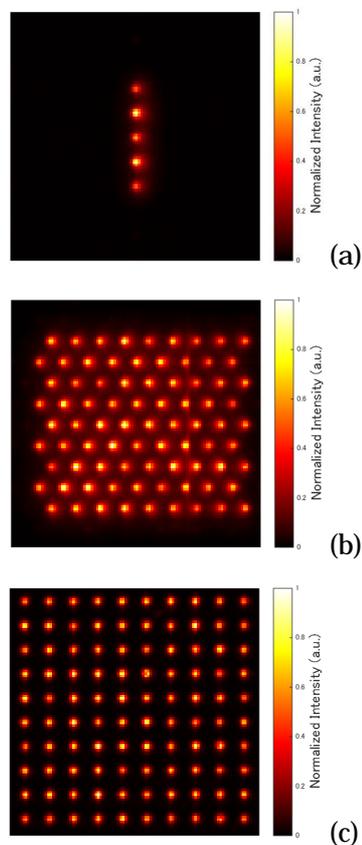


図4 空間位相変調器によって生成された光格子ポテンシャル。(a) 1次元光格子、(b) 三角格子、(c) 正方格子。

(2) マイクロ光トラップによる冷却  $^{87}\text{Rb}$  原子の捕捉と光誘起衝突を用いたトラップ内の原子数制御

最初に先の図 2 に示した実験系を用いて

1064nm のレーザー光を  $2\mu\text{m}$  以下に集光して単一のマイクロ光トラップを作り、単一冷却 Rb 原子をトラップした(図 5 左)。次にレーザー光を 2 つのビームに分けて偏光ビームスプリッターで重ねることにより二つのマイクロ光トラップを約  $10\mu\text{m}$  の間隔で生成し、各トラップに Rb 原子を 1 個ずつ捕捉できることを確認した(図 5 右)。

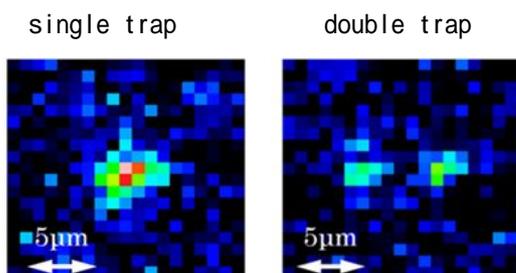


図 5 マイクロ光トラップ中の単一原子像

次に光誘起衝突を用いたマイクロ光トラップ中の原子数制御の実験を行った。磁気光学トラップからマイクロ光トラップにローディングされた冷却 Rb 原子に共鳴線に対して青色離調したレーザー光を照射してトラップ内の 2 個の原子間に光誘起衝突を生じさせる。この衝突によって原子は一定の大きさの運動エネルギーを受け取り、トラップの外に逃げる。この時レーザー光の離調を調整することにより原子が受け取る運動エネルギーの大きさを制限して、原子 1 個のみがトラップから逃げるようにすることによりトラップ内に原子が 1 個残る確率を高くすることが可能になる。これを実験で検証したところ、通常の赤方離調光の場合のトラップ内に単一原子が捕捉されている確率の最大値が 50% であったのが、青方離調光を用いることによりこの確率を最大 63% まで向上することができた(図 3)。今後さらに最適化を行うことによりこの確率を 80% 以上に向上できる可能性があり、これによって光格子の各トラップに原子を 1 個ずつ準備する確率を大きく向上できる見通しができた。

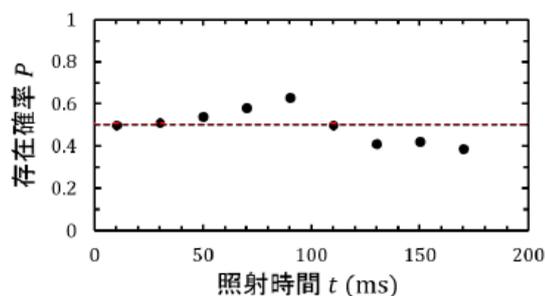


図 3 青方離調光による光誘起衝突を用いたマイクロ光トラップ中の原子数制御。

### (3) リドベルグ状態励起用高出力・周波数安定化レーザーの開発

Rb 原子のリドベルグ状態励起用の波長 480nm の高出力レーザー光源を先に示した波長 960nm の半導体レーザーの外部共振器内第二高調波発生(SHG)の方法を用いて開発した。以前の同様の研究では 480nm 光の最大出力は約 150mW 程度で、これは主に非線形光学結晶中の 480nm 光の吸収による熱的不安定性によるものであった。このため今回は結晶内のビーム径を大きくなるよう共振器の再設計を行うことにより 200mW 以上の 480nm 光の出力パワーが安定に得られた。この光パワーは光格子内の複数のマイクロ光トラップ中の Rb 原子をリドベルグ状態に励起するのに十分な大きさである。

波長 480nm の励起レーザーの周波数安定化は基本波の 960nm の外部共振器型半導体レーザーをトランスファー共振器を用いて行った。まず Rb 原子の D2 線の飽和吸収線に周波数安定化した波長 780nm の半導体レーザーを絶対的な周波数基準としてトランスファー共振器の共振器長を安定化した。このトランスファー共振器を基準として波長 960nm の半導体レーザーを Pound-Drever-Hall 法を用いて周波数安定化を行った。図 4 に周波数安定化時の 960nm 半導体レーザーの残留周波数揺らぎを示す。これより周波数安定度は  $\pm 200\text{kHz}$  が得られ、線幅が狭いリドベルグ状態への遷移を励起するのにほぼ十分な性能が

得られた。

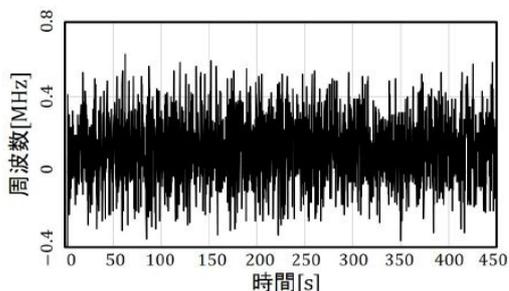


図4 960nm 半導体レーザーの周波数揺らぎ

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

1. M. Sadgrove, T. Schell, K. Nakagawa, and S. Wimberger, Engineering quantum correlations to enhance transport in cold atoms, Phys. Rev. A. 87, 013631 (2013). (査読有)
2. M. Sadgrove, S. Wimberger, and K. Nakagawa, Phase-selected momentum transport in ultra-cold atoms, Eur. Phys. J. D 66, 155 (2012). (査読有)

[学会発表](計 8 件)

1. 光誘起衝突を用いた光マイクロトラップ中の原子数制御：田村光、海上智行、中川賢二、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 23 日、早稲田大学
2. 空間光位相変調器を用いた光マイクロアレーの実現：海上智行、田村光、宮本洋子、中川賢一、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 23 日、早稲田大学
3. 光マイクロアレーによる単一原子トラップの実現：田村光、Jun He、海上智行、宮本洋子、中川賢一、日本物理学会第 70 回年次大会、2014 年 9 月 9 日、中部大学、
4. Manipulating ultra cold atoms towards the development of quantum technologies (invited) : Ken'ichi Nakagawa, The 8th International

Conference on Photonics and Applications, Sept. 9th, 2014, Da Nang city, Vietnam

5. 光誘起衝突を用いた光双極子トラップ中の原子制御：田村光、Jun He、海上智行、中川賢一、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27 日、東海大学

6. Frequency stabilized lasers using an electromagnetically induced transparency of Rb Rydberg atoms in a cell : Jun He, Hikaru Tamura, Ken'ichi Nakagawa, 日本物理学会第 69 回年回、2014 年 3 月 27 日、東海大学.

7. 電気光学変調器型光周波数コムを用いたデュアルコム分光 II : 渡邊直登、北村俊幸、照井李佳、武者満、中川賢一、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 28 日、徳島大学

8. 冷却 Rb 原子を用いた原子干渉計による重力加速度計 II : 堀憲真、小野田圭吾、渡邊直登、中川賢一、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 27 日、徳島大学

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

無し

取得状況(計 0 件)

無し

[その他]

無し

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

中川 賢一 (NAKAGAWA KENICHI)

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