

コンプレックス・プラズマにおける微粒子の帯電量計測

宇都宮大・大学院 齋藤和史

はじめに

プラズマ中に浮遊するマイクロメータ・サイズの微粒子は、プラズマのイオンと電子の易動度の差から負に帯電する。その帯電量がどのくらいであるかについては、これまでにいくつかの理論的な考察¹や実験による計測方法が提示されている²。例えば実験では、外部電場による微粒子軌道の偏向を用いる方法や外部磁場によるジャイロ運動を用いる方法、あるいは、シース中に微粒子を落下させてシース中での振動を観測することで見積もる方法、さらには微粒子が作る結晶構造における粒子間隔を用いる方法などが知られている。実験において微粒子の帯電量を評価する試みには、いくつかの困難が伴う。すなわち、地上実験において微粒子は、一般にシース電場による静電力と重力がバランスする位置に2次元的に浮遊している。浮遊している微粒子には常に電場が作用していることになる。また、隣り合う微粒子同士も互いに電場による作用を受けている。また、帯電量をそれぞれ単独で計測しようとしても電場を用いて粒子の軌道を変えるなどしなければならない。このように、プラズマ中に浮遊する微粒子を計測する際に、これらの電場の影響を排除することが非常に難しい。また、ジャイロ運動を用いる方法などでは、明確な軌道への影響を見るには非常に強い磁場や非常に速い微粒子の速度などが必要となる。よしんば、これらの方法が使えるとしても、その測定にはそれ専用でセットアップされた装置が必要となり、実際に研究対象としたい現象のための実験装置や実験条件からはかなり乖離したものとなり、あるいは、その解析には一般にかなり面倒な手続きが必要となるなど、問題を多く含んでいると考えられる。

実験対象の性質を知るための一つに、対象物に外部から何らかの刺激を与えてその応答を観測する方法がある。微粒子プラズマには、数十 Hz 程度の低周波振動である微粒子プラズマ振動が存在する。普通、この振動は非常に弱いため、そのままではなかなか観測にかからない。

そこで本研究では、実験領域にほぼ2次元的に水平面に浮遊している微粒子に対して、横方向から微粒子プラズマ周波数程度の低周波の電場の振動を与え、その応答を観測することで微粒子の帯電量を推定する方法を確立することを目指す。微粒子プラズマ振動を用いるため、外部電場の影響はほとんどないと考えられ、また、実験領域に存在する微粒子集団の応答を用いるため、個々の微粒子の帯電量にバラつきがある場合には平均帯電量を推定することになる。この方法では、実験装置中に外部電場印加用の電極とプローブを挿入しておけばよいので、研究対象としている微粒子プラズマの実験条件を大きく変えることなく測定ができるというメリットがある。

帯電量の理論的見積もり

理論的な帯電量の見積もり方法にはいろいろあるが、ここでは文献 1 に従って最も簡単であると思われる方法を概観する。

プラズマ中に置かれている電荷 Q に帯電した微粒子が作るポテンシャルは、微粒子中心から r 離れたところでは、Debye 長を λ_D として

$$\phi(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right).$$

このとき電場は

$$E(r) = -\frac{\partial\phi}{\partial r} = \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\lambda_D}\right)\phi(r)$$

となる。プラズマ・ポテンシャルを基準とした微粒子の表面ポテンシャルを ϕ_a とすると、半径 a の微粒子表面における電荷は

$$Q = 4\pi\epsilon_0 a^2 E(a) = 4\pi\epsilon_0 a \left(1 + \frac{a}{\lambda_D}\right) \phi_a.$$

微粒子プラズマでは一般に $a \ll \lambda_D$ であるから、プラズマ中の微粒子は

$$Q \approx 4\pi\epsilon_0 a \phi_a$$

に帯電していると考えられる。

この理論を実験に用いる場合、一般に微粒子の半径 a は既知である。微粒子の表面ポテンシャルは、Langmuir プロブなどのプロブ特性から見積もることが考えられる。この場合、微粒子が浮揚している位置が、プラズマ - シース境界であることには注意しておく必要があると思われる。プロブ理論はプラズマ中での使用を前提に理論が構築されており、プラズマ - シース境界では得られるプロブ特性についての理論的な保証が必ずしもあるわけではない。

本研究で提案する微粒子帯電量の見積もり方法

微粒子プラズマ中には様々なモードの振動が存在するが、微粒子プラズマ振動もその一つである。その周波数は

$$f_{ap} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Q^2 n_d}{\epsilon_0 m_d}}$$

で与えられる。ただし、 Q は微粒子の電荷、 n_d は微粒子密度、 ϵ_0 は真空の誘電率、 m_d は微粒子の質量である。微粒子の実験においては微粒子の質量は既知であることが多い。また、微粒子密度は写真撮影などによって計測可能である。

周波数 f_{ex} ($\approx f_{ap}$) の外部電場を印加してその系の応答周波数を計測する。その周波数が微粒子プラズマ周波数であるとみなせるとすれば、上式から微粒子の帯電量を見積もることが可能となる。

実験装置とこれまでの結果

実験装置の概略図を図 1 に示す。プラズマは酸化熱陰極による直流放電により生成される。実験に用いるガスはアルゴンであり、中性ガスの圧力は約 0.1 Pa である。実験領域はガラスと外部から振動電場を印加するメッシュ・グリッドで囲まれている。メッシュ・グリッドは発振器に接続されている。印加電圧は、RF 放電での実験を参考にして $5 + 2.5 \sin(2\pi f_{ext} t)$ V とした。メッシュ・グリッドに対向している面には矩形の Langmuir プローブが設置されている。プローブでイオン飽和電流を計測し、間接的に微粒子の外部電場に対する応答を測定する。得られたイオン飽和電流は FFT によって周波数分析を行い、微粒子プラズマ周波数に相当する周波数を推定する。実験に用いる微粒子は直径 5.6 μm のアクリル樹脂球と、直径 9.8 μm のシリカ球であり、いずれも単分散である。

種々に実験条件を変えて実験を行っているが、本装置ではシリカ球を浮遊させることは困難なようである。アクリル樹脂球を浮かせることはできている。しかしながら、中性ガス圧力の低さ故に微粒子の運動が激しく、微粒子密度を見積もることができていない。

まとめ

微粒子の帯電量について、実験的に可能な限り単純で簡単に見積もることのできる方法の構築を試みている。RF 放電によって生成された微粒子プラズマにおいて、本研究で構築しようとしている方法を用いた実験では、ここで紹介した理論によって予想される帯電量の約 1/3 程度の帯電量が得られている。

本方法を直流放電によって生成された微粒子プラズマの場合に、以下の問題があることが明らかとなった。すなわち、低い中性ガス圧のため、微粒子の運動が活発であり、微粒子密度の見積もりが容易ではないこと、また、熱陰極がかなり高温となるため、アクリル樹脂製の微粒子が熱的に溶融する可能性が高いことである。ただし、熱的な溶融については、少なくとも今年度の実験においては然程大きな問題とはならなかった。

2 月末から 3 月初めにかけて宇宙研の小型チェンバーを用いて取得したデータを、現在、鋭意解析・検討中である。

参考文献

1. 例えば、石原修『プラズマ物理科学』（電気書院, 2014）などを参照。
2. 例えば、A. A. Samarian *et. al.*, Phys. Rev. E **68**, 066404 (2003), Y. Nakamura and O. Ishihara, Phys. Plasmas **16**, 043704 (2009) など。

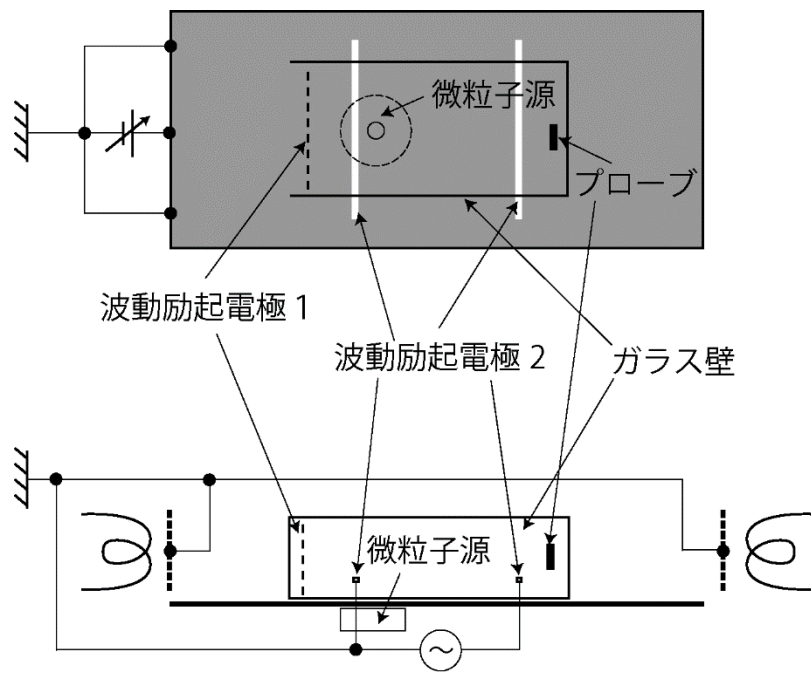


図 1. 実験装置の概略図