

高温プラズマ中におけるガリウム様重元素イオンからの 発光スペクトルの詳細解析

Detailed analysis of emission spectra from Ga-like heavy ions in high temperature plasmas

鈴木千尋^{1,2}, 小池文博³, 村上泉^{1,2}, 加藤太治¹, 田村直樹^{1,2}, 大石鉄太郎^{1,2}, 中村信行^{4,1}
SUZUKI Chihiro^{1,2}, KOIKE Fumihiko³, MURAKAMI Izumi^{1,2}, KATO Daiji¹,
TAMURA Naoki^{1,2}, OISHI Tetsutarou^{1,2}, NAKAMURA Nobuyuki^{4,1}

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

重元素多価イオンからの放射スペクトルは、基礎原子物理学的な興味のみならず、核融合プラズマや、産業用短波長光源への応用においても強い関心の対象となっている。極端紫外 (EUV)・軟エックス線領域における強い発光スペクトルは、主に最外殻電子の主量子数が 4、すなわち N 殻のイオンによるものであるが、電子相関などの多電子系に特有の性質が強く反映されることが知られている。ガリウム様イオンは、 M 殻閉殻の外側に 3 個の N 殻電子が存在する、単純な電子配置 $[\text{Ar}]3d^{10}4s^24p$ を基底状態として持つ。その発光スペクトルも少数の離散的な発光線からなる比較的単純な構造となるが、重元素のガリウム様イオンに関する分光実験データは未だ不完全であり、実験研究の余地が残されている。

本研究では、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) において系統的に観測された、一連の重元素多価イオンの分光データ [1,2] に基づき、ガリウム様イオンの EUV・軟エックス線領域のスペクトル線に着目して詳細な解析を行った。不純物を導入した状態で、2 keV 程度以上の比較的高温のプラズマを維持することで、ガリウム様イオンを含む、最外殻電子軌道が $4s$ または $4p$ の比較的高価数イオンからの離散的なスペクトルが観測された。GRASP92 コードを用いた多配置ディラック・フォック法による非経験的原子構造計算を行い、遷移波長の理論値と実験値を比較した [3]。

原子番号 (Z) 依存性の解析の結果、ガリウム様イオンの主要な遷移について、多数のスペクトル線を初めて実験的に同定するとともに、重元素多価イオンに特有の、強い配置間相互作用やスピン軌道相互作用を反映した興味深い結果が得られた [3]。その一例として、ランタノイド元素のガリウム様イオンについて、基底状態の $4p$ 電子のスピン軌道相互作用により分裂した、微細構造間の磁気双極子 (M1) 遷移波長の Z 依

存性を図に示す。 $Z=70$ 以外は LHD で初めて同定したラインである。原子番号 62 以下は観測波長域の制限のため実験値が同定できていないものの、理論値と実験値は極めてよく一致していることがわかる。水素様イオンのスピン軌道相互作用のハミルトニアンは、原子の平均半径としてボーア半径を取れば、原子番号の 4 乗に比例する。電子数 31 のガリウム様イオンについても、 $4p$ 電子から見た遮蔽効果を含む実効的な核電荷 $Z-\sigma$ に対して 4 乗則が成り立つと仮定してフィッティングを行ったところ、 $\sigma=17.4$ という値が得られた。

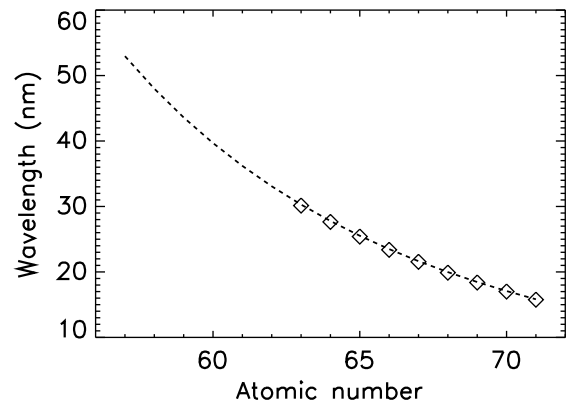


Fig. 1: ガリウム様イオンの基底配位微細構造間の磁気双極子 (M1) 遷移波長の原子番号依存性。データ点は LHD における実験値で、点線は GRASP コードによる理論値。

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

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

[3] F. Koike et al., Phys. Rev. A **105**, 032802 (2022).