

電子 - 多価イオン衝突における共鳴励起過程の観測

中村信行研究室 1413068 児玉 龍之介

1 背景と目的

天体プラズマや核融合プラズマなどの高温プラズマ内には多価イオンが多く存在している。多価イオンは分光診断に広く用いられていて、分光診断によってプラズマを理解するためにプラズマ中の様々な原子素過程を考える必要がある。しかし、プラズマ中には多数の元素が存在し、それぞれのイオンの密度や温度も様々であるためデータ量が膨大なものになる。そのため、様々な要素が複雑に絡んでいるプラズマのモデル計算には理論計算で得られる断面積を用いる方法が一般的であるが実験での評価が求められる。その中でも、共鳴過程は、特定の電子ビームエネルギーで大きな反応断面積を持ち、価数分布や発光強度に影響してくる。今回、取り扱う共鳴励起過程では、図 1.1における E_1 と E_2 のエネルギーが一致した時のみ、自由電子が捕獲され 2 電子励起状態になり、オージェ過程を経て、初期状態と同じ価数のイオンの励起状態になる。この一連の過程を共鳴励起過程と呼ぶ。共鳴励起過程はイオンの価数分布に影響はしないが、プラズマ内の励起状態のポピュレーションや発光線強度に影響する重要な過程である。このように共鳴過程を実験で観測するのは正確なプラズマモデルのために重要である。本研究の目的は図 1.2の理論計算によって得られた Fe^{14+} の $3s3d \ ^3D_3$ への励起断面積において $100\text{eV} \sim 200\text{eV}$ 付近に現れる共鳴励起過程の観測を行い、実験データを提供することである。

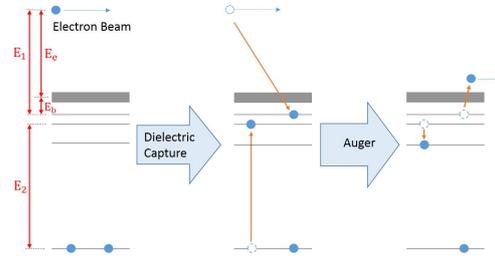


図1.1 共鳴励起過程の流れ

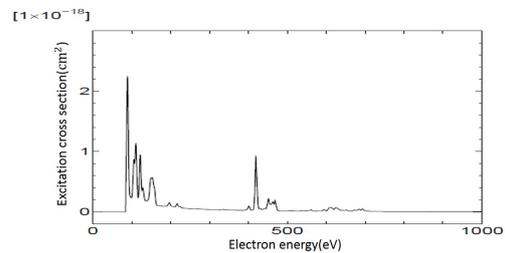


図1.2 Fe^{14+} における $3s3d \ ^3D_3$ への励起断面積の理論計算結果

2 実験

実験の配置図は図 2.1のようになっている。実験は極端紫外領域であるため、多価イオン源である小型電子ビームイオントラップ (Compact Electron Beam Ion Trap : CoBIT)[1] に極端紫外分光器を取り付けた。極端紫外分光器の回折格子には平面結像型不等間隔凹面回折格子を用いて、位置有感検出器 (Position Sensitive Detector : PSD) で光子を検出するごとに電子ビームエネルギーを記録した。

電子ビームエネルギーを掃引することで、発光強度の電子ビームエネルギーの依存性を測定することが出来る。今回の研究では先行研究の実験システム [2] を用いて、目的としている共鳴励起過程のエネルギー領域に合わせ、掃

引波形の調整を行った。図 2.2 に多次元同時計測システムの概略図を示す。このシステムは 3 つの任意波形発生装置 (Function Generator : FG) と PC の波形を組み合わせることで電子ビームエネルギーを掃引できるようにしている。また図 2.3 に実験で用いた掃引波形を示す。 t_{dump} はトラップ領域に重元素イオンが溜まることを防ぐためのイオンを払い出す時間、 t_{cook} はイオン生成時間、 t_{probe} は電子ビーム掃引時間、 t_{keep} は掃引によって価数分布の変化を防ぐためのイオン保持時間となっている。 t_{probe} と t_{keep} をセットで 1 サイクルとして、このサイクルを 100 回繰り返す波形を作り、共鳴励起過程の観測を行った。

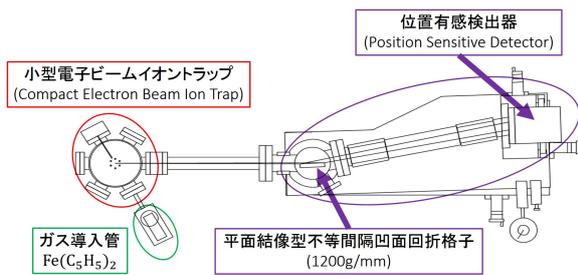


図2.1 実験装置の概略

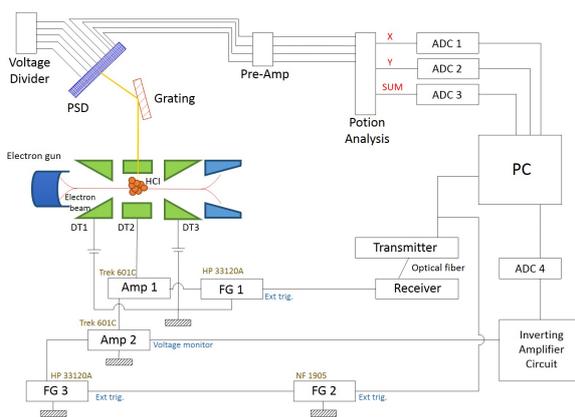


図2.2 多次元同時測定システムの概略図 [2]

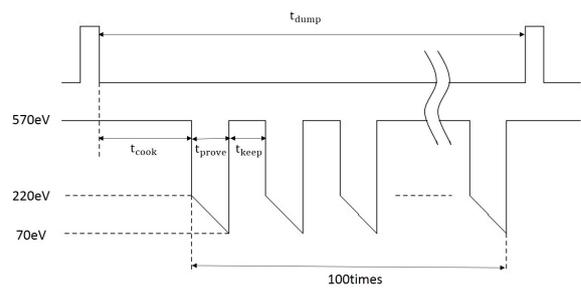


図2.3 電子ビームエネルギーの掃引波形 $t_{cook}=1600\text{ms}$, $t_{probe}=4\text{ms}$, $t_{keep}=16\text{ms}$, $t_{dump}=3600\text{ms}$, 掃引範囲 70 ~ 220eV

3 結果および考察

図 3.1 は横軸を波長とし、縦軸は上図が電子ビームエネルギー、下図が発光強度を示している。赤色、橙色、青色の矢印で示した位置がそれぞれ Fe^{13+} と Fe^{14+} , Fe^{15+} の発光線を示している。 Fe^{14+} と Fe^{15+} の発光線について、発光強度の電子ビームエネルギー依存性を図 3.2、図 3.3 に示した。どちらの図も縦軸は発光線の強度、横軸は電子ビームエネルギーを示している。図 3.2 の波長 23.39nm に関しては線幅が大きくなっているため 2 つに分けて解析している。

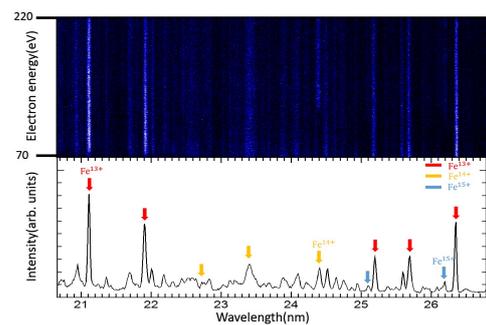


図3.1 20 ~ 27nm の発光線強度と発光線強度に対する電子ビームエネルギー依存性

図 3.2 と図 3.3 では特定の電子ビームエネルギーで発光線強度が強くなっている部分があ

る。例えば、 Fe^{14+} の 22.72nm では 120eV 付近と 140eV 付近、23.39nm では 120eV 付近、140eV 付近、また 24.38nm では 140eV 付近で発光強度が強くなっている。また Fe^{15+} においても 25.11nm においては確認できなかったが、26.30nm については 180eV 付近で発光強度の増大を確認できた。しかし、データの統計が悪いため確認できたが断定するまでには至らなかった。統計の改善には3つ方法がある。第1の方法は、測定時間を延ばすことである。測定時間を延ばすことで蓄積されるデータ量が多くなり統計の改善が見込める。今回の測定時間である 116 時間よりも 3 倍以上の測定時間を確保すれば統計が改善するのではないかと考えている。第2に電子ビーム電流の調整である。統計が悪いため要因として鉄多価イオンの発光線が弱いことがあげられる。発光線が弱い原因として鉄の多価イオンの生成量が少ないことがあげられる。これを解消するには、電子ビーム電流を上げてより多くのイオンを生成できる様にすれば鉄多価イオンの発光線の発光強度が増大し、統計が改善される可能性がある。しかし、掃引範囲が 70eV ~ 220eV といった低エネルギー領域であるため、大きく電子ビーム電流を変えるのは難しい。統計の改善には電子ビーム電流を上げることは有効な手段であるが、今の実験システムでは難しい。第3に、実験のシステムの改善である。掃引することでトラップ領域の十分にイオンがトラップ出来ていない可能性がある。そのため、より多くのイオンがトラップ領域に留まれるよう、井戸型ポテンシャルや掃引時間、掃引範囲などを再調整することで統計の改善を目指せる可能性がある。

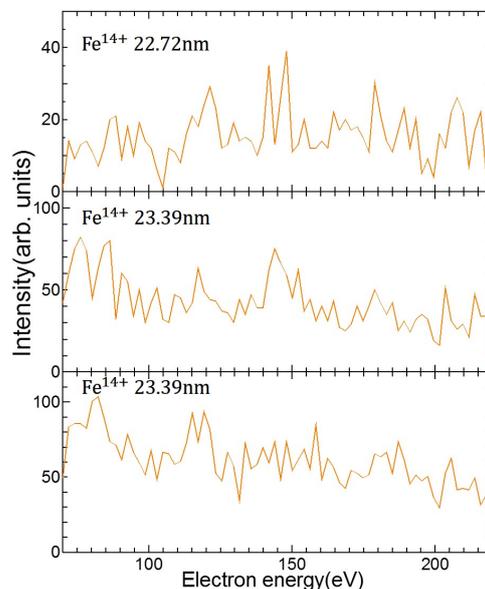


図3.2 Fe^{14+} の発光線強度の電子ビームエネルギー依存性

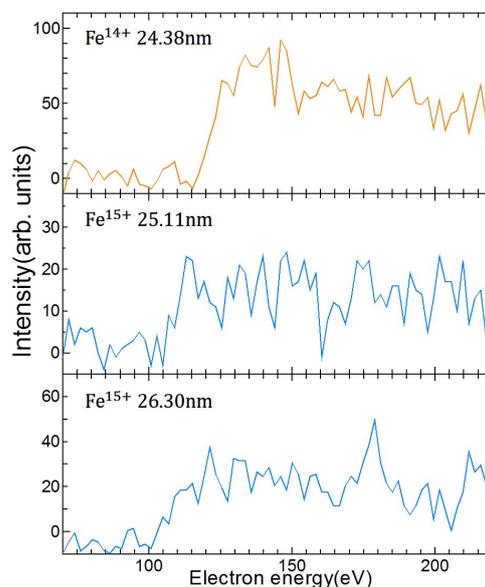


図3.3 Fe^{14+} と Fe^{15+} の発光線強度の電子ビームエネルギー依存性

4 今後の展望

先行研究 [2] より、低いエネルギー領域で Fe^{14+} と Fe^{15+} の発光線について特定の電子ビームエネルギーにおける発光強度の増大を観測することができた。しかし、共鳴励起過程であると結論づけるには統計が悪い。今後は、まず、今回の測定結果の解析を進め、 Fe^{14+} と Fe^{15+} 以外の共鳴はないか確認する。また Fe^{13+} と Fe^{14+} 、 Fe^{15+} のみ価数同定できているので、他の各発光線に対しての価数同定を行う。 Fe^{14+} と Fe^{15+} の遷移を同定し、理論との比較を行い考察していく。

実験はシステムの改善と統計の改善が中心となる。電子ビーム電流や井戸型ポテンシャル、イオン生成および保持時間における電子ビームエネルギー、そして、掃引時間やイオン保持時間の変更し、細かいパラメーターを調整、その後 Fe^{14+} と Fe^{15+} を観測する。今後も同じ実験システムを用い、細かな調整を行うことで統計の改善を目指し、共鳴励起過程を観測する。 Fe^{16+} でも共鳴励起過程があるようなので、その観測も視野に入れつつシステムの改善を試みる。また、今回よりも低エネルギー領域における測定も行える環境を整えることで、また、今回よりも低エネルギー領域における測定も行える環境を整え Fe^{14+} の 22.72nm と 23.39nm の電子ビームエネルギーに対する発光線強度がより低いエネルギー領域で Fe^{14+} の 24.38nm や Fe^{15+} の 25.11nm、26.30nm のような挙動を示すのか確認できるようにしたい。

参考文献

- [1] 菊池浩行氏 修士論文 電気通信大学 (2007)
- [2] 津田峻志氏 修士論文 電気通信大学 (2016)