

大型ヘリカル装置におけるランタノイド元素多価イオンの 極端紫外スペクトル解析の進展

Progress of Analyses of Extreme Ultraviolet Spectra from Highly Charged Ions of Lanthanide Elements in the Large Helical Device

鈴木千尋^{1,2}, 小池文博³, 村上泉^{1,2}, 田村直樹^{1,2}, 大石鉄太郎^{1,2}, 中村信行^{1,4}
SUZUKI Chihiro^{1,2}, KOIKE Fumihiko³, MURAKAMI Izumi^{1,2}, TAMURA Naoki^{1,2},
OISHI Tetsutarou^{1,2}, NAKAMURA Nobuyuki^{1,4}

核融合研¹, 総研大², 上智大³, 電通大⁴
NIFS¹, SOKENDAI², Sophia Univ.³, UEC⁴

ランタノイド元素の多価イオンからの発光スペクトルは複雑な構造を持つが、産業用短波長プラズマ光源への応用や天体プラズマ研究に関連して重要であるだけでなく、配置間混合や相対論効果の観点から原子物理学的にも興味深い研究対象である。しかしながら、最も基本的なデータともいえるスペクトル線の波長に関してさえ、実験データベースが十分に整備されていないのが現状である。

大型ヘリカル装置 (LHD) で生成される希薄な超高温プラズマは、不純物がある程度混入した状態でも比較的安定に維持でき、分光器をはじめとした各種高性能計測器も充実していることから、各種元素の基礎的な分光データの整備にも活用することが可能である。そこで、過去 10 年ほどの間に、トレーサー内蔵ペレット (TESPEL) を用いて各種ランタノイド元素を LHD プラズマに入射し、波長 1–20 nm の極端紫外 (EUV) 領域を中心に、発光スペクトルの観測を行ってきた [1–5]。これまでに、放射性元素であるプロメチウムを除く全ランタノイド元素の実験データが系統的に取得され、原子番号依存性を検討するための基礎データが整備された。

ランタノイド元素の多価イオンからのスペクトルは、電子温度が高い場合には、4s, 4p 電子が最外殻のイオン (銅様、亜鉛様、ガリウム様など) による離散的な構造となり、電子温度が低い場合は、4d, 4f 電子が最外殻のイオンによる連続的な構造となる傾向がある。比較的解析の容易な、前者の離散的なスペクトルを中心に、原子番号依存性を整理し、非経験的な原子構造計算や電子ビームイオントラップ (EBIT) 実験とも比較することにより、スペクトルデータの解析を順次進めている。その結果、過去に実験的に未同定であったスペクトル線が多数同定された。

原子番号依存性に関する検討の一例として、ガリウ

ム様イオンの基底状態 $(4p_-)_{1/2}$ への二つの遷移について、LHD で観測された波長の原子番号依存性を図 1 に示す。励起状態 $(4d_-)_{3/2}$ からの遷移の波長 (実線) と、励起状態 $(4s_+, (4p_+^2)_2)_{3/2}$ からの遷移の波長 (点線) は、途中で両者が入れ替わるように見える。この挙動は、上記の二つの励起電子配置が配置間混合していることに起因する。詳細な原子構造計算によれば、混合率は原子番号に依存し、両配置の寄与の大小関係が原子番号 62 と 63 の間で入れ替わる [6]。通常、各準位は寄与最大の電子配置によってラベルづけされるため、このような現象が生じたといえる。

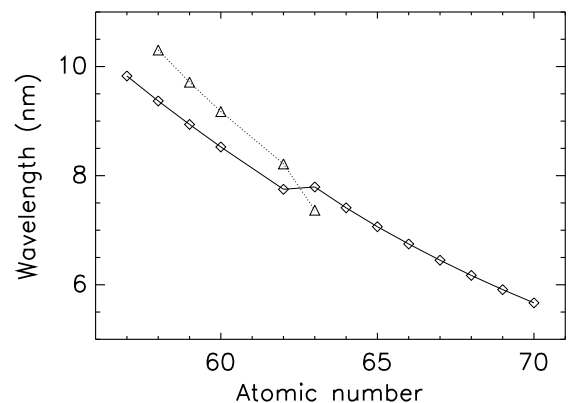


Fig. 1: LHD で観測されたガリウム様イオンの基底状態への遷移波長の原子番号依存性。励起準位 $(4d_-)_{3/2}$ (実線) および $(4s_+, (4p_+^2)_2)_{3/2}$ (点線)。

[1] C. Suzuki et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **48**, 144012 (2015).

[2] C. Suzuki et al., Plasma Phys. Control. Fusion **59**, 014009 (2017).

[3] C. Suzuki et al., Atoms **6**, 24 (2018).

[4] C. Suzuki et al., Atoms **7**, 66 (2019).

[5] C. Suzuki et al., Atoms **9**, 46 (2021).

[6] F. Koike et al., submitted to Phys. Rev. A