

鉄多価イオン発光線強度比の電子密度依存性測定

中村信行研究室 清水恵理奈

1 序論

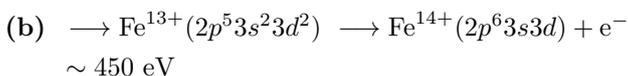
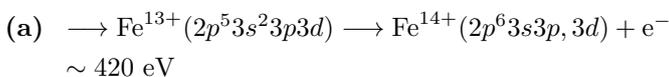
1.1 背景

太陽は地球に住む我々の生活に恩恵を与え続けているが、そのダイナミクスには不明な点も数多く存在している。その一つにコロナ加熱というものがある。この超高温のコロナ領域では太陽表面の巨大な爆発現象である太陽フレアが発生している。フレアに伴う障害を事前に防ぐべく、近年ジオスペースでの「宇宙天気予報」の実現が期待されているがその為にはフレアの発生機構と共にコロナ加熱機構も明らかにしていく必要がある。

国立天文台はフレア発生機構・コロナ加熱機構解明のために、2006年9月に「SOLAR-B」プロジェクトの太陽観測衛星「Hinode」を打ち上げ、極端紫外線撮像分光装置 (EUV Imaging Spectrometer: EIS)[1] を用いて太陽大気分光によるプラズマ診断を行っている。分光によるプラズマ診断では、EISで観測された鉄多価イオンのEUV領域のスペクトルデータとプラズマを記述するモデル計算である衝突輻射モデル (Collisional Radiative model: CR model) と組み合わせることで太陽大気の電子密度を求めている。したがってモデル計算の信頼性はプラズマ診断結果に大きく影響する。しかしCRモデル中の遷移確率や、電離・再結合などの速度係数は理論値に頼らざるを得ないのが現状であり、天体プラズマ診断結果の信頼性が十分でない。そこで、よく定義された実験室プラズマである電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap: EBIT) 等を用いた理論計算の評価が求められている。

また、EBIT内の電子のエネルギー分布はほぼ単色とみなすことが出来るため、顕著な共鳴過程が観測される。さらに太陽大気のように電子がエネルギー分布を持っている場合でも、観測されたスペクトルに対する共鳴過程の寄与は大きいと考えられる。太陽フレア観測 [2] や先行研究 [3] の測定結果とモデル計算との間の不一致が報告されている Fe XV には、電子ビームエネルギー 400 ~ 500 eV 間に次のような共鳴電子捕獲を経由した共鳴励起過程があることが理論計算によって予測されている。

$$\text{Fe}^{14+}(3s^2\ ^1S_0) + e^-$$



(a), (b) の共鳴過程はそれぞれのポピュレーションに影響を与えるため、先行研究 [3] で注目した Fe XV の 2 本のライン、233.9 Å(3s3p ³P₂ – 3s3d ³D₃) と 243.8 Å(3s3p ¹P₁ – 3s3d ¹D₂) のライン強度は強いエネルギー依存性を示すと予想される。一方で太陽フレア観測 [2] や先行研究 [3] で用いられた衝突輻射モデル中に共鳴過程は含まれていないため、共鳴過程の寄与が Fe XV のモデルと観測・実験の不一致の原因である可能性が考えられる。

1.2 目的

我々の研究室で所有している EBIT は実験室プラズマの一つであり、太陽コロナをよく再現することが出来る装置である。EBIT を用いた CR モデルの評価は現在まで数多く行われてきているが、EBIT 内の電子密度を実測した例は無く、密度依存性の評価が十分に行われているとは言い難い。そこで本研究では、密度依存性の評価をより厳密に行うことを目的として、EBIT 内の電子とイオンの空間分布を測定することで、実効電子密度を直接測定した。これにより、Fe X-XII におけるライン強度比の電子密度依存性について、モデル計算の評価を行った。さらに観測・実験とモデル計算の間に不一致が報告されている Fe XV について、実験的・理論的原因を検討し不一致の原因を明らかにすることを目的とした。

また共鳴過程はライン強度を議論する上で重要な過程である。今回我々は小型 EBIT(CoBIT) に電子ビームエネルギー制御と時間分解能スペクトルが計測可能な多次元同時計測システムを新たに設置し、Fe XV における共鳴電子捕獲過程を経由した共鳴励起過程の観測を行った。

本研究では、EBIT を利用した衝突輻射モデルのより厳密な評価を可能にする手法を確立し、太陽コロナをはじめ実験室プラズマなどの輻射計測のための高精度で有用なデータベースを提供することを目的とする。

2 理論計算

本研究で使用した CR モデル中の速度係数や遷移確率は原子コード計算の一つである HULLAC (Hebrew University Livermore Laboratory Atomic Physics Code) によって計算されている。HULLAC は配置間相互作用を含んだ相対論的ハートリー-フォック法を用いており、本研究では Fe X – XV 中の主量子数 $n = 5$ までの構造を含めて計算を行った。CR モデル中の原子過程は電子衝突励起・脱励起、高価数への自動電離、低価数からの電離が含まれている。また計算された各断面積から、EBIT 内の電子の速度分布はデルタ関数を仮

定して速度係数を求めている。

なお本研究で注目している各ラインの波長は天体物理学で広く知られているデータベース CHIANTI[4] を用いて同定を行った。ただし Fe XI のラインに関しては一部、NIST のデータベース [5] も参考にしている。表 1 には CHIANTI を用いた各価数におけるラインの同定結果、表 2 には NIST を用いたラインの同定結果をまとめた。

表 1 注目したラインの詳細 (CHIANTI atomic database[4])

label	Ion	Wavelength (Å)	Transition	
a	Fe X	174.531	$3s^2 3p^5 \ ^2P_{3/2}$	$3s^2 3p^4 ({}^3P) 3d \ ^2D_{5/2}$
b		175.263	$3s^2 3p^5 \ ^2P_{1/2}$	$3s^2 3p^4 ({}^3P) 3d \ ^2D_{3/2}$
c		175.475	$3s^2 3p^5 \ ^2P_{3/2}$	$3s^2 3p^4 ({}^3P) 3d \ ^2P_{1/2}$
d		177.243	$3s^2 3p^5 \ ^2P_{3/2}$	$3s^2 3p^4 ({}^3P) 3d \ ^2P_{3/2}$
e	Fe XI	180.401	$3s^2 3p^4 \ ^3P_2$	$3s^2 3p^3 ({}^4S) 3d \ ^3D_3$
f		182.167	$3s^2 3p^4 \ ^3P_1$	$3s^2 3p^3 ({}^4S) 3d \ ^3D_2$
g		188.217	$3s^2 3p^4 \ ^3P_2$	$3s^2 3p^3 ({}^2D) 3d \ ^3P_2$
h		188.299	$3s^2 3p^4 \ ^3P_2$	$3s^2 3p^3 ({}^2D) 3d \ ^1P_1$
i	Fe XII	186.854	$3s^2 3p^3 \ ^2D_{3/2}$	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 3d \ ^2F_{5/2}$
j		186.887	$3s^2 3p^3 \ ^2D_{5/2}$	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 3d \ ^2F_{7/2}$
k		193.509	$3s^2 3p^3 \ ^4S_{3/2}$	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 3d \ ^4P_{3/2}$
l		195.119	$3s^2 3p^3 \ ^4S_{3/2}$	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 3d \ ^4P_{5/2}$
m	Fe XV	233.86	$3s 3p \ ^3P_2$	$3s 3d \ ^3D_3$
n		243.794	$3s 3p \ ^1P_1$	$3s 3d \ ^1D_2$

表 2 注目したラインの詳細: Fe XI (NIST atomic database[5]).

Ion	label	Wavelength (Å)	Transition	
Fe XI	I	188.089	$3s^2 3p^4 \ ^3P_2$	$3s^2 3p^3 ({}^2D) 3d \ ^3P_1$
	II	188.219	$3s^2 3p^4 \ ^3P_2$	$3s^2 3p^3 ({}^2D) 3d \ ^3P_2$
	III	188.299	$3s^2 3p^4 \ ^3P_2$	$3s^2 3p^3 ({}^2D) 3d \ ^3S_1$

3 実験装置

実験装置及び分光器の概略図を図 3.1 に示す。本研究では Tokyo-EBIT と小型 EBIT (CoBIT) を相補的に用いて測定を行った。図 3.1 には CoBIT を用いた場合の図を示したが、Tokyo-EBIT でもほぼ同じ実験配置である。CoBIT の実験条件は、電子ビームエネルギー $E_e = 340 - 500$ eV、電子ビーム電流 $I_e = 6 - 15$ mA である。この様に電子ビームエネルギーと電流を変化させることによって、任意の電子密度にすることが可能である。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 30 V、真空度は 10^{-8} Pa である。

鉄多価イオンからの EUV 領域の発光は CoBIT の観測ポートに設置した斜入射型分光器で測定した。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電子冷却背面照射型 CCD カメラからなる。なお CoBIT の光源は細長い線状であるため、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つ CoBIT の EUV 分光器では高効率な測定が可能となっている。また本研究で用いた EUV 分光器は先行研究 [3] で用いた分光器よりも入射・出射長が長い分散が大きく分解能が高い。さらに Tokyo-EBIT での観測で用いた分光器は CoBIT の観測で用いたものと同じ光学配置だが、Tokyo-EBIT の方が印加磁場が大きく CoBIT に比べて電子ビーム径はより細

く収束されている ($B_{\text{Tokyo-EBIT}} = 1.5$ T, $B_{\text{CoBIT}} = 0.1$ T)。本研究で用いた分光器はスリットレスのため光源の太さがライン幅に大きく影響し、Tokyo-EBIT 分光器は CoBIT 分光器よりもさらに高い分解能を持っている。

さらにモデル計算の評価のためにはスペクトル観測と共に EBIT 内の電子密度を測定しなければならない。EBIT 内の電子密度を測定するためには、トラップ領域の EUV と可視領域発光の空間分布を測定する必要がある。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ることが出来る。電子ビーム径は EUV 領域に感度を持つ位置有検出器 (Position sensitive detector: PSD) を検出器にもつ、ピンホールカメラを用いて測定を行った。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。この性質を利用してイオン雲の空間分布は入射スリットを全開にした可視分光器を用いて観測した。

また本研究では共鳴電子捕獲過程を経由した共鳴過程の観測を行うために、CoBIT を用いた新たな多次元同時計測システムを立ち上げた。図 3.2 に多次元同時計測システムの概略図を示す。共鳴過程を観測するためには電子ビームエネルギーを高速で掃引する必要がある。EBIT の電子ビームエネルギーは陰極と DT の電位差によって決まり、本研究では DT にかかる電圧を掃引させることによって電子ビームエネルギーを変化させた。DT の電圧掃引をイオンの払い出しや信号取得などと同期を取って行うため、図 3.2 のように接続した 3 つの任意波形発生装置 (Function generator: FG) と PC によって制御した。CCD よりも高い時間分解能を持つ PSD によって検出された位置信号は電子ビームエネルギーと同期されて、Lab view で作成したプログラムによって記録・処理され、エネルギー掃引時のスペクトルを得ることが出来る。

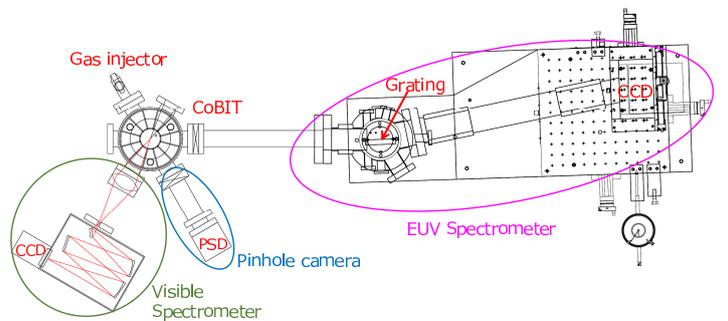


図 3.1 実験装置及び EUV 分光器の概略図

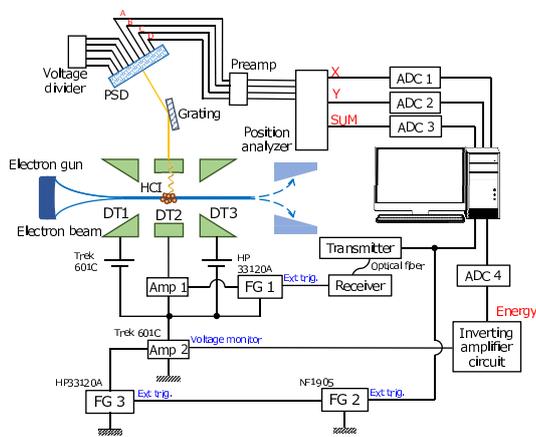


図 3.2 多次元同時計測システム

4 実験

4.1 鉄多価イオンの発光特性

本研究で注目しているのは太陽大気観測でよく観測されている Fe X–XV スペクトルである。まず太陽観測衛星 *Hinode* に搭載されている EIS の観測波長領域と同じ 160 – 200 Å に注目し、CoBIT と CoBIT 観測ポートに取り付けた EUV 分光器を用いて Fe X–XII のスペクトルを観測した。本研究では EBIT トラップ領域内の電子密度を変化させるために電子ビーム電流を $I_e = 6 - 12$ mA と変化させながら、電子ビームエネルギーは Fe X–XII が支配的に生成する $E_e = 340, 400$ eV に電子ビームエネルギーを固定しスペクトルを観測した。図 4.1 は電子ビームエネルギー $E_e = 340$ eV の場合のスペクトルの電流依存性の一部を示している。なお図 4.1 中の各ラインのラベル $a - l$ は表 1 に対応している。

図 4.2 には注目している Fe XV の 2 つのラインについて異なる分解能を持つ分光器を用いて観測した結果を示した。図 4.2(a), (b), (c) のラインの半値全幅はそれぞれ 0.2, 0.4, 0.8 Å である。また図中のラベル m, n はそれぞれ表 1 に対応している。なお図 4.2 中の黒矢印は不純物である O IV のスペクトルを示している。Tokyo-EBIT のスペクトルには O IV のラインは確認されないため、Tokyo-EBIT を用いた結果は酸素などの不純物ラインが混ざっていない結果だと言える。表 1 の $a - n$ の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強度を求め、強度比を求めた。ガウス関数をフィッティングする際、比較する 2 つのラインが持つ半値全幅が同じになるよう制限を課した。

4.2 共鳴過程による発光特性

本測定では CoBIT の観測ポートに取り付けられている EUV 分光器の検出器を、CCD から PSD に付け替えてスペクトルの測定を行った。実験条件はイオン掃き出し周期 $t_{\text{dump}} = 3600$ ms、イオン生成時間 $t_{\text{cook}} = 1600$ ms、プローブ時間 $t_{\text{probe}} = 10$ ms、イオン保持時間 $t_{\text{keep}} = 10$ ms、掃

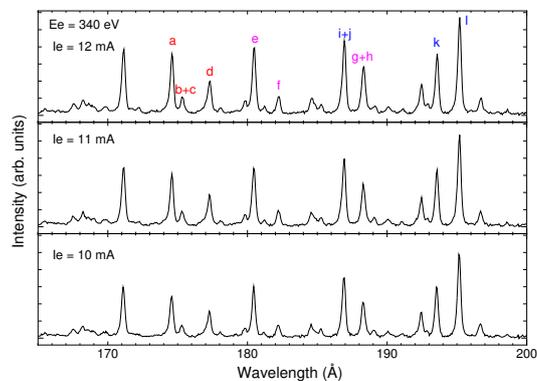


図 4.1 Fe X - XII スペクトルの電子ビーム電流依存性 ($E_e = 340$ eV).

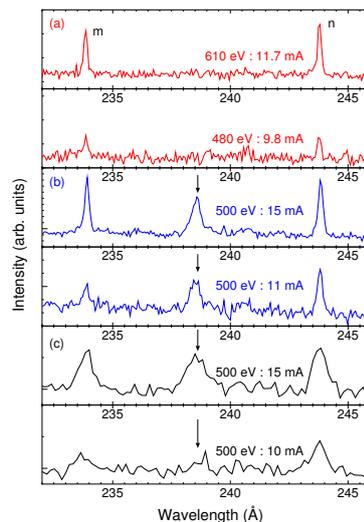


図 4.2 Fe XV スペクトルの電子ビーム電流依存性. (a), (b) はそれぞれ Tokyo-EBIT と CoBIT で観測した結果. (c) は CoBIT を用いた先行研究 [3] で得られた結果を示す。

引回数は 100 回である。電子ビームエネルギーは Fe XV が支配的に生成される 500 eV を生成エネルギー、DT 全体を -100 V で掃引させることによってプローブエネルギーを 400 – 500 eV とした。図 4.3 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。横軸は観測したラインの波長、縦軸には電子ビームエネルギーを表している。図 4.3 より、黄枠の 440 – 460 eV と青枠の 470 – 490 eV 付近に共鳴構造を確認することが出来る。

図 4.3 を注目しているラインそれぞれで切り、1 eV ずつビニングした 1 次元スペクトルが図 4.4 の赤、青の実線となる。図 4.4 の (a), (b) それぞれにおいて $E_e = 440$ eV 付近で強い共鳴が現れており、 $E_e = 470 - 490$ eV 付近にも弱い共鳴構造があることが分かる。さらに図 4.4 中の黒線は共鳴過程を考慮した理論計算結果を示している。なお理論計算は $\text{FWHM} = 3$ eV で畳み込んである。図 4.4 より理論と実験結果を比べると、全く一致していないことが分かった。そこで電子ビームエネルギーの補正を考えていく。

電子ビームエネルギーは陰極と DT 全体の電位差で決まる。しかし実際にイオンに衝突する電子のエネルギーは、DT からの染み出しと圧縮された電子ビームが作り出す空間電荷ポ

テンシャルの寄与を考慮し補正しなければならない。これを踏まえて、実効電子ビームエネルギーを補正したのが図 4.4 のマゼンタとシアンの点線となる。今回は理論計算に合わせて、両スペクトル共に 25 eV ずつ下方修正を行った。すると図 4.4 より、 $E_e = 420$ eV に強い共鳴構造、 $E_e = 445 - 470$ eV 付近に弱い幅広の共鳴構造を確認することが出来、理論曲線との間に定性的には良い一致を確認することが出来た。なおそれぞれのスペクトルにおける非共鳴の強度は、注目しているラインの非共鳴の放射遷移による発光と考えている。

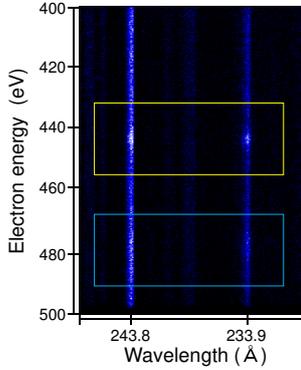


図 4.3 共鳴励起過程の 2 次元スペクトル。

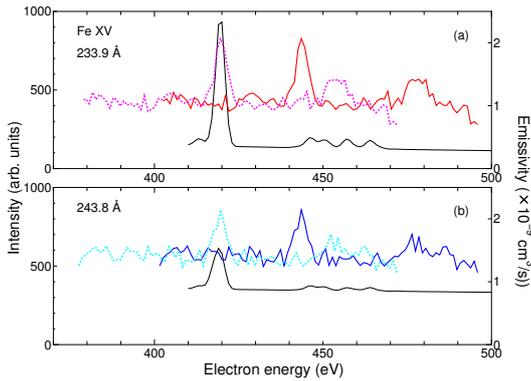


図 4.4 1 eV ごとにピンニングしたライン強度の電子エネルギー依存性。(a)238.9 Å, (b)243.8 Å. 赤・青の実線はエネルギー補正前のスペクトル、マゼンタ・シヤンの点線はエネルギー補正後のスペクトルを示す。黒線は理論計算を示し、右側の縦軸は放射率を示す。

5 結果および考察

5.1 モデル計算との比較

図 4.1 の各価数のスペクトルから求めたライン強度比と直接測定した EBIT トラップ領域内の実効電子密度 n_e^{eff} を示したのが、図 5.1, 5.2, 5.3 の各ライン強度比の電子密度依存性である。各図の赤と青の実線と破線はそれぞれ電子ビームエネルギー $E_e = 340, 400$ eV の理論曲線、各点は実験結果を示している。各実験結果の縦軸方向のエラーバーは統計誤差 (1σ) である。また横軸方向の負方向のエラーバーは測定による機械誤差やフィッティングによる誤差、正方向のエラーバーは電子ビームとイオン雲の空間分布をガウス関数と仮定した際の実効電子密度の最大値を描画している。

5.1.1 Fe X

図 5.1 より、Fe X のライン強度比 (I_b (175.263 Å) + I_c (175.475 Å))/ I_a (174.531 Å) と (I_b (175.263 Å) + I_c (175.475 Å))/ I_d (177.243 Å) について、実験結果と理論曲線を比較するとそれぞれの結果で良い一致が確認される。さらにこの 2 つの強度比は電子ビームエネルギーを $E_e = 340, 400$ eV と変化させてもほとんど変化は確認されなかったため、温度依存は小さいと考えられる。

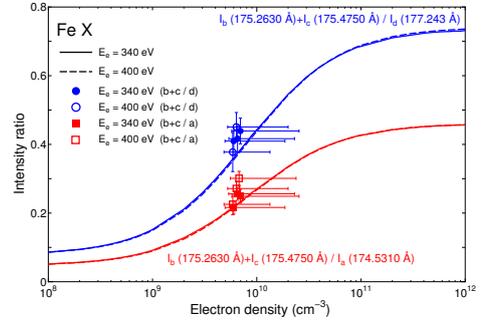


図 5.1 Fe X: ライン強度比の電子密度依存性. 赤と青の実線、破線はそれぞれ $E_e = 340, 400$ eV としたときの理論計算を示す。青丸、青白丸はそれぞれ $E_e = 340, 400$ eV としたときのライン強度比 ($(I_b + I_c)/I_d$)、赤四角、赤白四角は $E_e = 340, 400$ eV としたときのライン強度比 ($(I_b + I_c)/I_a$) を示す (表 1 参照)。

5.1.2 Fe XI

次に図 5.2 に示すように、Fe XI のライン強度比 I_f (182.17 Å)/ I_e (180.40 Å) と I_f (175.263 Å)/(I_g (188.2165 Å) + I_h (188.2994 Å)) について、モデル (青・赤線) と実験を比較すると若干の差異があることが分かる。この差異の原因としては他の価数のラインのブレンドが考えられる。 I_f/I_e に関しては Fe X (188.4410 Å: $3s^2 3p^5 \ ^2P_{1/2} - 3s^2 3p^4 (^3P) 3d \ ^2P_{1/2}$ (180.4410 Å)) のブレンドが 20% 程度あると HULLAC 計算より考えられるため、考慮すべきである。ここで Fe X と Fe XI の価数分布を 1:1 と仮定して計算を行った。Fe X のラインのブレンドを考慮した理論計算結果は図 5.2 のマゼンタとなっており、実験とモデルの間に良い一致が確認できる。

また $I_f/(I_g + I_h)$ の g, h のラインについて Fe XII (188.177 Å: $3s^2 3p^3 \ ^2P_{1/2} - 3s^2 3p^2 (^3P) 3d \ ^2D_{3/2}$) のブレンドが考えられ、図 5.2 の青一点鎖線がブレンドを考慮した結果となっているが、Fe XI と Fe XII の価数分布を 1:1 と仮定しても Fe XII のブレンドの寄与は小さいと考えられる。さらに $I_f/(I_g + I_h)$ の g, h のラインについては表 1 の CHIANTI データベースと表 2 の NIST データベースの同定結果に食い違いがあることが分かる。CHIANTI (表 1 参照) のライン g と NIST のライン II (表 2 参照) は波長と遷移共に一致を確認することが出来るが、ライン h と III については波長は同じだが遷移の同定が異なっている。さらに NIST に示されているライン I の遷移は CHIANTI には示されていない。本研究で行った HULLAC 計算から得られた全角運動量 J と各データベース

との比較の結果、188 Å のラインでは3つのライン I , II , III がブレンドしていると同定した。本研究で対象としている多価イオンの準位においては全角運動量 J のみが良い量子数であり、原子コード計算から LS 項を決定するのは難しく、そのためデータベースごとに LS 項の同定が異なった結果となっている。G. Y. Liang ら [6] は NIST を参考に Fe XI ラインの同定を行っており、本研究では G. Y. Liang らの結果を参考に、ライン強度比の分母を NIST から求めた3つのラインのブレンド ($I_I + I_{II} + I_{III}$) と考えると図 5.2 の緑の実線となり実験とモデルの間に良い一致があることが確認できた。

また図 5.2 中の点線は、2014 年の 4 月 15 日に太陽観測衛星 *HINODE* に搭載されている EIS で観測した太陽活動領域からの $I_f/(I_g + I_h)$ のライン強度比を示している。EIS で観測した太陽コロナの電子密度が 10^{10} cm^{-3} 程度であることを考慮して、EIS による観測結果とモデル、実験を比較すると3つの間に良い一致を確認することが出来た。

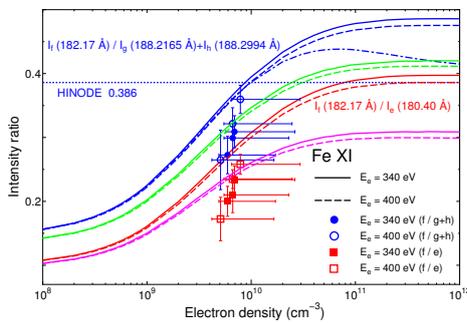


図 5.2 Fe XI: ライン強度比の電子密度依存性. 赤と青の実線、破線はそれぞれ $E_e = 340, 400 \text{ eV}$ としたときの理論計算を示す. 青丸、青白丸はそれぞれ $E_e = 340, 400 \text{ eV}$ としたときのライン強度比 (I_f/I_{g+h})、赤四角、赤白四角は $E_e = 340, 400 \text{ eV}$ としたときのライン強度比 (I_e/I_d) を示す (表 1 参照). また青一点鎖線は I_e/I_{f+g} に Fe XII のラインのブレンドを考慮した計算結果 ($E_e = 340 \text{ eV}$)、緑線と破線は NIST を参考にした計算結果 ($E_e = 340, 400 \text{ eV}$) を示し、マゼンタ線と破線は I_f/I_e に Fe X のラインのブレンドを考慮した計算結果 ($E_e = 340, 400 \text{ eV}$) を示す. 図上部の横軸に平行な青点線は、*HINODE* で観測されたライン強度比 (I_f/I_{g+h}) を示す.

5.1.3 Fe XII

図 5.3 に示すように、Fe XII のライン強度比 $I_k(193.509 \text{ Å})/(I_i(186.834 \text{ Å}) + I_j(186.887 \text{ Å}))$ と $I_l(195.119 \text{ Å})/(I_i(186.834 \text{ Å}) + I_j(186.887 \text{ Å}))$ について、モデルと実験を比較すると良い一致を確認することが出来る。

また図 5.3 中の点線は、Fe XI と同様に *HINODE* に搭載されている EIS で観測した太陽活動領域からの $I_k/(I_h + I_i)$ のライン強度比を示している。EIS で観測した太陽コロナの電子密度が 10^{10} cm^{-3} 程度であることを考慮して、EIS による観測結果とモデル、実験を比較すると Fe XII に関しても3つの間に良い一致を確認することが出来た。

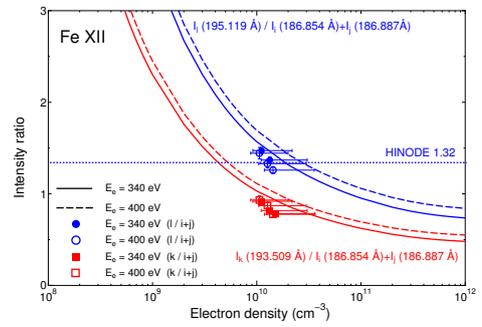


図 5.3 Fe XII: ライン強度比の電子密度依存性. 赤と青の実線、破線はそれぞれ $E_e = 340, 400 \text{ eV}$ としたときの理論計算を示す. 青丸、青白丸はそれぞれ $E_e = 340, 400 \text{ eV}$ としたときのライン強度比 (I_l/I_{i+j})、赤四角、赤白四角は $E_e = 340, 400 \text{ eV}$ としたときのライン強度比 (I_k/I_{i+j}) を示す (表 1 参照). 図中ほどの横軸に平行な青点線は、*HINODE* で観測されたライン強度比 (I_l/I_{i+j}) を示す.

5.1.4 Fe XV

(a) モデルと実験の不一致：実験的要因

序章で述べた Fe XV の強度比に関する実験とモデルの不一致の実験的要因としては、他のラインのブレンドによる寄与が考えられる。異なる分解能を持った分光器を用いた観測結果それぞれから求めたライン強度比の電子密度依存性とモデル計算を比較すると図 5.4 の様になり、黒線は $E_e = 500 \text{ eV}$ として計算された理論曲線を示している。図 5.4 より、異なる分解能を持つ分光器で観測した結果とモデルを比較しても、実験とモデルの間に顕著な差が確認された。Tokyo-EBIT で得られたスペクトルは CoBIT よりも不純物が少ないスペクトルであるため、他のラインのブレンドによる寄与はさらに排除されていると考えることが出来る。また *Skylab* による観測では他の元素イオンのライン (Ni XVIII, Ar XIV) のブレンドによる寄与の可能性が指摘されているが、これらのイオンは今回の実験条件下では生成されない。よって他のラインのブレンドによる寄与のみでは、モデルと実験の不一致を説明することが出来ないと考えられる。

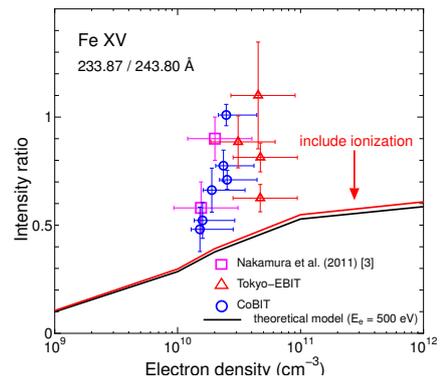


図 5.4 Fe XV: ライン強度比 (I_m/I_n) の電子密度依存性. 黒線は理論計算結果、青丸、赤三角、マゼンタ四角の各点はそれぞれ CoBIT、Tokyo-EBIT を用いた観測結果、CoBIT を用いた先行研究 [3] の結果を示す. また赤線は低価数からの電離を考慮した場合の理論計算結果を示す.

(b) モデルと実験の不一致：理論的要因

実験とモデルの不一致の理論的要因として、低価数からの

電離の寄与について考えていく。衝突輻射モデルでは一般に低価数からの電離の寄与は含まれず、注目している価数の基底状態からの励起のみを考慮しポピュレーションを計算している。しかし低価数からの電離、特にポピュレーションの大きい準安定状態からの電離は考慮していく必要があると考えられる。本研究では、Fe XIV の基底状態の微細構造準位であり準安定状態でもある $3s^2 3p^2 P_{3/2}$ から Fe XV の励起状態へ直接電離する過程を考慮しモデルの再計算を行った。

Fe XIV の準安定状態のポピュレーションは強い電子密度依存性を持つため、準安定状態から直接電離した先の Fe XV の励起状態、特に準安定状態である $3s3p^3 P_2$ のポピュレーションも Fe XIV の影響を受けて強い電子密度依存性を持つと考えられる。まず Fe XIV の基底状態から Fe XV への電離断面積を計算し、Fe XIV からの電離励起過程を考慮して再計算を行ったのが、図 5.4 中の赤線となる。しかし低価数からの電離の寄与は、強度比にあまり大きな効果を与えなかった。今回 Fe XIV における準安定状態のポピュレーションの電子密度依存は考慮しなかったが、Fe XIV の微細構造準位のポピュレーションは統計的分布を仮定しており、これは Fe XIV の準安定状態からの電離の確率が最も高い高密度極限での計算結果を示している。この様な Fe XIV の極限状態を仮定しても、注目しているラインの強度比の計算結果に大きな変化は確認されなかった。したがってモデルと実験の不一致は、低価数からの電離の寄与を考慮しても説明することが出来なかった。

5.2 共鳴励起過程による輻射と理論計算の比較

観測したライン強度の電子エネルギー依存性から強度比を求めた結果を図 5.5 に示した。図中の青線はエネルギー補正後の強度比を示している。また黒線は共鳴過程を考慮した、黒点線は共鳴過程を含んでいない理論計算結果を示している。

エネルギー補正後の実験結果と理論計算を比較すると、 $E_e = 420, 445 - 470$ eV の共鳴構造において比較的良い一致を確認することが出来る。しかしいずれの共鳴構造でも、強度比の大きさでは実験と理論の間に顕著な差があった。まず $E_e = 420$ eV 付近については、 $Fe^{14+}(3s^2 \ ^1S_0) + e^- \rightarrow Fe^{13+}(2p^5 3s^2 3p 3d)$ の電子捕獲断面積が実際よりも理論計算で大きく見積もられていることが考えられる。対して $E = 440 - 470$ eV は、 $Fe^{14+}(3s^2 \ ^1S_0) + e^- \rightarrow Fe^{13+}(2p^5 3s^2 3d^2)$ の断面積が実際よりも小さく見積もられていると予想される。さらに共鳴がないと考えられる領域の強度比も理論の方が実験よりも 0.2 ほど小さく見積もられているので、現状では断面積や遷移確率を求めた原子コード計算に改善が必要だと考えられる。

6 結論

本研究では、よく定義された実験室プラズマの一つである EBIT を用いて、天体プラズマ診断に用いられる衝突輻射モデルの評価を行った。まず本研究では EBIT プラズマを定義

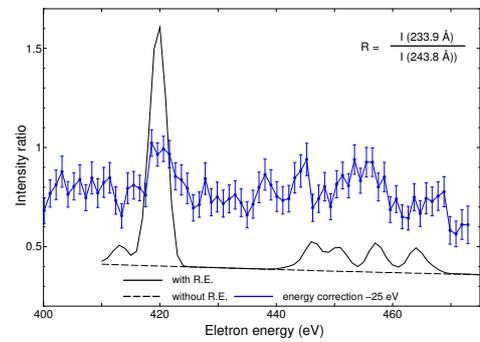


図 5.5 ライン強度比 ($R = I(233.9 \text{ \AA})/I(243.8 \text{ \AA})$) の電子エネルギー依存。青点線はエネルギー補正後の強度比を示している。黒線は共鳴過程を考慮した理論計算、黒点線は共鳴過程を含んでいない理論計算結果を示している。縦軸のエラーバーは 1σ としている。

するために重要なパラメータの一つである実効電子密度を、トラップ領域の EUV と可視光の発光分布を観測することによって、初めて直接測定することに成功した。

次に Fe X, XI, XII のベンチマークスペクトルを用いてモデル計算の評価を行い、Fe X と Fe XII に関してはモデルと実験の間に良い一致を確認した。Fe XI については他のラインのブレンドによる寄与を考慮することで、モデルと実験の間に良い一致を示すことが出来た。

また、先行研究や太陽フレアの観測でモデルと実験及び観測の不一致が報告されている Fe XV のラインについて、不一致の実験的・理論的要因を調べたが、不一致の明確な説明をすることは出来なかった。現時点では衝突輻射モデル中のプラズマ過程のモデリングの不十分さが不一致の原因ではなく、遷移確率や断面積を求める原子コード計算に改善が必要だと考えている。しかしどちらが原因であるかを明確に分けるためには、励起光源を用いた振動子強度の観測が今後有用であると考えられる。

さらに本研究では、CoBIT に多次元同時計測システムを新たに設置することで、共鳴電子捕獲過程を経由した共鳴励起過程を観測することに成功した。実験結果と理論計算を比較すると共鳴構造に関しては良い一致を確認することが出来たが、強度に関しては理論が実験を再現していなかったため断面積の理論計算などに改善が必要だと考えられる。

参考文献

- [1] <http://hinode.nao.ac.jp/po/eis/>
- [2] P. L. Dufton et al., ApJ, 353:323-328 (1990)
- [3] N. Nakamura et al., ApJ, 739 (2011) 17
- [4] CHIANTI atomic database
- [5] NIST atomic database
- [6] G. Y. Liang et al., ApJ, 696, 2275 (2009)