

2025 年度 若手研究者スタートアップ支援プログラム 報告書

2026 年 8 月 5 日

プラズマ量子プロセスユニット 木村直樹

研究課題名：多価イオンレーザー分光で目指すプラズマ科学の革新

1. 研究目的

『多価イオン』は、2 価以上に帯電した正の原子イオンの総称である。その原子構造に迫る分光研究は、原子物理の一大分野であり、古くから相対性理論や量子電磁力学の検証の一助を担ってきた。また、その分光データは、核融合・天文学・短波長光源開発などの応用研究にも役立てられている。多価イオン分光実験の標準的な手法は、プラズマ中多価イオンの発光を分光器で観測する受動分光実験である。多価イオンは、その生成・保持自体が特殊技術であり、十分なイオン数を稼ぐことが容易でない。そのため、現状はレーザー励起などを使う能動的分光実験が広く普及しているとは言い難い。しかしながら、特に近年、多価イオン原子時計などの新しいアプリケーションの登場によって、分光精度への要求が高くなってきており、より高い分解能を得られる能動的分光手法への転換が求められている。そんな中、最近我々は多価イオンレーザー分光手法「時間分解プラズマアシストレーザー分光」を提案・実証した[Kimura et al., Comm. Phys. 6, 8 (2023)]。ただし、本手法で得られるレーザー誘起蛍光の信号強度は非常に弱く、幅広い多価イオンを対象とした汎用的手法とは言い難い。そこで本研究では、その信号強度を増大させ、幅広い種類の多価イオンに対して適用できる汎用的レーザー分光技術に昇華させることを目指す。具体的には、軸フリー構成の「穴あきカソード小型電子ビームイオントラップ（軸フリーCompact EBIT）」を新たに開発し、空間捕捉された多価イオンとレーザーとの衝突領域を従来の 100 倍以上に増加させ、高効率なレーザー励起を可能にする。これによって、以前は実験対象となり得なかった複雑な準位構造を持つ多価イオンのレーザー分光をも実現し、宇宙物理・核融合・短波長光源・原子時計開発など幅広い応用研究に貢献する。

2. 2025 年 4 月～2026 年 7 月までの成果

2. 1. 軸フリーEBIT の開発

本研究では、既に別予算で開発を始めている新しい EBIT 装置 (CoBIT-III) の電子銃を改造し、目的の軸フリーCompact EBIT を実現する。2025 年度、まずは穴のあいていない一般的な市販カソードを用いた電子銃構成で、CoBIT-III を組み上げ、その機能試験を行った。図 1 に実験装置の写真と機能試験で観測した多価イオンの可視発光スペクトルを示す。EBIT は、超高真空チャンバー内で電子ビームを高密度化させ、逐次電離によって多価イオンを生成するプラズマ実験装置である。多価イオンの生成は、その発光を分光器で観測することで、確認することが出来る。図 1 のように装置の立ち上げと機能試験を完了し、10 価程度の重

元素多価イオンが生成できる EBIT の開発に成功した。

また、並行して穴あきカソードを採用する新しい電子銃の設計も進めている。既に、電子軌道計算によって最適な電極配置を決定し、電極の詳細設計も終えている。

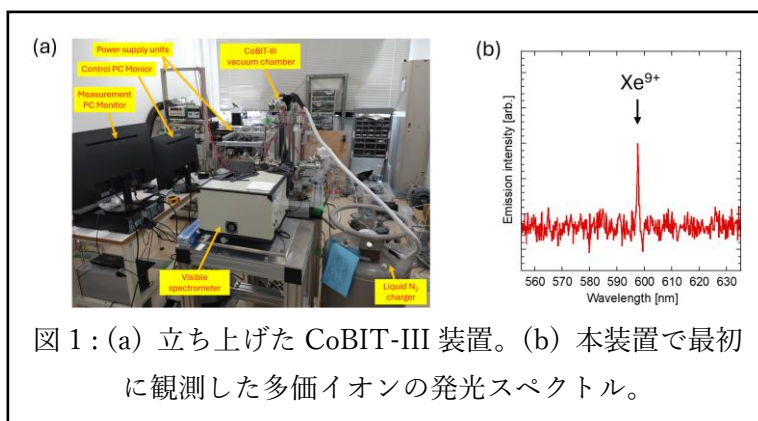


図 1 : (a) 立ち上げた CoBIT-III 装置。(b) 本装置で最初に観測した多価イオンの発光スペクトル。

2. 2. 既存の EBIT を用いた多価イオン分光実験

上記の新装置開発と並行して、既存の EBIT 装置を用いた多価イオン分光実験も精力的に実施した。例えば、原子分光データが不足していた Lu・Hf・Ta(原子番号 71-73) の多価イオンに着目し、紫外～可視領域の発光線を系統的に測定した。また、Fe や Ni など天体プラズマ中で重要な多価イオンを対象に、その電離過程を詳細に調べた。さらに、Na 様多価イオンの極端紫外 D1 線分光によって原子核半径を評価する新しい試みにも挑戦している。

3. 今後の研究計画

穴あきカソード電子銃を CoBIT-III に組み込み、電子ビームの特性試験と多価イオン生成のテストを実施する。その後、本装置を用いたレーザー分光実験を幅広く展開したい。

4. 研究成果

4. 1. 論文（責任著者論文、査読有のみ）

- ✓ Y. Miya, N Kimura et al., New Journal of Physics 27 063203 (2025)
- ✓ N. Kimura et al., Physical Review A 114, 012811 (2026)

4. 2. 学会発表（自分が登壇したもののみ）

- ✓ 国内学会発表 10 件（うち招待講演 5 件）
- ✓ 国際学会発表 3 件（うち招待講演 1 件）

4. 3. 外部資金獲得（代表のみ）

- ✓ 科学研究費補助金（基盤研究(B)）
- ✓ 自然科学研究機構 OPEN MIX LAB (OML) 公募研究プログラム 若手支援型
- ✓ 松尾学術振興財団 松尾学術研究助成
- ✓ 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業（原子力システム研究開発事業） 一般課題型（若手）