

プラズマ物理学と微小重力微粒子プラズマ実験

東辻 浩夫 (岡山大), 高橋 和生 (京都工繊大), 足立 聡 (JAXA)

Plasma Physics and Fine Particle Plasma Experiments under Microgravity

Hiroo Totsuji^{*,**}, Kazuo Takahashi, Satoshi Adachi

^{*}Okayama University, Okayama 700-8530, ^{**}6-3-16, Saginomiya, Nakanoku 165-0032

E-Mail: totsuji-09@t.okadai.jp

Abstract: The importance of microgravity experiments of fine-particle plasmas is described from the view point of fundamental physics of strongly coupled systems. After the projects PKE-Nefedov and PK-3Plus, the ESA project PK-4 is now in progress. Based on the activity of PK-4 Working Group under the JXA Space Utilization Research Committee (in Japanese, utyuukankyō-riyōkagaku-iinkai), theoretical aspects of such experiment are presented.

Key words; Fine particle plasma experiments, strong coupling, Theory and simulation, PK-4 onboard International Space Station

1. 序

プラズマの物理現象には構成粒子の長距離相互作用に起因する特異性がある。弱結合熱平衡状態の理論は確立しており、特異点である理想気体近くについては高次の特性まで知られている。一方、強結合状態は理論・シミュレーションによる解析はあるが実験的検証が難しい。典型的なパラメータは 1 eV , 10^{25} cm^{-3} であり、電離・再結合などの原子過程、電子縮退が同時に起こるためである。しかし強結合プラズマ特性の情報は高温・高密度物質の状態方程式など強結合系解析の基礎として必須である。

強結合プラズマ実験の舞台としては、非中性プラズマと微粒子プラズマがある。前者では数 K 以下の He 液面上の 2 次元電子系や、強磁場によるトラップに閉じ込めて 10 mK 程度以下に冷却した回転するイオン系などで、次元などの自由度が限られる。後者では弱電離プラズマ中に置かれた 1 m^{-6} 程度の微粒子の集団を用いる。微粒子は電荷素量の 10^3 - 10^4 倍にも及ぶ巨大な絶対値の負電荷を自然にもつので、容易に強結合状態になり得、様々な実験ができる。

一方で、微粒子が重力の影響を受けることが微粒子プラズマ実験の弱点であり、地上では水平な層状の系になってしまう。重力の効果を温度勾配により打ち消すことも不可能ではない難しく、実験例は多くない。これが微小重力実験が必要な理由である。

ISS ではロシア・ドイツのプロジェクトとして PKE-Nefedov¹⁾, PK-3Plus²⁾による実験が行われた。さらに、PK-3Plus の後継として、ESA プロジェクト PK-4³⁾が最近開始された。我々は PK-3Plus 実験に参加した。その経緯は文献 4)にある。

PK-4 の特徴は、図 1 の PK-3Plus と異なり、図 2(上)のように、プラズマの主要部分が長い円柱状であることである。JAXA 宇宙環境利用科学委員会の下での PK-4 WG (略称) では、理論的研究とともに、図 2(下)のような PK-4 類似の実験装置 PK-4J を構築し、数年にわたりプラズマ物理に関連した基礎物理研究の可能性を検討した。

講演では、PK-4 WG の成果も含め、やや広い観点から基礎物理としての微粒子プラズマ微小重力実験の理論的側面を主に述べた。

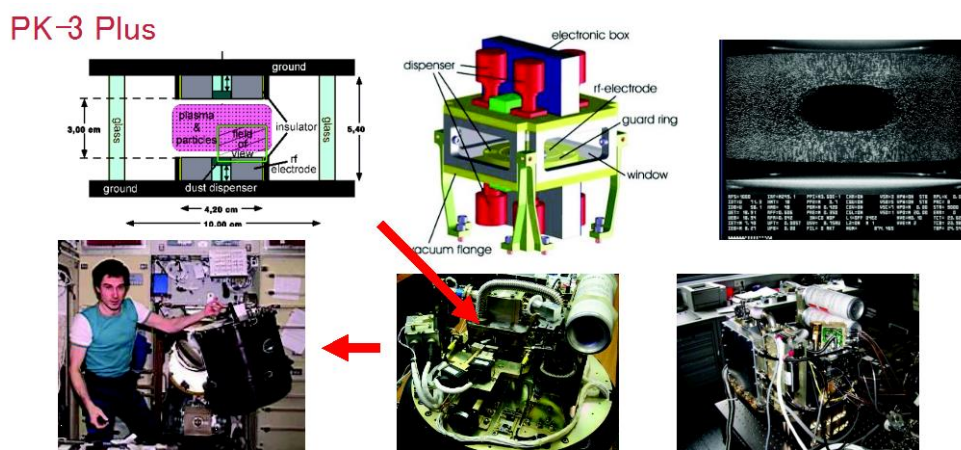


Fig.1. PK-3Plus, main part and void (upper right).

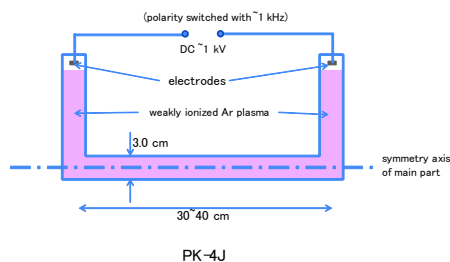
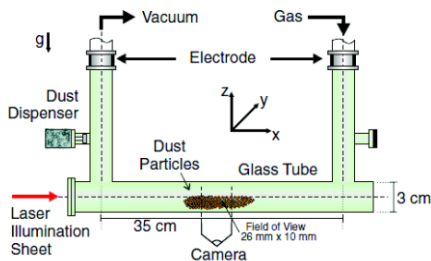


Fig.2. Top: PK-4. Bottom: PK-4J.

2. 微粒子集団の構造・相関形成

強結合系として特性には、系全体の構造と系内の微視的な構造（相関）形成がある。

2.1 微粒子集団の構造

微粒子を含むことによってプラズマが受ける影響について連続体近似の範囲での解析が行われた⁵⁾。プラズマは本来、自らの電気的中性を保とうとするのが、図3のように、微粒子が存在する領域ではそれが特に顕著となる。また、電子の拡散係数は大きいので、微粒子が存在する領域では電子の分布はほぼ平坦になる。

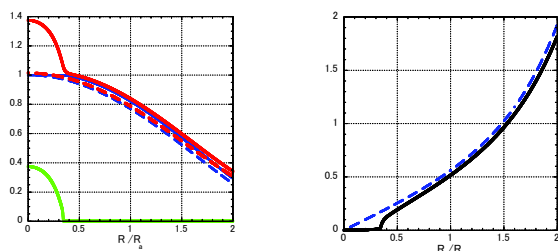


Fig.3. Left: Distribution of fine particle charge (green), ions (red), and electrons (blue). Right: Electric field.

この結果を用いると、微粒子集団の構造について、モデルをつくることができ、円筒対称など、対称性がよい場合には図4のように、具体的にモデル方程式が解ける。また、微粒子集団の構造と微粒子の密度を独立に制御できる可能性がある。

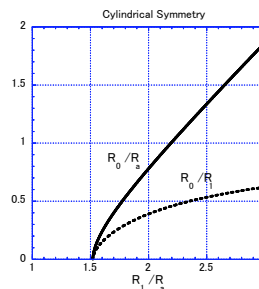


Fig.4. Plasma half width R_1 and cloud radius R_0 .

PK-3においては多くの場合、ボイドと呼ばれる微粒子の存在しない領域が出現し、微視的観測の対象となる部分の大きさを制限した。図5のように、円筒対称の場合に対して連続体近似でボイド形成の条件が求められ、ボイド形成条件がより強い（ボイドが形成されにくい）可能性が示された⁵⁾。

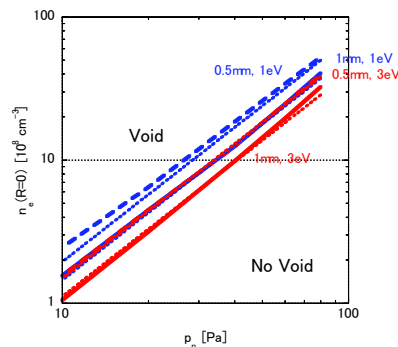


Fig.5. Condition for void formation.

2.2 微視的な構造（相関）形成

1次元的な閉じ込めの場合、円筒対称な場合、球対称な場合について、シミュレーションと理論による結果がすでに得られている⁶⁾。理論は層内の相関（凝集）エネルギーを採り入れたシェルモデル⁷⁾である。

トラップ中のイオン系の場合、微視的構造がこのシェルモデルでよく表されることが知られている⁷⁾。この場合には一体ポテンシャルおよびイオン間相互作用はともに自明であるが、微粒子系の場合には、どちらも検討の余地があった。

微粒子を含む一様でないプラズマについて、統計力学的な解析を改めて行って、これらのポテンシャルを定式化した⁸⁾。その結果、先行した解析⁶⁾の多くはそのまま正当化された。

3. まとめ

講演内容に沿って、プラズマ物理および関連する基礎物理研究における微粒子プラズマ微小重力実験の重要性、これまでの理論的研究の結果、制御された微粒子実験を行う可能性について説明した。

参考文献

- 1) A. P. Nefedov et al., *New J. Phys.* **5**, 33(2003).
- 2) H. Thomas et al., *New J. Phys.* **10**, 033036(2008).
- 3) V. E. Fortov et al., *Plasma Phys. Contrl. Fusion* **47**, B537(2005).
- 4) 東辻浩夫他, *プラズマ核融合学会* **91**, 514(2015).
- 5) H. Totsuji, *J. Plasma Phys.* **80**, 843(2014); to appear in *Plasma Phys. Contrl. Fusion*.
- 6) H. Totsuji et al., *Phys. Rev. Lett.* **78**, 3113(1997); *Phys. Rev. E* **71**, 045401(R)(2005); *Phys. Rev. E* **72**, 036406(2005); *Phys. Rev. E* **84**, 015401(R) (2011).
- 7) H. Totsuji et al., *Phys. Rev. Lett.* **60**, 2484(1988).
- 8) H. Totsuji, *J. Phys. Soc. Japan* **84**, 064501(2015).