

鉄多価イオン発光線強度比の電子密度依存性測定

清水恵理奈

平成 26 年 3 月 6 日

1 背景

太陽には未だ解明されていないメカニズムの一つにコロナ加熱というものがある。太陽内部や表面は高密度プラズマだがコロナは低密度プラズマであるため、光球表面から遠ざかるにつれて電子密度は低くなっていく。しかし電子温度は、光球表面が約 6000 K に対して遷移領域を過ぎると急激に上昇してコロナでは 100 万 K となっている。希薄なプラズマであり太陽表面から離れた距離にあるコロナがなぜ 100 万 K を保っているのか、そのメカニズムは未だ解明されていない。

太陽コロナは 100 万 K という高温を保っているため、そこには鉄多価イオンが多数存在している。太陽大気の鉄多価イオンスペクトルを調査することは太陽大気における電子密度分布や電子温度分布を知るために必要であり、その為に太陽大気分光計測は重要である。国立天文台は 2006 年 9 月に「SOLAR-B」プロジェクトの太陽観測衛星「ひので」を打ち上げている。このひのでは、超高分解能の可視光磁場望遠鏡 (SOT-FPP,OTA)、極端紫外線撮像分光装置と X 線電波望遠鏡 (XRT) が搭載されており、3 つの波長領域における観測が可能となっている。今回注目している鉄多価イオンのスペクトルは主に 5~30 nm の極端紫外 (EUV: Extreme ultraviolet) 領域で発光するため、極端紫外線撮像分光装置 (EIS: EUV Imaging Spectrometer)[1] を用いて分光測定が行われている。

この EIS を用いたプラズマ診断は、観測されたスペクトル強度比をモデル計算と比較することで診断を行い、太陽大気の電子密度分布の測定を行っている。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。しかし衝突輻射モデル (CR model: Collisional Radiative model) 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。

よってモデル計算が信頼に値するのか実験による評価が求められている。本研究では過去の研究 [2] においてモデル計算と大きな違いが見られている FeXV のスペクトルを観測し再現性を確かめ、さらにモデル計算との違いが見られる部分についての詳細な測定を行った。

2 実験装置

本研究で測定する波長領域は 5 ~ 30 nm の極端紫外領域 (EUV 領域) である。10 ~ 200 nm の真空紫外領域 (VUV 領域) と呼ばれる波長領域は大気中に含まれる N_2 や O_2 の吸収帯となるため、空气中を伝播することが出来ない。そのため光学系は真空容器に収められており、真空度は 10^{-8} Pa となっている。

実験装置及び分光器の概略図を図 2.1 に示す。CoBIT の光源は細長い線上であるため、それ自体を分光器の入射スリットとみなすことが出来る。そのためスリットレスな構造を持った分光器となっている。このため CoBIT の EUV 分光器では高効率な測定が可能となっている。また別の観測ポートに取り付けたピンホールカメラでは電子ビーム径を測定してトラップ領域における電子密度を求め、ワイヤープローブ挿入システムは制動放射観測に利用した。

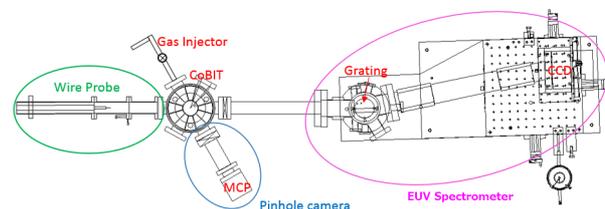


図 2.1 実験装置及び EUV 分光器の概略図

3 発光線強度比の電子密度依存性

3.1 鉄スペクトルの観測

図 3.1 は本研究で注目している FeXV23.39 nm と 24.38 nm のラインについての電子ビーム電流依存性を示したものである。ここでは電子ビームエネルギー (Ee) を 500 eV に固定し、電子ビーム電流を $I_e = 10, 12, 13, 14, 15$ mA と変化させた。一般に電子ビーム電流を増加させていくとその分標的となるイオンに衝突する電子の数が増えるため、生成される多価イオンの数も増加する。同じ価数の多価イオンによる発光ラインの強度比は I_e によって急激に変化しないと考えられる。しかし図 3.1 を見ると、 I_e を変化させていくことによって同じ価数からの発光である FeXV23.39 nm と FeXV24.38 nm の強度比が急激に変化していることがわかる。なお図 3.1 の青線は、各スペクトルについてガウシアンフィッティングを行ったものである。後述する各スペクトル強度比はガウシアンフィッティングによって求めた。

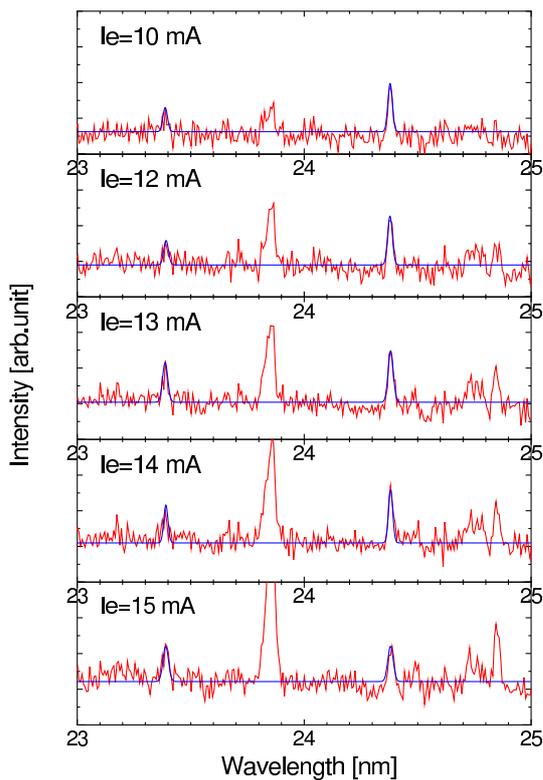


図 3.1 500 eV における FeXV23.3866 nm と 24.37940 nm の電子ビーム電流依存性

3.2 電子密度測定

対象となるスペクトルの強度を測定すると共に、位置有感検出器 (PSD: Position Sensitive Detector) を用いてトラップ領域の電子密度を測定した。電子密度の値を求めるためには電流値、電子ビームエネルギーの他にも電子ビームの形状即ち電子の空間分布とイオンの空間分布を測定しなければならない。

電子ビームの衝突によって励起状態となったイオンは脱励起する際に光を放出する。EUV 領域の発光は遷移寿命が短い E1 遷移によるものであり、寿命は 10^{-10} s 程度である。そのため電子が衝突した直後に発光するので、EUV 領域の発光分布は電子の空間分布を表していると考えられる。一方でイオンの空間分布は可視領域の発光分布から求める。可視領域の発光は基底状態微細構造間の M1 遷移であるために寿命が長く (\sim ms)、電子ビームの衝突により励起されてもすぐには脱励起せず、電子ビームの外でも発光すると考えられる。しかし先行研究 [2] より、電子とイオンの空間分布に大きな差異はないことが分かっている。そのため今回の測定では電子の空間分布のみを測定した。図 3.2 は PSD で検出したイメージであり、青色の部分が発光を検出している部分である。これを横軸方向に積分し空間分布を表したのが図 3.3 である。電子密度は測定の結果を以下の式に代入して求めた。

$$\bar{n}_e = \frac{4\ln(2)}{2\pi a^2} \cdot \frac{I}{ev} \quad [\text{cm}^{-3}] \quad (3.1)$$

ここで I は電子ビーム電流、 v は電子ビームエネルギーより求めた電子の速度、 a は EUV 領域の発光分布の半値全幅であり、ガウシアンフィッティングによって求めた。

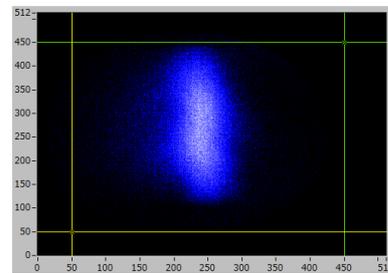


図 3.2 PSD で観測した EUV 発光分布

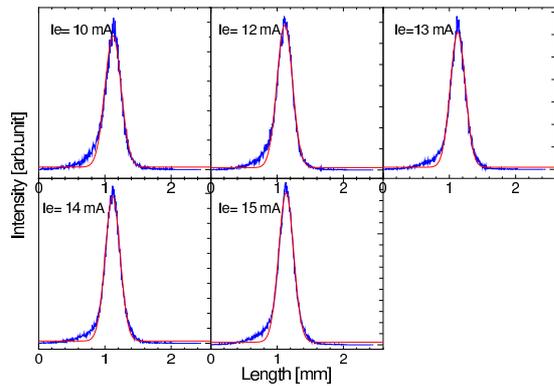


図 3.3 エネルギー 500 eV における EUV 発光分布測定結果

3.3 モデル計算の評価

本研究ではモデル計算と顕著な違いが見られる FeXV 23.39 nm と 24.38 nm に注目した。

ライン強度比は図 3.1 に示すように、それぞれのラインについてガウシアンフィッティングを行いその面積を強度として比を求めた。その際、2つのラインの半値幅が一定となるようにフィッティングを行った。図 3.1 より $I_e=14$ mA から 23.39 nm のピークの高さが著しく増加していることが分かる。

図 3.4 は大阪大学の山本氏の理論計算と今回測定した強度比 23.39 nm/24.38 nm の電子密度依存性をプロットしたものである。横軸が対数表示であらわした電子密度、縦軸が強度比を示しており、赤い点が今回の実験値、青い曲線がモデル計算の結果を示している。また桃色の四角は先行研究 [2] の結果をプロットしたものである。なお、注目したラインの詳細及び強度比や電子密度は表 1, 表 2 の通りである。表 1 や図 3.4 より、 $I_e=12$ mA までは概ねモデル計算が実験を良く再現していることが分かる。しかし $I_e=13$ mA 以降ではモデル計算と実験結果に著しい差が見られる。 $I_e=13$ mA 付近で立ち上がりを見せる 23.39 nm のラインがこの様な著しい差を生み出している原因であると考えられる。しかし 23.39 nm のラインが立ち上がる原因は不明なため、今後の研究課題となっている。

また先行研究 [2] のデータと今回のデータを比較すると、電子密度に差があることが分かる。しかし、電子密度に対して強い依存性を持つことは再現していると言える。

表 1 注目したラインの詳細 [3]

Ion	Wavelength [nm]	Transition	
FeXV	23.3866	$3s3p\ ^3P_2$	$3s3d\ ^3D_3$
	24.3794	$3s3p\ ^1P_1$	$3s3d\ ^1D_2$

表 2 強度比の電子密度依存性

電子ビームエネルギー I_e [mA]	電子密度 n_e [cm^{-3}]	強度 23.3866 nm	強度 24.3794 nm	強度比
10	$2.6\text{E}+10$	17	34	0.50
12	$3.4\text{E}+10$	18	36	0.50
13	$3.8\text{E}+10$	32	41	0.78
14	$4.2\text{E}+10$	25	35	0.71
15	$4.6\text{E}+10$	30	30	1.0

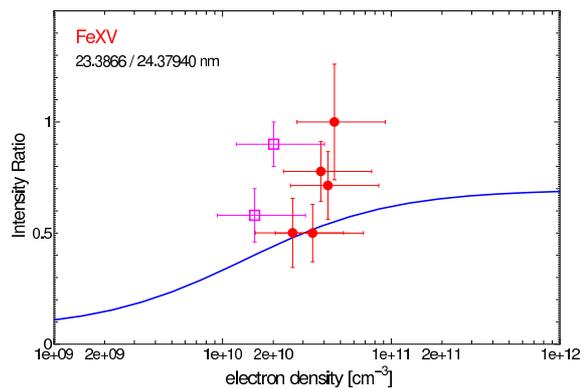


図 3.4 FeXV のライン強度比の電子密度依存性

3.4 感度較正

今回用いたモデル計算はライン強度比と電子密度の依存性を計算したものである。モデル計算の評価を行う実験では目標とする価数のイオンによる各ライン強度比を測定によって得られたスペクトルから求めていく。しかしながら、ここで分光器における感度の波長依存性について考えなければならない。本研究で対称としていた FeXV の 23.39 nm と 24.38 nm におけるライン強度比では発光波長が比較的近いので、感度の波長依存性はほぼ同じものだと考えた。しかし同じ FeXV でも 24.38 nm と 28.42 nm では波長が離れている為に、強度比を議論するためにはそれぞれのラインについて感度較正を行わなければならない。

本研究では制動放射によるスペクトルを感度較正に利用した。制動放射は

$$I_\lambda = \frac{Cc^2(\lambda - \lambda_{\min})}{\lambda^3 \lambda_{\min}} \quad (3.2)$$

と表す事が出来る。ここで C は原子固有の定数、 c は光速を示している。ここで電子ビームエネルギーを 82.3 eV とすると λ_{\min} は Duane-Hunt の

法則

$$\lambda_{\min} = \frac{12.4}{E_e} [\text{\AA}] \quad (3.3)$$

より、 $\lambda_{\min} = 15.06 \text{ nm}$ と求めることが出来る。図 3.5 は実際に Ti ワイヤにエネルギー 82.3 eV の電子ビームを入射して得られた制動放射スペクトルと制動放射の理論曲線をプロットしたものを示している。理論計算と実験で得たスペクトルを比較すると、赤い理論線と青い実測線はスペクトルの形に大きな違いが見られた。今回は 20 nm 付近を 1 と規格化しており、長波長側に行くにつれて感度が減少していることが図 3.5 より分かる。つまり長波長側は感度が悪く、短波長側は感度が良いと言える。図 3.6 は $E_e=500 \text{ eV}$ のスペクトルについて実際に感度較正を行ったものである。今回の実験では波長が離れたラインの強度比は求めなかったが、この感度較正の方法を用いて今まで議論が出来なかったライン強度比についても測定を行いたいと考えている。

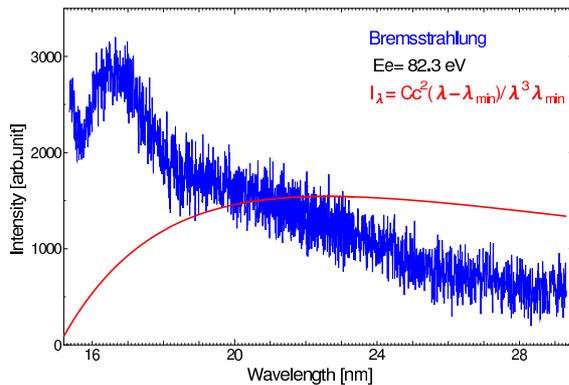


図 3.5 観測した制動放射スペクトルと理論計算の比較

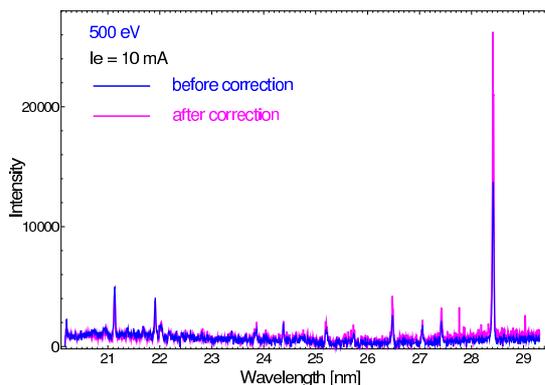


図 3.6 $E_e=500 \text{ eV}$ における感度較正前後のスペクトル

4 まとめと今後の展望

小型多価イオン源と斜入射型分光器を用いて鉄多価イオンの極端紫外域発光線強度比の電子密度依存性を測定した。

発光線強度は電子ビームエネルギーは一定に、電子ビーム電流を変化させて測定した。同時に極端紫外領域の発光分布も測定し、そこからトラップ領域の電子密度を測定した。測定結果より発光線強度比の電子密度依存性を求め、モデル計算との比較も行った。本研究では特にモデル計算と大きな差が見られる FeXV スペクトルを観測し再現性を確かめ、さらにモデル計算と違いが見られる部分について詳細な測定を行った。

FeXV の 23.39 nm と 24.38 nm の発光線強度比の電子密度依存は、実験とモデル計算で大きな差があることが分かった。差が大きくなる部分の詳細な測定によって、電子密度が $n_e = 4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ を超えるとモデル計算との差が大きくなる事が分かった。しかし今回注目している FeXV 23.39 nm の発光線強度が弱い為、実験誤差が非常に大きくなってしまった。そのため今後の研究では露光時間を増やして測定する必要があると考えられる。

また本研究では制動放射スペクトルを用いて感度較正を行った。本研究では実際に感度較正を行うことはなかったが、今後の研究ではこの感度較正の方法を用いて今まで議論が出来なかった発光線強度比についても測定を行っていききたい。

参考文献

- [1] <http://hinode.nao.ac.jp/po/eis/>
- [2] N.Nakamura et al., ApJ, 739 (2011) 17
- [3] CHIANTI database