

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540521

研究課題名（和文） 強結合微粒子プラズマの臨界現象・相分離と構造形成

研究課題名（英文） Critical Phenomena, Phase Separation, and Structure Formation in Strongly Coupled Fine Particle (Dusty) Plasmas

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： 微粒子プラズマにおいて、微粒子間の結合が十分強くなると全系の等温圧縮率が発散し、臨界現象が出現する可能性があることが熱力学関数の具体的な表式に基づいて示され、無次元の特性パラメータを軸とする相図の上に臨界点の位置と相分離の様子が描かれた。また、そのための特性パラメータの値を実現する実験条件が求められた。さらに、臨界点付近の密度揺動の増大が相図に対応して示された。この結果は、これまで実験では観測できないとされていた一成分プラズマの等温圧縮率の発散を観測する方法を与えた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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：プラズマ物理，臨界現象と相分離，強結合微粒子プラズマ

1. 研究開始当初の背景

- (1) 電氣的に中性な荷電粒子系において、一つの電荷成分だけに着目するモデルを一成分プラズマという。古典系であるか量子系であるかにかかわらず、一成分プラズマには強結合領域において熱力学的に不安定となる普遍的な傾向がある。し

かし、通常は反対符号の電荷の成分（背景電荷）がその傾向を強く抑制するので、一成分プラズマのこの傾向に起因する現象は現実の系では観測できないとされてきた。

- (2) 本研究の研究代表者は、微粒子プラズマにおいては微粒子が非常に大きな電

荷をもつので、この熱力学的不安定性が実験的に観測する可能性があることを初めて示した。

2. 研究の目的

微粒子プラズマにおける臨界現象・相分離について微視的モデルを構築し、臨界現象・相分離に伴う構造形成を理論およびシミュレーションにより解明する。

- (1) 微粒子プラズマ解析の基礎となる、微粒子および電子・イオンの粒子としての振る舞いを精度よく表す微視的モデルを構築する。
- (2) 強結合微粒子プラズマの熱力学関数を精度よく求め、微粒子プラズマの状態方程式および相図を確立する。
- (3) 強結合微粒子プラズマの臨界点付近のプラズマパラメータを明らかにし、相分離による微粒子濃縮の効率を解析する。

3. 研究の方法

- (1) 湯川系に対するこれまでの数値シミュレーションに基づき、相関エネルギーを結合定数の関数として内挿式で精度よく表現する。
- (2) 微粒子プラズマにおける微粒子間の相互作用を湯川型と仮定し、湯川系に対する(1)の結果を用いて、強結合微粒子プラズマの熱力学関数を精度よく求める。
- (3) 強結合微粒子プラズマの状態方程式および相図を確立する。
- (4) 強結合微粒子プラズマの状態を表す無次元特性パラメータを実験条件に対応させる。
- (5) 強結合微粒子プラズマの臨界点付近で期待される密度揺動の増大を求める。

- (6) 微粒子間相互作用の湯川型からのずれについて解析し、その効果を求める。

4. 研究成果

(1) 本研究では、これまでの一成分プラズマの研究の結果を踏まえ、熱力学的不安定性観測の可能性を具体的に明らかにした。まず、微粒子間の相互作用を湯川型と仮定し、計算機シミュレーションの結果を利用して相互作用の効果をできるだけ正確に取り入れた。その上で、背景電荷に相当する微粒子周辺のプラズマの寄与を具体的に取り入れて微粒子プラズマ全体の熱力学的関数を求め、これに基づいて、熱力学的不安定性による相分離が起き、相分離に伴う臨界点が現れることを示した。その結果、相分離を含む強結合微粒子プラズマの相図が描かれ、通常的气体・液体の相転移・相図との対応が明らかにされた。

微粒子プラズマを特徴づけるのは次の4つの無次元特性パラメータである。

$$\Gamma = (Qe)^2 / ak_B T_p, \quad \xi = a / \lambda,$$

$$A = (n_i T_i + n_e T_e) / n_p T_p, \quad \Gamma_0 = (Qe)^2 / rk_B T_p$$

ここで、 $a = (3/4 \pi n_p)^{1/3}$ は微粒子の平均粒子間距離、 r は微粒子半径であり、 n , T は密度、温度を表し、添字 p , i , e は微粒子、イオン、電子に対応する。また、 λ はプラズマの遮蔽距離である。

図1は温度一定の下での体積と系全体の圧力の関係（等温線）の例を示す。特性パラメータが特定の値をとるとき、等温圧縮率が発散する。図2のスピノーダル線上で等温圧縮率が発散する。その頂点が臨界点である。図3の相図は通常的气体・液体転移における温度・密度図に対応し、図4の相図は、同じく温度・圧力図に対応する。

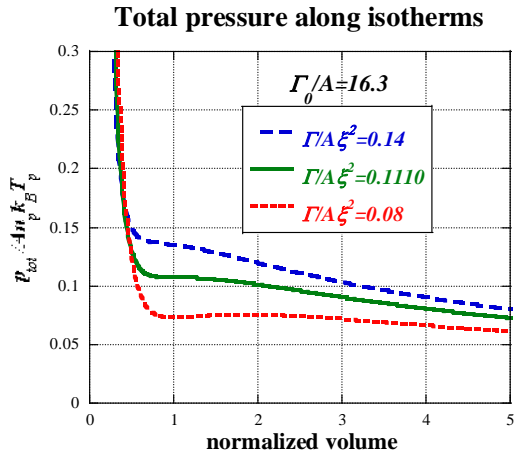


図1 等温線の例

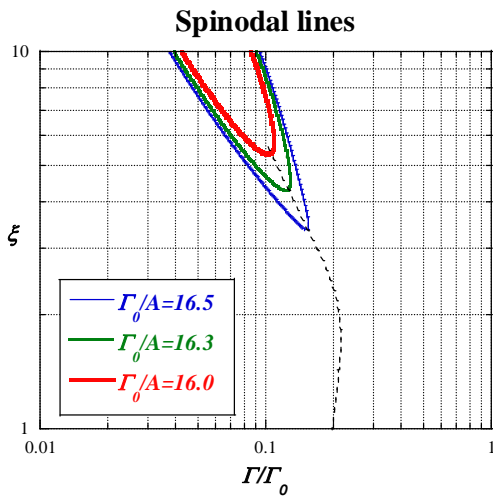


図2 スピノーダル線の例

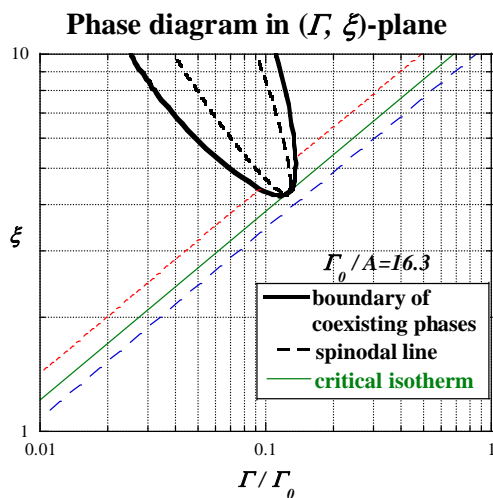


図3 (Γ, ξ) 面の相図 (温度・密度図に対応)

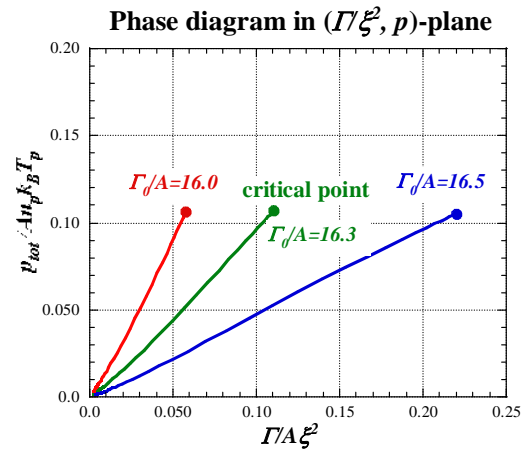


図4 $(\Gamma \xi^{-2}, p)$ 面の相図 (温度・圧力図に対応)

(2) 実験で観測するためには、熱力学的性質を記述する無次元特性パラメータを密度、温度などの具体的な実験条件に翻訳する必要がある。実験条件から特性パラメータの値は直ちに求まる。しかし、それぞれの実験条件は複数の特性パラメータと関係しているため、特性パラメータから実験条件を求めるのは単純ではない。本研究では、特性パラメータの組によって実験条件を具体的に表現した。図5はArガスのプラズマ中に半径 $10 \mu\text{m}$ の微粒子がある場合の実験条件の例である。

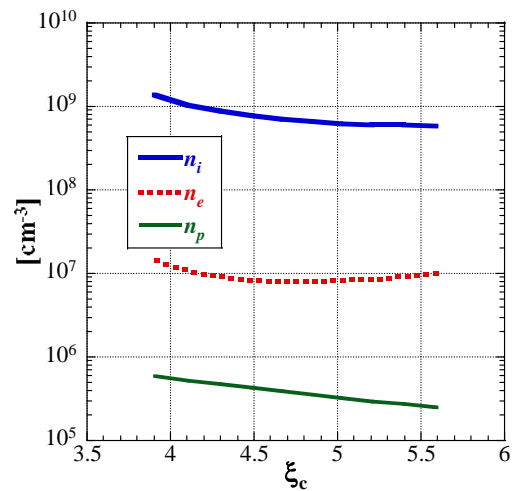


図5 実験条件の例(Ar)

また、この過程で実験的に実現できない特性パラメータの領域があることも示された。

(3) 臨界現象の一つに臨界点の付近における密度揺動の増大がある。これに対応して、強結合微粒子プラズマの構造因子の長波長の振る舞いに現れる、臨界点付近の密度揺動の増大率を相図の上に表した。これは、実験において、臨界点にどれだけ近づいたかを判定するための指標となる。

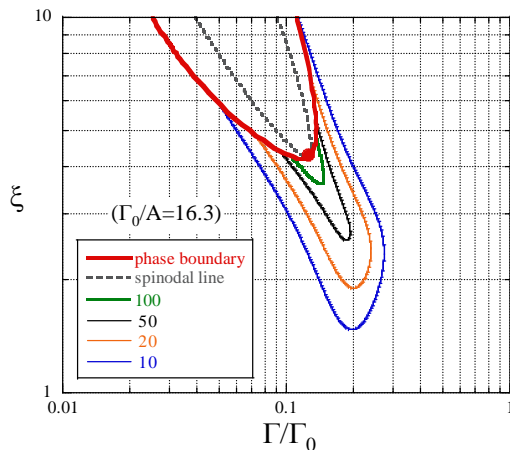


図6 臨界点付近の密度揺動の増大率

以上の研究により、荷電粒子系が普遍的にもつ熱力学的不安定性が微粒子プラズマにおいて臨界現象として観測できる可能性が実験条件とともに具体的に示され、相図上に臨界点および相分離の様子が求められた。さらに、臨界点付近の密度揺動の増大を相図に対応して示された。

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7件)

- ① H. Totsuji, *Thermodynamics of strongly coupled repulsive Yukawa particles in ambient neutralizing plasma: Thermodynamic instability and*

possibility of observation in fine particle plasmas, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.15, 072111-1 - 072111-14, 2008.

- ② H. Totsuji, *Experimental Parameters of Fine Particle Plasmas Explicitly Expressed by Dimensionless Characteristic Parameters*, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.3, 046-1 - 046-10, 2008.
- ③ H. Totsuji, *Thermodynamic Instability in Strongly Coupled Fine Particle Plasmas and Critical Phenomena*, Journal of Japan Society of Microgravity Application, 査読有, Vol.25, 343 - 348, 2008.
- ④ H. Totsuji, *Thermodynamic instability and the critical point of fine particle plasmas: enhancement of density fluctuations and experimental conditions for observation*, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 査読有, Vol.42, 214022 - 214030, 2009.

[学会発表] (計11件)

- ① H. Totsuji, *Critical Phenomena in Strongly Coupled Fine Particle Plasmas*, 35th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2008.6.13, Crete (Greece).
- ② H. Totsuji, *Phase diagrams of strongly coupled Yukawa particles in deformable background and application to fine particle (dusty) plasmas*, 2008.9.11, 福岡.
- ③ H. Totsuji, *Critical Point of Fine Particle Plasmas and Density Fluctuations*, 50th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society, 2008.11.19, Dallas (U. S. A.).

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

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし