

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22550021

研究課題名（和文）メゾスコピック極低温アルゴンガスの分子動力学的研究

研究課題名（英文）Study of dynamics of ultra-cold Ar atoms in magneto-optical trap

研究代表者

前田 はるか（MAEDA HARUKA）

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：80260199

研究成果の概要（和文）：本研究では、磁気光学トラップ中に捕獲された冷却原子を主な研究対象として、特に原子が高励起状態へ励起された場合に原子の間に働く遠距離相互作用を理解すること、及びそれを利用した新しい分子の創成や原子を用いた量子情報処理の実現の可能性などを追求するため、幾つかの装置を開発し、それを使った独自性に富む実験を行い興味深い結果を得た。

研究成果の概要（英文）：Aiming at understanding long-range van der Waals or dipolar interaction between cold Rydberg atoms in a magneto-optical trap, which plays key role in studying strongly correlated atom quantum system, we have carried out several fundamental experiments using newly developed experimental system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・物理化学

キーワード：分子動力学、極低温中性原子

### 1. 研究開始当初の背景

近年、磁気光学トラップ（MOT）中に生成される極低温原子ガスには、精密に制御できる条件を変化させることによって、原子間、原子-電子間、原子-分子間、あるいは分子-分子間での極低温相互作用に基づく多種多様の物理化学反応が発現することが理解されつつある。

例えばトラップ原子を高いエネルギー状態、いわゆるリユードベリ状態に励起した場合、低温原子間に働く双極子・双極子相互作用

用やファンデルワールス相互作用による自発的イオン化、ブロケード効果、多原子分子的挙動あるいはアモルファスガスとしての挙動などを示すことが実験的・理論的な研究により明らかにされている。中でもブロケード効果は、冷却中性原子を用いた量子演算に利用出来ることが示唆されており、これを対象とした研究が世界的に行われている。

また、極低温原子ガスをレーザーなどを用いて光電離して生成される極低温準中性プラズマでは電子と原子間に働く強いクロ

ン相互作用が系を支配することが知られている。例えばプラズマ結晶化の可能性が示唆されている例をはじめとして、実験室で作成可能なものの中で最も低温のプラズマであることが新しい現象の観測や応用を期待させる新奇なプラズマとして注目されている。

その他、原子の光会合による冷却分子の生成反応研究や、原子同士の極低温散乱研究なども盛んに行われつつあり、研究開始当初から現在もなお大いに学術的興味をそそる研究対象となっている。近年我が国では、多くの場合はボーズアインシュタイン凝縮を対象とした研究を一つの中心として、冷却中性原子を用いた実験的・理論的研究が盛んに行われている。

ところが申請者の知る限りでは、これら多くの研究は例えば原子干渉や量子相転移、量子反射、光格子を用いた量子コンピュータをはじめとする量子デバイスの原理研究といったテーマを対象とする、どちらかという物理的な興味に基づいた、あるいは物理的観点から俯瞰した研究がその大半を占めていると見受けられる。

一方、冷却粒子（＝原子・分子・電子）同士が相互作用する反応のメカニズムの研究やその制御、あるいは冷却原子・分子の精密分光といった、どちらかという物理化学的な立場からの研究は、少なくとも我が国ではそれほど盛んには行われていないのが現状であるといえる。

このような背景を鑑み、申請者はいまだに解決すべき課題が山積する冷却粒子（＝原子・分子・クラスター、及び電子も含める）間の反応メカニズムの解明及びそれに基づいた反応制御などをテーマとした極低温物理化学研究を新たに開始しようという着想に至ったものである。

## 2. 研究の目的

超高真空中の MOT 中に、目的とする希ガスやアルカリ金属の同位元素を選択的にレーザー冷却し捕獲すると、トラップ条件の如何により極低温ガス中に原子-原子、原子-電子、原子-分子、或いは分子-分子の間に強い相互作用が働くことが知られており、これらの相互作用の理解及びそれに基づく反応制御は原子・分子・マイクロクラスターがかかわる極低温物理学に関する新テーマの展開をもたらすものと期待される。

本研究では MOT 中でこれら強い相互作用に基づいて発現する幾つかの新奇な物理化学現象を題材に、その反応メカニズムの原理を詳細に解明することを通じて、最終的には冷却トラップ原子を用いた原子・分子・クラスターの低温反応物理学の新たな展開の糸口を掴むことをめざす。

一方、「1. 研究開始当初の背景」で既に述

べた様に、MOT 中の冷却原子を高励起リユードベリ状態に励起した時に働く高励起原子間の相互作用を利用して行う量子コンピューティングの原理研究は世界的に行われており、冷却原子を利用した量子情報処理の可能性を追求する研究は非常に興味深いテーマであることは間違いない。

以上の背景より、本研究では特に、リユードベリ原子を量子メモリーとして利用する可能性を考察することを目的とした実験研究を行う。我々の独自の戦略として、近年我々が世界に先駆けて観測に成功した「発散しないリユードベリ波束」を利用することを考え、この波束を利用することがデコヒーレンスに対してロバストな量子メモリーとして原子を利用し得ることを証明することが当面の目的である。

最後に、MOT はアトムトラップ微量分析法の最も中心的な装置であり、これを用いることで高い効率で同位元素を選択的に捕獲し、また極めて高い感度で検出できることが知られている。MOT 中に濃縮された同位元素自身、或いはそれを含む冷却分子、たとえば<sup>6</sup>リチウム-<sup>87</sup>ルビジウムフェルミボーズガスの様な同位体の種類が重要な役割を果たす冷却分子の分光学的研究などを行う道筋を付けることを目的とする。

## 3. 研究の方法

研究方法は、装置開発及び実験について、以下の様である。

MOT 中の原子を高励起状態あるいはイオン化状態に励起するための高分解能波長可変レーザーの開発を行い、空間的、時間的、或いはエネルギー的にウェルデファインドな高励起状態を生成することを試みる。これは、多体効果が支配する系に原子を励起する場合には必至条件となる。そのためには例えば赤色半導体レーザーの第二高調波を、非線形光学結晶を挿入したボウタイ型の共振器を用いることで生成し、更にそれを増幅することを試みる。ここでは簡単のため、まずはルビジウム原子のための励起レーザーを念頭にいれて行う。

一方、MOT 中に冷却された原子をリユードベリ状態に励起するため使用する波長可変レーザーがパルス発振の場合、高い繰り返し数を持つレーザーを使用することでデータの取得を迅速化できる。このための高繰り返しパルス発振波長可変レーザーの開発を試みる。

また、冷却リユードベリ原子、あるいはプラズマを検出するための電極を MOT 容器の中心部に設け、電極に電圧を印加することでリユードベリ原子或いはプラズマをマイクロチャンネルプレートを用いて検出する。

MOT を用いて行うことを予定している実

験を予備的に行う為の、原子ビームチェーンを準備し、波束の励起や原子のイオン化・イオンの再結合などに関する幾つかの予備実験を行う。

上述の装置開発を行うと同時に幾つかの実験を行う。この場合実験手法には、MOT あるいは原子ビーム装置のいずれの場合にも、基底状態、或いは低励起状態にある原子を波長可変レーザーによりリユードベリ状態へと共鳴励起し、更にマイクロ波を照射、最後に終状態を検出するためにパルス電場を印加し終状態を検出する、というものをを用いた。

#### 4. 研究成果

本研究ではまず、キロヘルツオーダーの高繰返し数を持つ波長可変色素レーザーシステムの開発を行い、これを用いてリチウム原子の高励起状態の生成を確認した。この結果は論文[1]として発表した。

更に、トラップされた極低温高励起原子のマイクロ波精密分光を実行するための予備実験として、マイクロ波による高励起原子のイオン化実験を行った。実際高励起原子はマイクロ波の強度に鋭敏に反応し、条件によってはいとも簡単に多光子イオン化してしまう場合がある。本実験ではイオン化の条件及びイオン化の物理を定量的に把握することを目的とした。得られた結果は論文[2]として発表した。

トラップ極低温高励起原子のマイクロ波精密分光、或いは量子状態の精密制御を実行するための準備実験として、周波数チャープマイクロ波を用いたリユードベリ原子の多光子遷移実験を行った。ここではチャープマイクロ波によりリユードベリ準位間に多光子断熱高速遷移が誘起される条件を定量的に解明することに主眼をおき、得られた研究成果は論文[3]として発表した。本実験により長距離原子間相互作用をナノ秒オーダーの短時間内に変化させることができることが明らかにされた。また、この方法により通常は生成に大きな困難の伴う高い軌道角運動量状態への励起が可能であることが判った。高角運動量状態にあるトラップ原子の精密分光は殆ど行われておらず、新たな高精度データの取得が期待される。

また、二つの軌道角運動量状態のみから成る量子重ねあわせ状態(波束)の生成をナトリウムリユードベリ原子を用いて試みた。この様な状態の生成と観測は、原理的には冷却リユードベリガスから多原子分子を生成する手段の一つとなり得、実験で確認することが強く望まれるものであった。この様な背景の下に本実験は行われた結果、波束の生成とその制御に成功を修め、論文[4]として発表した。

さらに、「発散しない波束」(論文[6])をリユードベリ原子に励起することで本来外界からの擾乱に対して極めて脆弱である原子波束がその欠点から免れ得ることを提示し、その結果量子メモリーとしての利用の可能性を明らかにした。

「発散しない波束」を用いた量子情報記録を行う場合、波束の構成準位がウェルデファインドであることが望まれる。一方「発散しない波束」は、通常、多準位系に近共鳴マイクロ波を照射して生成できると考えられるが、これまでの実験で実際に波束が励起された例はリチウムとナトリウムだけである。これらアルカリ原子の場合には微細構造の存在が「発散しない波束」の構成準位を複雑にしようという問題がある。そこで本研究では微細構造の影響を極力除外できるアルカリ土類原子に波束を励起することを試み、初めてその励起に成功した。また、波束の構成準位を簡単な理論により同定することに成功した。結果は日本物理学会第 68 会年次大会にて報告した。

最後に、原子・分子の同位体選別的な分光学的実験を行う準備研究として実験室で簡単に作成できる飛行時間型質量分析器の性能に関する実験研究を行い、成果を論文[5]に報告した。

#### 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 6 件)

①西口貴洋, 東出 純, 水谷由宏, 高峰愛子, 前田はるか, “発散しない原子波束の生成と観測”, 分光研究, 査読有, 63 巻, 89-97 (2012).

②Yoshihiro Mizugai and Haruka Maeda, “N-Body simulations of expanding ions in a time-of-flight spectrometer”, J. Mass Spectrom. Soc. Jpn., 査読有, 59巻, 63-67 (2011).

③H. Maeda, J.H. Gurian, and T.F. Gallagher, “Population transfer in the Nas-Rydberg ladder by a chirped microwave pulse”, Phys. Rev A., 査読有, 84巻, 063421 1-7 (2011).

DOI:10.1103/PhysRevA.84.063421

④H. Maeda, J.H. Gurian, and T.F. Gallagher, “Population transfer by multiphoton adiabatic rapid passage”, Phys. Rev A., 査読有, 83巻, 033416 1-8 (2011).

DOI:10.1103/PhysRevA.83.033416

⑤J.H. Gurian, K.R. Overstreet, H. Maeda, and T.F. Gallagher, “Connecting field ionization to photoionization via 17- and 36-GHz microwave fields”, Phys. Rev. A. 査読有, 82巻, 043415 1-9 (2010). DOI:10.1103/PhysRevA.82.043415

⑥J.H. Gurian, H. Maeda, and T.F. Gallagher, “Kilohertz dye laser system for high resolution laser spectroscopy”, Rev. Sci. Instrum., 査読有, **81**, 073111 1-3(2010). DOI:10.1063/1.3462978

[学会発表] (計 8 件)

①R. Shiozaki, A. Takamine, and H. Maeda, “Production of ultra cold Rydberg gases for cold atom engineering”, the 12<sup>th</sup> Asia Pacific Physics Conference, July 2013, Makuhari, Japan.

②K. Komatsu, A. Takamine, Y. Mizugai, and H. Maeda, “Suppression of multiphoton ionization of Rydberg atoms by bichromatic fields”, the 12<sup>th</sup> Asia Pacific Physics Conference, July 2013, Makuhari, Japan.

③N. Takiguchi, A. Takamine, Y. Mizugai, and H. Maeda, “Forced synchronization of quantum system”, the 12<sup>th</sup> Asia Pacific Physics Conference, July 2013, Makuhari, Japan.

④瀧口菜美, 高峰愛子, 水谷由宏, 前田はるか, “発散しない波束の二電子系原子への励起の試み”, 日本物理学会第 68 会年次大会, 2013 年 3 月, 広島大学.

⑤H. Maeda, “Coherent control of Rydberg atoms (Nondispersing Bohr wave packets)”, 6<sup>th</sup> International Conference on Laser Probing, June 2012, Paris, France.

⑥前田はるか, J.H. Gurian, T.F. Gallagher, “発散しない波束を用いた Na s-p ラダークライミング”, 日本物理学会第 67 会年次大会, 2012 年 3 月, 関西大学.

⑦前田はるか, “量子位相同期による波束の生成と量子制御への応用”, 2011 年秋季応用物理学関係連合講演会, 2011 年 8 月, 山形大学.

⑧前田はるか, “デコヒーレンスフリーな非発散波束の生成と量子制御への応用”, 2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011 年, 神奈川大学 (震災により発表扱い).

[その他]

ホームページ等

<http://www.phys.aoyama.ac.jp/~maeda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 はるか (MAEDA HARUKA)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号: 80260199