

ネストトラップをプラズマ移送実験に用いる場合に 予期せずに発生する不純物イオンの発生機構の解明

本学電気電子工学系の比村治彦教授の研究グループでは、非中性プラズマ^{※1}である電子プラズマとリチウムイオンプラズマをネストトラップ^{※2}内で混合させて、2 流体プラズマ状態を世界で初めて生成する実験を行っている。混合実験を行う際、ネストトラップ内にリチウムイオン以外のイオンが発生することが実験で観測されていたが、その発生機構は不明のままであった。今回、この発生機構を同定するために、包括的な実験、データ解析、シミュレーションを繰り返すことによって、ついにその発生機構が解明された。この現象は、電子プラズマがネストトラップ内で移送される際、電位勾配によって加速されることで真空容器内の背景に含まれる残留ガスが電離され、イオンやイオン性分子になることが明らかとなった。これらは不純物イオンになるため、これらの発生を抑制するための実験パラメータ領域も解明された。これにより、不純物イオンが発生しない理想的な 2 流体プラズマ実験をネストトラップ内で行うことが可能になった。さらに、本研究結果は、ネストトラップが用いられている先端物理学研究の一つ、反物質の生成実験にも寄与する所が大きい。

この研究成果は、最先端の物理学を専門に取り扱う国際学術雑誌「Physics Letters A」に掲載される。

ポイント

- ✓ ネストトラップ内で不純物となるイオンやイオン性分子が生じる物理機構を解明した。
- ✓ それら不純物イオンは、ネストトラップのポテンシャル障壁による電位勾配で加速された電子による電子衝突電離に起因していることが明らかにされた。
- ✓ ネストトラップを用いてイオンプラズマと電子プラズマを混合する 2 流体プラズマ実験において、不純物イオンが発生しない実験オペレーション領域を示した。
- ✓ これらの知見はネストトラップが用いられる反物質実験にも寄与する。

研究の背景

プラズマは多数の荷電粒子で構成されている、物質の第4の状態と言われる状態である。プラズマには巨視的な集団運動が見られることがある。この集団運動は、MHD と呼ばれる理論でよく取り扱われている。MHD では、プラズマは電気的に中性で、イオンと電子と一緒に運動すると考えられている。一方で、近年では MHD の適用に妥当性がない現象がいくつも発見されている。その例として、太陽フレアや地球磁気圏にみられる磁気リコネクションや、現在開発中の核融合炉で扱われるような磁場閉じ込めプラズマの周辺部での乱流現象、コアプラズマにおける異常輸送が挙げられる。これらの物理を理解するために、拡張 MHD が注目されている。その1つに、イオン群（イオンプラズマ）と電子群（電子プラズマ）がそれぞれ別の流体方程式に従って運動を行うと考えて構築された 2 流体プラズマモデルがある。2 流体プラズマとは、このモデルに従って集団運動している状態である。しかし、理論や数値計算で 2 流体プラズマの研究が多く行われる中、実験で意図的に 2 流体プラズマを生成した例は存在しない。

この 2 流体プラズマ状態の存在可否を検証するために、我々は BX-U 装置^{*3}を用いて、ネストトラップ内で非中性プラズマである電子プラズマとリチウムイオンプラズマを混合する実験を行っている。この混合実験を行ったときに、もともと閉じ込めているリチウムイオンだけでなく、別の正の荷電粒子も検出された。我々はこの別の荷電粒子を不純物イオンと呼んでいる。2 流体プラズマ実験では、不純物イオンはリチウムイオンと一緒に検出されるため、イオン数測定やイオンの線積分密度分布の測定において大きな実験誤差になる。また、2 流体プラズマ実験だけでなく反物質に関する研究においても、望ましくないプラズマの膨張や加熱を引き起こす原因となる不純物イオンの発生は避けなければならない。

研究の内容

本研究は、ネストトラップ内で発生する不純物イオンに関する研究である。実験では、一様磁場中にネストトラップと呼ばれるポテンシャル井戸を形成し、その中でリチウムイオンプラズマと電子プラズマを閉じ込める。図 1 (a)は緑で示すネストトラップの領域でリチウムイオンプラズマを閉じ込めたとき、図 1 (b)は電子プラズマを閉じ込めたときの概略図をそれぞれ示している。赤で示すリチウムイオンは中央の正ポテンシャル井戸に閉じ込められる。一方で、青で示す電子はより長い負ポテンシャル井戸内に閉じ込められる。ネストトラップ内に閉じ込められている正の荷電粒子は、図 1 に示すポテンシャル障壁 ϕ_{id0} を 0 V に下げることで図の右側へと流れ出る。流れ出た荷電粒子はマイクロチャネルプレート (MCP) ^{*4}に衝突し、MCP からは大量の 2 次電子が放出される。

図 2 は、この 2 次電子電流の時間発展を示している。青のプロットは電子のみを閉じ込めたときに流れ出る正電荷による 2 次電子電流である。この結果から、電子プラズマをネストトラップ内に閉じ込めると不純物イオンが発生していることがわかる。その後、さらに、 ϕ_{id0} を 0 V に下げてから約 8 μ s 後に phase 1 の時間帯に発生したイオンが、また、約

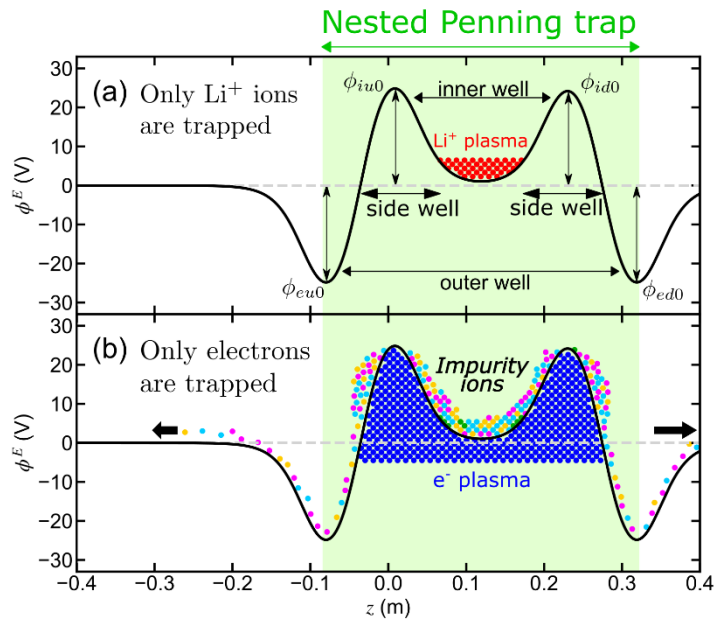


図1 ネストトラップにおける非中性プラズマの閉じ込め.

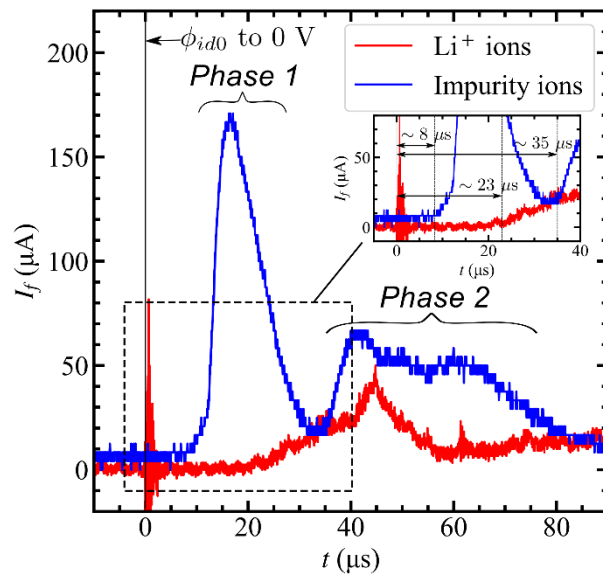


図2 蛍光板付きMCPから流れる2次電子電流の時間発展.

35 μs 秒後に phase 2 の時間帯に発生したイオンが MCP に到達している。これらの結果から、複数種のイオンが存在することがわかる。赤のプロットはリチウムイオンのみを閉じ込めたときの2次電子電流である。リチウムイオンは約 23 μs 後に MCP に到達する。荷電粒子の質量が大きいほど MCP への到達時間は長くなるので、phase 1 の時間帯に生成されたイオンはリチウムイオンより軽く、phase 2 の時間帯に生成されたイオンはリチウムイオンよりも重いことになる。これらを合わせて「不純物イオン」と呼ぶことにする。

不純物イオンのイオン種同定実験の詳細についてはここでは省略するが、リチウムイオンよりも軽いイオンと重いイオンが発生する原因は、ネストトラップ特有の電位分布にある。ネストトラップは電位井戸が入れ子構造になっている。その入れ子構造のために、中心電位井戸の両端に極性が逆の電位井戸が存在している。今の場合、その両端の電位井戸内で電子が加速されることにより、トラップ内に含まれる残留ガスの電子衝突電離過程が生じる。

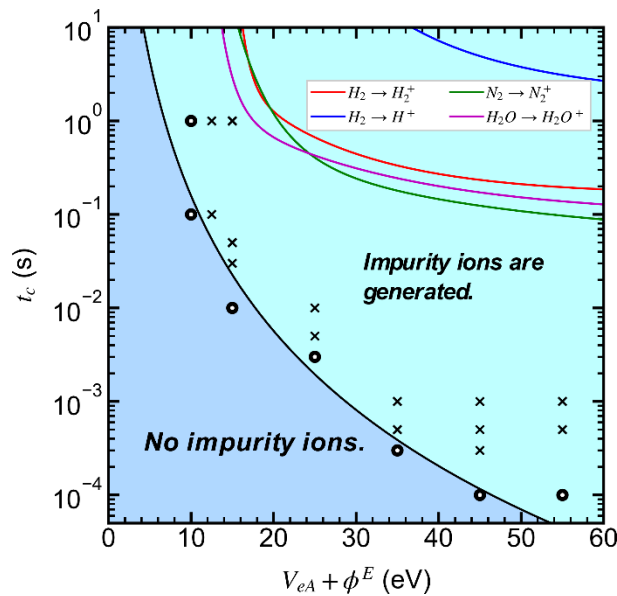


図3 ネストトラップ内で不純物イオンが発生しない実験パラメータ。

図3は、この不純物イオンの発生を抑制するための実験条件を示している。縦軸はネストトラップ内での電子の閉じ込め時間を表しており、横軸がその電子の持ちうる最大エネルギーを意味している。ここで、 V_{eA} は電子の初期エネルギー、 ϕ^E は ϕ_{iu0} 、 ϕ_{ido} と同じ値である。○と×のプロット点の間が、電子衝突電離過程が生じないパラメータ領域の境界を表している。その境界が、イオンやイオン性分子の発生を抑制するためには、電子の閉じ込め時間とエネルギーの値を適切に選択する必要があることを示している。

今後の展開

本研究では、電位井戸が入れ子構造となっているネストトラップの両端に存在する電位井戸内で荷電粒子が加速されることを初めて実験的に示した。この実験では電子が加速される場合を示している。その加速電子によって、たとえ超高真空状態下であっても、残留ガスの電子衝突電離過程が生じる。このために水素イオンや水素分子イオン等が不純物イオンとしてネストトラップ内に現れる。これを回避するためのオペレーション領域についても実験的に初めて示した。これにより、不純物イオンが発生しない2流体プラズマ実験を精緻に行うことが可能となる。今後は、それら不純物イオンの発生が回避される条件におい

て、2 流体プラズマ実験のデータを蓄積し、2 流体プラズマにおける平衡状態の存在可否を明らかにする。この研究で得られた知見は、最先端物理の問題の一つ、CPT 対称性を実験的に検証するために用いられているネストトラップとそのトラップでの実験に対して広い波及効果をもたらすことになる。

用語解説

1. 非中性プラズマ

電氣的に中性ではないプラズマのことである。本研究では、電子のみから構成される電子プラズマと、リチウムイオンのみから構成されるリチウムイオンプラズマを扱っている。

2. ネストトラップ

電位井戸が入れ子構造になっているトラップである。図 1 に示しているような正の電位井戸がより長い負の電位井戸に内包される形と、その極性が逆の形がある。

3. BX-U 装置

プラズマ基礎工学研究室が所有する実験装置である。一様磁場を生成するソレノイドコイルと、電子銃、イオン銃、円筒型電極、マイクロチャンネルプレートが設置された超高真空の容器から構成される直線型プラズマ実験装置である。

4. マイクロチャンネルプレート

荷電粒子を 2 次元的に検出し、増倍する素子である。電子、イオンといった荷電粒子だけでなく、紫外線や軟 X 線なども検出することができる。蛍光面と組み合わせることで、2 次元的に信号を検出することも可能である。この素子は質量分析装置などで使用されている。

謝辞

本研究は、JSPS の科研費(Grant No. 21H01056, 21K18618, 20KK0063)、核融合科学研究所(Grant No. NIFS20KOAP035)および JST SPRING(Grant No. JPMJSP2107)の支援を受けて行った。

論文情報

- ・ タイトル

“Observation of impurity ions during a plasma translation experiment in nested Penning traps”

- ・ 著者

T. Okada, H. Himura, S. Yamada, S. Nishio, A. Sanpei

- 掲載誌

Physics Letters A

<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2022.128617>