

多価イオンの発光強度比による電子密度診断

津田 峻志

平成 27 年 3 月 4 日

1. 背景

太陽の解明されていないメカニズムの一つにコロナ加熱がある。太陽の光球表面温度が約 6000K であるのに対し光球表面から遠く離れたコロナは 100 万 K もの高温になっている。太陽表面から遠く離れ、かつ希薄なプラズマであるコロナがなぜ 100 万 K もの高温を保っているのか。このメカニズムを解明する為には、太陽コロナの電子密度分布・電子温度分布を詳細に調査する必要がある。それにはコロナに豊富に存在する多価イオンのスペクトルデータが必要であり、太陽大気分光計測が重要となる。

現在、太陽大気分光計測で活躍している太陽観測衛星の一つに国立天文台が打ち上げた衛星「ひので」がある。ひのでは可視光、極端紫外、X 線の 3 つの波長領域での観測が可能であり、各波長領域に対して可視光磁場望遠鏡、極端紫外線撮像分光装置、X 電波望遠鏡がそれぞれ搭載されている。太陽大気におけるプラズマ診断は、衛星に搭載された極端紫外線撮像分光装置によって観測されたスペクトルのライン強度比と衝突輻射モデル(CR model : Collisional Radiative model)による計算を比較することで電子密度診断を行っている。その為、プラズマ診断結果が信頼に値するかどうかはモデル計算の信頼性に大きく左右される。しかし CR モデル計算で使われる放射、電離、再結合などの速度係数は実験による評価を受けていない計算値であることが多く、実際の観測において信頼性が十分にあるか分かっていない。その為よく定義された実験室プラズマを用いてモデル計算を評価していく必要がある。

今回は先行研究^[1]より実験とモデルの間に大きな違いが報告されている Fe XV におけるライン強度比 $23.39\text{nm} \quad (3s3p \ ^3P_2 - 3s3d \ ^3D_3) \quad / 24.38\text{nm} \quad (3s3p \ ^1P_1 - 3s3d \ ^1D_2)$ の電子密度依存性に注目した。Fe XV における実験とモデルの比較を図 1.1 に示す。本研究では図 1.1 に見られる不一致が鉄特有の現象かどうか調べるため、鉄より原子番号が 1 つ小さいマンガン Mn を使って問題のある Fe XV の遷移と同じ遷移を持つ Mn XIV のライン強度比 $25.00\text{nm} \quad (3s3p \ ^3P_2 - 3s3d \ ^3D_3) \quad / \quad 26.05\text{nm}$

$(3s3p \ ^1P_1 - 3s3d \ ^1D_2)$ を測定し電子密度依存性を調べた。

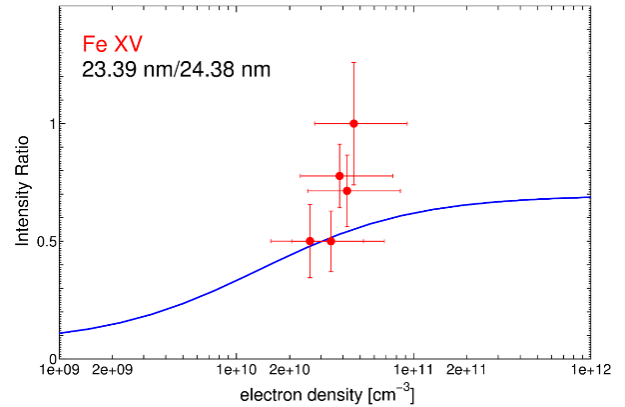


図 1.1 Fe XV における実験とモデルの比較

2. 実験装置

本実験では小型電子ビームイオントラップ(CoBIT)を用いて多価イオンの生成を行った。Mn スペクトル測定の実験系は図 2.1、実効電子密度測定の実験系は図 2.2 に示した。図 2.1 では CoBIT に試料である Mn を導入するための蒸着セル、波長較正に用いる Fe を導入するためのガス導入管、そして多価イオンの発光を測定するために EUV 分光器を取り付けた。また、図 2.2 では CoBIT に試料である Fe を導入するためのガス導入管、ピンホールカメラ、可視分光器を取り付けてあり、電子ビームの広がり測定として衝突励起直後に発光が起こる遷移寿命の短い E1 遷移の発光をピンホールカメラで測定し、イオンの広がり測定として衝突励起後電子ビームの外側に広がってからも発光する遷移寿命の長い M1 遷移の発光を可視分光器で測定した。

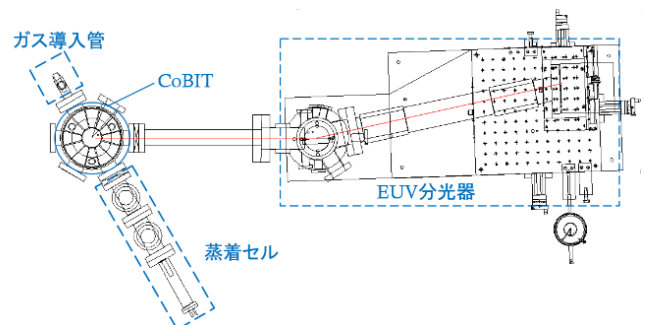


図 2.1 Mn スペクトル測定時の実験系

表 1 Mn XIV ライン強度比の電子ビーム電流依存性

I_e [mA]	強度比
13	0.81 ± 0.09
12	0.75 ± 0.06
11	0.69 ± 0.08
10	0.64 ± 0.09

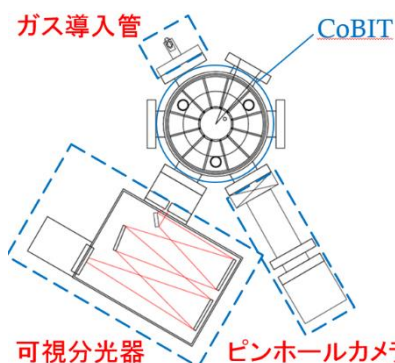


図 2.2 実効電子密度測定時の実験系

3. Mn XIV のスペクトル測定

Mn スペクトルの電子ビーム電流依存性の測定は、 $E_e = 425$ eV に固定し電子ビーム電流 I_e を 5~13 mA の範囲で 1 mA ずつ変化させて行った。注目している Mn XIV ライン 25.00 nm と 26.05 nm 付近を拡大した測定結果を図 2.1 に示した。電子ビーム電流の変化はトラップされた標的イオンに衝突する電子の密度変化を意味する。図 2.1 より電子ビーム電流の増加に伴ってラインの強度が強くなっていることが確認できる。しかし各ライン強度の増加の割合は異なっており、電子ビーム電流の増加に伴ってライン強度比は急激に変化する。各電子ビーム電流におけるライン強度比(25.00 nm / 26.05 nm)を表 1 に示した。表 1 を見ると電子ビーム電流の増加に伴ってライン強度比が変化していることが確認できる。

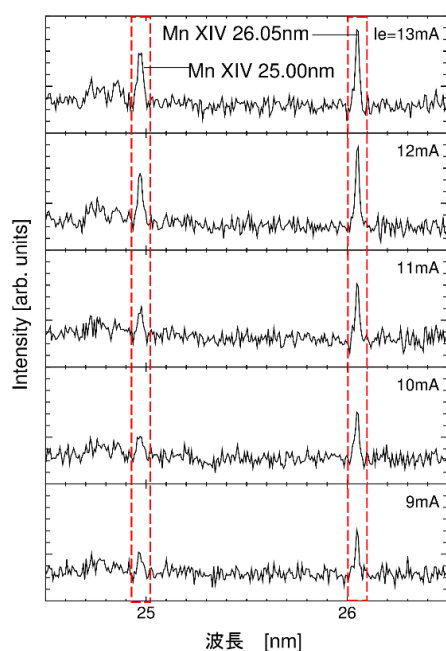


図 3.1 Mn XIV ライン強度の電子ビーム電流依存性

4. 実効電子密度測定

電子ビームの広がりや多価イオンの EUV 領域の発光を測定することで求めた。EUV 領域の発光は遷移寿命が非常に短い E1 遷移によるもので、寿命は 10^{-10} s 程度である。そのため E1 遷移による発光は電子衝突励起直後に起こる。よって、EUV 領域の発光分布は電子ビームの空間分布とみなすことが出来る。測定試料には鉄を用いた。また、イオン雲の広がりや可視領域の発光を測定することで求めた。EBIT 内では一般にイオンは電子ビームよりも広がりを持って分布している。よって、電子ビームによる衝突励起を受けてもイオンが電子ビームの領域の外にいくまで脱励起しない程度に遷移寿命の長い遷移を観測すればイオン雲の広がりやを測定出来ると考えた。本実験ではイオンの空間分布は基底状態微細構造間の M1 遷移における可視領域の発光 Fe XIV 530.3nm ($3s^2 3p^2 P_{1/2} - 3s^2 3p^2 P_{3/2}$) を使いイオン雲の広がりやを測定した。測定では電子ビームエネルギーを $E_e = 425$ eV に固定して、Mn のライン強度比の測定時と同様に $I_e = 9 \sim 13$ mA の範囲で 1 mA ずつ変化させ、両測定を同時に行った。それぞれの広がりやをガウシアンであると仮定し半値全幅を求め、以下の式を使ってイオンが感じる実効電子密度 \bar{n}_e を求めた。

$$\bar{n}_e = \frac{4 \ln(2)}{\pi(a^2 + b^2)} \cdot \frac{I_e}{ev} \text{ [cm}^3\text{]}$$

ここで、 I_e は電子ビーム電流、 v は E_e より求めた電子の速度、 e は電気素量、 a, b はそれぞれ電子ビームとイオンの広がりやの半値全幅である。

電子ビーム、イオン雲それぞれの広がりやの測定結果、得られたそれぞれの半値全幅を用いて計算した実効電子密度を表 2 にまとめた。

表 2 電子ビーム、イオン雲の広がりを実効電子密度

I_e [mA]	電子 FWHM[mm]	イオン FWHM[mm]	n_e [cm^{-3}]
9	0.27	0.53	1.1×10^{10}
10	0.26	0.51	1.2×10^{10}
11	0.26	0.50	1.6×10^{10}
12	0.25	0.47	1.9×10^{10}
13	0.25	0.47	2.1×10^{10}

5. Mn XIV ライン強度比の電子密度依存性

得られたライン強度比と実効電子密度をもとに図 5.1 に Mn XIV ライン強度比の電子密度依存性をプロットした。また比較のために Fe XV ライン強度比の電子密度依存性を図 5.2 に示した。Fe XV のライン強度比と電子密度の関係をプロットしたものと比較すると、Fe XV と同じように電子密度 $10^{10} \sim 10^{11} / \text{cm}^3$ の領域でライン強度比の電子密度依存による効果が顕著であることが確認できた。このことから、同じ基底配置を持ちかつ同じ励起準位間の遷移からのライン強度比は元素の種類によらず似た挙動を示すことが考えられる。

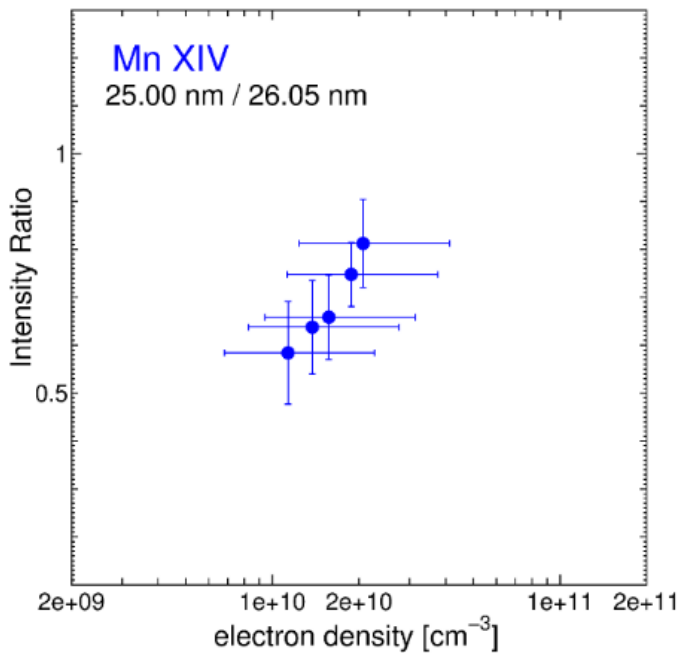


図 5.1 Mn XIV ライン強度比の電子密度依存性

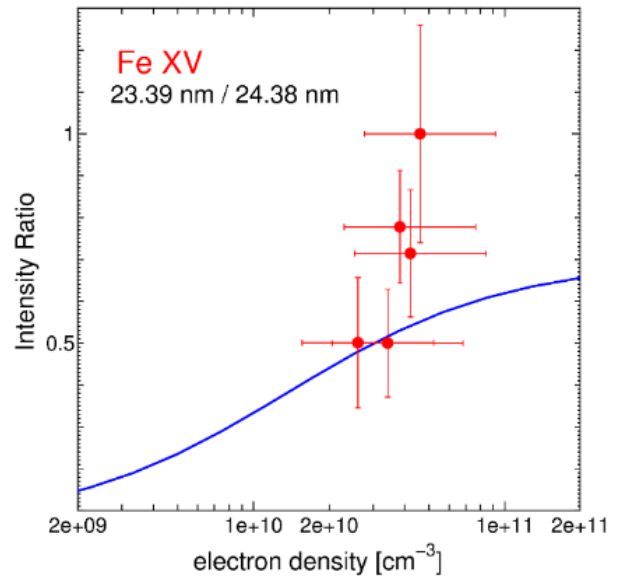


図 5.2 Fe XV ライン強度比の電子密度依存性

6. 電流の定義式の利用とその評価

本研究では目的の多価イオンスペクトル測定時と同じ実験条件における電子ビームとイオン雲の広がりを測定することで実効電子密度を求めたが、今後の実験において実験時間の短縮を図るために、電流の定義式を用いた電子密度の導出を試みた。この方法には電子ビームエネルギーと電子ビーム電流の値から電子密度を決定できるという利点がある。ここではこの導出方法の妥当性について検討を行う。

電流の定義式と運動エネルギーの式を用いて電子密度 n_e を電子ビーム電流 I_e と電子ビームエネルギー E_e で表すことが出来る。

$$I_e / \sqrt{E_e} = n_e C$$

ここで e は素電荷、 A は電子ビームの断面積、 v は電子の速度、 m は電子の質量、 C は定数である。この式から電子密度 n_e と $I_e / \sqrt{E_e}$ には線形の関係があることがわかる。

この式の評価をするために電子ビーム径とイオン雲の広がりを用いて計算した電子密度の $I_e / \sqrt{E_e}$ 依存性をプロットしたものが図 6.1 である。

図 6.1 より、電子とイオンの空間分布測定から得られた実効電子密度は $I_e / \sqrt{E_e}$ に対して線形の依存性があることがわかる。得られた電子密度の $I_e / \sqrt{E_e}$ 依存性において任意の 1 次関数でフィッティングを行い、係数 C を決定することで電子ビームエネルギーと電子ビーム電流の値から電子密度を得ることが可能であ

る。この方法で決定した電子密度に対する強度比の依存性を理論線と比較したものが図 6.2 である。図 6.2 の 2 本の曲線はライン強度比 Fe XIV 21.13 nm/21.91 nm の電子密度依存性のモデル計算による理論線を表している。このモデル計算は実験を再現できていることが証明されており、この曲線と比較することでこの電子密度測定法が有用であることが確認できる。図 6.2 より電流の定義式より求めた電子密度であっても、モデルと良い一致を示していることが分かった。しかし、今回の係数 C は $I_e/\sqrt{E_e} \cong 0.2\sim 0.6$ の範囲における測定のみから決定したものであり、この範囲外も含めた場合の信頼性は不十分である。よって $I_e/\sqrt{E_e} \cong 0.2\sim 0.6$ においては、この方法が有効であると考えられる。

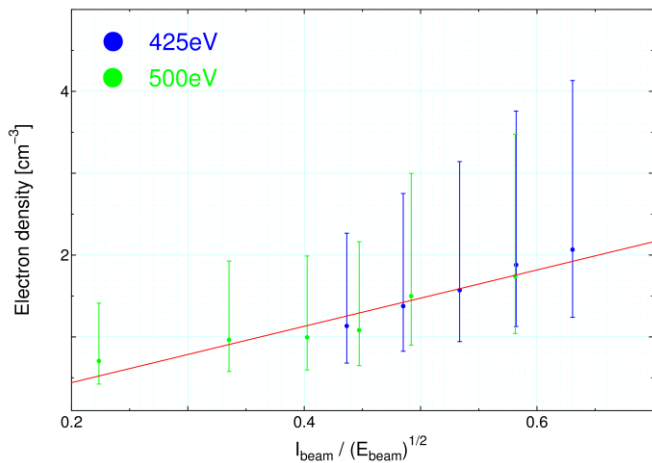


図 6.1 電子密度の I/\sqrt{E} 依存性

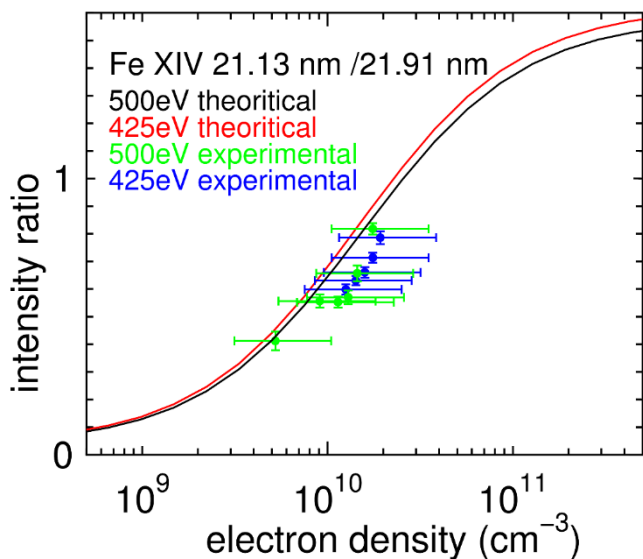


図 6.2 電子密度測定法の評価

7. まとめと今後の展望

本研究ではモデルと実験の間に顕著な差が確認されている Fe XV の 23.39 nm ($3s3p\ ^3P_2 - 3s3d\ ^3D_3$)/ 24.38 nm ($3s3p\ ^1P_1 - 3s3d\ ^1D_2$) に注目した。今回はこのずれに対する定量的な理解を深める為に、Fe XV と同じ基底配置を持つ Mn XIV の同様の遷移による発光 25.00 nm ($3s3p\ ^3P_2 - 3s3d\ ^3D_3$)/ 26.05 nm ($3s3p\ ^1P_1 - 3s3d\ ^1D_2$) を測定した。Mn XIV のライン強度比 25.00 nm / 26.05 nm は実験室プラズマを生成する装置である小型電子ビームイオントラップと斜入射型 EUV 分光器を用いて測定した。また Mn 測定時と同じ実験条件における電子ビームとイオンの広がり測定し、トラップ領域内のイオンが感じる実効電子密度を求めた。これらの測定結果から Mn XIV のライン強度比の電子密度依存性を求め Fe XV の結果と比較したところ、Fe XV と同じ電子密度領域においてライン強度比の密度依存による効果が顕著であるということが確認できた。今後、Mn XIV について計算したモデル計算との比較を行い、Fe XV の実験とモデルの比較における不一致が鉄のある遷移特有のものかを検証していく予定である。

また電流の定義式を用いた実効電子密度の導出方法の有効性を検証した。検証の結果、 $I/\sqrt{E_e}$ が約 0.2~0.6 の範囲において有効性が示された。現状ではこの限られた範囲においてのみ、電子ビーム電流及び電子ビームエネルギーの値から実効電子密度を得ることが可能である。今後、0.2~0.6 の範囲外での有効性を確かめる予定である。

参考文献

- [1] 清水恵理奈 卒業論文、電気通信大学 (2013)
- [2] N.Nakamura et al., ApJ, 739 (2011) 17