

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800227

研究課題名(和文) 極低温原子気体との共同冷却によるイオンの振動基底状態冷却

研究課題名(英文) Ground-state cooling of ions via sympathetic cooling with ultracold atomic gases

## 研究代表者

土師 慎祐 (Haze, Shinsuke)

電気通信大学・学内共同利用施設等・学振特別研究員

研究者番号：10647423

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では極低温イオン・原子混合気体を生成するための実験設備を構築し、ミリケルビンから数ケルビンの衝突エネルギーレンジにおいてイオン・中性原子間の散乱を観測することで、その散乱断面積の決定に成功した。さらに、弾性散乱レートおよび非弾性散乱ロスについて詳しく調べ、本研究で用いるイオン・原子混合系が共同冷却やイオン・原子間量子散乱の実現において有用であることが確認された。これらの成果は、イオン・原子間の共同冷却への応用のみならず、星間分子反応等に代表される極低温化学反応ダイナミクスの解明への足掛かりにもなると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, we implemented an experimental system for realizing an ultracold mixture of atoms and ions. We succeeded in determining the cross sections by measuring atom-ion collisions in a wide collision energy scale ranging from milli kelvin to a few kelvin. We also precisely investigated the elastic collision rate and the inelastic loss rate, and it is confirmed that our atom-ion mixture is useful for realizing atom-ion sympathetic cooling and atom-ion interaction in a quantum regime. These results can be an essential step for atom-ion sympathetic cooling and also for exploring the dynamics of chemical reactions in ultracold temperature, which governs the chemistry in an interstellar space.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：冷却原子 冷却イオン

## 1. 研究開始当初の背景

レーザーの実現により原子物理学は近年飛躍的に成長を遂げ、ボースアインシュタイン凝縮体の実現などを筆頭に目覚ましい成果が次々と報告されるようになった。こういった研究においては、特に物質の量子性が顕わとなる凝縮体や超流動体を実現する為に系を極低温領域へと冷却する必要があるが、その際大きな効力を発揮するのがレーザー冷却である。例えば原子気体の場合なら、レーザー冷却を用いることで瞬時のうちに室温からマイクロケルビンオーダーまでの冷却が可能となり、現在では当該分野のスタンダード技術となっている。しかしながら、この冷却方法はどのような物質に対しても有効であるわけではなく、幾つかの克服すべき課題が残っていることも事実であり、近年ではそれらの問題解決に向けて様々な取り組みが成されている。

## 2. 研究の目的

本研究では「極低温原子気体との共同冷却によるイオンの振動基底状態冷却」を行うことを目的としている。

上述のように、物質の冷却に際してはレーザー冷却技法は非常に強力なものであるが、必ずしも万能ではなく、冷却を効率的に行うための幾つかの制約が存在する。中でも、冷却に適した光学遷移を有する原子種にしか適応できないという点は、研究に使用できる原子種の選択肢を大幅に狭めてしまうことにつながり、近年克服すべき課題として挙げられている。

本研究では極低温状態にある原子気体を冷媒として用い、イオントラップ中のイオンとの共同冷却を行うことでイオンの振動基底状態冷却を実現する事を最終目的として掲げている。この方法では粒子間の散乱過程を介して冷却が行われるので、レーザー冷却にあるような制約を考慮する必要がない。そのため、これまで困難であった原子、イオン種や分子などの冷却への応用が期待される。実際、これまでに異種中性原子間の協同冷却効果に関する報告例はあるが、イオントラップ中のイオンと原子気体との冷却による基底状態冷却は未だなされておらず、本研究が初の試みとなる。

## 3. 研究の方法

本研究では「マイクロケルビン温度領域へ冷却した原子気体との共同冷却により、イオントラップ中のイオンを振動基底状態まで冷却すること」を目指し、研究を進めた。そのためまず、中性原子気体、およびイオンを真空チャンバー内でそれぞれ個別にトラップし、レーザー冷却を行う。その後、原子・イオン間の相互作用を実現する為に両者を

同一空間上で重ね合わせイオン原子混合気体を生成する。その際には、光ピンセット(光双極子トラップのポテンシャル極小点を移動させ、捕獲体を空間輸送する技法)により原子気体を輸送し、イオントラップ中のイオンと同時に捕獲した状態で保持する。

イオン・原子間の散乱を観測するためには、イオンと原子を一定時間相互作用させた後、混合気体中の原子数、イオン数を検出することで弾性散乱および非弾性散乱レートや散乱断面積に関する情報が得られる。

## 4. 研究成果

### (1) 「イオン・原子間の弾性散乱の観測」

カルシウムイオンとリチウム原子間の弾性散乱の観測に成功し、弾性散乱断面積を決定する事が出来た。弾性散乱特性は協同冷却過程においては最も重要なパラメタであり、共同冷却効率や最終到達温度などに大きく影響するものであるため、詳細に調べる必要がある。実際の実験では、レーザー冷却により100 ミリケルビン程度に冷却されたイオン集団と原子気体を混合し、相互作用後の原子数を測定することでイオン・原子間の弾性散乱ロスレートを見積もった。図.1は測定された弾性散乱断面積の衝突エネルギー依存性の結果を表す。図中の点線はイオン原子間散乱の半古典モデルから予測される理論曲線で、測定結果との良い一致が得られていることが分かった。この成果は論文にまとめられ、Physical Review A. 誌に掲載された。[1]

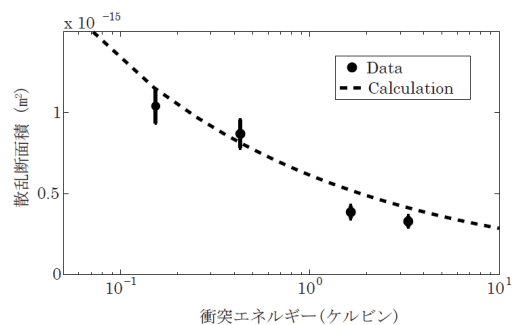


図.1 散乱断面積のエネルギー依存性

### (2) 「イオン・原子間の非弾性散乱の観測」

イオン原子間の非弾性散乱過程、特に電荷交換衝突の観測に成功し、その散乱特性の評価を行った。まず、本研究で使用している原子イオン混合気体においてどのような非弾性散乱過程が起こりうるかを確かめるため、相互作用後にイオントラップ中に残った生成物イオンの質量分析を行い、リチウムイオンが検出されることがわかった。これにより非弾性散乱過程ではイオン・原子間の電荷交換反応が支配的に起こると結論付けた。非弾性散乱の検出には、イオン原子間相互作用

用後のイオンロス測定し、散乱係数を求めた。図.2は混合気体中でのイオンロス測定の結果を表す。この結果より、電荷交換レートが求められ、この時に準備した原子気体の密度の情報をもとに散乱係数を決定する事が出来た。さらに、イオンを電子基底状態に準備した際には電荷交換反応がほぼ無視できる程度まで抑制され、協同冷却の妨げとなるイオンロスによる悪影響をうまく回避できることが確認された。

尚、この研究成果は論文にまとめられ Physical Review A. 誌に掲載された。[2]

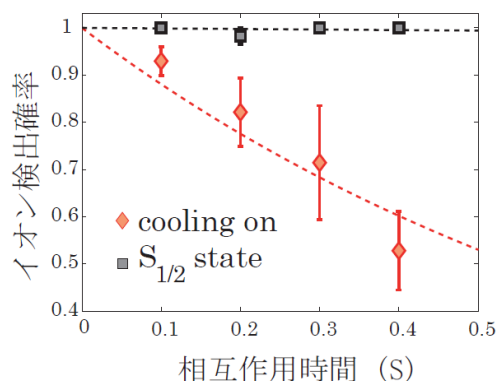


図.2 電荷交換衝突の観測結果

### (3) 「イオンの四重極子遷移の分光」

イオンの共同冷却効果の検証を行うためにはイオンの温度を実測しなければならない。その方法としては、イオンの振動サイドバンド遷移をプローブし、赤方および青方離調側の両スペクトルの遷移確率を比較するのが一般的である。そのため、本研究ではカルシウムイオンの有する狭線幅光学遷移 (S-D 軌道間の四重極遷移) の分光実験を行った。この遷移の自然幅は非常に狭いため、励起用レーザーの線幅としてキロヘルツもしくはそれ以下の周波数揺らぎ幅の、高安定なものを準備する必要がある。本研究ではそのため、半導体レーザーの周波数を高フィネス光共振器を参照しながらフィードバック安定化した。

実験ではこうして安定化されたレーザー光を単一イオンに対して照射することで四重極子遷移を励起し、周波数分離された振動サイドバンド遷移スペクトルの取得に成功した。これより、イオンの温度測定方法が概ね確立され、当初本研究の最終目標として掲げていたイオン・原子間の協同冷却実現まであと一歩と迫った。

#### <引用文献>

Shinsuke Haze, Sousuke Hata, Munekazu Fujinaga, and Takashi Mukaiyama, “Observation of elastic collisions between lithium atoms and calcium ions” Physical Review A. 87,

052715 (2013).

Shinsuke Haze, Ryoichi Saito, Munekazu Fujinaga, and Takashi Mukaiyama, “Charge-exchange collisions between ultracold fermionic lithium atoms and calcium ions” Physical Review A. 91, 032709 (2015).

#### 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)

Shinsuke Haze, Ryoichi Saito, Munekazu Fujinaga, and Takashi Mukaiyama, “Charge-exchange collisions between ultracold fermionic lithium atoms and calcium ions” Physical Review A. 91, 032709 (2015). 査読あり  
DOI: 10.1103/PhysRevA.91.032709

Shinsuke Haze, Sousuke Hata, Munekazu Fujinaga, and Takashi Mukaiyama, “Observation of elastic collisions between lithium atoms and calcium ions” Physical Review A. 87, 052715 (2013). 査読あり  
DOI: 10.1103/PhysRevA.87.052715

(学会発表)(計8件)

#### 国際学会

Ryoichi Saito, Shinsuke Haze, Mizuki Sasakawa, Kazuki Kyuno, and Takashi Mukaiyama, “Measurement of Charge-Exchange Collision Cross Section between Li and Ca<sup>+</sup> in a Temperature Range of mK to K” The Irago conference 2015 田原市, 愛知県, 日本, 10月22-23日, 2015年 査読あり

R. Saito, S. Haze, M. Fujinaga, K. Kyuno and T. Mukaiyama, “Local density probing of atomic gas via cold Li-Ca<sup>+</sup> inelastic collisions in an atom-ion hybrid system”, 46th Annual Meeting of APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics, コロンバス, アメリカ合衆国, 6月2015年 査読あり

S. Haze, M. Fujinaga, R. Saito and T. Mukaiyama, “Charge Exchange Collisions Between Ultracold Fermionic Atoms and Trapped Ions”, Trapped Ions Meet Cold Atoms, 27, Physikzentrum Bad Honnef March 27-29, (2014) 査読あり

## 国内学会

齋藤了一, 土師慎祐, 笹川瑞樹, 中井良輔, 向山敬

「原子-イオン間電荷交換散乱のエネルギー依存性」日本物理学会第71回年次大会(2016年)査読あり

齋藤了一, 藤永宗和, 土師慎祐, 向山敬  
「冷却イオンを用いた原子気体の局所密度測定」日本物理学会 2015年春季大会、2015.3 査読あり

土師慎祐, 藤永宗和, 齋藤了一, 向山敬  
「極低温原子・イオン間の非弾性散乱特性」日本物理学会 2014年春季大会、2014.3 査読あり

土師慎祐, 藤永宗和, 齋藤了一, 向山敬  
「フェルミ縮退気体と冷却イオンの混合」日本物理学会 2013年秋季大会、2013.9 査読あり

土師慎祐, 畑聡祐, 藤永宗和, 向山敬  
「極低温イオン・原子間相互作用の観測」日本物理学会 2013年春季大会、2013.3 査読あり

〔図書〕(計0件)  
該当なし

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)  
該当なし

取得状況(計0件)  
該当なし

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.ils.uec.ac.jp/~muka/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者  
土師 慎祐 (HAZE, Shinsuke)  
電気通信大学 レーザー新世代研究センター 特別研究員  
研究者番号: 10647423