

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24年 5月11日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540512

研究課題名（和文） 強結合微粒子プラズマの臨界揺動と反応場への応用

研究課題名（英文） Critical Fluctuations in Strongly Coupled Fine Particle Plasmas and Application to Reactive Fields

研究代表者

東辻 浩夫（TOTSUJI HIROO）

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：40011671

研究成果の概要（和文）：荷電粒子系の等温圧縮率は一成分プラズマモデルの範囲では結合度の増加により発散する。研究代表者は、かつて、この特異性が強結合微粒子プラズマの臨界点として観測される可能性を指摘した。本研究では臨界点に伴う揺動出現の条件を精密・広範囲に解析するとともに、国際宇宙ステーション(ISS)における微小重力実験データに基づき、反応場となる密度場の揺動スペクトル分析を試みた。また、異なる原因による臨界点の可能性を新たに示し、上記との関係を明らかにした。さらに、地上およびISS実験が計画されている円柱型の放電管での実験に対応する理論およびシミュレーションによる解析を行った。

研究成果の概要（英文）：The isothermal compressibility of strongly coupled charged particle systems diverges within the one-component plasma model. Previously, the PI of this project pointed out the possibility of its observation as the critical phenomena around the critical point in strongly coupled fine particle plasmas. In this project, the theory has been extended and the conditions for critical density fluctuations have been evaluated in a wide parameter domain and the data obtained in microgravity experiments on the ISS have been analyzed. Another possible origin of critical point in fine particle plasmas has also been shown and the relation to the above mentioned critical point is clarified. For planned experiments on the ground and on ISS, fine particle plasmas in cylindrical discharge tube are analyzed by theory and numerical simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：プラズマ物理

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：微粒子プラズマ、強結合プラズマ、臨界点、密度揺動、理論・シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 強結合プラズマを一成分モデルにより解

析すると、結合度の増加に伴い等温圧縮率が

発散することは古くから知られていたが、モデルの特性に起因するもので観測できないと考えられていた。本研究課題の代表者は強結合微粒子プラズマにおいて等温圧縮率発散に伴う密度揺動の増大などの臨界現象の観測が可能であることを初めて示し、そのための具体的な条件を求めた。

(2) 微粒子は重力の効果を大きく受けるため、臨界現象の観測には微小重力環境の実験が望ましい。代表者は、臨界現象の観測を国際宇宙ステーション(ISS)におけるドイツ・ロシアの実験の一つのテーマとして提案し、実験データを得る機会が与えられた。

(3) 微粒子を含む低電離プラズマは広く応用されており、密度揺動の増大は様々な応用の可能性があるため、関連した理論の精密化が求められた。

2. 研究の目的

(1) 統計力学に基づいて強結合微粒子プラズマに関する理論的解析を行って、熱力学的特性を精密化し、揺動場の応用の可能性を検討する。

(2) 数値シミュレーションにより微粒子プラズマの特性を求める。その結果を強結合の場合の理論解析の基礎とする。

(3) 強結合微粒子プラズマ実験における密度揺動などの観測データを分析する。

3. 研究の方法

直接の実験を除き、研究方法として可能な方法をすべて用いた。具体的には次のとおりである。

(1) 強結合微粒子プラズマに対する統計力学理論を展開した。強結合領域の基礎データと

して熱力学関数・相関関数などの数値シミュレーションの結果を利用した。

(2) 理論による実験条件に基づいて実験手順を提案し、得られたデータを解析した。

(3) 数値解析としては、粒子モデルによる数値シミュレーションおよび微積分方程式の数値解法による求解を行った。

4. 研究成果

(1) 微粒子プラズマの臨界現象についての理論的解析を精密化し、実験条件を広く探索した。また、臨界点が存在する原因として、本研究代表者によるものを含め、これまで知られていたものの他に、微粒子がプラズマ中に浮遊する過程を微粒子のプラズマへの融解と捉えることにより、新たな可能性があることを示した。

① 強結合微粒子プラズマの臨界揺動について詳細な結果を公刊するとともにELGRAなどの国際会議および学会において発表して討論を行った。また、臨界点付近を実験において実現するための具体的な実験条件について、微粒子の半径、ガスの種類に対する依存性などを広く探索した。さらに、プラズマ内の反応に対する密度揺動の効果については基礎的な解析を行った。臨界揺動の大きさの例を図1に示す。

② 溶液の理論で古くから知られている溶解度の限界に伴う臨界現象が、微粒子を溶質、プラズマを溶媒とする微粒子プラズマに存在する可能性がある。精密な熱力学関数に基づいて具体的な条件を求めるとともに、微粒子プラズマの臨界現象として代表者が初めて示したものの関係が次のようになることを明らかにした：微粒子濃度を増加すると、まず、

溶液理論の臨界現象が起きて相分離し、さらに濃度を増加すると、分離した高密度相において、これまで予想されていた現象が起きる。

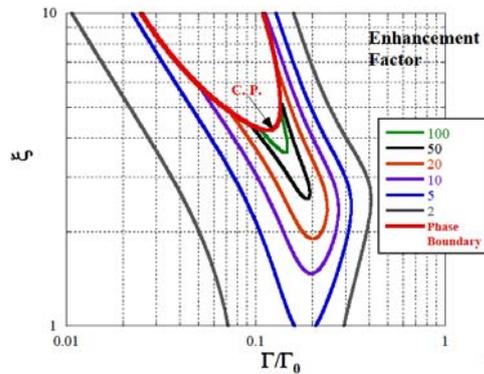


図1: 臨界点付近の密度揺動の増倍率。横軸は規格化された結合度、縦軸はプラズマによる遮蔽の効果の大きさ。C. P. は臨界点で、C. P. を通る曲線が相境界であり、曲線の内側では2相が共存する。

(2) 研究代表者の提案により、国際宇宙ステーション(ISS)でのMax-Planck Institute for Extraterrestrial Physics (ドイツ)とJoint Institute for High Temperatures (ロシア)の共同実験に臨界現象の観測を目指したものが複数含まれ、一連の実験の系統的なデータ解析が可能となった。密度揺動解析コードを開発し、結果の一部を分析した。臨界点そのものではないが、密度揺動の増大に対応すると思われる結果を得た。同時に、実験では中心部にボイドと呼ばれる領域が発生するために非一様性が生じており、この効果などの検討が必要であることが分かった。

(3) 密度揺動の観測で直接求まるのは、薄いシート状のレーザー光の散乱により得られる2次元データである。一方、求めたいのは3次元の密度揺動であり、2次元データを3次元に翻訳する必要がある。シート面に垂直方向のスキャンをすれば3次元データが得られるが、

スキャンのできないこともある。この研究では、相関関数および構造因子について、2次元観測と3次元観測との間の関係を明らかにし、変換公式を導いた。実験ではこれらのうちの2次元から3次元への変換を利用することになる。その適用限界を明確にするためにモデル系のシミュレーションを行い、レーザー光の厚さが粒子間平均距離の1.5倍程度以下であれば、展開式は収束し、十分適用できることを示した。

(4) 反応性低電離プラズマにおける密度揺動効果の解析に必要な有限プラズマについて理論およびシミュレーションによる研究を行った。

① 構造を記述する方程式を検討し、円柱状の形状を仮定して理論解析および分子動力学およびモンテカルロ法によるシミュレーションを行った。結果として、1成分および2成分のときの微粒子分布の具体的な結果を得て構造形成を簡単な内挿式で表すとともに動的な振る舞いの特徴を示した。これは、ISSにおける後継実験装置として計画されている円筒対称プラズマ中での強結合微粒子プラズマ実験の基礎となる。

② 微粒子を含む非一様なプラズマに対して、電子・イオン・粒子の分布、電位分布、粒子間の相関を決める方程式を導いた。それにより、円柱型の実験装置の中心付近では、これまでの一様系の結果が適用でき、増大した密度揺動を利用できることが分かった。

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 11 件)

① H. Totsuji, C. Totsuji, Restoring the three-dimensional correlation function and structure factor from two-dimensional data, Phys. Rev. E, 査読有,

Vol. 85, 2012, pp. 031139-1-031139-6.

② H. Totsuji, C. Totsuji, Structures and dynamics of fine particles in fine particle plasmas under microgravity and friction between two-dimensional layers of charges, J. Phys.: Conference Series, 査読有, Vol. 327, 2011, pp. 012037-1-012037-14.

③ H. Totsuji, K. Takahashi, S. Adachi, Y. Hayashi, and M. Takayanagi, Strongly Coupled Plasmas under Microgravity, J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 査読有, Vol. 28, 2011, pp. S27-S30.

④ H. Totsuji, C. Totsuji, Structures of Yukawa and Coulomb particles in cylinders: Simulations for fine particle plasmas and colloidal suspensions, Phys. Rev. E, 査読有, Vol. 84, 2011, pp. 015401-1-015401-4.

⑤ H. Totsuji, Possible observation of critical phenomena in fine particle (dusty, complex) plasmas: Two mechanisms and experimental conditions, Microgravity Science and Technology, 査読有, Vol. 23, 2011, pp. 159-167.

⑥ H. Totsuji, Restoration of Three-Dimensional Correlation Function and Structure Factor from Two-Dimensional Observations of Sliced Volume, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 79, 2010, 査読有, pp. 064002-1-064002-5.

⑦ H. Totsuji, Thermodynamic instability and critical point of fine particle (dusty) plasmas: Enhancement of density fluctuations and experimental conditions for observation, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 査読有, Vol. 42, 2009, pp. 214022-214030.

⑧ H. Totsuji, Phase Diagram of Strongly Coupled Yukawa Particulates in Deformable Background and Application to Fine Particle (Dusty) Plasmas, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有, Vol. 8, 2009, pp. 257-260.

⑨ H. Totsuji, On estimation of three-dimensional pair distribution function from two-dimensional sliced data, J. Phys. Soc. Japan, 査読有, Vol. 78, 2009, pp. 064002-1-064002-5.

[学会発表] (計 13 件)

① H. Totsuji, Structure and dynamics of fine particles in plasmas with cylindrical symmetry: Charge separation and formation of “Screw”, Plasma Conference 2011 (招待講演, International

Session), 2011. 11. 25, Kanazawa.

② H. Totsuji, Structures and Dynamics of Fine Particle (Dusty) Plasmas with Cylindrical Symmetry: Theory and Simulations, 6th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, 2011. 5. 20, Garmisch-Partenkirchen, Germany.

③ H. Totsuji, Strongly Coupled Plasmas under Microgravity, 8th Japan-China-Korea Workshop on Microgravity Sciences for Asian Microgravity Pre-Symposium, 2010. 9. 24, 仙台.

④ H. Totsuji, Solubility of fine particles in plasmas, 37th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2010. 6. 25, Dublin, Ireland.

⑤ 東辻 浩夫, 微粒子プラズマの臨界点と国際宇宙ステーションにおける微粒子プラズマ実験、日本地球惑星科学連合 2010 年大会合同セッション、2010. 5. 24、幕張メッセ.

⑥ 東辻 浩夫, プラズマへの微粒子の溶解における相分離と臨界点、日本物理学会 第 65 回年次大会、2010. 3. 23、岡山大学.

⑦ 東辻 浩夫, 強結合実験のための微粒子プラズマ: 臨界点付近の実験条件の半径・ガス種等への依存性、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009. 9. 26、熊本大学.

⑧ H. Totsuji, Possible Observation of Critical Phenomena in Fine Particle (Dusty) Plasmas, 2009 ELGRA (European Low Gravity Research Association) Biennial Symposium and General Assembly, 2009. 9. 2, University of Bonn (Bonn, Germany).

[図書] (計 1 件)

V. Y. Nosenko, P. K. Shukla, M. H. Thoma, H. M. Thomas (eds.), American Institute of Physics, “Dusty/Complex Plasmas: Basic and Interdisciplinary Research”, 2011, pp. 92-97.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東辻 浩夫 (TOTSUJI HIROO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号: 40011671

(2) 研究分担者 (なし)

(3) 連携研究者 (なし)

(4) 研究協力者

東辻 千枝子 (TOTSUJI CHIEKO)

工学院大学・工学部・講師
研究者番号: 20253007