

## 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：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22340115

研究課題名（和文） イオントラップ中での同位体イオンクーロン結晶の観測とリユードベリイオンの生成

研究課題名（英文） Observation of isotope ion Coulomb crystals and generation of Rydberg ions in an ion trap

研究代表者

長谷川 秀一（HASEGAWA SHUICHI）

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：90262047

研究成果の概要（和文）：

中性原子・イオンの励起に必要な 5 台の光源を外部共振器型半導体レーザーシステムとして製作した。その結果、中性原子を 3 段光イオン化させ、同位体選択的にイオントラップへ導入することが可能となった。さらに小型トラップ装置を整備し、イオン蛍光をトラップの軸方向から撮影した。捕獲イオンに励起レーザー光を照射することで、イオンの高励起状態への遷移を可能とし、リユードベリイオン生成の可能性を確認した。さらに単一同位体イオンレベルでのクーロン結晶を動画として撮影することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

Five External Cavity Diode Laser systems were constructed in order to excite neutral atoms to photoionize and ions to excite highly excited states. These laser systems enabled ones to make isotopically selective excitations and photoionization of atoms. Fluorescence from trapped ions was observed with a CCD camera from z-axis direction. A highly excited state of the trapped ions was confirmed with the laser excitation. Dynamics of individual ions in Coulomb crystal were successfully observed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011 年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2012 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

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、同位体

## 1. 研究開始当初の背景

交流電場により空間中にトラップ（Paul trap）されたイオンをレーザー冷却することにより実現可能となるイオンクーロン結晶は、時間平均調和ポテンシャル中に束縛された多数のイオンがクーロン反発することで結晶化しているものである。この系は交流電場により閉じ込めポテンシャルが生成でき

ることとレーザー冷却により低温化できることから 3 次元の系に対して研究が進められてきた[1]。これらの研究は固体物理における相転移現象や極低温プラズマの挙動としても見なすことができる[2]。これらは 3 次元系であるが、2 次元系については、超流動ヘリウムや量子井戸構造における電子、ダストプラズマ[3]による研究も進められている。一

方、イオントラップを用いた量子コンピュータが提案されて以来[4]、それを実現するために必要となる1次元のイオンクーロン結晶の実験的実現およびその性質が研究されてきている[5]。さらに、2次元イオンクーロン結晶を用いて、固体の量子シミュレーション（量子計算の簡易版）を行う理論提案が2006年になされた[6]。これはレーザーによる操作が難しい静電磁場を使ったトラップを念頭に置いたものであるが、より利用範囲の広い交流電場を用いたトラップによる大規模な2次元イオンクーロン結晶はこれまで実現されていない[7]。直接イオンを冷却できない場合は、冷媒となるイオンを周りに配置することで間接的に冷却を行うことになる。これは協同冷却と呼ばれており、質量が近いほど効率がよいことが知られている[8]。その際のイオンクーロン結晶の挙動について実験的には不明な点が多い。

異なる同位体が同一の四重極電場内にトラップされた場合の、各同位体イオンの挙動という観点からこの問題を見直してみると、3次元結晶についてはCCDを用いた空間画像を取得することでその構造の理解が進んでいる[1]。しかしながら2次元イオンクーロン結晶については、その実現も十分ではなく同位体による構造変化などについても全く知見が得られていない。さらに同位体組成比に対するイオンクーロン結晶の構造依存性などについては、次元にかかわらずほとんど知見がない。

さらにトラップされたイオンをリユードベリ状態へ励起すると、隣接イオンとの距離に対して励起電子の軌道半径を調整できることから新たな物理への展開が理論的に提案されている[9]。これを実験的に実現するには、多段階レーザー共鳴励起法が有効であるが、リユードベリイオンに対する知見はほとんどなく、トラップ中のリユードベリイオンの実験的実現は行われていない。

## 参考文献

- [1] A. Mortensen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 103001(2006). [2]例えば S. Fishman *et al.*, Phys. Rev. B**77**, 064111(2008). [3]O. Arp *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 165004(2004). [4] J.I.Cirac and P. Zoller, Phys. Rev. Lett. **74**, 4091(1995). [5]例えば C. Monroe *et al.*, Science **272**, 1131(1996). [6]D. Porras and J. I. Cirac, Phys. Rev. Lett. **96**, 250501 (2006). [7] M. Block *et al.*, J. Phys. B**33**, L375(2000). [8] W. M. Itano *et al.*, Physica Scripta T**59**, 106 (1995). [9] M. Mueller *et al.*, New J. Phys. **10**, 093009 (2008).

## 2. 研究の目的

空間中に調和ポテンシャルを生成し荷電

粒子を閉じ込めるイオントラップとレーザー冷却法を組み合わせることで実現できるイオンクーロン結晶は、固体物理やプラズマ物理をはじめとする多くの分野と関連をもち、優れた制御性を有する系である。本研究では、四重極型 rf 電場にトラップされたイオンを、電場およびレーザー光を用いて同位体レベルで制御する手法を確立する。さらにトラップされたイオンをリユードベリ状態へ励起することで新たな機能を持たせる理論的な提案が行われていることから、その実験的可能性について検討する。

## 3. 研究の方法

レーザー光共鳴イオン化法により同位体選択的に生成されたイオンを交流電場でトラップすることで同位体比を調整する。原子は、準位間のエネルギー差に応じた光子の吸収により励起される。このように原子の共鳴遷移を利用して励起させ、最終的にイオン化限界を越えるエネルギーを与えることでイオン化させる手法を共鳴イオン化法と呼ぶ(図1)。この手法では、同位体シフトと呼

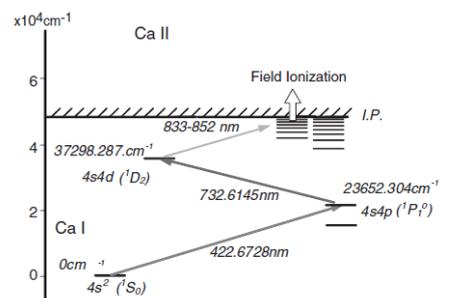


図1：中性Ca原子励起イオン化スキーム

ばれるエネルギー準位の同位体ごとの差異を利用することで、同位体選択的に励起・イオン化することが可能となる。本研究では、Caのトラップ中へのイオンローディング法として一般的に行われている  $4s^2 \ ^1S_0 \Rightarrow 4s4p \ ^1P_1 \text{ Ca}^+$  の遷移より、高い選択性が期待できる  $4s^2 \ ^1S_0 \Rightarrow 4s4p \ ^1P_1 \Rightarrow 4s4d \ ^1D_2 \Rightarrow \text{Ca}^+$  の遷移を用いた共鳴イオン化を検討する。これらに必要なレーザーの製作から行う。

これをレーザー冷却により結晶化することで、同位体レベルでのイオンクーロン結晶を実現する。観測にはCCDカメラを利用することでイオン結晶の構造を観測可能とする。さらに、トラップされたイオンをリユードベリ状態へ励起するためのレーザーを製作し、リユードベリイオンの生成へ向けた高励起状態の実現を目指す。

## 4. 研究成果

### (1) レーザー光源の製作

中性原子及びイオンの励起に必要な光源を半導体レーザーを用いて製作した。半導体レーザーを原子やイオンの共鳴を利用する実

験に用いるためには、遷移波長に応じた安定した単一モードでの発振が必要である。半導体レーザーに自身の光をレーザー共振器の外からフィードバックさせて外部共振器を構成する外部共振器型半導体レーザー (External Cavity Diode Laser : ECDL) の製作を行った。

フラッシングにより発振閾値の低下が観測され、適切にフィードバックされていることが確認できた。同様の手法により、5 台の ECDL を製作し、目的の遷移波長の光出力が得た。

### (2) 中性原子レーザー共鳴イオン化

今回製作した原子ビーム分光装置 (図 2) を用いて分光実験を行った。金属ポートへ印

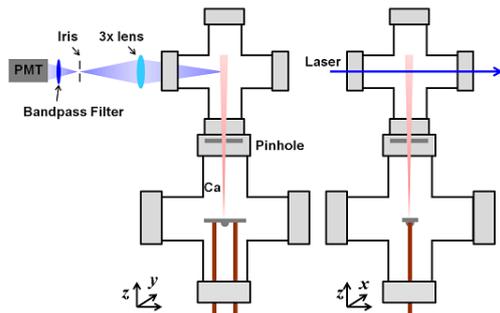


図 2 : 中性 Ca 原子ビーム分光装置

加する電流を徐々に上げることで Ca の蒸気を発生させ、そこへ 423 nm の光を照射し、波長を掃引した際の蛍光強度が図 3 である。この結果から、主要同位体  $^{40}\text{Ca}$  だけでなく  $^{42}\text{Ca}$ 、 $^{43}\text{Ca}$ 、 $^{44}\text{Ca}$ 、 $^{48}\text{Ca}$  のスペクトル観測に成功した。これらは既往の結果と一致している。また 423 nm の波長を  $^{40}\text{Ca}$  の共鳴周波数に設定し、733 nm の波長を掃引し、 $^{40}\text{Ca}$  の  $4s4p^1P_1 \Rightarrow 4s4d^1D_2$  のスペクトルの観測にも成功した。

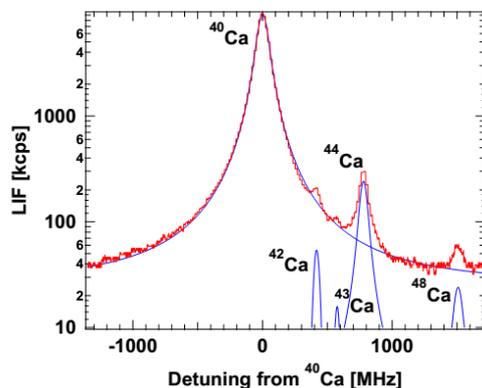


図 3 : 中性 Ca 原子蛍光スペクトル

(3) 3 段光イオン化したイオンの捕獲観測  
製作した 423、733 nm の光源を用いて生成したイオンの捕獲観測実験を行った。既存のイオントラップチャンバーに 423、733 nm、またレーザー冷却に必要な 397、866 nm の 4

本のレーザーを入射させ、Ca が封入された金属ポートを抵抗加熱することで中性 Ca を発生させ、それを共鳴イオン化しトラップ中に捕獲した (図 4)。この蛍光を光電子増倍管で観測した結果が図 5 である。この結果

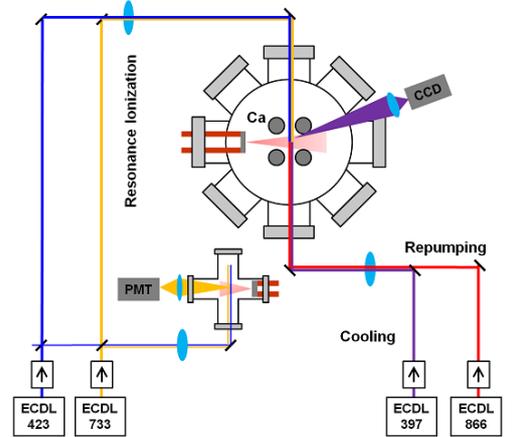


図 4 : 共鳴イオン化トラップ・レーザー冷却実験装置

より 2 波長でイオン化していることが確認

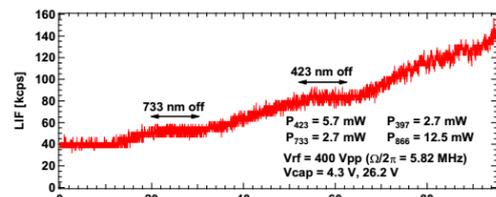


図 5 : 蛍光の中性原子励起レーザー依存性

できた。さらに今回整備したトラップ装置にて z 方向から CCD を用いて観測を行い、図 6 の結果を得た。イオン集団はイオン雲の状態であるが、光イオン化させた  $\text{Ca}^+$  の可視化を行うことに成功した。

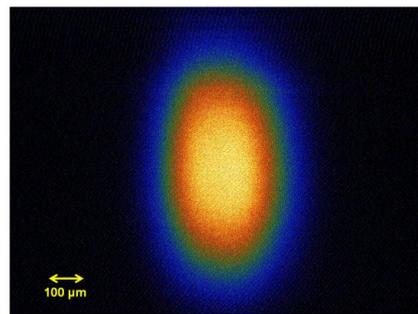


図 6 : z 方向からの捕獲イオンの可視化

### (4) 捕獲イオン高励起状態の観測

捕獲冷却され結晶化したイオンに今回製作したレーザー光を照射し、高励起状態への遷移波長付近を掃引した。その結果、共鳴周波数に近づくと  $5s^2S_{1/2}$  へ励起され、一定の割合で  $4p^2P_{3/2} \Rightarrow 3d^2D_{3/2}$  と準安定状態に遷移し蛍光が低下することを確認した (図 7)。冷却サイクルが止まるため元の蛍光量まで

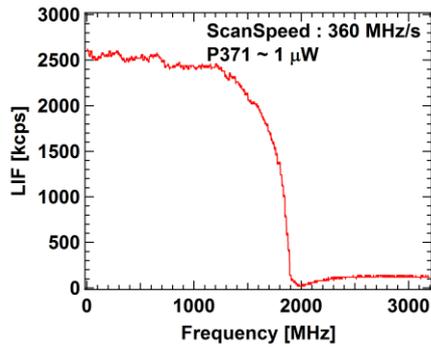
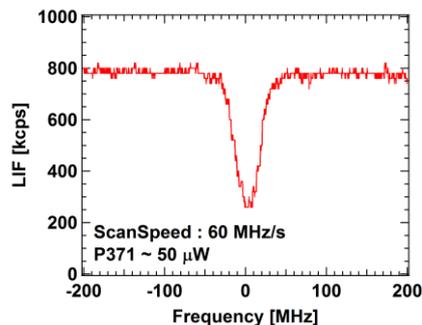


図7：捕獲イオン高励起状態への励起スペクトル

は戻らないことがわかる。866 nm の共鳴周波数の離調を調整することで準安定準位へと遷移する量を変化させることが可能であることもわかった (図8)。



(5) 同位体イオン結晶の観測

レーザー冷却されたイオンを独自に設計した光学系と ICCD を用いて可視化を行い、イオン結晶の観測に成功した (図9)。さらに理論との比較により、形状とイオン個数の関係について検討を行った。さらに、SN 比を改善することでイオン挙動を動画で観測することに成功した。

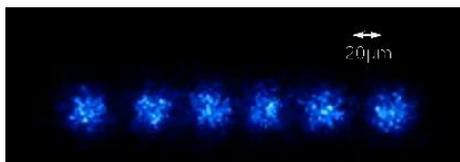


図9：捕獲イオン (6個) の画像観測

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. Kitaoka and S. Hasegawa, "Isotope - selective manipulation of  $\text{Ca}^+$  using laser heating and cooling in a linear Paul trap" J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 45, 165008 (2012) (査読有)

2. Y. Hashimoto, M. Kitaoka, T. Yoshida and S. Hasegawa, "Observation of sympathetically cooled  $^{43}\text{Ca}^+$  ions in a linear ion trap" Appl. Phys. B: Lasers and Opt., 103, 339-344 (2011) (査読有)

[学会発表] (計14件)

1. Yuta Yamamoto, Masanori Kitaoka, Kyunghun Jung, Shuichi Hasegawa, 「Observation of Resonance Photoionized Calcium Ions in RF Ion Trap」, International Conference on Laser Applications in Nuclear Engineering (LANE'13), LANEp8-15, 神奈川, 2013年4月
2. Kyunghun Jung, Masanori Kitaoka, Yuta Yamamoto, Shuichi Hasegawa, 「Digital Fringe Offset Control System to Laser Isotope Analysis of Calcium Ions」, International Conference on Laser Applications in Nuclear Engineering (LANE'13), LANEp8-15, 神奈川, 2013年4月
3. Kyunghun Jung, Masanori Kitaoka, Yuta Yamamoto, Shuichi Hasegawa, 「Laser frequency control for isotope shift analysis by computer」, Proc. 5th Joint International Symposium on Nuclear Science and Technology, 東京, 2012年8月
4. Shuichi Hasegawa, Masanori Kitaoka, Kyunghun Jung, Yuta Yamamoto, 「Laser cooling spectroscopy of trapped ions injected from Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer」, LAP2012:6th International Conference on Laser Probing, Paris, 2012年5月
5. 鄭京勲、北岡雅則、山元祐太、長谷川秀一、 「コンピュータ波長制御システムを利用した  $\text{Ca}$  同位体イオン観測」、日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会、茨城、2013年4月
6. 山元祐太、北岡雅則、鄭京勲、長谷川秀一、 「多段共鳴イオン化したカルシウムイオンの捕獲観測」、日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会、茨城、2013年4月
7. 山元祐太、北岡雅則、鄭京勲、長谷川秀二、 「3 段光イオン化によるカルシウム同位体の捕獲観測」、第 11 回同位体科学研究会、P5、東京、2013年3月
8. 山元祐太、北岡雅則、鄭京勲、長谷川秀二、 「カルシウムの 3 段光イオン化及び高励起状態の生成」、物理学会 2012 年秋学会、26aEE-10、広島、2013年3月
9. 鄭京勲、北岡雅則、山元祐太、長谷川秀二、宮部昌文、 「同位体シフトに対応したレ

一ザ波長のコンピュータ制御」、第 73 回応用物理学会学術講演会、14p-B2-1、愛媛、2012 年 9 月

10. 山元祐太、北岡雅則、鄭京勲、長谷川秀一、「3段励起共鳴イオン化によるカルシウムイオンの捕獲観測」、物理学会2012年秋季大会、20pAL-1、神奈川、2012年9月
11. 鄭京勲、北岡雅則、山元祐太、長谷川秀一、「コンピュータ制御を用いた866nmレーザーの同位体シフトに対応した波長安定化」、第59回応用物理学関係連合講演会、18p-E3-1、東京、2012年3月
12. Masanori Kitaoka, Yoshinori Hashimoto, Iulia M. Buluta, Shuichi Hasegawa, “Towards realization of a multi-isotope planar Coulomb crystal” CREST2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, 2010/4/7, Tokyo
13. 北岡 雅則、長谷川 秀一、“線形イオントラップに捕獲されたCa<sup>+</sup>の同位体選択的観測” 第58回応用物理学関係連合講演会、2011/3/24、神奈川工科大
14. 北岡雅則、長谷川秀一 “線形イオントラップにおける奇数Ca同位体の観測”、第9回同位体科学研究会、2011/3/16、東京

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

長谷川 秀一 (HASEGAWA SHUICHI)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号：90262047

### (2)研究分担者

宮部 昌文 (MIYABE MASAFUMI)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究主幹  
研究者番号：20354863

### (3)連携研究者

若井田 育夫 (WAKAIDA IKUO)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・グループリーダー  
研究者番号：10354862