

多電子原子イオンのポピュレーションダイナミクスに対する縮約モデリングと 発光線スペクトルの統計則

Reduced Modeling of Population Dynamics of Many-electron Atoms and Statistical Properties of Their Emission Lines

藤井 恵介

FUJII Keisuke

京都大学工学研究科¹

Graduate School of Engineering, Kyoto university¹

複数の電子を有する多電子原子のスペクトルは様々なプラズマで見られる。極端紫外光源のためのスズやランタノイドの発光、核融合プラズマ中のタングステンイオンの発光スペクトル、恒星大気鉄原子による吸収スペクトルなどである。複数の電子の間の非線形相互作用のため、多電子原子は非常に複雑なエネルギー構造を持ち、その準位間の発光に対するスペクトルも非常に複雑である。計測結果を理解するためこれまでは、主に第一原理計算が用いられてきた。しかし定性的・系統的な理解を行うためには、スペクトルやポピュレーション分布の理論的な理解が必要であろう。本研究では、多電子原子の構造をランダム近似することで、励起状態ポピュレーションが従うダイナミクスおよび発光スペクトルの統計則を導出した [1, 2]。

多くの電子が相互作用する多電子原子の波動関数は、水素原子波動関数の積で表される軌道近似からは大きく離れたものとなる。つまり、水素原子波動関数を基底関数にしたハミルトニアンを構築した場合、非対角項の影響が大きくなる。このようなハミルトニアン行列をランダム行列で近似する理論が、原子核や多電子原子に対して用いられてきた [3]。この近似のもとでは、ハミルトニアン行列の固有ベクトルに対応する混合係数も独立に分布する確率変数とみなせる。また一方で、量子多体系のエネルギー準位密度が、励起エネルギー E に対して指数関数的な依存性 $\rho(E) \propto e^{E/\epsilon_0}$ を示すことも知られてきた。ここで ϵ_0 は、エネルギー準位密度の増加レートの逆数である。本研究ではこれらの近似に基づき、多電子原子の膨大なエネルギー準位を連続的に扱うことで、連続的な衝突ふく射モデルを構築した。

その結果、

1. 多電子原子の占有密度は、電子密度・温度にかかわらず実効的励起温度 T_{ex} のボルツマン分布に

従う

2. T_{ex} は低電子温度・高電子密度の領域では、電子温度 T_e に従う
3. T_{ex} は高電子温度・低電子密度の領域では、 $\epsilon_0/2k$ に従う

ことがわかった。その概要を図1に示す。

また本モデルにより、40年近く明らかにされていなかった、多電子原子発光線強度がべき乗分布する由来について、初めて理論的な説明を与えることができた [2]。

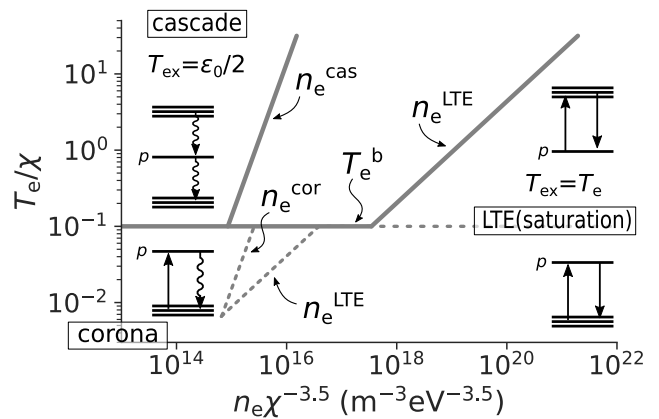


Fig. 1: 多電子原子のポピュレーションダイナミクスの概要 [1]

References

- [1] Akira Nishio, Julian C. Berengut, Masahiro Hasuo, and Keisuke Fujii. *Physical Review E*, (accepted), 2020.
- [2] Keisuke Fujii and Julian C Berengut. *Physical Review Letters*, 124(18):185002, 2020.
- [3] Madan Lal Mehta, editor. *Random Matrix*, volume 142. Elsevier Ltd, 2004.