

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(C)  
 研究期間： 2007 ～ 2009  
 課題番号： 19540519  
 研究課題名（和文） イオントラップ中冷却イオンの相転移近傍における統計力学的諸量の測定  
 研究課題名（英文） Measurement of statistical character of trapped cold ions at the vicinity of phase transition  
 研究代表者  
 荒巻 光利 (Aramaki, Mitsutoshi)  
 名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号： 50335072

研究成果の概要（和文）：イオントラップに閉じ込めた一成分プラズマをドップラーレーザー冷却することで、イオン温度を絶対零度近くまで下げることができる。本研究課題は、極低温プラズマの物性に対するクーロン相互作用の影響を、実験的に明らかにすることを目的としている。本研究課題で、冷却プラズマのレーザー誘起蛍光（LIF）スペクトルを非破壊観測する方法を確立した。この方法を用いて、イオン温度を室温程度から極低温に冷却する過程で、イオンの LIF スペクトルが異常な形状変化を示すことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）： One component plasma which is confined in an ion trap can be cooled to near the absolute zero temperature by the Doppler laser cooling method. This proposal aims to clarify experimentally the effect of Coulomb interaction on the character of extremely low temperature plasma. We have established a nondestructive laser induced fluorescent measurement technique for the cooled plasma. The shape of the spectra which are observed by using the technique shows unusual change during the cooling process from room temperature to extremely low temperature.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：強結合プラズマ、イオントラップ、レーザー冷却

## 1. 研究開始当初の背景

従来、広く成功を収めてきたボルツマン統計は、系の相互作用が短距離力であることを前提としており、長距離の相互作用が支配的な系では保証されない。近年、このような相

関の強い系を扱う新しい統計力学の理論研究が進められている。我々は、プラズマが弱結合状態から強結合状態へと遷移する際に、クーロン相互作用がプラズマの統計力学的物性に与える影響を、実験的手法で明らかに

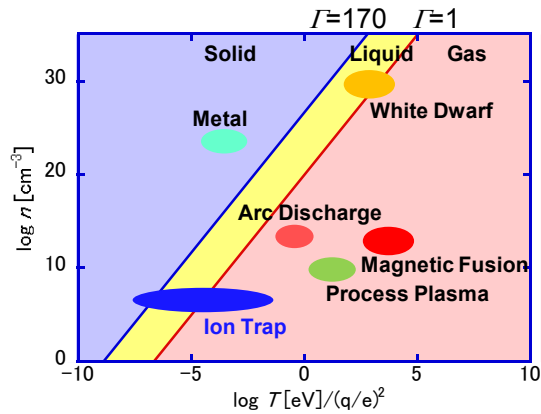


図1 プラズマの相図

することを目的としている。

荷電粒子系の状態を特徴づける無次元のパラメータとして、荷電粒子間のクーロンエネルギーと運動エネルギーの比で定義される  $\Gamma$  (=クーロンエネルギー/熱エネルギー) が良く用いられる。図1に、 $\Gamma$ によって分類されたプラズマの相図を示す。 $\Gamma$ が1より小さいプラズマは弱結合プラズマと呼ばれ、荷電粒子は比較的自由に熱運動しており、気相に分類される。実験室プラズマの多くは弱結合領域にあり、例えばプロセスプラズマや磁気核融合プラズマの $\Gamma$ は約 $10^{-4}$ である。 $\Gamma$ が1より大きいプラズマは強結合プラズマと呼ばれ、プラズマの物性にクーロン相互作用が重要な働きを及ぼす。 $\Gamma$ が170程度で荷電粒子系が液相から固相に相転移することが知られている。自然界では、白色矮星の表面が強結合状態にあると考えられている。我々が実験に用いるイオントラップに閉じ込められた一成分プラズマは、レーザー冷却技術を用いてイオン温度を広い範囲で制御できるという特徴があり、弱結合状態から強結合状態まで所望の状態のプラズマを生成して長距離相互作用の効果を系統的に研究するのに適した系である。しかし、レーザー冷却されたプラズマは非常に脆弱なため、その測定手段は限られており、その物性を詳細に調べるには、新たな測定法の開発が必要となる。

## 2. 研究の目的

本研究は、イオントラップに閉じ込めた一成分プラズマを、弱結合状態から強結合状態に至るまで冷却し、その過程でクーロン相互作用がプラズマの統計力学的な特徴にどのような影響を与えるかを、精密に調べることを目的としている。レーザー冷却されたプラズマは、擾乱に対して非常に脆弱なため、その観測は容易でない。そこで、本研究では、研究期間内に以下の2点を行う。

- (1) 粒子系の基本的な物性をあらかず、ドップラーレーザー誘起蛍光 (LIF) スペク

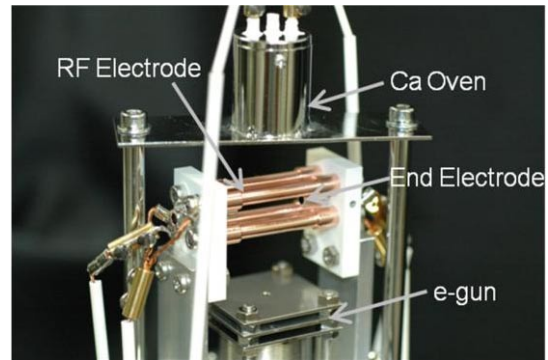


図2 直線型 RF トラップ

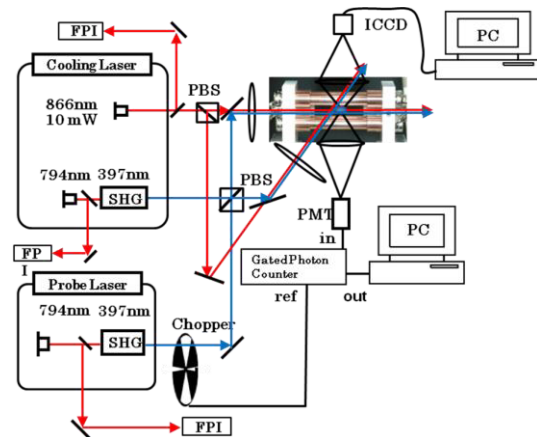


図3 プラズマ制御・測定系

トルの非破壊観測法を確立する。

- (2) 開発した非破壊測定技術を用いて、弱結合状態から強結合状態へと遷移する過程におけるドップラー-LIF スペクトルを観測し、長距離相互作用によるスペクトル形状の変化を明らかにする。

## 3. 研究の方法

イオントラップとは、電磁場によって荷電粒子を閉じ込める装置である。本研究では、直線型 RF トラップを用いて、冷却イオンを閉じ込める (図2)。径方向の閉じ込めは、4本の棒状電極で生成する四重極高周波電界によって行い、軸方向の閉じ込めは終端電極に直流電圧を印加することによって行う。一成分カルシウムプラズマは、閉じ込め電極間に導入したカルシウム蒸気を、電子ビームで衝突イオン化することで生成する。イオントラップおよびイオン生成系は、 $10^{-10}$  Torr 程度の超高真空中に排気された真空容器内に設置されている。図3に、本研究で開発したプラズマ制御・測定系を示す。カルシウムイオンに、 $S_{1/2}-P_{1/2}$  遷移を励起する 397 nm の青色レーザーと、 $D_{3/2}-P_{1/2}$  遷移を励起する 866 nm の近赤外レーザーを同時に照射することでレーザー冷却してイオン温度を制御する。イ

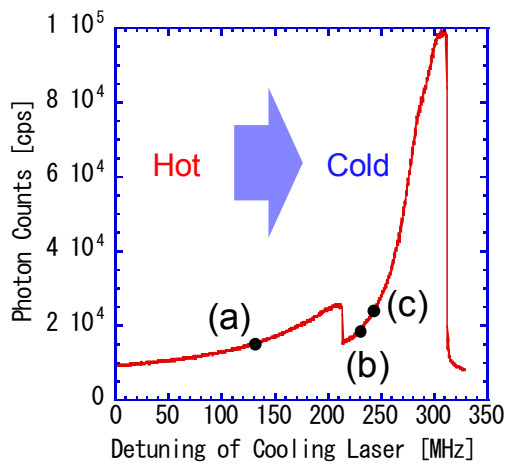


図4 397 nm 冷却用レーザー掃引で観測されたドップラー-LIF スペクトル

オン温度を一定に保つため、冷却用レーザーの発振波長はパーソナルコンピュータによって長期安定化されている。本研究では、冷却イオンの非破壊観測法として、微弱なプローブレザーを用いたプローブレザー測定法を提案し、測定技術を確認した。計測用の微弱な 397 nm プローブレザーは、光チョッパーによって強度変調され、冷却用レーザーに重畳されてイオンに照射される。イオンの観測には、 $P_{1/2}$  状態に励起されたイオンが、基底状態に脱励起する際に発する 397 nm の LIF 信号を用いる。冷却用レーザーとプローブレザーによる LIF は光子計数モードで動作している光電子増倍管 (PMT) で検出され、光チョッパーに同期した光子計数器でプローブレザーによる変調成分が取り出される。プローブレザーの周波数を掃引することで、レーザーによって変形されていない LIF スペクトルが得られる。また、イメージインテンシファイア付き CCD (ICCD) カメラによる、レーザー冷却プラズマの 2 次元 LIF 測定もプローブレザー測定と同時に行われる。

#### 4. 研究成果

従来用いられてきたレーザー冷却プラズマの LIF 測定では、397 nm 冷却用レーザーの周波数を掃引してドップラー-LIF スペクトルを観測するため、波長掃引に伴ってイオン温度も変化し、LIF スペクトルが変形される。図 4 は、従来の方法で観測されたドップラー-LIF スペクトルである。横軸は、掃引開始周波数を基準にした。イオンは、冷却遷移の共鳴周波数よりも低周波側ではレーザー冷却され、高周波側ではレーザー加熱され、その冷却・加熱効率は周波数に依存している。従

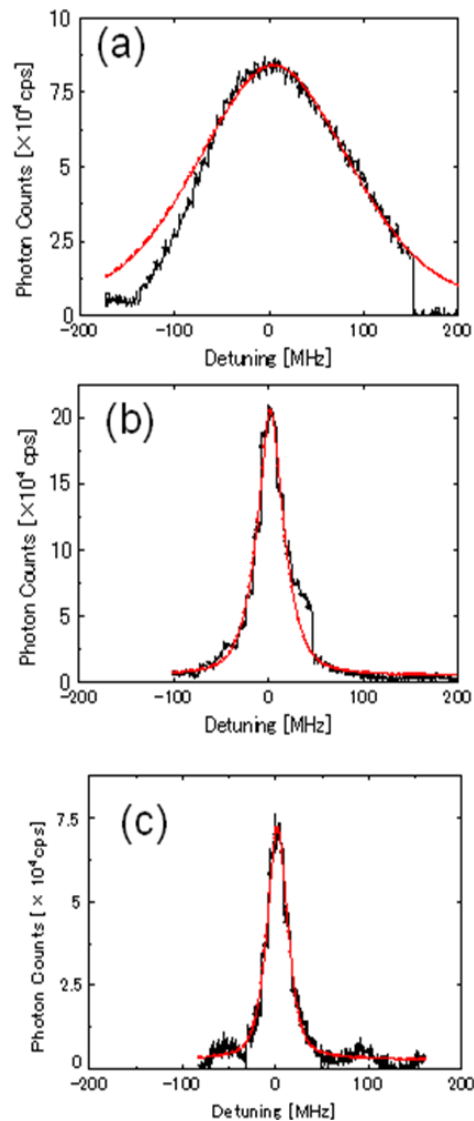


図5 冷却過程に伴うドップラー-LIF スペクトルの形状変化

って、LIF スペクトルは非対称な形状をしており、スペクトルの中心からレーザー周波数を絶対値校正することが出来ないため、相対的な掃引周波数を用いる。冷却用レーザーの周波数の増加に伴い、イオンの冷却が進み、約 200 MHz 掃引したところで、LIF スペクトルは不連続に減少している。これは、冷却にともない、イオン-イオン相互作用が顕著となり、イオンの振動が同期することで、イオンの高周波加熱の効率が低下し、冷却が急速に進んだことを示している。冷却プラズマの特徴的な状態として、この不連続な冷却の前後で、図中(a)、(b)、(c)に冷却用レーザーの周波数を固定して、プローブレザー測定を行った。

表 1 ローレンツ幅の $I$ 依存性

	$T$ [K]	$I$	$\omega_G$ [MHz]	$\omega_L$ [MHz]
(a)	4.8	0.46	192	138
(b)	0.28	7.9	45	27
(c)	0.12	18	29	23

新たに開発したプローブレザー測定系によって観測された冷却プラズマのスペクトルを図 5 に示す。いずれのスペクトルも、共鳴中心に対して対象な分布となっており、プローブレザーによる冷却・加熱効果による歪みは無視できる範囲であった。これにより、スペクトル形状に関する詳細な議論をはじめて可能にした。観測されたスペクトルの幅は、今回用いた冷却遷移の自然広がり  $\omega_L$  (22 MHz) に対して十分広いとは言えないため、ガウス分布とローレンツ分布の畳み込みで定義されるフォークト分布を用いてスペクトルを評価した。図 5 の赤線は、観測されたスペクトルに対してカーブフィットしたフォークト分布を示している。図 5(a) のスペクトルで、低周波側でフォークト分布に対して LIF 強度が減少しているのは、冷却用レーザーによって下準位のイオン密度が減少しているためである。フォークト分布を用いて、LIF スペクトルをガウス成分とローレンツ成分に分離し、ガウス幅  $\omega_G$  からイオン温度  $T$  を求めた。また、低温の極限を仮定して理論的に求めたイオン密度 ( $\sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ) を用いて  $I$  を計算した。表 1 にこれらの結果をまとめる。この結果より、今回の測定を行ったプラズマの  $I$  が、おおよそ 0.5~20 であり、当初より目的としていた弱結合状態から強結合状態へ遷移する範囲のプラズマが生成できていることが分かった。このようなパラメータ領域のガウス広がり精度に観測され、イオン温度が明らかとなったのは初めての例である。一方、 $\omega_L$  と圧力広がり  $\omega_p$  の和となるローレンツ広がり  $\omega_L$  には、このパラメータ領域で顕著な変化が見られた。今回の実験条件でイオン-イオンの 2 体の衝突周波数は数 100 kHz 程となり、 $\omega_p$  もこの程度の値が期待されるが、 $\omega_L$  から  $\omega_N$  を差し引いた値は、図 5(a) では 100 MHz を超える値となった。この値は 2 体の衝突周波数と比較して 3 桁程度大きな値であり、通常の圧力広がりでは説明が出来ず、強結合領域に近づきイオン間の多体相互作用が顕著になったことが原因と考えられる。このようなローレンツ幅の広がりには、クーロン多体相互作用の影響が実験的に観測された初めての例である。一方、さらに冷却が進み、強結合領域に入ったプラズマを観測した図 5(b), (c) では  $\omega_p$  は数 MHz に減少した。このような  $\omega_p$  の数桁に渡る変化は、

プラズマが弱結合状態から強結合状態へと遷移する過程で、圧力広がりメカニズムが 2 体衝突から多体衝突による圧力広がりへと変化し、さらに静的な圧力広がりへと変化していると仮定することで説明できると考えている。現在、より精密なスペクトル観測を行うため、レーザーの安定化および発振波長の絶対値校正など、測定系の改良を行うとともに、本研究の成果を補強するため、新たな強結合プラズマの非破壊観測手法の開発を行っている。

## 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 3 件)

- ① M. Aramaki, S. Kameyama, Y. Sakawa, T. Shoji, and A. Kono, Observation of Phase Transitions of 1-Dimensional Ion Clouds in a Linear RF Trap, *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES*, **8**, pp. 940-943, 2009. (査読有)
- ② 荒巻光利, 亀山悟史, 河野明廣, “小特集 極低温環境下でのプラズマ研究の新展開 3. RF トラップ中のレーザー冷却プラズマ”, *J. Plasma Fusion Res.*, **85**, pp. 520–525, 2009. (査読有)
- ③ M. Aramaki, S. Kameyama, Y. Sakawa, T. Shoji, and A. Kono, Observation of String Ion Cloud in a Linear RF Trap, *NON-NEUTRAL PLASMA PHYSICS VII: Workshop on Non-Neutral Plasmas 2008, AIP CONFERENCE PROCEEDINGS / Plasma Physics Vol. 1114*, pp. 19-24, 2009. (査読有)

[学会発表] (計 23 件)

- ① (invited) M. Aramaki, S. Kameyama, Y. Sakawa, T. Shoji, and A. Kono, Nondestructive Diagnostics of Strongly Coupled One Component Plasma Confined in RF Trap, 19th International Toki Conference on Advanced Physics in Plasma and Fusion Research, Ceratopia Toki-City, Gifu, Japan, December 8 - 11, 2009.
- ② (招待講演) 荒巻光利, RF トラップによる一成分強結合プラズマの閉じ込めと診断, 九州山口プラズマ研究会 (熊本、崇城大学), 2009 年 11 月 19 日.
- ③ S. Kameyama, M. Aramaki, Y. Sakawa, T. Shoji, and A. Kono, Optimization of Probe-Laser LIF System for Observation of Laser-Cooled Ions in a Linear RF Trap, *IC-PLANTS 2009*, Nagoya University, Nagoya, Japan, January 22-23, 2009.
- ④ M. Aramaki, S. Kameyama, Y. Sakawa, T. Shoji, A. Kono, Observation of Phase

Transitions of 1-Dimensional Ion Cloud in a Linear RF Trap, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka International Congress Center, Japan, September 8-12, 2008.

- ⑤ M. Aramaki, S. Kameyama, Y. Sakawa, T. Shoji, A. Kono, Development of Non-Destructive Doppler-LIF System for Laser-Cooled Ions in a Linear RF Trap using a Modulated Probe-Laser Technique, International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka International Congress Center, Japan, September 8-12, 2008.
- ⑥ M. Aramaki, S. Kameyama, Y. Sakawa, T. Shoji, A. Kono, Observation of String Ion Cloud in a Linear RF Trap, 9th International Workshop on Non-Neutral Plasmas, Columbia University, New York, USA, June 16-20, 2008.
- ⑦ (invited) M. Aramaki, A. Kono, Observation of phase transition of small Coulomb systems in an RF Trap, 8th Workshop on Fine Particle Plasma, NIFS, Gifu, Japan, December 21, 2007.
- ⑧ M. Aramaki, A. Kono, 0-D and 2-D LIF Measurements of Small Coulomb Crystals in a Linear RF Trap, Bulletin of the

American Physical Society 49th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, Vol. 52, No. 16, (2007) p240, Orlando, Florida, USA, November 12-16, 2007.

[その他]

ホームページ

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/konolab/members/aramaki/index.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

荒巻 光利 (Aramaki, Mitsutoshi)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50335072

### (2) 研究分担者

河野 明廣 (Kono, Akihiro)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40093025

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：