

2 流体プラズマ状態の検証に用いる電子プラズマの能動的 操作法の発見

本学電気電子工学系の比村治彦教授の研究室では、ネストトラップ^{*1}内でそれぞれ異なる流体運動を行っているイオンプラズマと電子プラズマを混合させることで、2流体プラズマ状態を世界で初めて生成するという実験を行っている。この実験を精緻に行うために、電子プラズマの数密度を変化させることで、電子プラズマの直径を能動的に操作できることを発見し、イオンプラズマと電子プラズマの直径を合わせることに成功した。これにより、精密な2流体プラズマ状態を作り出すことが可能となる。さらに、2流体プラズマ実験において重要なパラメータとなっているイオンプラズマと電子プラズマの数密度比の操作も可能となる。

この研究の成果は、学術雑誌「Plasma and Fusion Research」の2019年1月号に掲載される。

ポイント

- ✓ 電子プラズマの数密度を変化させることで、電子プラズマの直径の操作ができることを発見。
- ✓ それぞれ独立の流体運動を行っているイオンプラズマと電子プラズマを用いた2流体プラズマ物理の開拓実験を大きく前進させる技術的操作方法。

研究の背景

プラズマは多数のイオンや電子、ラジカルで構成され、それらが連続体としてコヒーレントな集団運動を行うこともあり、物質の第 4 の状態とも言われている。プラズマの巨視的な集団運動を取り扱う際、プラズマは電氣的に中性で、イオンと電子は一緒に運動するという 1 流体プラズマ (MHD) モデルが用いられる。しかし、近年、この MHD モデルの適用に妥当性がない新しい現象が次々と発見され始め、イオン群 (イオンプラズマ) と電子群 (電子プラズマ) がそれぞれ独立の集団運動を行うという 2 流体プラズマモデルが提案されている。ところが、この 2 流体プラズマは、その状態が理論的に予測されてはいるものの、実験的に見つかっておらず、不明なままである。そこで我々は、非中性プラズマ^{*2}であるイオンプラズマと電子プラズマをネストトラップ内で混ぜるという独自の 방법으로 2 流体プラズマ状態の存在可否を検証するという世界初の実験を進めている。この実験を行うためには 2 つの技術が不可欠となっている。1 つ目は、回転楕円体であるイオンプラズマと電子プラズマの直径を合わせることである。2 つ目は、イオンプラズマと電子プラズマの数密度の値を正確に制御することである。この 2 つの要請に応えるために、本研究では電子プラズマの直径をイオンプラズマの直径まで大きくすることを実験的に試み、それに成功した。本論文では、電子プラズマの直径の能動的操作方法の詳細とその結果について示している。

研究の内容

我々の実験では、静電ポテンシャル井戸と一様磁場を用いて、イオンプラズマと電子プラズマを円筒型真空装置内に閉じ込めている。まず初めに、イオンプラズマと電子プラズマをそれぞれ別々の領域に閉じ込める (図 1(a)参照)。その後、イオンプラズマをネストトラップ領域へと移送して、電子プラズマと重畳させる (図 1(b)参照)。ある一定時間そのままの重畳状態を維持した後、イオンプラズマ (あるいは、電子プラズマ) を蛍光盤付きマイクロチャンネルプレート^{*4}へと排出し、発光画像からイオンプラズマ (あるいは、電子プラズマ) の 2 次元画像を計測している。

電子プラズマ直径の能動的制御を行わない場合、重畳前のイオンプラズマと電子プラズマの直径は、それぞれ 1.77 cm と 0.28 cm であった。これらプラズマの直径は、それぞれのプラズマの剛体回転周波数と相関しており、その剛体回転周波数はプラズマ数密度で決まる。今回、我々は、電子プラズマの数密度が、電子プラズマを生成するためのフィラメント数とそれらの加速電圧^{*3}で変化することを実験的に突き止めた。そして、そのフィラメント数と加速電圧をパラメータとして、電子プラズマの直径の変化を正確に測定した。測定結果より (図 2 参照)、加速電圧が -8 V、フィラメント数が 3 のとき、電子プラズマの直径を 1.84 cm まで大きくすることができた。これをイオンプラズマの直径と比べると、差異はわずかに 4 %であり、両プラズマの直径を等しくすることに成功した。

次に、イオンプラズマと電子プラズマの数密度の違いについては、電子プラズマの直径が 0.28 cm から 1.84 cm となることで (図 3 参照)、数密度は $5 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ から $7 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ と下がる。この一方で、これまでの実験より、イオンプラズマの数密度は、イオンプラズマの直径を一定値に保ちつつ、 $2 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ から $2 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ まで変化させることができることを確認している。つまり、イオンプラズマの数密度 < 電子プラズマの数密度の大小関係や、これとは反対に、イオンプラズマの数密度 > 電子プラズマの数密度の状態を実現することに目途もついた。これらにより、2 流体プラズマ検証実験が大きく前進する。

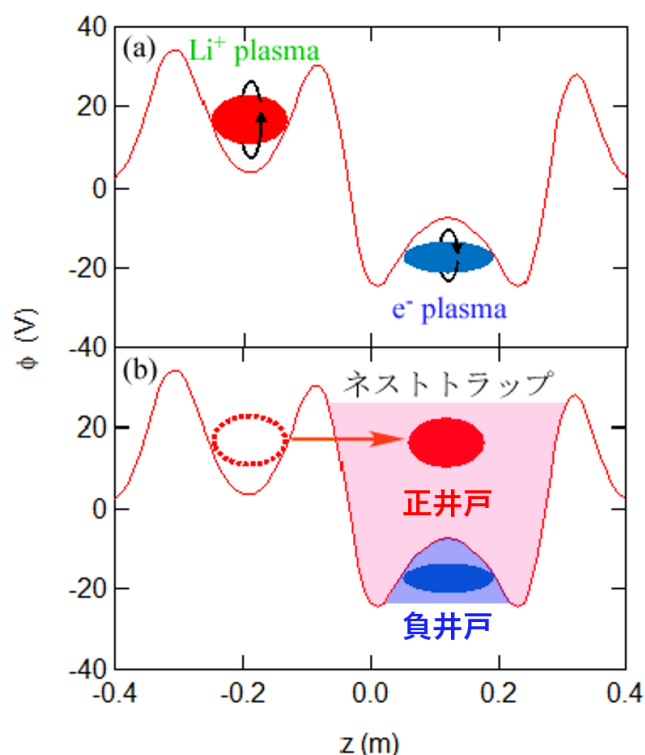


図 1 イオンと電子を閉じ込める電位配位

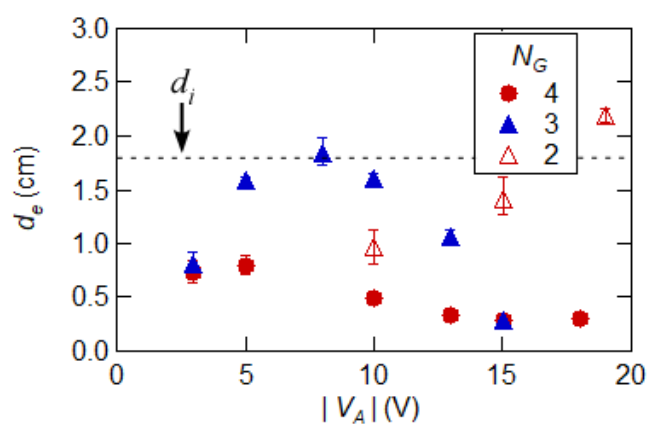


図 2 電子直径の電子銃の数と加速電圧依存性

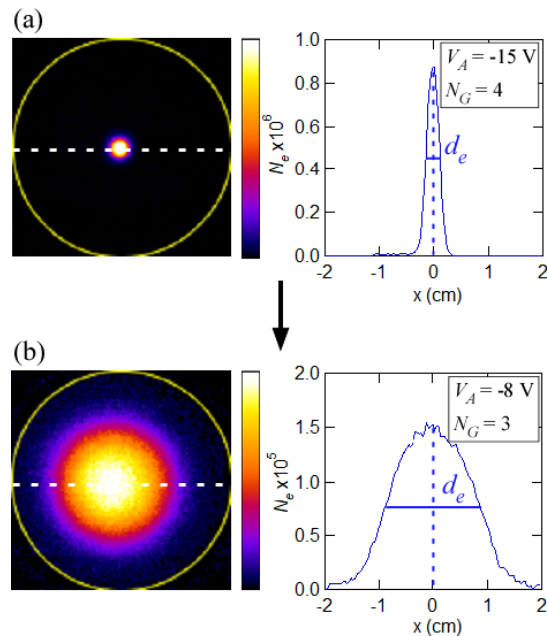


図3 電子銃の数と加速電圧を変化させたときの電子の発光画像と粒子数分布

今後の展開

本研究でイオンプラズマ直径＝電子プラズマ直径を実験的に実現して、イオンプラズマと電子プラズマの数密度の比を能動的に変える手法を確立した。今後はイオンプラズマと電子プラズマの数密度比をパラメータとして、イオンプラズマと電子プラズマを重畳した後のそれらイオンプラズマと電子プラズマの巨視的なダイナミクスをそれぞれ個別に観測していく。この実験と並行して、現在、海外のシミュレーション研究者と共同で、シミュレーションでの実験結果の再現も開始している。実験とシミュレーションを合わせた最新の結果からは、2流体プラズマの差動回転平衡状態の存在が示唆されている。このような2流体プラズマ状態の存在が確立されることになると、これはプラズマ物理学における革新的な発見の一つになり、大きな学術的成果となる。現在、我々の実験室では、本研究で発見した操作を用いて、様々なプラズマパラメータを変化させながらこの2流体プラズマ状態に関するデータを蓄積しており、実験データとシミュレーションを併用しながら、未解明物理の開拓を進めていく。

用語解説

1. ネストトラップ

ネストトラップとは、正と負の荷電粒子を同じ領域に閉じ込めることのできるトラップ法であり、大きな正のポテンシャル井戸の中に負のポテンシャル井戸が内包されているポテンシャル井戸分布となっている（図1(b)参照）。

2. 非中性プラズマ

非中性プラズマとは、電氣的に中性状態ではないプラズマを指す。我々の実験で用いている非中性プラズマはイオンまたは電子のみで構成されたプラズマであり、それぞれ純イオンプラズマ、純電子プラズマと呼ばれている。

3. 加速電圧

加速電圧とは、イオンまたは電子を加速させるために、荷電粒子の加速領域の両極間に加える電圧を指す。この加速電圧により、イオンまたは電子が荷電粒子源（銃と呼んでいる）から放出される。

4. マイクロチャンネルプレート

マイクロチャンネルプレートとは、入射した荷電粒子（電子やイオン等）の数に応じて大量の2次電子を発生させる装置である。構造は微小な光電子増倍管を束ねた構造になっているので、微弱な紫外線やX線等の光子を大量の2次電子に変換して検出することも可能である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)「非中性プラズマを応用した制御自己ポテンシャル場が創り出す2流体プラズマの動力学(課題番号18H01194)」の支援を受けて行った。

論文情報

- ・ タイトル

“Controlling the diameter of a pure electron plasma to produce an exact two-fluid plasma state in a nested trap”

- ・ 著者

T. Kato, H. Himura, S. Sowa, and A. Sanpei

- ・ 掲載誌

Plasma and Fusion Research **14**, 1201039 (2019).