

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610169

研究課題名(和文)冷却プラズマ混合系における内部素過程と動的物性の研究

研究課題名(英文) Study of elementary processes and dynamics in a binary-component laser-cooled plasma

研究代表者

荒巻 光利 (ARAMAKI, Mitsutoshi)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：50335072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、プラズマ中の粒子拡散を直接観測する技術を開発し、従来のドップラー分光法が利用できない液相-固相の相転移近傍におけるプラズマ中の粒子拡散およびプラズマの構造を明らかにすることを目的としている。従来のカルシウムイオンのレーザー冷却実験系に、ストロンチウムのイオン源とレーザー冷却光源を追加することで、独立に温度制御可能な異種イオン混合系を開発した。プラズマを構成する全イオンを可視化するため、同位体分離用の光源も開発し、冷却プラズマ混合実験系の整備を完了した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to show that the particle diffusion and the structure of plasmas in the vicinity of the liquid-solid phase transition of a laser-cooled plasma. Since the traditional laser-induced fluorescence measurement can destroy the state of the laser-cooled plasma, development of a non-destructive measurement technique is required. We proposed an imaging technique of particle diffusion in the binary-component laser-cooled plasmas. A strontium ion source and a laser system for the laser cooling of strontium ions were integrated into the existing calcium-ion laser-cooling experiment setup. By mixing strontium ions and calcium ions, we can visualize the diffusion of the each ions. Since it is important to visualize all ions, external cavity diode laser systems were also developed for isotope selection using a photo ionization techniques

研究分野：プラズマ物理、プラズマ分光

キーワード：強結合プラズマ レーザー冷却 イオントラップ

1. 研究開始当初の背景

プラズマ研究の特徴の1つに、取り扱うパラメータ領域の広大さがあげられる。その中であっても、1つの装置で10桁にわたってイオン温度を制御したプラズマを生成することが可能なイオントラップ実験系は、他に類を見ない実験環境を提供し、プラズマ物理だけでなく、広く物質科学や統計力学の基礎研究に貢献できる潜在的能力を有している。ところが、レーザー冷却で温度制御されたプラズマは非常に脆弱なため、計測法に限られており、定量的な研究はこれまで困難であった。今回、我々は、微弱なプローブレーザーを用いたレーザー誘起蛍光(LIF)測定系を開発し、世界で初めてレーザー冷却プラズマのドップラー-LIFスペクトルを非破壊測定することに成功した(図1)。

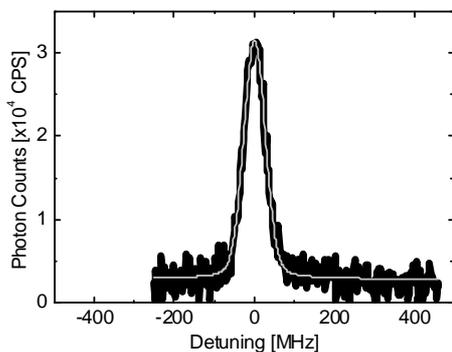


図1 レーザー冷却プラズマのLIFスペクトル

これがブレークスルーとなり、冷却プラズマの温度、クーロン結合係数、クーロン衝突周波数等の内部パラメータを定量的に評価することが可能となった。レーザー冷却により気相から液相の範囲で状態制御されたプラズマのドップラースペクトルを測定することで、比較的結合度の弱い(~ 0.1)プラズマであっても、イオン-イオン衝突に多体相互作用の効果が現れることを実験的に明らかにした。しかし、液相から固相への相転移近傍にあるプラズマの計測では、微弱なプローブレーザーであっても、その冷却・加熱効果を無視することはできず、LIFスペクトルの形状を歪ませてしまう。そのため、冷却プラズマの物性研究を気相・液相・固相で行い、荷電粒子系の物性における粒子相関の影響を包括的に理解するために、さらなる技術開発が必要とされている。

2. 研究の目的

これまでに開発した微弱レーザーによる冷却プラズマ測定法により、気相から液相までのプラズマのドップラースペクトルの非破壊計測が可能になった。しかし、より低温の液相-固相の相転移近傍におけるプラズマ計測では、ドップラー幅が自然幅程度になる

うえ、微弱なレーザーであっても、それによるプラズマの状態変化が無視できなくなるため、ドップラー計測に代わる新たな計測法の開発が必要となる。

液相や固相中では、クーロン衝突周波数が増大し、気相中と比較して粒子がゆっくりと拡散すると期待できる。本研究は、プラズマ中の粒子拡散を直接観測する技術を開発し、従来のドップラー分光法が利用できない液相-固相の相転移近傍におけるプラズマの内部素過程およびプラズマの構造を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、既存のCa⁺レーザー冷却実験系に、Sr⁺レーザー冷却系を加え、独立に温度とイオン数を制御した冷却プラズマ混合系を実現する。プラズマ中に導入した単一のSr⁺の拡散を動画撮影することで、液相-固相の相転移近傍で粒子拡散を直接測定する。従来のCa⁺プラズマのドップラーレーザー誘起蛍光計測系と組み合わせることで、弱結合から強結合に至る幅広い温度範囲でプラズマ中の拡散、クーロン衝突周波数等の精密な測定を可能にする。

既存の実験系は、図2に示すように、Ca⁺

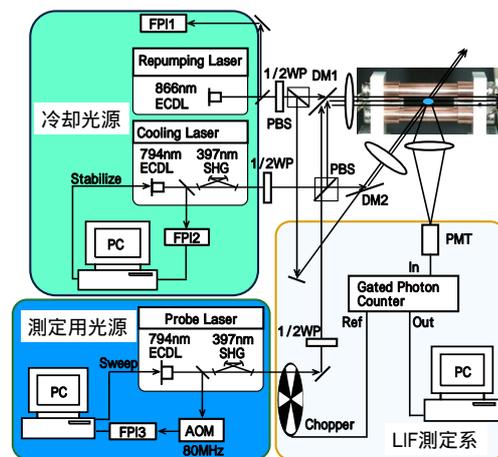


図2 レーザー冷却プラズマ実験系

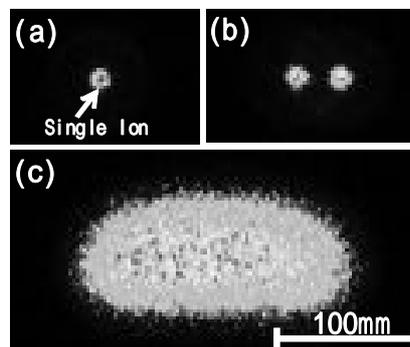


図3 冷却イオンの画像計測。(a)1個のCa⁺、(b)2個、(c)多数個。

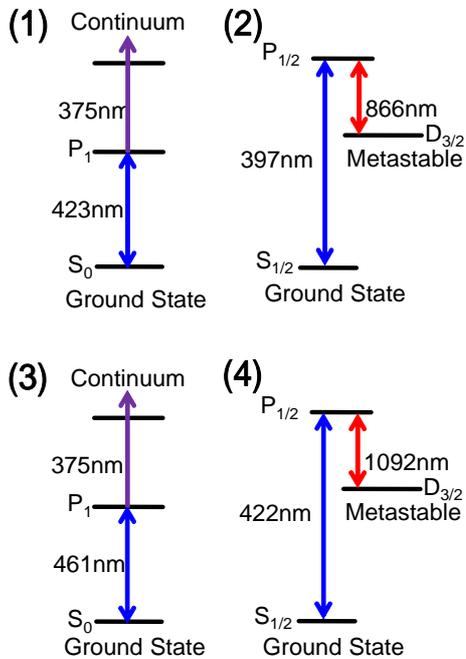


図 4 (1) ^{40}Ca の二段階光電離過程、(2) $^{40}\text{Ca}^+$ のレーザー冷却遷移、(3) ^{88}Sr の二段階光電離過程、(4) $^{88}\text{Sr}^+$ のレーザー冷却遷移。

のレーザー冷却用光源、微弱光を用いた LIF 計測系およびイメージインテンシファイア付きの CCD カメラ (ICCD) による画像計測装置を備えている。画像計測系は、図 3 に示すように 1 個のイオンを観測する能力を有している。

既存の装置に Sr^+ を同時に閉じ込め、レーザー冷却により状態を制御する。Ca および Sr は複数の同位体を持つが、本研究では $^{40}\text{Ca}^+$ および $^{88}\text{Sr}^+$ を用いる。 $^{40}\text{Ca}^+$ および $^{88}\text{Sr}^+$ のレーザー冷却に用いる遷移を図 4(2)、(4) に示す。 $^{88}\text{Sr}^+$ の冷却に必要な 422nm と 1092nm のレーザーは、市販のレーザーダイオード素子を用いて新たに自作し、費用を格段に抑える。各イオン種の観測には、397nm および 422nm の LIF 信号を用いる。両波長の差が 25nm と十分に大きいため、既存の光学測定系の干渉フィルタを交換することによって、これらの 2 種イオンを分離して計測することが可能である。本研究では、イオンの拡散や固相転移後の構造を画像計測によって明らかにするため、プラズマに含まれる全粒子を可視化する必要がある。イオンの計測にはレーザー冷却遷移の誘起蛍光を用いるため、レーザー冷却している同位体以外は観測することができない。従って、同位体分離し、 $^{40}\text{Ca}^+$ および $^{88}\text{Sr}^+$ のみからなるプラズマを生成する必要がある。ここでは、二段階光電離を用いた同位体分離を行う。図 4(1)、(3) に ^{40}Ca および ^{88}Sr の二段階光電離過程を示す。それぞれ、423nm およ

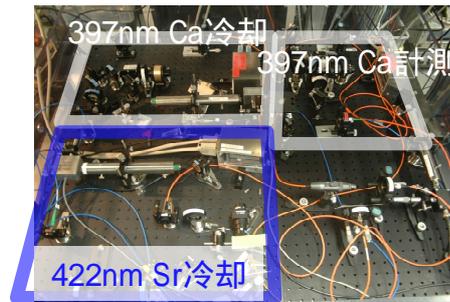
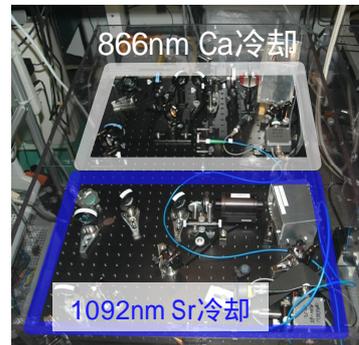


図 5 新たに開発した、 $^{88}\text{Sr}^+$ レーザー冷却用狭帯域波長可変レーザーシステム。1092nm および 422nm。

び 461nm の狭帯域レーザーで基底状態を励起させ、375nm のレーザーで励起状態から電離する。同位体間のエネルギー準位の違いを利用して、一段目の基底状態の励起時に選択的に ^{40}Ca および ^{88}Sr を励起することで、同位体分離したプラズマを生成することができる。

4. 研究成果

$^{88}\text{Sr}^+$ レーザー冷却実験

図 5 に、新たに開発した $^{88}\text{Sr}^+$ レーザー冷却用の外部共振器型半導体レーザーシステムを示す。1092nm 光源は TOPTICA 社製 レーザーダイオード (#LD-1080-0075-1) を用いて作製し、35mW の出力を得た。422nm 光源は日亜化学製レーザーダイオード (NDV4A16E) を用いて作製し、40mW の出力を得た。どちらの光源も数 GHz に渡りモードホップフリーで波長掃引が可変であり、レーザー冷却実験に十分な性能が得られた。

既存の Ca イオン用イオントラップ装置に、Sr の原子オープンを組み込み、電子ビームによる衝突電離でイオンを生成した。生成したイオンを高周波イオントラップに閉じ込め、レーザー冷却実験を行った。ICCD カメラによる画像計測の結果を図 6 に示す。プラズマが層構造を持っており、固相へと相転移していることが確認できる。これにより、既存の $^{40}\text{Ca}^+$ 用実験装置による $^{88}\text{Sr}^+$ の閉じ込め、および、新たに開発した光源による $^{88}\text{Sr}^+$ の十分な冷却性能が確認できた。

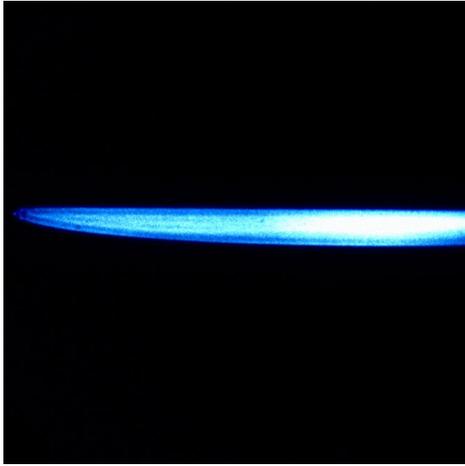


図 6 レーザー冷却により固相に相転移した $^{88}\text{Sr}^+$ プラズマ。

二段階光電離用光源の開発

プラズマを構成する全粒子を観測するには同位体イオン等の不純物を排除する必要があるため、 ^{40}Ca および ^{88}Sr を選択的に生成する光電離用レーザー (423nm、461nm、375nm) を開発した。423nm および 375nm 光源には、日亜化学製レーザーダイオード (NDV4A16E、NDU4116) を用いた。461nm 光源には、TOPTICA 社製レーザーダイオード (#LD-0460-0100-1) を用いた。いずれも 10mW 以上の出力が得られており、光電離実験に十分な性能である。

以上の実験により、既存のイオントラップ装置による $^{40}\text{Ca}^+$ および $^{88}\text{Sr}^+$ の閉じ込めが確認され、レーザー冷却による独立した温度制御実験が可能となった。また、光電離光源の開発により、同位体選別された 2 種イオンからなる純イオンプラズマの生成系が整備された。今後は、これらを用いたイオン拡散計測実験を、強結合領域において行う。

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)

M. Aramaki、Low Perturbative Observation of Moderately Coupled Plasma Using a Probe Laser Induced Fluorescence、JPS Conf. Proc.、査読有、1、015017 (2014)

M. Aramaki、S. Kameyama、and A. Kono、Non-perturbative probe laser-induced fluorescence spectroscopy of lasercooled Ca-plasma in a linear radiofrequency ion trap、Non-Neutral Plasma Physics VIII、AIP Conf. Proc.、査読有、1521、184-190 (2013)

[学会発表](計 11 件)

荒巻光利、光渦レーザーを用いた 2次元ドップラー分光、「プラズマ分光と素過程研究の深化と展開」研究会、2015年1月29日、核融合科学研究所(岐阜県・多治見市)

荒巻光利、レーザー冷却強結合プラズマの速度分布計測、「荷電粒子系の物理」研究会、2014年12月27日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

荒巻光利、光科学を融合した新しいプラズマ物理研究、Plasma Conference 2014、2014年11月19日、朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)

M. Aramaki、Precise plasma spectroscopy using a tunable diode laser、INTERNATIONAL CONGRESS ON PLASMA PHYSICS、Sep. 17、2014、Lisboa (Portugal)

M. Aramaki、Laser Induced Fluorescence Measurement of Moderately Coupled One Component Plasma、22nd International Conference on Spectral Line Shapes、June 1、2014、Tulahoma (USA)

M. Aramaki、Experimental study of strongly coupled plasma using ion trap and laser cooling technique、International Scientific Spring、March 13、2014、Islamabad (Pakistan)

M. Aramaki、Precise plasma spectroscopy using a tunable diode laser、International Scientific Spring、March 11、2014、Islamabad (Pakistan)

荒巻光利、「独立に状態制御された強結合プラズマ混合実験に向けた Sr + レーザー冷却系の開発」、日本物理学会 2013年秋季大会、2013年9月28日、徳島大学(徳島県・徳島市)

M. Aramaki、Low Perturbative Observation of Moderately Coupled Plasma Using a Probe Laser Induced Fluorescence、The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS、July 14、2013、Makuhari Messe Chiba、Japan.

荒巻光利、「高次機能レーザー光源の開発と先端光計測への応用」、第3回先端フォトニクスシンポジウム、2013年4月26日、日本学術会議講堂(東京都)

〔その他〕
ホームページ等
<http://aramaki-lab.ee.cit.nihon-u.ac.jp>

6．研究組織

(1)研究代表者

荒巻 光利 (ARAMAKI、Mitsutoshi)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：50335072