

微粒子プラズマにおける臨界現象

京都工芸繊維大学¹、岡山大学²、東北大学³、九州大学⁴、名城大学⁵、横浜国立大学⁶、静岡大学⁷、JAXA⁸

林康明¹、東辻浩夫²、佐藤徳芳³、渡辺征夫⁴、上村鉄雄⁵、石原修⁶、飯塚哲³、三重野哲⁷、高橋和生¹、白谷正治⁴、足立聡⁸、高柳昌弘⁸

Critical Phenomena in Fine Particle Plasmas

Yasukai Hayashi¹, Hiroo Totsuji², Noriyoshi Sato³, Yukio Watanabe⁴, Tetuso Kamimura⁵, Osamu Ishihara⁶, Satoru Iizuka³, Tetsu Mieno⁷, Kazuo Takahashi¹, Masaharu Shiratani⁴, Satoshi Adachi⁸, Masahiro Takayanagi⁸

Kyoto Inst. Technol.¹, Okayama Univ.², Tohoku Univ.³, Kyushu Univ.⁴, Meijo Univ.⁵, Yokohama Nat. Uvi.⁶, Sizuoka Univ.⁷, JAXA⁸

E-Mail: hayashy@kit.ac.jp

Abstract: Fine particle plasma is a kind of one component plasmas and strongly coupled plasmas and is predicted to have the critical point. The experimental verification of existence of such a kind of interesting phenomena is now planning to be performed under microgravity condition by the collaboration between German and Japanese research groups.

Key words; Plasma, Fine Particle, Critical Point

微粒子プラズマにおける相転移と臨界点の存在

微粒子プラズマは、イオンと電子および負帯電した微粒子からなる複合プラズマである。一般にイオンは正電荷を有する場合が多く、プラズマ中で正の電荷はイオンが、負の電荷は電子と微粒子が受け持つ。プラズマ中の微粒子の表面には電子が付着し、その帯電量は直径に比例して、ミクロンサイズの微粒子は数千荷から数万荷もの電荷を帯びる。プラズマ全体は電気的に中性であることから、微粒子を除いた電荷は、正イオンから電子の電荷分を差し引いて正となる。イオンや電子比較して巨大な微粒子は移動度が小さく断熱近似が成り立ち、一樣な正の背景電荷の中に負の電荷が存在するモデルが適用できる。これは一成分プラズマ(OCP: One Component Plasma)であり、微粒子プラズマも OCP として扱うことができる。

一成分プラズマでは、その結合度を示すのに、平均クーロンエネルギーと熱運動エネルギーの比、クーロン結合係数 Γ を用いる。すなわち、

$$\Gamma = \frac{Q^2 / (4\pi \epsilon_0 a)}{k_B T}$$

ここで、 Q は微粒子の帯電量、 a は平均微粒子間距離の半分、 T は温度である。 $\Gamma > 1$ のときは強結合プラズマと呼ばれ、液体の状態に対応する。さらに $\Gamma > 172$ では固体、すなわち結晶が形成される。計算機シミュレーションによる一成分プラズマの研究は古くから行われており、液体-固体間の相転移は 1 次であることがわかっている。微粒子プラズマにおいても液体-固体間相転移が可能であることは 1986 年に予測された¹⁾。そして

1994 年には、世界の 3ヶ所（日本、ドイツ、台湾）で同時に、“クーロン結晶”の観測が報告された²⁻⁴⁾。

微粒子プラズマが原子・分子からなる気体、液体、固体の状態を成すことがあるのならば、微粒子間に引力や凝集力がある場合、臨界点も存在する可能性があり、最近、理論的に指摘がなされた^{5,6)}。ドイツのグループでは、微粒子間引力の存在の理論的予測⁷⁾に基づき van der Waals の状態方程式を解いて、臨界点の条件を求めている⁶⁾。一方、日本では、一成分プラズマにおける（相関エネルギーの低下による）凝集力の存在から、臨界点の予測を行っている⁵⁾。両者の条件ははるかに異なっており、その実験的実証が期待されている。

臨界現象を正しく調べるには微小重力環境下での実験が必須であり、ISS を利用した実験が計画されている。欧州では今年から、ドイツとロシアの連携により、PK3 Plus と呼ばれる実験装置を用いた微粒子プラズマの微小重力実験が ISS のロシア側モジュール内で進められている。一連の実験の中で、臨界点の存在についての実験も試みられているようである。日本においても、私達の“微小重力環境下微粒子プラズマ研究WG”において、一成分プラズマとしての立場からの臨界点存在に関する実証実験を提案している。日本と欧州、共通の話題の元、International Topical Team を形成し、昨年はミーティングを 2 回、フランス・オルレアンとオランダ・ノルトビークにおいて開催した。

臨界点実験に関する準備

微粒子プラズマを用いた臨界現象解析の特長は、系がマクロサイズであるため(格子定数は $100\ \mu\text{m}$ を超える)、個々の構成粒子の配列や挙動を直接ビデオに記録することができるところにある。つまり、平均粒子間距離の数倍から数十倍のサイズにおける揺動現象を観察することができる(Fig.1)。つまり、相関長 ξ が小さなところからの観測が可能であり、これは臨界温度からかなり離れた温度領域においても現象解析が行えることを意味する。平均場近似では相関長は臨界温度との差の平方根に反比例することから、逆に単純には、微粒子プラズマにおいて温度が臨界点から 0.1eV 程度離れていても臨界現象の観測ができると計算される。

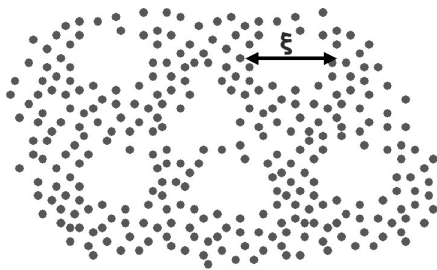


Fig.1 Observation of critical point fluctuation in a fine particle plasma.

こうした臨界揺動現象を定量的に評価するには、ビデオ画像における微粒子配列の動径分布関数を求め、それをフーリエ変換した構造因子を調べる。

地上において、Fig.2 に示す実験装置を用いて、こうした実験の準備を進めている。図に見えるように、地上では重力の影響で単純立方格子の二次元的な結晶しか形成されないが、微粒子の二次元面内での運動から温度評価を試みた。

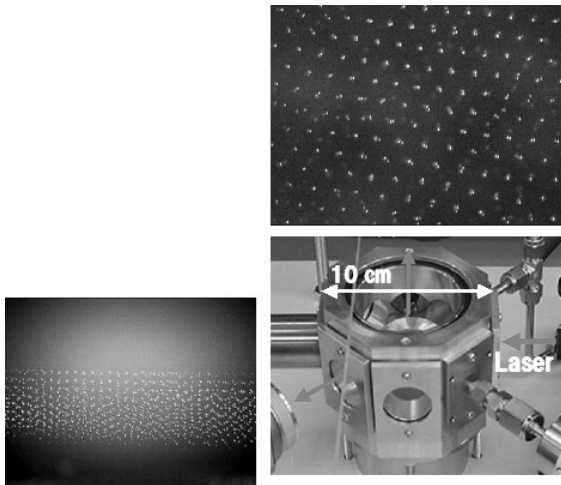


Fig.2 Fine particle arrangement under gravity.

微粒子の速度分布を Fig.3 に示す。この結果を Maxwell 分布にフィッティングし、微粒子の温度の評価を行った。さらに温度の RF パワー依存性を調べた結果を Fig.4 に示す。この結果によれば、前述の 0.1eV オーダーの温度制御は可能といえる。

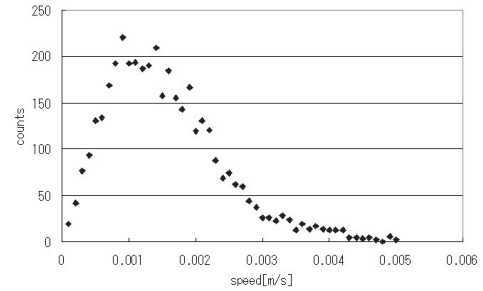


Fig.3 Velocity distribution of fine particle.

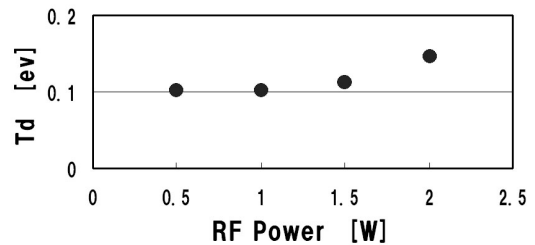


Fig.4 RF power dependence of fine particle temperature.

参考文献

- 1) H. Ikezi: *Phys. Fluids*, **29**, 1764 (1986).
- 2) Y. Hayashi and K. Tachibana: *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, L804 (1994).
- 3) J. H. Chu and Lin I: *Phys. Rev. Lett.* **72**, 4009 (1994).
- 4) H. Thomas, G.E. Morfill, V. Demmel, J. Goree, B. Feuerbacher, and D. Mohlmann: *Phys. Rev. Lett.* **73**, 652 (1994).
- 5) H.Totsuji: *J. Plasma Fusion Res.* **82**, 693 (2006).
- 6) S. A. Khrapak, et. al.: *Phys. Rev. Lett.* **96**, 015001 (2006).
- 7) V. N. Tsytovich, et. al.: *Plasma Phys. Control. Fusion*, **17**, 249 (1996).