

## 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 3 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22684021

研究課題名（和文）

レーザー冷却イオンで実現する極低温中性原子気体の局所物性研究

研究課題名（英文）

Local probing of ultracold atomic gases using laser-cooled ions

研究代表者

向山 敬 (MUKAIYAMA TAKASHI)

電気通信大学・先端領域教育研究センター・特任准教授

研究者番号：70376490

研究成果の概要（和文）：

本研究ではレーザーによって極低温にまで冷却されたイオンと中性原子を用いて極低温イオン-原子混合系を実現した。極低温のイオンと中性原子を生成するために必要な各種レーザー光源を作成し、イオンと中性原子を同一の真空チャンバー中において捕獲、冷却した。捕獲された中性原子を光ピンセットの手法でイオントラップの位置に輸送し、両者を混合させ低温領域における弾性散乱断面積の測定に成功した。

研究成果の概要（英文）：

We have created an ultra-cold atom-ion hybrid system using laser-cooled  $^{40}\text{Ca}^+$  ions and  $^6\text{Li}$  atoms. To create the mixture, we have made laser diode systems to trap and cool ions and atoms. We successfully create the mixture by transporting atoms to the ion trap position by optical tweezers technique. We experimentally determined the elastic scattering cross-section between atoms and ions in a temperature range from 0.1 K to 3K.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2011 年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2012 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	18,900,000	5,670,000	24,570,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学／原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：原子・分子物理、イオントラップ、レーザー冷却、量子縮退

## 1. 研究開始当初の背景

本研究の目的は、極低温中性原子気体の「電場による局所操作法」の実現である。中性原子はその名の通り電気的中性のため、電荷のある粒子系と比べると粒子間相互作用が格段に弱い。そのため相互作用の理論的記述の精度が高く、超伝導や超流動といった量子凝縮系の理論の構築、検証に極めて有効で

あるという利点がある。一方で宿命的な問題を抱えている。それは調和ポテンシャル中にトラップされているため原子気体の密度が空間的に不均一であるという問題である。原子系で発現する量子相は不均一な密度分布を反映して異なる密度の点で異なる相が現れる。現れた量子相の定量的理解のためには密度が一樣と考えられる狭い領域（一樣な量

子相を示す領域)における局所的な物性を調べることが必須であり、この局所物性評価の難しさのために理論的記述の精度の高い冷却原子系にも関わらず理論と実験の付き合いが容易でないという背景がある。高い空間分解能を持つ局所的な観測手法の開発が重要な課題となっている。

## 2. 研究の目的

本研究ではこれまで原子気体の操作には不向きと考えられてきた電場を用いた原子集団の局所的原子操作法を実現する。ここで用いるアイデアは、トラップされたイオンを中性原子気体に混ぜ、イオンと中性原子の間の相互作用を介して原子を操作する、というものである。イオンは電場により位置や速度を制御することができるが、その電場は中性原子には影響を与えない。一方イオンと中性原子は静電相互作用により大きな相互作用をするため(中性原子同士と比べて比較的長距離に及ぶ力)、電場によってイオンの運動状態を制御すると、イオンと中性原子の間の相互作用を介してイオンの位置における中性原子の運動状態に影響を与えることができる。この手法は原子気体集団の非常に狭い領域にアクセスすることを可能にし、この「局所性」が磁場や光を用いた原子の操作法では不可能だった実験を可能にする。

そして本研究ではこの新しい電場による原子操作法を用いて、超流動について年来の懸案である「超流動臨界速度と渦生成」の問題に挑戦する。超流動とは、流体の粘性がなくなり容器など外界との相互作用が消え、流体が減衰せずに流れ続ける現象である。しかし超流動体はいくらでも速い速度で容器の中を流れることはできない。超流動が容器の中をある値以上の速度で運動すると超流動の安定性は壊れ、流れは減衰することが多くの実験から知られている。そしてこの臨界速度における超流動の減衰が渦生成によるものであることが1955年にFeynmanによって議論され、今では確かなものとして広く受け入れられている。しかしながら、この仮説は古くから議論されてきたにもかかわらず未だ実験的検証が完全とは言えないというのが現状である。この「超流動臨界速度と渦生成の関係」という最も基本的な超流動不安定性のメカニズムを明確にすることが超流動体の物理の理解に不可欠であることは言うまでもない。冷却原子気体は残留渦など不純物がなくクリーンな系であり、捕獲は非接触な力で行われるため外壁などの影響も存在しない理想的な系である。また冷却原子系で

は渦のサイズは光の波長程度の大きさがあり、さらに原子集団を開放することで渦の大きさは光の波長より十分大きくなる。よって冷却原子系では臨界速度における渦生成のダイナミクスの情報が視覚的に得られることが期待でき、超流動の散逸過程のミクロなメカニズムの解明に決定的な情報を得ることができると考えられる。しかし原子系での課題は渦の観測ではなく生成方法にある。実験では小さく絞られた光を原子集団内で動かして渦生成をすることになるが、そのサイズは数ミクロン程度かそれ以上となる。この大きさは渦のサイズに比べてはるかに大きく、この異物の運動は超流動体に流れを生じさせるため純粋な意味の臨界速度の測定にはならず、この条件下では渦の生成も観測できない。渦のサイズよりも小さな異物を超流動体中に実現することが本質的に重要であり、しかし極低温原子系では難しい課題となっている。

## 3. 研究の方法

本研究では中性原子とイオンのトラップを一つの真空チャンバーの中のわずかにずれた位置に配置し、冷却された中性原子を光ピンセットによって捕獲後にトラップ光の焦点を移動させることで原子集団をイオントラップの位置に輸送した。トラップ領域における装置の概略図を図1(a)に示す。中性原子の気体は図の左側からゼーマン減速器を通して減速され、磁気光学トラップ(MOT)の位置に到達する。そこで6方向からレーザーによって減速、冷却されトラップされる。MOTの後、非共鳴の光(1064nm光源)である光双極子トラップ用レーザーの焦点をMOTの位置に配置することで原子を光双極子トラップに移す。さらにその焦点位置をチャンバー中央から少しずれた位置にあるイオントラップの位置に動かすことで中性原子を輸送する。MOTの位置とイオントラップ電極は約5cm離れている。この輸送の際にはスライドステージ上に配置された光双極子トラップの焦点を作るレンズを動かすことで行う。一方、イオントラップ領域にはイオンを捕獲するための電極が配置されており、イオンを捕獲された後にレーザーによって極低温まで冷却する。イオンの冷却には冷却光である397nmのレーザーと、さらに準安定状態に落ちた時に冷却準位に状態を戻すための866nmのレーザーカルシウム原子をイオン化するための光源である423nmと375nmレーザーの4つのレーザー光が必要である。

本研究では中性原子はリチウム原子を、イ

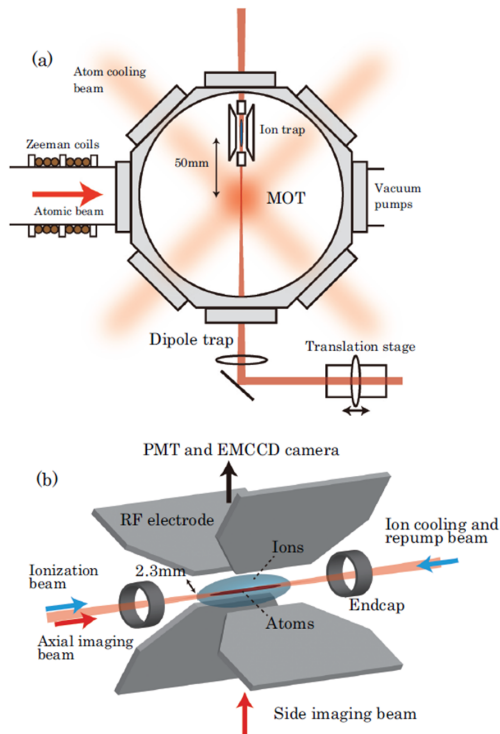


図 1 : 装置の概略図(a)とイオントラップ電極(b)

オンとしてはカルシウムイオンを用いている。本研究ではカルシウムイオンのレーザー冷却用の光源である 397nm の光は、794nm で発振する外部共振器付き半導体レーザーを作成し、テーパー型増幅器で光強度を増幅した後共振器内に配置した BIBO 結晶で第二高調波を発生させることで生成した。またカルシウム原子をイオン化させるための光源の一つである 423nm のレーザーも 397nm のレーザーと全く同様の方法で生成した。中性原子を捕獲するための光源である 671nm のレーザーには外部共振器付き半導体レーザーとテーパー型増幅器を使用した。

#### 4. 研究成果

イオントラップには、トラップが安定な領域を 1 次元軸状に持つリニアトラップを選んだ。トラップ用の光源である 397nm のレーザーを作るために、まず 794nm の無反射コーティング付き半導体レーザー素子に外部共振器を組んで単一周波数発振させた。この半導体レーザーの出力は約 20mW 程度であり、これをさらにテーパー型光増幅素子に入射することで 200mW 程度まで増幅した。そのレーザー光を bow-tie 型共振器に対して周波数ロックし、共振器中に第二高調波発生用の結晶である BIBO 結晶を配置することで約 8mW の 397nm の光を発生させた。このとき、レーザーの周波数を共振器に対して安定化させているが、実験装置の持つ振動などでロック

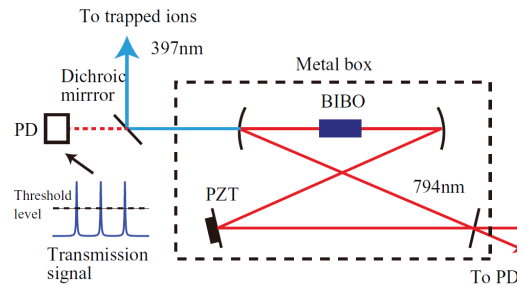


図 2 : 第二高調波発生共振器の自動ロックシステム

が外れてしまうことがあり、安定化のためのフィードバックパラメータの最適化は重要な問題であった。我々は共振器の安定化を強固にするために、ロックが外れたときに自動的に共鳴条件を探しなおしてロックをかけ直すシステムを開発した (図 2)。ロックが外れたことを検知する方法として第二高調波出力にわずかに混ざっている基本波の光強度を検出し続け、その強度がある値をより小さくなったときにロックが外れたと判断する回路を用いた。その成果を論文として出版した。

また、リポンプ用のレーザー光である 866nm のレーザーについては無反射コーティング付き半導体レーザー素子に外部共振器を組んで単一周波数発振させて使用した。高い効率で Ca 原子をイオン化させるために本研究では光イオン化の手法を用いており、イオン化に必要な光源である 423nm と 375nm のレーザーも作成した。423nm のレーザー光を発生させるために、基本波である 846nm で発振する外部共振器付き半導体レーザーを作成し、約 10mW の出力を得た。このレーザー光をテーパー型増幅器で 100mW 程度まで強度を増幅したのち、第二高調波発生結晶 (BIBO 結晶) で 423nm に波長変換を行った。375nm のレーザーは Ca 原子を第一励起状態からイオン化準位 (連続準位) へ遷移させるための光源であり、波長安定化は必要のない光源でなかったため日亜化学工業製の半導体レーザーを、外部共振器を組まずに使用した。これらのレーザーのうち Ca イオンの冷却に用いる 397nm と 866nm のレーザーについては周波数の長期的安定度が必要である。本研究では 0.1°C 程度の精度で温度安定化された箱の中に配置されたファブリペロー共振器にレーザーを安定化させることで長期的な周波数の安定度の向上を図った。

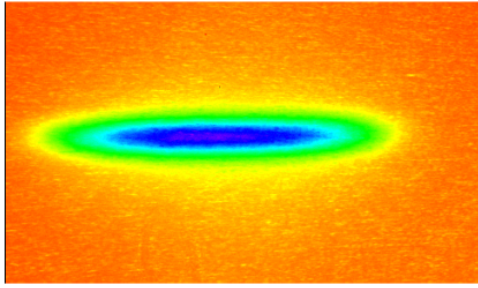


図3：イオンの蛍光画像

実験ではトラップされたイオンからの蛍光をPMT検出器で観測するとともにCCDカメラで空間的な分布も測定している。図3に実験で得られた典型的な $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの蛍光画像を示す。10分程度監視していても蛍光量に大きな減少が見られない程度の長寿命を実現できている。イオンの蛍光量を観測しながら冷却レーザーやリポンプレーザーの周波数の調整を行うことで冷却効率を上げることができる。また、イオンの数を減らすことでRF電場による加熱の影響を小さくすると、イオンの温度をより低温まで下げることができる。本研究ではイオンの数を数個まで減らし、冷却効率を最適化するように冷却レーザーとリポンプレーザーの周波数を調整した結果、イオンの結晶化の観測に成功した。結晶化した画像からイオン間距離が測定でき、そこからイオンの温度を大まかに評価することができる。これは結晶化が起こるのはイオンの運動エネルギーがイオン間相互作用エネルギーの100分の1程度になったときに起こることが知られており、このことからイオンの温度が数ミリケルビン程度であることがわかる。本研究で用いた装置ではイオンの数と冷却レーザーのパラメータを調節することで数ケルビンから数ミリケルビンの範囲でイオンの温度が制御できている。

中性原子のトラップ位置とイオントラップ電極の位置は5cm程度離れた位置にある。真空チャンバー中央で磁気光学トラップにより捕獲された中性原子は光双極子トラップで捕獲し直された後、トラップレーザーの焦点位置を動かすことでイオントラップ位置まで輸送されてイオンとの混合系が作成

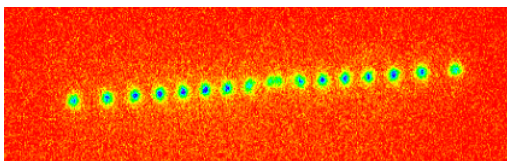


図4：1次元イオン結晶

された。その際に用いた中性原子の光双極子トラップ用レーザーには1064nmのファイバーレーザーを用い、約15Wを入射することで中性原子を捕獲した。この時の原子集団の原子数は $10^4$ 個程度、温度は180 $\mu\text{K}$ であった。この原子をイオントラップ位置まで輸送し、その位置での原子数の減少の様子を図4に示す。赤のデータ点が中性原子のみをイオントラップ位置で保持したときの原子数の推移を示している。中性原子は保持しているだけでも1/e減衰時間4.3秒で減衰している。これは残留気体との衝突によるロスと考えられ、この寿命は真空度で決まっているものである。一方、青のデータ点がイオンと中性原子を同時にトラップしたときの結果であり、明らかに原子のみを保持したときと比べて短い時定数で減衰していることが見て取れる。この短い時定数がイオンの存在によるものであることを明確にするために、イオンがないときでもイオントラップに必要なレーザーはすべて入射されており、またイオントラップに必要な電場も印加されている。ここで示すデータはイオン密度が $n_{\text{ion}}=1.2 \times 10^{13} [\text{m}^{-3}]$ の時のものであり、1/e減衰時間が1.7秒まで短くなっている。この実験において、イオン温度は2K程度あり、中性原子のトラップ深さと比べて1000倍以上高い。そのためイオンと中性原子が弾性散乱を起こすと中性原子はほぼ確実にトラップから飛び出してロスすることになる。よって原子数の減少はイオン-中性原子間の弾性散乱を観測していることになり、減衰の時定数から断面積を計算すると $3.5 \times 10^{-16} [\text{m}^2]$ と見積もられた。これは半古典的衝突理論の予測値 $4.7 \times 10^{-16} [\text{m}^2]$ と極めて近い。これによりイ

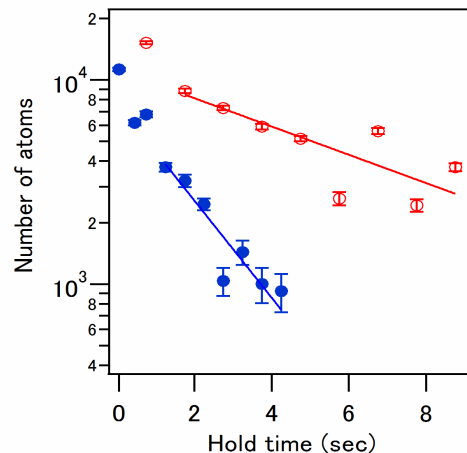


図5：原子をイオンの位置まで移動した後の保持時間に対する原子数のプロット

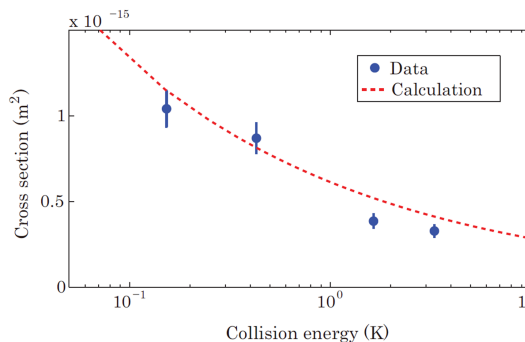


図6：イオン蛍光の冷却用レーザー周波数依存性

オン - 中性原子間の衝突エネルギーが 2K 程度の温度領域において半古典的衝突理論が良く成り立っているということが確かめられた。さらに、この弾性散乱断面積の測定を異なる温度において測定し、弾性散乱断面積の衝突エネルギー依存性を測定した。図6に実験結果を示す。実験による測定結果が●で示されており、点線は半古典的理論計算による予測値である。この衝突エネルギー領域では特殊な共鳴現象がない限りは半古典論でよく説明できることが知られており、矛盾ない結果が得られた。

このように本研究では中性原子気体と冷却されたイオンを混合した系の実現に成功した。これは中性原子気体の物理的性質を冷却されたイオンをプローブとして用いることで探究するという技術への重要なステップとなっている。

#### 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 4 件)

- ① S. Haze, S. Hata, M. Fujinaga, and T. Mukaiyama, "Observation of elastic collisions between lithium atoms and calcium ions", *Physical Review A* **87**, 052715 (2013). 査読有り  
DOI: 10.1103/PhysRevA.87.052715
- ② S. Haze, S. Hata, M. Fujinaga, and T. Mukaiyama, "Auto-relock system for a bow-tie cavity for second harmonic generation", *Rev. Sci. Instr.* **84**, 026111 (2013). 査読有り  
DOI: 10.1063/1.4793613
- ③ S. Nakajima, M. Horikoshi, T. Mukaiyama, P. Naidon and M. Ueda, "Measurement of an Efimov Trimer

Binding Energy in a Three-Component Mixture of  ${}^6\text{Li}$ ", *Physical Review Letters* **106**, 143201 (2011). 査読有り

DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.143201

- ④ S. Nakajima, M. Horikoshi, T. Mukaiyama, P. Naidon and M. Ueda, "Nonuniversal Efimov Atom-Dimer Resonances in a Three-Component Mixture of  ${}^6\text{Li}$ " *Physical Review Letters* **105**, 023201 (2010). 査読有り  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.023201

[学会発表] (計 19 件)

- ① Takashi Mukaiyama, Experimental study on collisional properties of ultracold  $6\text{Li}$  near a p-wave Feshbach resonance(招待講演), UEC-Shanxi joint workshop, 2013年3月14日、電気通信大学
- ② 向山敬、冷却原子気体における p 波相互作用(招待講演)、新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」ウィンタースクール、2013年2月25日、高エネルギー加速器研究機構
- ③ Takashi Mukaiyama, Measurement of Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas(招待講演), The 10th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, 2012年10月23日、Institute of Atomic and Molecular Sciences, Taiwan
- ④ Takashi Mukaiyama, Experimental progress pursuing p-wave superfluid and ultracold atom-ion physics(招待講演), Few-body calculation of cold atomic physics, 2013年8月31日、理化学研究所
- ⑤ 向山敬、極低温中性原子気体系における散乱過程の制御と極低温分子生成(招待講演)、原子衝突学会、2012年7月28日、電気通信大学
- ⑥ Takashi Mukaiyama, Ultracold molecules(招待講演)、日仏先端科学シンポジウム、2012年1月19日、Nice, France
- ⑦ Takashi Mukaiyama, Towards creation of cold molecules using ultracold atoms and ions, Fundamental Physics Using Atoms 2011、2011年10月10日、岡山大学
- ⑧ Takashi Mukaiyama, Measurement of

- Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas(招待講演), Renormalization Group Approach from Ultra Cold Atoms to the Hot QGP, 2011年8月29日、京都大学基礎物理学研究所
- ⑨ Takashi Mukaiyama, Measurement of an Efimov Trimer Binding Energy in a Three-Component Mixture of 6Li(招待講演), Workshop on Frontiers in Ultracold Fermi Gases, 2011年6月7日、Institute for theoretical physics, Italy
- ⑩ Takashi Mukaiyama, Measurement of Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas(招待講演), 日本物理学会シンポジウム, 2011年3月27日、新潟大学
- ⑪ Takashi Mukaiyama, Measurement of Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas(招待講演), Conference on Ultracold Atoms and Molecules, 2011年1月24日、東京大学
- ⑫ 向山敬, レーザー冷却フェルミ原子系の普遍的熱力学(招待講演), レーザー学会, 2011年1月10日、電気通信大学
- ⑬ Takashi Mukaiyama, Measurement of Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas(招待講演), 量子エレクトロニクス研究会「冷却原子系で探究する新しい物理と極限的技術」、2010年12月18日、上智大学軽井沢セミナーハウス
- ⑭ Takashi Mukaiyama, Measurement of Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas(招待講演), Conference on "Novel Quantum States in Condensed Matter", 2010年9月2日、University of Chicago center in Beijing, China
- ⑮ 向山敬, 強く相互作用するフェルミ粒子系の熱力学(招待講演), 基研研究会「熱場の量子論とその応用」、2010年8月30日、京都大学基礎物理学研究所
- ⑯ Takashi Mukaiyama, Measurement of Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas(招待講演), 量子情報サマースクール, 2010年8月24日、ホテルサンライズ知念
- ⑰ Takashi Mukaiyama, Experimental observation of Efimov trimer states in ultracold Fermi gases(招待講演), 「少数粒子系の物理の現状と今後の展望」研究会、2010年8月20日、福岡国際会議場
- ⑱ Takashi Mukaiyama, Measurement of Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas(招待講演), International workshop on statistical physics of quantum systems, 2010年8月3日、東京大学
- ⑲ Takashi Mukaiyama, Measurement of Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas, International Workshop on Ultracold Fermi Gas(招待講演), 2010年5月13日、日本原子力研究開発機構
- ⑳
- [図書] (計2件)
- ① 堀越宗一、向山敬、上田正仁、ユニタリ極限におけるフェルミ原子気体の普遍的熱力学、日本物理学会誌 2012年4月号 p.257-261
- ② 向山敬、極低温フェルミ原子気体系におけるBCS-BECクロスオーバー、固体物理、46巻、2011、111-120
- [その他]  
ホームページ等  
<http://www.ils.uec.ac.jp/~muka/index.html>
6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
向山 敬 (MUKAIYAMA TAKASHI)  
電気通信大学・先端領域教育研究センター・特任准教授  
研究者番号：70376490