

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02935

研究課題名（和文）マイクロ光トラップアレー中のリドベルグ原子を用いた量子多体系の量子シミュレーター

研究課題名（英文）Quantum simulator for many body systems using cold Rydberg atoms in optical microtrap arrays

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,800,000円

研究成果の概要（和文）：光トラップ中のリドベリ状態の冷却原子を用いて量子多体系を模倣する量子シミュレーターを実現した。リドベリ状態の原子間の大きな相互作用により、複数の原子の間で量子もつれ状態を実現することができた。また一次元のイジングモデルの量子スピン系のシミュレーションを実現し、反強磁性的な状態が現れることを確認し、このシミュレーターが量子多体系を忠実に模倣していることを確認した。またこの系で量子多体系の量子状態の時間発展を詳細に調べることにより、このシミュレーターの技術的な課題が明らかになり、今後の本格的な量子シミュレーションを実現する際の改良点および方向を見出すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、個々の原子の量子状態を操作および観測することが可能な量子シミュレーターを実現して実験でその性能を詳細に評価したもので、このような量子シミュレーターの実現は先行する数グループ以外にほとんどなく、実験で得られた情報は将来の本格的な量子シミュレーターの実現に向けての研究に大きく貢献するものである。またこの量子シミュレーターは物性の問題以外にも従来の計算機シミュレーションでは計算が難しい問題への応用が期待されており、量子コンピューターと同様に科学だけでなく産業界を含む幅広い分野への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：We have developed a quantum simulator for many-body quantum systems with cold Rydberg atoms in optical trap arrays. We demonstrate the generation of the entangled states of few atoms using Rydberg blockade. We also demonstrate a quantum simulation of the Ising type spin model using the Rydberg atom quantum simulator. From these demonstrations, we evaluate the performance of the quantum simulator. These results are useful for the development of future large-scale quantum simulations.

研究分野：量子技術

キーワード：量子シミュレーション 量子もつれ 冷却原子 量子情報

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

原子、イオン、超伝導デバイスなどを用いて人工的に量子多体系を実現して、これを用いて実験的に興味ある量子多体系の性質を調べるいわゆる量子シミュレーションが非常に注目されている。互いに相互作用する多数の粒子からなる量子多体系の振る舞いをコンピューターでシミュレーションしようとする、粒子数が増加するにつれて計算量が指数関数的に増加するため、計算が困難になる。また実際の物性材料においてはその物理的性質を支配している様々なパラメーターを自由に変えて合成することは難しく、系統的にその性質を調べるのが難しい。これに対して量子シミュレーターでは物理系の性質を決める温度、粒子間の相互作用、粒子の空間配置などの様々なパラメーターを自由に制御することが可能となるため、量子多体系の性質を調べるための強力なツールとなると期待されている。このような量子シミュレーションは、現在までのところイオントラップ中のイオンや光格子中のボース凝縮原子を持いて実現されている。我々のグループでは主量子数  $n$  が 50 以上と大きなリドベルグ\*(Rydberg)状態と呼ばれる高い励起状態の Rb 原子を用いてこの量子シミュレーションを実現するための基礎研究を行ってきた。リドベルグ励起状態の原子間には非常に大きな相互作用が働くため、レーザー光である原子をリドベルグ状態に励起すると、数  $\mu\text{m}$  程度離れた近傍の原子の励起状態のエネルギー準位がシフトして共鳴が外れるため、この原子の励起が抑圧されるリドベルグ・ブロック効果が生じる。この効果を用いると 2 個の原子間に量子力学的な相関を持つ量子もつれ状態が実現できる。原子の基底状態  $|g\rangle$  とリドベルグ励起状態  $|r\rangle$  をスピンの下向き、上向きに対応させると、このような原子を数  $\mu\text{m}$  程度の間隔で並べて配置してレーザーでリドベルグ状態に励起することにより、隣接するスピン間で相互作用する量子多体系の量子シミュレーションを行うことが可能になる。

\* Rydberg の訳語としてはリドベルグよりもリュードベリが一般的に用いられているため、これ以降はリュードベリを用いる。ただし研究課題名は変更しない事とする。

### 2. 研究の目的

本研究ではマイクロ光トラップアレーにレーザー冷却ルビジウム(Rb)原子を 1 個ずつトラップし、これにレーザー光を照射してリュードベリ状態に励起することにより、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することを第一の目的とする。先行研究で行った光トラップ中の Rb 原子のリュードベリ・ブロック効果の検証実験と、空間位相変調器を用いたマイクロ光トラップアレーの生成技術の開発の研究成果を基に、これに新たにいくつかの要素技術を開発して 10 個以下の原子からなる量子シミュレーターを開発する。開発した量子シミュレーターを用いてリュードベリ・ブロック効果を用いて複数の原子において量子もつれ状態が生成可能であることを実験的に確認する。次に原子を一次元格子状に並べて一次元の量子スピン系の量子シミュレーションを実現して理論との比較を行いその特性を評価する。これらの実験結果を基に原子の数を 10 個以上に増やすための実験装置の改良および新しい実験技術の開発を行う。これにはマイクロ光トラップに高効率に単一原子をローディングして 10 個以上の無欠損原子アレーを実現する技術の開発と、10 個以上の原子をリュードベリ状態に励起するための励起用レーザーの高出力化および周波数安定化などが挙げられる。これらの技術の開発および装置の改良により、最終的に原子数が 50 個以上の量子多体系を用いた本格的な量子シミュレーションを実現することを目標とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、マイクロ光トラップアレーにレーザー冷却  $^{87}\text{Rb}$  原子を 1 個ずつトラップして 10 個以上の原子アレーを準備し、これをレーザー光でリュードベリ状態に励起することにより相互作用する量子多体系を模倣する量子シミュレーターを実現した(図 1)。コンピュータープログラムと空間位相変調器を用いて任意の 2 次元の空間配置のマイクロ光トラップアレーを生成し、この各トラップにレーザー冷却  $^{87}\text{Rb}$  原子を 1 個ずつ捕捉して興味ある物性を示す空間配置の原子アレーを作ることができる(図 2)。原子間の間隔は  $4\mu\text{m}$  程度あるため、CCD カメラによって各原子の状態を独立に観測することが可能である。このようにして原子アレーが準備できたら、光トラップをオフにし、続けて波長 780nm と 480nm の 2 台のレーザー光を一定時間照射し

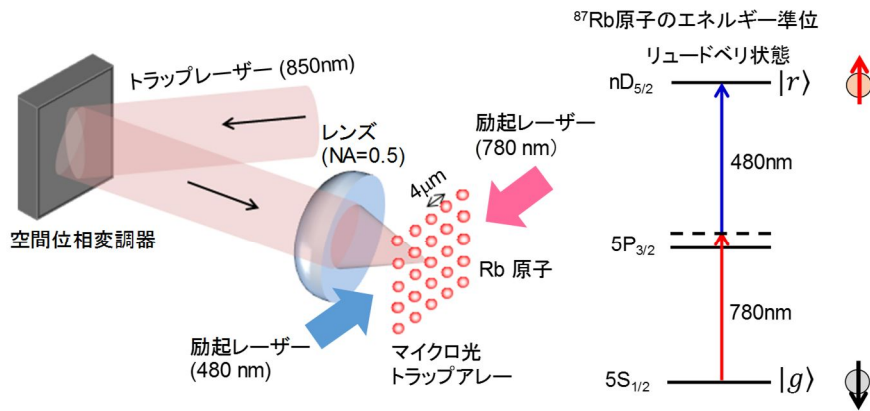


図1 リュドベリ原子を用いた量子シミュレーター

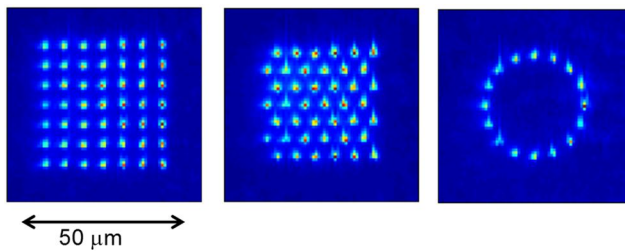


図2 マイクロ光トラップアレー中の原子像

て、原子を主量子数  $n = 50 \sim 70$  のリュドベリ状態  $nD_{5/3}$  に励起する。一定の相互作用時間の後、光トラップを再びオンにして原子を再び捕捉し、その原子の蛍光像を CCD カメラで観測して原子の有無を検出することにより、原子の終状態の量子状態が測定する。この系の原子の基底状態とリュドベリ励起状態をそれぞれスピンの下向きおよび上向きに対応させることにより、量子スピン系の量子シミュレーションを行うことができる。

#### 4. 研究成果

本研究では、先の研究方法で示したようにマイクロ光トラップ中のリュドベリ原子を用いた量子シミュレーターを開発し、これを用いて様々な量子シミュレーションの実験を行った。これらの実験で得られた主な研究成果を以下にまとめる。

##### (1) 少数個の原子集団での量子もつれ状態の生成

リュドベリ原子間の相互作用により近傍の原子の励起が抑圧されるリュドベリ・ブロッケード効果を用いて複数の原子集団において量子もつれ状態が生成されることを確認した。1~4個の原子を  $3\mu\text{m}$  間隔で並べ、これにレーザー光を照射してリュドベリ状態に励起したところ、 $N$  個の原子集団中の1個の原子のみが励起された  $W$  状態  $|W\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N |g_1 \cdots r_i \cdots g_N\rangle$  がコヒーレントに励起されている事を確認した(図3)。この実験結果は、理論的な予想結果をほぼ再現しており、この量子シミュレーターが粒子間の相互作用により量子もつれ状態となるような量子多体系の振る舞いを忠実に模倣することが可能であることが確認された。

##### (2) 一次元イジングスピン系の量子シミュレーションの実現

開発した量子シミュレーターを用いて1次元格子状の原子アレーを作ってイジングスピン系の量子シミュレーションを実現した。リュドベリ・ブロッケード効果により、隣接する二つの原子が共に励起状態になることが抑制されるため、格子中の原子の励起状態の分布には反強磁性的な空間変調が生じることを確認した(図4)。これはスピン間の反強磁性的な相互作用により、スピンの上向きと下向きが交互に現れる反強磁性状態が生じることに対応する。ただ空間変調の振幅は一定以上には増加せず、これは主に原子アレー中に原子が存在しない欠損部分が存在することが主な原因だと考えられる。このため、今後はトラップアレー中の原子の並び替えなどにより10個以上の原子からなる無欠損原子アレーを高い効率で生成する技術を開発する必要がある。

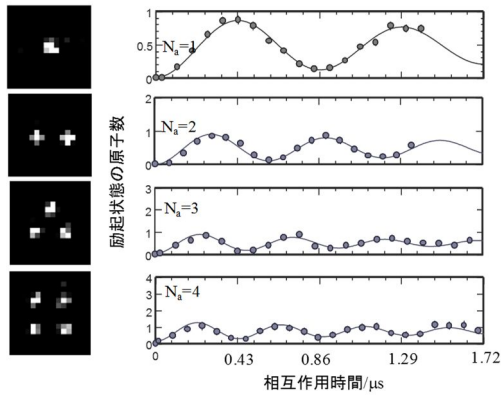


図3 量子もつれ状態(W状態)の生成

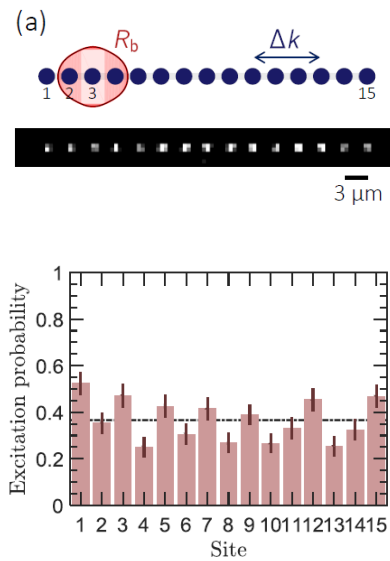


図4 スピン系の量子シミュレーション

### (3) 一次元イジングスピン系のダイナミクスの観測

先の実験より開発した量子シミュレーターがイジングスピン系の反強磁性的な性質を再現することが明らかになったため、このシミュレーターが量子レベルで忠実にこの系を模倣することが可能かを明らかにするため、一次元イジングスピン系の量子状態の時間発展を観測することによりそのダイナミクスを調べた。原子アレーに原子が無い欠損が存在すると、理論との比較が難しいため、原子数が6個以下の無欠損原子アレーを用いて実験を行った(図5)。最初に1次元直線格子状の5個の原子アレーの場合を考えると、最初に全て基底状態にあった原子は相互作用時間共に一つおきに励起された反強磁性的が現れ、時間とともにこれが反転することが数値計算で予想されるのに対して、量子シミュレーションの実験もほぼ同様の結果が得られた(図5左)。次にリング格子状の6個の原子アレーの場合を考える。これは格子の端の効果がないため、度の原子も一緒に同じ確率で励起状態になることが期待され、これは数値計算でも確かめられている。これに対して量子シミュレーションの結果も、ほぼ一様にすべての原子が励起状態になり、理論とほぼ一致した(図5右)。リング格子の場合、全ての原子が一様に励起されているように見えるが、個々の原子の状態を見ると隣接する原子が共に励起状態にあることはなく、一つおきに励起状態にある反強磁性的な状態となっていることが分かった(図6)。

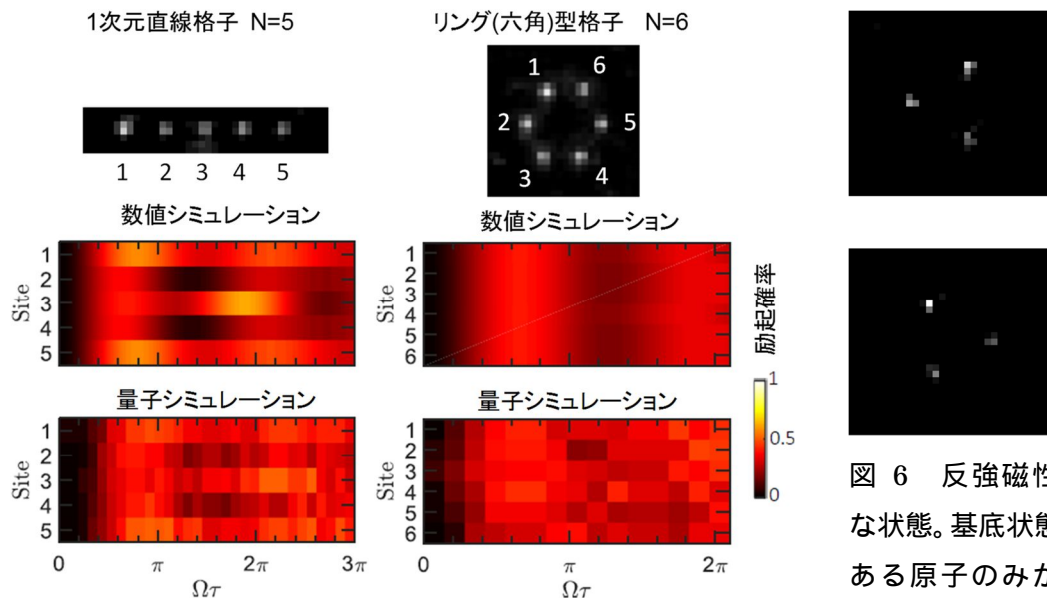


図5 一次元イジングスピン系のダイナミクス



図6 反強磁性的な状態。基底状態にある原子のみが観測される。

そこで相互作用時間とともに量子状態がどのように時間発展するのかを数値計算で求め、実際に量子シミュレーションで観測された各状態の観測確率と比較を行った(図7)。この結果、相互作用時間が短い時間においては理論通りに各量子状態の分布数が変化していることが分かった。一つおきに励起状態にある反強磁性的な状態(図7(f))が時間と共に出現するのが理論および実験でも確認できた。しかし相互作用時間が  $0.6\mu\text{s}$  以上においては理論と実験とのずれが大きくなっていることが分かった。そこでコヒーレントな時間発展を阻害する原因を解析して調べた結果、今回の実験系において問題になるのは、リュードベリ状態への励起用レーザーの周波数安定度が主な原因であることが明らかになった。これに対しては同様にレーザーの周波数雑音のコヒーレンス時間を制限しているとの指摘が海外のグループの論文より出されており、今回の結果はそれを裏付けたものである。このため、今後レーザーの周波数安定度を向上することにより相互作用時間をさらに長くすることが可能であることを示唆するものである。

以上の研究成果をまとめると、本研究によってリュードベリ原子を用いた量子シミュレーターが、6個以下の少数個の量子多体系のダイナミクスを忠実に再現することが可能であることが明らかになった。今後の課題としては、原子の並び替えなどによる無欠損原子アレーを実現する技術を導入してシミュレーション可能な原子数を50個程度に拡張することと、励起レーザーの改良により相互作用時間を  $10\mu\text{s}$  以上に延ばすことが挙げられる。これらの装置の改良により、今後、多くの物性的な興味ある量子多体系の量子シミュレーションが可能になると考えられる。また物性だけでなく、量子アニーリングなどの新しい量子計算の手法などの原理検証などに応用することも考えられる。

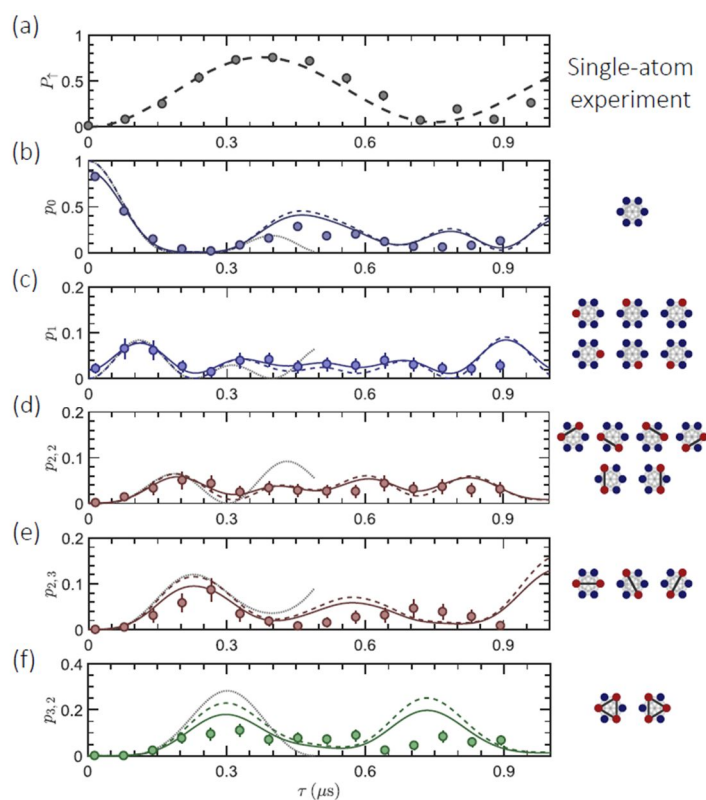


図7 量子ダイナミクス。右の原子配置の図の青は基底状態、赤は励起状態の原子をそれぞれ表す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 中川賢一	4. 巻 47
2. 論文標題 量子技術のための単一冷却原子・イオンの操作	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 276-282
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Naoto Watanabe, Hikaru Tamura, Mitsuru Musha, and Ken'ichi Nakagawa	4. 巻 56
2. 論文標題 Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy of Rydberg states of Rb atoms	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 112401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/JJAP.56.112401	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 -

1. 著者名 Hikaru Tamura, Tomotake Yamakoshi, and Ken'ichi Nakagawa	4. 巻 101
2. 論文標題 Analysis of coherent dynamics of a Rydberg-atom quantum simulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 43421
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.101.043421	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 中川賢一 田村光	4. 巻 33
2. 論文標題 リュードベリ原子を用いた量子シミュレーション	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 パリティ	6. 最初と最後の頁 37-39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -



〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Hikaru Tamura, Tomotake Yamakoshi, and Ken'ichi Nakagawa
2. 発表標題 Towards quantum simulations of many-body systems using 2D arrays of cold Rydberg atoms
3. 学会等名 The EMN(Energy Material and Nanotechnology) meeting on Quantum Technology 2018 (Dubrovnik, Croatia) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken'ichi Nakagawa, Hikaru Tamura, Tomotake Yamakoshi
2. 発表標題 Quantum simulation of many-body systems with cold Rydberg atoms
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Cold Atom Physics (Wuhan, China) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川賢一
2. 発表標題 冷却リユードベリ原子を用いた量子多体系シミュレータ
3. 学会等名 物性研究所 短期研究会「量子情報・物性の新潮流」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken'ichi Nakagawa, Hikaru Tamura, Tomotake Yamakoshi
2. 発表標題 Programmable quantum simulators based on cold Rydberg atoms
3. 学会等名 the 13 th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy (Kanazawa, Japan) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken'ichi Nakagawa, Hikaru Tamura, Tomotake Yamakoshi
2. 発表標題 Quantum simulation of many-body systems with cold Rydberg atoms
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Workshop on Trapped Quantum System (KAIST, Daejeon, South Korea) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川賢一
2. 発表標題 リュードベリ原子を用いた量子シミュレーションの最前線
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高瀬直美、岸本哲夫、中川賢一
2. 発表標題 Rb原子のRydberg状態励起用波長420nm干渉フィルター安定型半導体レーザーの開発
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (九州大)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早瀬茂法, 宮本洋子, 落合洋介
2. 発表標題 ホログラムの作製のための電子線レジストの多重露光特性の研究
3. 学会等名 日本光学会 コンテンポラリーオプティクス研究グループ「ダイバーシティの光明」
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 早瀬茂法, 宮本洋子, 落合洋介
2. 発表標題 経路干渉計法による光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出用ホログラムの作製
3. 学会等名 日本光学会 Optics and Photonics Japan 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hikaru Tamura, Tomotake Yamakoshi, Ken ' ichi Nakagawa
2. 発表標題 Observation of spatially ordered Rydberg excitation in an one-dimensional optical microtrap array
3. 学会等名 International Conference on Laser Spectroscopy(ICOLS) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Tamura, T. Yamakoshi, and K. Nakagawa
2. 発表標題 Towards quantum simulation of Ising spins using cold Rydberg atoms in microtrap arrays
3. 学会等名 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田村光、山越智健、中川賢一
2. 発表標題 リドベルグ原子を用いたスピン系量子シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会 岩手大学
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ken'ichi Nakagawa
2. 発表標題 Quantum simulator with cold Rydberg atoms in micro trap arrays
3. 学会等名 1st-Asia-Pacific Workshop on Trapped Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中川賢一、田村光、山越智健
2. 発表標題 冷却リユードベリ原子を用いたプログラマブル多体系量子シミュレータ
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Miyamoto and S. Hayase
2. 発表標題 Experimental parameters for observation of high-dimensional effect in orbital
3. 学会等名 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 早瀬茂法, 宮本洋子
2. 発表標題 光子の軌道角運動量もつれ合い状態の同時計数確率に関するシミュレーション
3. 学会等名 第14回原子・分子・光科学 (AMO) 討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoko Miyamoto, Shigenori Hayase, and Yuma Sawa Yoko Miyamoto, Shigenori Hayase, and Yuma Sawa
2. 発表標題 Parameter optimization for observation of high-dimensional
3. 学会等名 Optical Manipulation Conference (OMC '18) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高瀬直美、奥野央志、中川賢一
2. 発表標題 Rb原子のRydberg状態励起用波長420nm干渉フィルタ安定型半導体レーザーの開発11
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高瀬直美、奥野央志、中川賢一
2. 発表標題 Rb原子のRydberg状態励起用波長420 nm干渉フィルタ安定型半導体レーザーの開発3
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	宮本 洋子  (Miyamoto Yoko)  (50281655)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授    (12612)	