

LHD プラズマを用いた高 Z 元素多価イオンからの極端紫外・軟 X 線スペクトル 実験データベースの構築

Development of an Experimental Database of EUV/Soft X-ray Spectra from Highly Charged Ions of High Z Elements in the Large Helical Device Plasmas

鈴木千尋¹, 村上泉¹, 小池文博², 東口武史³, 坂上裕之¹, 田村直樹¹, 須藤滋⁴, Gerry O'Sullivan⁵
Chihiro SUZUKI¹, Izumi MURAKAMI¹, Fumihiko KOIKE², Takeshi HIGASHIGUCHI³,
Hiroyuki A. SAKAUE¹, Naoki TAMURA¹, Shigeru SUDO⁴, Gerry O'SULLIVAN⁵

核融合研¹, 上智大², 宇都宮大³, 中部大⁴, UCD⁵
NIFS¹, Sophia Univ.², Utsunomiya Univ.³, Chubu Univ.⁴, UCD⁵

高 Z 元素多価イオンからの発光スペクトルは、プラズマ・壁相互作用研究や産業用の短波長光源開発において重要であるが、その複雑な構造のため、原子データや分光モデルが十分に整備されていないのが現状である。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) では、光学的に薄い高温プラズマからのスペクトルを高輝度で観測することができ、かつ各種計測装置・不純物入射装置が充実しているという特徴を活かして、各種高 Z 元素多価イオンからの極端紫外 (EUV)・軟 X 線発光スペクトルに関する実験データベースの構築を進めている。特に、ガスパフまたはトレーサー内蔵ペレット (TESPEL) [1] を用いて LHD プラズマ中に元素を導入し、Schwob-Fraenkel 型斜入射分光器 [2] を用いて 1–20 nm の波長領域のスペクトルを観測する実験が、これまでに Z=36–83 のうち 20 種以上の元素に対して行われた。一連の実験では、TESPEL のトレーサー量とプラズマ加熱パワーの適切な設定により、中心部で温度がゼロとなるような中空型の電子温度分布を意図的に形成し、様々な電子温度のプラズマからのスペクトルを効率的に得られるようになった [3,4]。その結果、過去の実験データがほぼ皆無な元素も含め、広範囲の原子番号と電子温度を網羅する実験データベースが系統的に整備された。データベースの整備過程では、下記に述べるような特筆すべき成果も得られている。

原子番号がおよそ 50 以上の元素では、EUV・軟 X 線領域における主要な発光は、基底状態の最外殻電子が N 殻 ($n=4$) のイオンによるものである。プラズマの温度が比較的高い場合は、最外殻電子が 4s あるいは 4p のイオンによる離散的なスペクトルとなり、温度が低い場合は、最外殻電子が 4d あるいは 4f のイオンによる、多くのスペクトル線が密集した擬似連続的なスペクトルとなる傾向がみられた。これらのスペクトルの Z 依存性を調べることで、いくつかのランタノイド系元素について、過去に実験的に観測されたことのない、新たなスペクトル線が同定された [4,5]。一方、Z=36–45 の元素では、基底状態の最外殻電子が M 殻 ($n=3$) のイオンによる発光が支配的となった。このようなイオンの発光スペクトルは、最外殻電子が 4d あるいは 4f のイオンに比べてエネルギー準位の数が少ないことから、離散スペクトルに近い傾向を示している。これらの離散的あるいは擬似連続的なスペクトルについて、Hullac コード、Grasp コード、FAC コードを用いた理論計算で得られる線強度スペクトルとの比較も行った。遷移電子の主量子数が変化する、 $n=4-5$ や $n=3-4$ といった遷移の波長は、実験値とよく一致するのに対して、遷移電子の主量子数が変化せず、内殻励起電子配置に関係する $n=4-4$ や $n=3-3$ といった遷移の波長は、実験値よりも系統的に短波長側にずれる傾向が見られた。

[1] S. Sudo and N. Tamura, Rev. Sci. Instrum. **83**, 023503 (2012).

[2] J. L. Schwob et al., Rev. Sci. Instrum. **58**, 1601 (1987).

[3] C. Suzuki et al., Phys. Scr. **89**, 114009 (2014).

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

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