

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 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22540503

研究課題名（和文）

顕微レーザー誘起蛍光計測法を用いた冷却イオンのゆらぎ計測

研究課題名（英文）

Measurement of fluctuations in cooled plasma using a microscopic laser-induced fluorescence method

研究代表者

荒巻 光利 (ARAMAKI MITSUTOSHI)

名古屋大学・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レーザー冷却することで、気相－液相－固相の3相のプラズマを生成できる。この系では粒子間の相関を広い範囲で制御した実験ができるため、プラズマの物性におけるクーロン相互作用の効果を詳細に研究するのに理想的な系である。粒子相関の効果は、スペクトル形状の小さな変化として現れると考えられているため、その変化を観測するには実験精度の向上が特に重要となる。本研究では、レーザー冷却により状態制御された微小な一成分プラズマの、高精度な顕微レーザー誘起蛍光（LIF）測定系を開発した。それに加え、広い温度範囲でプラズマを安定に制御して実験を行うため、レーザー冷却用および計測用光源の性能を向上させた。これら新しく開発した実験系を用いて、強結合－弱結合の中間領域の顕微レーザー誘起蛍光スペクトルの形状変化を詳細に検討し、クーロンポテンシャルの遮蔽メカニズムの変化を示唆する結果を得た。

研究成果の概要（英文）：An ion trap is a suitable device for the study of the effect of inter-particle correlation in a plasma, since the gas, liquid, and solid phase plasmas are able to be generated under well-controlled condition using the laser cooling method. Since the correlation effect is thought to appear as small modification of the spectrum shape, it is important to improve the accuracy of the diagnostics to find it. In this study, we developed a microscopic laser induced fluorescence (LIF) system for the diagnostics of a tiny one-component laser-cooled plasma. In addition, we improved the tuning range and stability of the laser systems in order to achieve wider range of ion temperature and better stability of the plasma. We performed the detailed study of the change of the spectrum shape, and found the change of Coulomb screening mechanism in the moderately-coupled plasma.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：プラズマ物理学

科研費の分科・細目：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

超高真空中に配置したイオントラップに

閉じ込められたイオンに、狭帯域波長可変レーザーを作用させることで、イオンをミリケ

ルビン以下に冷却することができる（レーザー冷却）。このような極低温に冷却されると、イオンの運動エネルギー E_k に対するイオン間のクーロンポテンシャル U の比 U/E_k で定義される結合定数 Γ が1より大きい強結合プラズマ状態となる。イオントラップを用いた実験ではレーザー冷却によってイオン温度を制御することで、弱結合から強結合状態まで連続的に変化させることが出来るため、プラズマの物性に対する長距離相互作用の影響の詳細な研究に適している。

我々は、レーザー冷却プラズマ研究の全体構想として、以下に示す3つの分野への展開を目指して研究を行っている。

- ① 強相関係の統計物理 現在広く用いられているボルツマン統計は、粒子間相互作用として剛体衝突を仮定しており、長距離相互作用が支配的な系に対して成り立つことは保証されていない。我々の冷却プラズマ研究の主たる目的は、強結合系で予想されているボルツマン統計からの乖離を実験的に検出することで、非ボルツマン統計の理論研究と相補的に強相関係の統計物理の新領域を開拓することである。具体的には、速度分布関数、拡散係数等の統計力学量を精密に測定し、ボルツマン統計と比較する。このような速度分布関数の形状変化を詳細に検討するには、LIFスペクトルの広がりメカニズムを完全に理解する必要がある。
- ② 高密度星の物理 高密度星のプラズマは強結合プラズマ状態にあると考えられている。温度、密度ともにイオントラップ中で生成される冷却プラズマとは大きく異なるが、系を特徴づける Γ は同程度の値をもつ。高密度星の発光スペクトルは、一般に2体相互作用の高密度の極限を仮定して解析されているが、強結合プラズマ中では多体相互作用が重要性となる。我々は、冷却イオンの分光的研究成果を用いて、白色矮星等の高密度星のスペクトル解析の精度を向上させ温度、密度の再評価に寄与できると考えている。さらに、実験的に得られた強結合プラズマ中の拡散係数等に対する知見は、高密度星の進化に関連する重要な情報であり、新たな実験室宇宙物理の分野の開拓が期待できる。
- ③ 量子情報 冷却イオンの極限的应用として、数個の冷却イオンの量子化された集団運動と電子励起準位の量子的もつれ状

態を利用した量子演算の研究が盛んに行われている。また、実用的な演算能力を得るため、粒子数の拡張が検討されている。量子論的集団現象を考慮すべきメソスコピックな強結合系は、従来マクロな系を主な研究対象としてきたプラズマ物理と、粒子数を拡大する方向に発展している蓄積イオン型量子演算の研究との中間領域にあたり、将来的にはプラズマ物理の新領域になると考えている。

これらの研究分野では、新しい理論が模索されている状況にあり、出来る限り高精度な実験と理論の相補的発展が強く求められている。

2. 研究の目的

本研究では、このような全体構想の基盤技術となる、微小プラズマを高精度に観測するための顕微LIF測定系を開発する。また、広いイオン温度領域で、系統的な実験を行うため、レーザー冷却用光源およびLIF計測用光源の波長可変幅および安定性を改善する。これらを用いて、強結合-弱結合の中間領域でスペクトルを系統的に観測し、その形状変化を詳細に検討する。

3. 研究の方法

受光系に顕微鏡を用いた顕微LIF測定系を新たに開発し、極低温に冷却された直径数百ミクロン程度の微小プラズマを観測する。プラズマは直線型イオントラップに閉じ込める。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。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カルシウムプラズマ

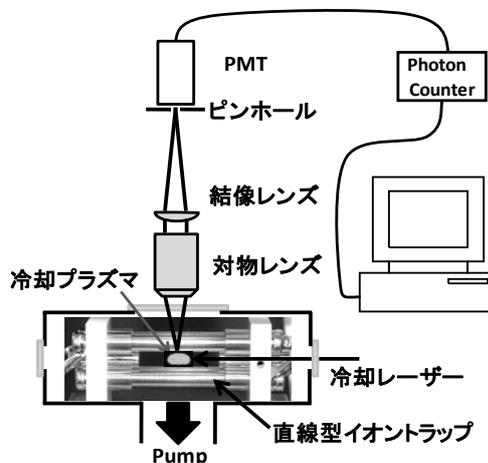


図1 顕微LIF測定系

を生成する。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。軸方向から入射した冷却レーザーの波長を調整することで冷却効率を変化させ、イオン温度を制御している。冷却レーザーによる励起領域は、ICCDカメラでLIF画像を確認しながら高精度に位置決めすることができる。図1に顕微LIF測定系の概略を示す。顕微LIF測定系は、拡大光学系、ピンホールおよび光電子増倍管(PMT)で構成する。イオンの蛍光は、拡大光学系でピンホールに結像され、光子計数モードで動作しているPMTでパルス信号に変換され、光子カウンタで計数される。計測用レーザーの波長を掃引することで、ドップラーLIFスペクトルを観測し、そのスペ

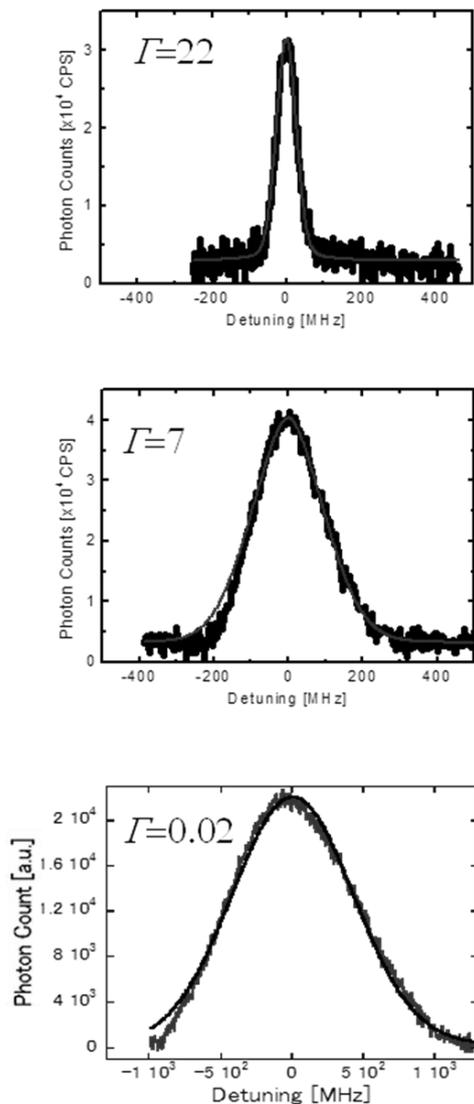


図2 顕微LIF測定系で観測された強結合-弱結合の中間領域のプラズマのスペクトル。

クトル広がりから、イオン温度およびイオン-イオン衝突周波数が得られる。

4. 研究成果

冷却用の第二高調波光源の安定化制御を最適化することで、光源の安定性および波長掃引幅を向上させた。また、計測用レーザーは基本波で必要波長が得られる光源を新たに開発し、第二高調波光源と置き換えることで波長掃引幅を大幅に向上させた。これにより、より広いイオン温度領域でのスペクトル計測を可能にした。図2に、 Γ を22から0.02まで3桁に渡って変化させて観測した顕微LIFスペクトルを示す。いずれのスペクトルもVoigt分布関数に良く合い、ガウス成分とローレンツ成分に分離することができる。 Γ の計算には、スペクトルのガウス広がりから得られたイオン温度を用いている。また、スペクトルのローレンツ広がりからは、イオン-イオン衝突周波数が得られる。

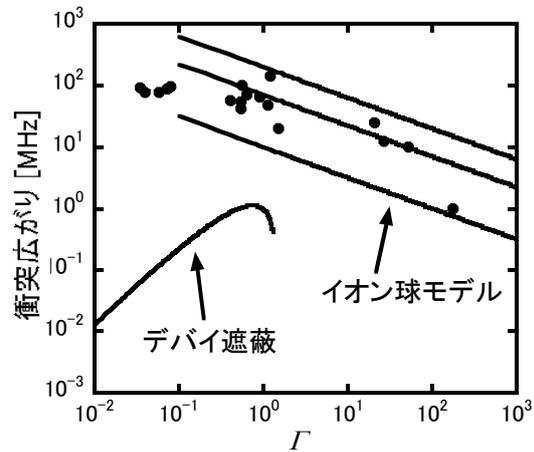


図3 衝突広がり Γ の依存性

図3は、測定したスペクトルの衝突広がり Γ の依存性を示している。プラズマ中の荷電粒子の衝突周波数には、クーロン遮蔽のメカニズムが強く影響しており、その Γ 依存性からプラズマ中の遮蔽メカニズムを知ることが出来る。遮蔽メカニズムの変化は、例えば巨星内部の核融合確率を大きく変化させることが理論的に予想されており、宇宙物理分野においても、その理解は重要な課題である。図3には、観測した衝突広がりとともに、クーロン遮蔽のモデルとして、デバイ遮蔽を用いた場合とイオン球モデルを用いた場合の衝突広がり Γ の理論曲線も同時に示されている。実験結果より、 Γ が0.1程度よりも大きい場合は、イオン球モデルから得られた衝突周波数の Γ 依存性に比較的良く合い、 Γ が0.1程度よりも小さい領域ではイオン球モデルの結果から乖離し始める傾向が見られる。より Γ が小さな領域で、衝突広がり Γ はデバイ

遮蔽を仮定した曲線へと移ると考えられるが、今回のイオン温度範囲では、これら二つのクーロン遮蔽モデルの遷移領域は見られなかった。

今後の課題として、冷却用レーザーの出力パワーおよび波長可変範囲を向上させ、より広い Γ 領域で実験を行い、遮蔽モデルの遷移領域を明らかにすることがあげられる。また、今回開発した顕微LIF測定系では、数百マイクロンのプラズマ内を十分な精度で空間分離して密度揺らぎを測定することが出来なかった。測定系と励起光源を改良し、共焦点型顕微LIF系へと変更することで、さらに空間分解能を向上させる必要がある。また、最近光科学の分野で応用が進んでいる、光渦光源を利用した超高空間分解レーザー分光法の導入も検討している。

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 12 件)

- ① (査読有) 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. **1521**, 184-190 (2013)
- ② (査読有) S. Ishida, H. Kawagoe, M. Aramaki, Y. Sakakibara, E. Omoda, H. Kataura, N. Nishizawa, Ultrahigh resolution optical coherence tomography using high power fiber laser supercontinuum at 1.7 μm wavelength region, Proc. SPIE, 85710B, doi:10.1117/12.2006722 (2013).
- ③ (査読有) Y. Celik, T. V. Tsankov, M. Aramaki, S. Yoshimura, D. Luggenhölscher, and U. Czarnetzki, Recombination and enhanced metastable repopulation in the argon afterglow, Phys. Rev. E **85**, (2012) 056401.
- ④ (査読有) Y. Celik, T. V. Tsankov, M. Aramaki, S. Yoshimura, D. Luggenhoelscher, and U. Czarnetzki, Electron cooling in decaying low-pressure plasmas, Phys. Rev. E **85**, (2012) 046407.
- ⑤ (査読有) B. Du, M. Aramaki, S. Mohr, Y. Celik, D. Luggenhoelscher, and U. Czarnetzki, Spatially and temporally resolved optical spectroscopic investigations inside a self-pulsing micro thin-cathode discharge, J. Phys. D: Appl. Phys. **44** (2011) 252001.
- ⑥ (査読有) 荒巻光利, 荻原公平, 江藤修三, 吉村信次, 田中雅慶, 遅い中性粒子

測定のための高精度レーザー誘起蛍光分光システムの開発, プラズマ・核融合学会誌 **87**, 216-221, 2011.

- ⑦ (査読有) K. Ogiwara, M. Aramaki, S. Yoshimura, Y. Itoh, Y. Kato and M. Y. Tanaka, Lamb-dip Laser Induced Fluorescence Method for Measuring Magnetic Field in a Plasma, Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 036101-1-5, 2011.
- ⑧ (査読有) Y. Celik, M. Aramaki, D. Luggenhölscher and U. Czarnetzki, Determination of electron densities by diode-laser absorption spectroscopy in a pulsed ICP, Plasma Sources Sci. and Technol. **20**, 015022(12pp), 2011.
- ⑨ (査読有) S. Yoshimura, A. Okamoto, K. Terasaka, K. Ogiwara, M. Aramaki, and M. Y. Tanaka, Parallel Ion Flow Velocity Measurement Using Laser Induced Fluorescence Method in an Electron Cyclotron Resonance Plasma, Plasma Fusion Res. **5**, S2052-1 – S2052-4, 2011.
- ⑩ (査読有) M. Aramaki, K. Ogiwara, S. Etoh, S. Yoshimura, and M. Y. Tanaka, Measurement of neutral flow velocity in an ECR plasma using tunable diode laser LIF spectroscopy combined with saturated absorption spectroscopy, Journal of Physics: Conference Series, **227**, 012008, 2010.
- ⑪ (査読有) K. Terasaka, S. Yoshimura, T. Katahira, K. Ogiwara, M. Aramaki, and M. Y. Tanaka, Self-calibrated Measurement of Ion Flow Using a Fine Multi-hole Directional Langmuir Probe, Jpn. J. Appl. Phys. **3**, 036101_1~6, 2010.
- ⑫ (査読有) K. Terasaka, S. Yoshimura, K. Ogiwara, M. Aramaki and M. Y. Tanaka, Experimental studies on ion acceleration and stream line detachment in a diverging magnetic field, Physics of Plasmas, **17**, 072106-1 – 072106-6, 2010.

[学会発表] (計 55 件)

- ① 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, 日本学会会議講堂, 東京都.
- ② 荒巻光利, 「一成分プラズマにおけるデバイ遮蔽とイオン球モデルの遷移領域」, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月26日~29日, 広島大学.
- ③ M. Aramaki and A. Kono, Experimental study of Coulomb screening mechanism in cryogenic one-component plasma, 5th international symposium on advanced plasma science and its applications for nitrides and nanomaterials, Jan. 28 – Feb. 1,

- 2013, Nagoya, Japan.
- ④ 荒巻光利, 「光科学の導入によるプラズマ研究の新しい展開」, 日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年9月18-21日, 横浜国立大学.
 - ⑤ 荒巻光利, 戸田泰則, 吉村信次, 寺坂健一郎, 田中雅慶, 「新規プラズマ分光法のための波長可変光渦レーザーの開発」, 日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年9月18-21日, 横浜国立大学.
 - ⑥ M. Aramaki and A. Kono, Coulomb Collision in Cryogenic Plasma, European Conference on Trapped Ions, September 10-14, 2012, Obergurgl, Austria.
 - ⑦ M. Aramaki, Coulomb Screening in One-Component Strongly-Coupled Plasma, 10th International Workshop on Non-Neutral Plasmas, August 27-30, 2012, Greifswald, Germany.
 - ⑧ 荒巻光利, 「強結合プラズマの精密分光と素過程」, 「プラズマ科学のフロンティア 2012」研究会, 2012年8月6-8日, 核融合科学研究所
 - ⑨ 荒巻光利, 河野明廣, 「イオントラップ中の強結合プラズマのクーロン遮蔽」, 日本物理学会 第67回年次大会, 関西学院大学, 2012年3月24-27日
 - ⑩ 荒巻光利, 「RF イオントラップを用いた強結合プラズマ研究」, 第一回イオントラップ研究交流会, 電気通信大学 レーザーセンター, 2012年3月21日
 - ⑪ M. Aramaki and A. Kono, Collapse of Debye screening assumption in strongly coupled plasma, The 5th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science, March 9-10, 2012, Inuyama, Aichi, Japan.
 - ⑫ 荒巻光利, 「強結合一成分プラズマのLIFスペクトルとクーロン遮蔽の効果」, 「プラズマの素過程研究と分光診断の展望」研究会, 核融合科学研究所, 2012年1月12-13日.
 - ⑬ 荒巻光利, 田中雅慶, 「光科学の導入による新しいプラズマ基礎研究」, 第14回物質科学研究会, 核融合科学研究所, 2012年1月6, 7日
 - ⑭ 荒巻光利, 坂和洋一, 庄司多津男, 河野明廣, 「レーザー冷却強結合プラズマ中のクーロン遮蔽」, Plasma Conference 2011, 石川県立音楽堂, 2011年11月22-25日
 - ⑮ 荒巻光利, 「レーザー冷却強結合プラズマのレーザー誘起蛍光計測」, プラズマ科学のフロンティア 2011 研究会, 核融合科学研究所, 2011年9月7-9日
 - ⑯ 荒巻光利, 亀山悟史, 坂和洋一, 庄司多

津男, 河野明廣, 「RFトラップ中で冷却されたCa⁺のLIFスペクトルのイオン温度依存性」, 日本物理学会秋季大会, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス, 大阪, 2010年9月23-26日.

- ⑰ 亀山悟史, 荒巻光利, 坂和洋一, 庄司多津男, 河野明廣, 「冷却イオンのLIFスペクトルにおける多体相互作用の影響II」, 日本物理学会秋季大会, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス, 大阪, 2010年9月23-26日.
- ⑱ 荒巻光利, 亀山悟史, 坂和洋一, 庄司多津男, 河野明廣, 「冷却イオンのLIFスペクトルにおける多体相互作用の影響」, 第65回日本物理学会年次大会, 岡山大学津島キャンパス, 岡山, 2010年3月20-23日.
- ⑲ 荒巻光利, 亀山悟史, 坂和洋一, 庄司多津男, 河野明廣, 「レーザー冷却された強結合プラズマのLIFスペクトルにおける多体相互作用の影響」, 「第46回原子分子光の素過程とプラズマ分光の研究フロンティア」研究会, 核融合科学研究所, 岐阜, 2010年1月18-19日.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<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・工学研究科・助教

研究者番号: 50335072

(2) 研究分担者

田中 雅慶 (TANAKA MASAYOSHI)

九州大学・総合理工学研究科・教授

研究者番号: 90163576

(3) 連携研究者

庄司 多津男 (SHOJI TATSUO)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 50115581