

鉄多価イオンの共鳴励起過程の観測

中村信行研究室 津田峻志

1 序論

1.1 背景

多価イオンとは中性原子が 2 個以上の電子を失ったイオンである。生成に必要なエネルギーの大きさ、不安定さから地球上ではほとんど存在しない。しかし恒星内部や表面などの高温プラズマ中においては多価イオンが空間を占める主な物質となるため、その中で起こる現象の理解には多価イオンの情報が必要不可欠である。

プラズマ中の多価イオンは電子と相互作用を繰り返し、様々な発光を見せる。その発光スペクトルはプラズマ中の電子密度や電子温度などの情報を含んでいる。天体プラズマなどの高温プラズマを理解する際、多価イオンと電子間の素過程を考慮し、プラズマを構成するイオンの価数分布や各準位の占有密度のモデリングを行う。正確なモデリングを行うためにはそれぞれの素過程の断面積が必要不可欠である。天体プラズマや核融合プラズマには多数の元素が存在し、密度や温度も様々であるため必要となるデータは膨大な量となる。そのためプラズマのモデリングに用いられている断面積の多くは理論計算によって得られているというのが現状である。そこで理論値の信頼性を保証、また改善するために実験による断面積の評価が求められている。

本研究で観測を行った共鳴励起過程を模式的に図 1 に示す。共鳴励起過程は特定の電子ビームエネルギーで大きな断面積を持つ 2 電子性捕獲過程を含む共鳴過程である。

2 電子性捕獲過程を経て形成された 2 電子励起状態からオージェ過程を経て、電子を一つ放出し始状態と同じ価数の励起状態を形成するため励起状態のポピュレーションやライン強度に大きく影響する重要な過程であり、実験理論の両面で調べられてきた。しかし、これまでは数 keV 程度の高エネルギー領域の研究が多く、天体プラズマ診断で重要な数 100 eV 領域における共鳴励起過程の実験データが不足しているのが現状である。このエネルギー領域では、例えば太陽コロナに多く存在する十価程度の鉄多価イオンに多くの共鳴が現れるため、天体プラズマ診断において重要な役割を持つ。

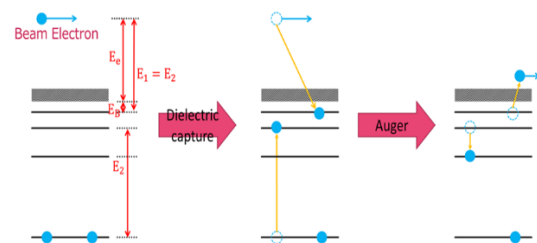


図 1 共鳴励起過程。 E_e は電子ビームエネルギー、 E_B は束縛エネルギーを示している。

1.2 Fe XV の問題

我々が過去に行った鉄多価イオン Fe XV のライン強度比の電子密度依存性の測定[1]を紹介する。図 2 に測定結果と衝突輻射モデル (CR モデル: Collisional radiative model) を用いた理論計算の結果の比較を示す。縦軸は Fe XV のライン 23.39 nm と 24.38 nm の強度比を示しており、横軸は電子密度を示している。青い点が実験値、黒い

曲線が CR モデルによる理論計算の結果である。図 2 の通り実験の結果が理論計算の予想した範囲を大きく超えるという問題が確認された。ここで用いられた CR モデルには共鳴励起過程は含まれていないため、この問題の原因が共鳴励起過程の寄与によるライン強度の変化である可能性も考えられる。

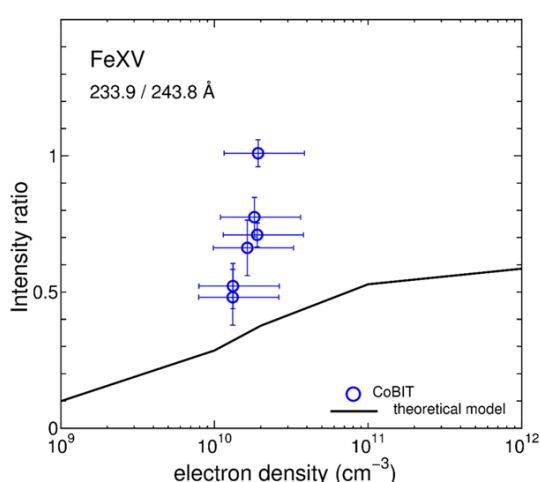


図 2 Fe XV ライン強度の電子密度依存性。縦軸は Fe XV におけるライン強度比(22.34 / 24.38)、横軸は電子密度を示している。黒線は CR モデルを用いた理論計算の結果、青い点は CoBIT を用いた実験の結果を示している。

2 目的

我々の研究室で所有している電子ビームイオントラップ(Electron Beam Ion Trap: EBIT)は実験室プラズマの一つであり、任意の元素、価数が支配的なプラズマの生成が可能である。対象となる元素に電子ビームを照射し、逐次電離の原理で多価イオンを生成する。また電子ビームエネルギーを調整することでプラズマ中のイオンの価数分布を変化させることが可能である。

本研究では低価数多価イオンの生成を目的として作られた小型 EBIT(CoBIT) [2]に、

電子ビームエネルギー制御と時間分解スペクトルが計測可能な多次元同時計測システムを導入し、実験データが不足しているエネルギー領域における Fe XV-XVI の共鳴励起過程の観測を目的とした。また、先行研究で確認された Fe XV における問題の原因についても検証する。

3 実験

3.1 実験装置

本研究で使用した実験配置図を図 3 に示す。観測対象としている発光は極端紫外領域 (Extreme ultraviolet: EUV) の発光であるので、多価イオン生成装置である CoBIT に EUV 分光器を取り付けた。EUV 分光器は溝本数 1200 g/mm の平面結像型凹面不等間隔回折格子と EUV 領域に感度を持つ位置有感検出器 (Position sensitive detector: PSD) によって構成されている。

また今回、共鳴励起過程の観測のために電子ビームエネルギー制御と時間分解スペクトルが計測可能な多次元同時計測システムを導入した。図 4 に多次元同時計測システムの概略図を示す。電子ビームエネルギーは電子銃のカソードと DT2 の電位差によって決定される。このシステムでは 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 DT2 に印加される電位を掃引させることで電子ビームの制御を行った。また、PSD が光子を検出する 1 イベント毎に光子の検出位置と検出時の電子ビームエネルギーの情報を同期して取り込むことで時間分解スペクトルを測定した。

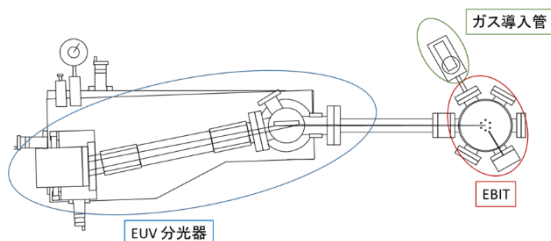


図 3 実験配置図

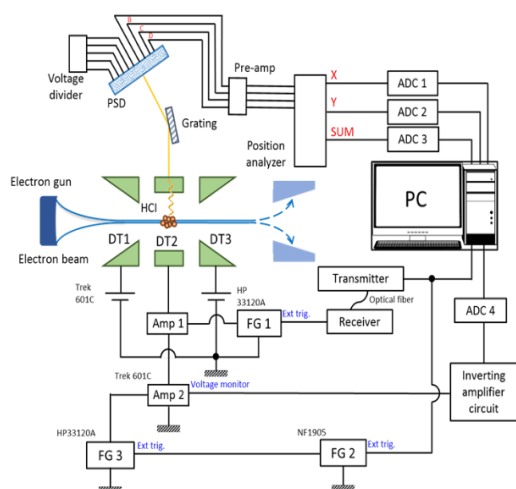


図 4 多次元同時測定システム

3.2 測定

CoBIT の実験条件は、電子ビーム電流 $I_e = 13 \text{ mA}$ 、電子ビームエネルギーを $E_e = 350 \sim 600 \text{ eV}$ の範囲で掃引させて行った。図 5 に本実験で使用した掃引波形を示す。掃引波形はイオン生成時間(t_{cook})、プローブ時間(t_{probe})、価数分布保持時間(t_{keep})、イオン払い出し周期(t_{dump})、掃引範囲で決定される。 t_{cook} で目的の価数のイオンを生成する時間、 t_{probe} は電子ビームエネルギーを掃引させる時間、 t_{keep} はトラップ領域の価数分布を一定に保つための時間、 t_{dump} は重元素イオンがトラップ領域に溜まらないようにするための時間である。

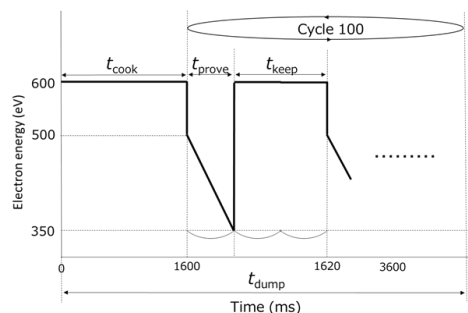


図 5 電子ビームエネルギー掃引波形 $t_{\text{cook}} = 1600 \text{ ms}$ 、 $t_{\text{probe}} = 6.667 \text{ ms}$ 、 $t_{\text{keep}} = 13.333 \text{ ms}$ 、 $t_{\text{dump}} = 3600 \text{ ms}$ 、掃引範囲 $350 \sim 500 \text{ eV}$

またドリフトチューブ (DT) 電極が形成するトラップポテンシャルは 150 V 、真空度は 10^{-8} Pa 、測定時間は 45 時間である。試料である鉄の導入は減圧化では室温で昇華する鉄の有機化合物フェロセン $\text{Fe}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ を用いてガス導入管から導入した。

3.3 結果

図 6 にエネルギー掃引によって得られた 2 次元スペクトルを示す。横軸は波長(X)、縦軸(Y)は電子ビームエネルギーを表している。赤矢印で示した特定の電子ビームエネルギーにおいて共鳴励起過程の寄与と思われるライン強度の増加を確認できた。

共鳴励起過程が確認されたラインの同定を行うために、図 7 に X についての 1 次元スペクトルを示す。横軸が波長、縦軸がライン強度を示している。価数によって異なる色の矢印でマークしてあり、今回共鳴励起過程を観測できたのは Fe XV の 3 本のラインと Fe XVI の 2 本のラインである。その 5 本について波長と遷移を表 1 にまとめた。

共鳴励起過程が確認されたラインそれぞれについてのライン強度の電子ビームエネルギー依存性を図 8、図 9 に示す。それぞれ Fe XV と Fe XVI におけるライン強度の

電子ビームエネルギー依存性を示している。横軸は電子ビームエネルギー、縦軸はライン強度を示しており、左上にそれぞれのラインの価数と波長を示してある。測定時、電子ビームエネルギーの値は 0.25 eV/ch で AD 変換されたが、図 8、図 9 では 4 ch (電子ビームエネルギー 1eV に相当) ごとに足し合わせてある。また横軸は Fe XV ライン 23.39 nm の 420 eV 付近の共鳴において、実験と FAC による理論計算で算出した共鳴エネルギーが合うように規格化した。非共鳴過程に対する共鳴励起過程によるライン強度の変化を定量的に議論するためにバックグラウンド処理を行った。

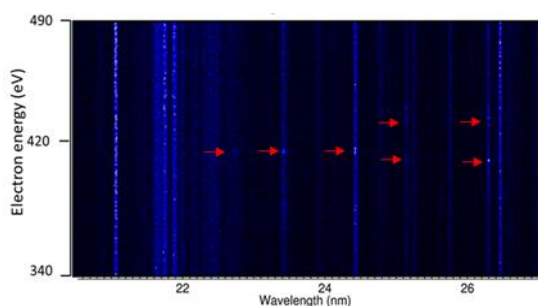


図 6 共鳴励起過程の 2 次元スペクトル 横軸が波長、縦軸が電子ビームエネルギーを示している。また共鳴励起が確認できた部分を赤の矢印で示した。

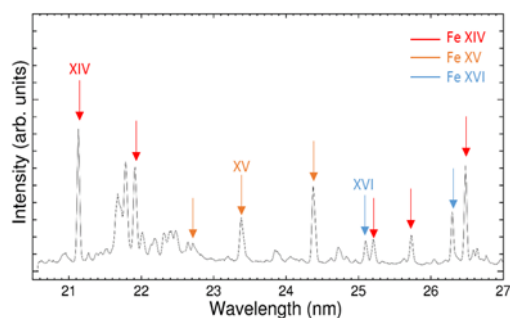


図 7 Fe スペクトル 横軸が波長、縦軸がライン強度を示している。価数ごとに色の違う色の矢印を用いており、赤は Fe XIV、橙は Fe XV、青は Fe XVI をそれぞれ示している。

表 1 共鳴励起過程の寄与が確認されたライン

Ion	Wavelength (nm)	Transition	
Fe XV	22.72	$3s3p \ ^3P_1$	$3s3d \ ^3D_2$
Fe XV	23.39	$3s3p \ ^3P_2$	$3s3d \ ^3D_3$
Fe XV	24.38	$3s3p \ ^1P_1$	$3s3d \ ^1D_2$
Fe XVI	25.11	$3p \ ^2P_{1/2}$	$3d \ ^2D_{3/2}$
Fe XVI	26.30	$3p \ ^2P_{3/2}$	$3d \ ^2D_{5/2}$

図 8 より、Fe XV の 3 本のラインでは電子ビームエネルギー 420eV 付近と 450eV 付近の 2 箇所共鳴励起過程の寄与を確認することが出来た。特に 420eV 付近の共鳴は強度が約 2 倍となる顕著な影響が見られた。図 9 より、Fe XVI の 2 本のラインでは 400eV 付近と 420eV 付近の 2 箇所に共鳴が確認できた。共鳴励起過程は特定のエネルギーで起こる過程であるが、実験で観測された共鳴過程はエネルギーに幅を持っていることがわかる。これは電子ビームエネルギーが完全なデルタ関数ではなく、エネルギー幅が存在するためである。FAC を用いた理論計算によると Fe XV 23.39nm の 420 eV 付近の共鳴は 1 つの共鳴構造の寄与であり、その幅が電子ビームのエネルギー幅であると考えられる。本実験から電子ビームのエネルギー幅が約 4.5 eV であることが確認できた。

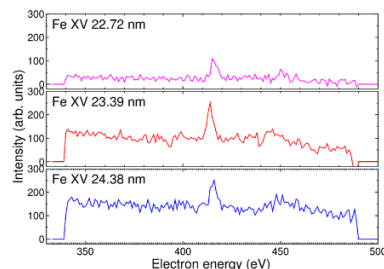


図 8 Fe XV ライン強度の電子ビームエネルギー依存性 縦軸はライン強度、横軸は電子ビームエネルギーを示している。左上に価数とピーク波長を示してある。

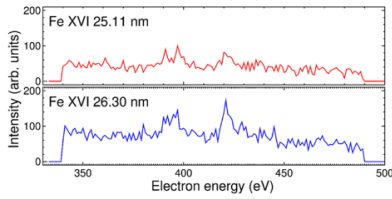


図 9 Fe XVI ライン強度の電子ビームエネルギー依存性

4 考察

各ライン強度の電子ビームエネルギー依存性は共鳴励起過程の寄与と非共鳴過程の寄与の和であり、共鳴励起過程によって強度が増加している部分の面積が共鳴強度に比例する。図 10、図 11 にそれぞれ Fe XV、Fe XVI における実験と FAC を用いた理論計算との比較を示す。Fe XV における図 12 は HULLAC を用いた理論計算との比較である。それぞれ横軸が波長、縦軸が実験の強度と共鳴断面積を示している。共鳴断面積は理論計算で得られた共鳴強度を電子ビームエネルギーの持つ幅 4.5 eV で畳み込みを行って得た。図 10、図 11 の実験値の横軸は 5 つのライン全てにおいて、FAC で計算した Fe XV ライン 23.39 nm の 420 eV 付近の共鳴エネルギーで規格化してある。また、図 12 の実験値の横軸は HULLAC で計算した共鳴エネルギーで規格化してある。図 10、図 13 の縦軸は Fe XV ライン 23.39 nm の 420 eV 付近の共鳴について強度と共鳴断面積が一致するように規格化した。

図 10、図 12 より、Fe XV の 3 本のラインにおける比較では FAC、HULLAC 共に非常に良い一致を示していることが確認できた。しかし図 11 より、Fe XVI における比較では実験と FAC の間に顕著な差が確認できた。

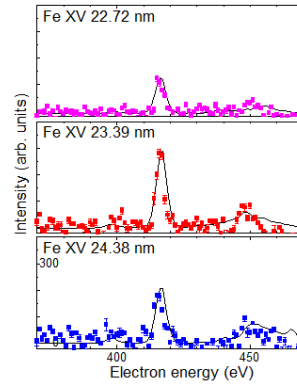


図 10 Fe XV ラインにおける FAC と実験の比較 横軸が波長、縦軸が実験の強度と共鳴断面積を示している。左上に価数とピーク波長を示してある。点はそれぞれ実験値、黒線が FAC を用いて計算した共鳴強度を 4.5 eV の幅で畳み込みした共鳴断面積を示している。

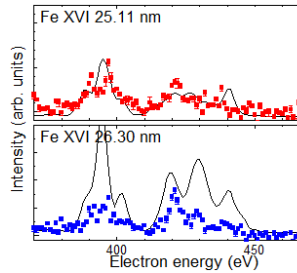


図 11 Fe XVI ラインにおける FAC と実験の比較 図の説明は図 12 と同じ

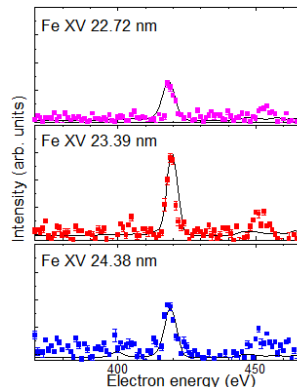


図 12 Fe XV ラインにおける HULLAC と実験の比較 図の説明は図 12 と同じ

先行研究で確認された Fe XV ライン強度比の電子密度依存性における実験と CR モデル計算の不一致の原因について、図 13 に問題の 23.39nm/24.38nm ライン強度比の

電子ビームエネルギー依存性を示す。横軸は電子ビームエネルギー、縦軸はライン強度比を示している。横軸は Fe XV ライン 23.39 nm の 420 eV 付近の共鳴において、実験と FAC による理論計算で算出した共鳴エネルギーが合うように規格化した。その結果、350 eV ~ 500 eV の範囲で行った測定と FAC の間には約 10 eV ずれていることが確認された。

図 13 中の 420eV 付近に見られるようにライン強度比についても共鳴励起過程の寄与を確認することが出来た。共鳴エネルギーにおいては強度比が非共鳴時のおよそ 2 倍の値となっている。この結果から、ライン強度比を議論する際に共鳴励起過程を考慮する重要性を改めて確認できた。しかし、今回の例では先行研究の測定は電子ビームエネルギー 500 eV で行われたものであり、図 13 中で電子ビームエネルギー 500eV に相当する 490 eV 付近に共鳴励起過程は確認されなかった。従って、問題の原因は共鳴励起過程ではなく、未だ不明のままである。

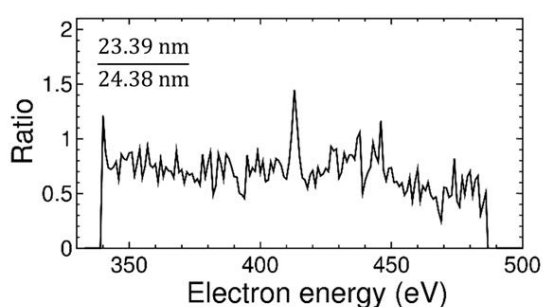


図 13 Fe XV ライン 23.39 nm と 24.38 nm の強度比

4 結論

今回 CoBIT に多次元同時計測システムを導入し、電子ビームエネルギー 350 eV ~ 500eV、波長 20.5 nm ~ 27.0 nm の範囲に

おける鉄多価イオンのライン強度の電子ビームエネルギー依存性の測定を行った。その結果、Fe XV では 3 本のライン 22.72 nm、23.39 nm、24.38 nm において、電子ビームエネルギー 420 eV、450 eV 付近の 2 箇所共鳴励起過程の寄与を確認できた。FAC、HULLAC を用いて計算した共鳴断面積と実験結果を比べた結果、Fe XV の 3 本のラインについては実験と理論の間で非常に良い一致を確認できた。Fe XVI では 2 本のライン 25.11 nm、26.30 nm において、電子ビームエネルギー 390 eV、420 eV 付近の 2 箇所共鳴励起過程の寄与を確認できた。FAC を用いて計算した共鳴断面積と実験結果を比べた結果、Fe XVI の 2 本では実験との間に顕著な差を確認できた。

Fe XV の問題について、実験結果から得た Fe XV のライン強度比 23.39 nm/ 24.38 nm の電子ビームエネルギー依存性から、共鳴励起過程は問題のライン強度比に対しても大きく影響を及ぼすことが確認できた。しかし、先行研究で確認された Fe XV における実験と CR モデル計算の不一致の原因として、共鳴励起過程の寄与の可能性を確かめたが、原因ではないことがわかった。

5 参考文献

- [1] N. Nakamura et al., ApJ, 739 (2011) 17
- [2] 菊池浩行氏 修士論文、電気通信大学 (2007)