

太陽フレアの密度診断に有用な 多価イオン EUV 発光線強度比の測定

中村信行研究室 河野泰隆

1 序論

1.1 太陽大気分光診断

1.1.1 太陽コロナ/フレア

太陽系の中心として輝き続け、長年研究対象とされてきた太陽だが、未だにそのメカニズムに謎は多い。例として、太陽大気の最外部に存在するコロナ領域にて発生する、数千万度の高温に達する太陽フレアと呼ばれる巨大な爆発現象が挙げられる。これに伴って宇宙空間に放出された荷電粒子や宇宙線により人工衛星に搭載された電子機器に影響を及ぼし、通信障害の原因の一端となっているが、現在においても詳しい原因については解明されていない。

太陽における物理現象解明のため、国立天文台と宇宙航空研究開発機構が主導の元に開発された太陽観測衛星「ひので (Solar-B)」が 2006 年から現在まで運用されている。ひのでによる観測結果は、波動加熱説の直接的な証拠となる発見 [1] 等、現在に至るまで多くの研究成果に寄与している。

1.1.2 衝突輻射モデルを用いたプラズマ分光診断

多価イオンは天体プラズマにおける分光診断に有用とされている。これは恒星といった高エネルギーを持つ天体において大量に生成された多価イオンが、宇宙空間では他の原子や電子と相互作用を受けにくいと、地上に比べ多く存在することが出来ることにある。よって、宇宙空間における高温プラズマを理解するためには多価イオンに対する理解が重要となる。太陽大気におけるプラズマ分光診断には、観測により得られたスペクトルの強度比の実測値と理論計算に

よって得られる強度比の電子密度依存性を対応させることで大気中の電子密度を求めるという事例がある。例えば、太陽コロナにおける電子密度診断において、Fe XIII をはじめとする鉄多価イオンの発光線強度比の観測が盛んに行われている [2]。この強度比の電子密度依存性は、衝突輻射モデル (Collisional-Radiative model: CR-model) と呼ばれるモデルを用いて理論的に算出され、太陽観測衛星「ひので (SOLAR-B)」などにより得られた強度比の実測データと対応させることで、太陽大気の電子密度を得ることが出来る。

しかしながら、CR モデルには実験により十分な評価を得ていない理論値が用いられており、CR モデルを用いたプラズマ診断結果の信頼性は十分ではない。実際、Fe XV における 233.9Å と 243.8Å のラインについて 1990 年に観測衛星 Skylab による太陽フレアの観測結果とモデル計算との顕著な差異があった例が報告されている [3]。

1.2 研究目的

本研究では、太陽フレアの密度診断に利用される 3.2×10^6 K の温度領域において重要な Ar XIV の波長 187.96Å と 194.40Å のスペクトル強度比 $R_1 = I_{187.96}/I_{194.40}$ および波長 257.37Å と 243.79Å の強度比 $R_2 = I_{257.37}/I_{243.79}$ の電子密度依存性と、より高温域で重要となる Ca XV の波長 181.90Å と 200.97Å の強度比 $R_1 = I_{181.90}/I_{200.97}$ の電子密度依存性を、多価イオン源の一種である電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap: EBIT) を用いた観測により求め、実験値を CR モデルを用いて計算した強度比の電子密度依存性と比較すること

により CR モデルの評価を行った。

2 実験

2.1 電子ビームイオントラップ (Electron Beam Ion Trap:EBIT)

2.1.1 原理

本研究で使用したイオン源は電子ビームイオントラップ (通称:EBIT) と呼ばれるものである。

基本的に電子銃、ドリフトチューブ (Drift Tube:DT)、コレクタ、超伝導コイルから構成され、側面が穴の開いた構造となっている多価イオン生成領域の周囲に各種分光器が配置される。イオン生成には逐次電離と呼ぶ、ある一定のエネルギーを持つ電子を衝突させ続けることで、目的の価数まで1つずつ束縛電子を電離させる方法を用いている。

また、EBIT の電子ビームは一定のエネルギーを持つことから理想的には単色であるため、核融合科学研究所に設置されている大型ヘリカル装置 (Large Helical Device:LHD) などの核融合プラズマと比べ、多価イオン生成時の価数分布が狭いという特徴を持つ。これにより、比較的単純なスペクトルとなり、波長の同定や強度比の取得等が行いやすいという利点がある。

本研究では「Compact EBIT」および「Tokyo-EBIT」という2種類のEBITを用いた。Compact EBITは通称CoBITとも呼ばれ、最大ビームエネルギーは2.5keV、最大ビーム電流値は20mAであり、中心磁場は最大で0.2Tとなる。CoBITにおいて、Ar XIVスペクトルの測定で実際に使用した分光器等の配置図を図2.1に示す。CoBIT内部において多価イオンによる発

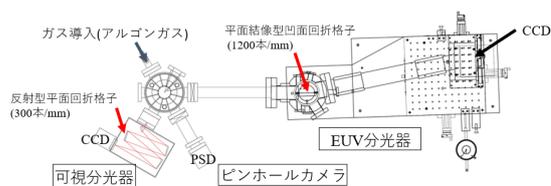


図 2.1 CoBIT における分光器等の配置図 (Ar XIV スペクトル取得時)。Ca XV スペクトル取得時には「ピンホールカメラ」に当たる部分に Ca 導入用の蒸着セル (K-Cell) が取り付けられている (後述)。

光は細い線状となる上、極端紫外領域では高効率のミラーやレンズが使用できないため極端紫外分光器はスリットを用いない構造となっている [4]。対して、Tokyo-EBIT は最大エネルギー180keV、最大電流 330mA の電子ビームの発生が可能で、トラップ領域において最大 4.5T の強磁場を発生させることが出来る。Tokyo-EBIT においても、CoBIT と同様 (図 2.1) に分光器等を配置し観測を行っている。

2.2 極端紫外スペクトルの測定

本研究で取得したスペクトルは EBIT に設置されている EUV 分光器を用いて観測を行った。得られたスペクトルは目的となるライン及びその周辺についてガウシアンフィッティングを行い、強度比及び後述する電子密度依存性測定のためのスペクトル半値全幅の決定を行った。

使用した EUV 分光器について、基本的には Tokyo-EBIT 及び CoBIT の2台ともに同じ光学配置の分光器が設置されている。回折格子には日立ハイテク社製の平面結像型凹面不等間隔回折格子を使用している。また、受光器となる CCD カメラには Princeton Instruments 社の背面照射型 CCD (Charge Coupled Device) カメラ (PIXIS-OX:400B) を使用している。この装置の感光面の大きさはピクセルにおいて 400×1340pixel であり、ピクセルサイズは 20 μ m となっている。Tokyo-EBIT で取得時間 120 分として得られた Ar XIV と Ca XV の EUV スペクトルの内、ビーム電流 15mA で測定したものを図 2.2,2.3 に示す。

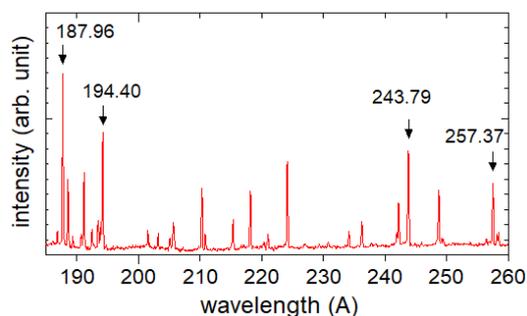


図 2.2 Tokyo-EBIT においてビーム電流を 15mA として取得した Ar XIV の EUV スペクトル

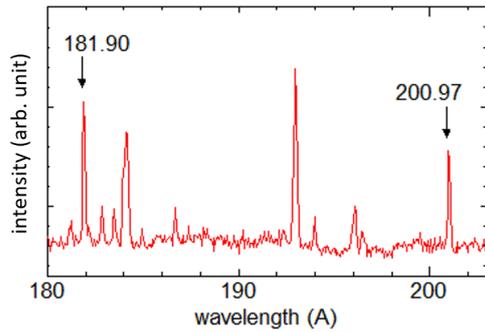


図 2.3 Tokyo-EBIT においてビーム電流を 15mA として取得した Ca XV スペクトル

2.3 電子密度の測定

本研究では、EUV スペクトルの観測による強度比の測定とともに EBIT 内における電子密度を実測する必要がある。ただし、イオンは一般に電子ビームより広い空間分布を持つことが知られている [5]。よって、イオンの感じる実効的な電子密度を導出するにはイオンの広がり (イオン雲) によるオーバーラップを考慮する必要がある。

本研究の場合、例として Ar XIV では、EUV 領域における発光は電気双極子遷移 (E1) 遷移によるものであり寿命は 10^{-10} s 程度であるのに比べ、波長 441nm の遷移は磁気双極子 (M1) 遷移であり、その寿命は 9.6ms にも及ぶ [6] ことから、電子ビーム外で発光するイオンの存在が考えられる。これを考慮してより厳密な電子密度を表す実効電子密度 n_e^{eff} が取り入れられている [7]。実効電子密度を表す式を式 (2.1)[7] として示す。

$$n_e^{\text{eff}} = \frac{4\ln(2)}{\pi(\Gamma_e^2 + \Gamma_i^2)} \cdot \frac{I_e}{ev_e} \quad (2.1)$$

ここで、 Γ_e は電子ビームの空間分布、 Γ_i はイオン雲の空間分布を表す。より厳密に実効電子密度 n_e^{eff} を測定するためには、電子ビーム径 Γ_e 及びイオン雲の径 Γ_i のそれぞれを直接測定する必要がある。よって、本研究では EUV 領域と可視光領域において同時観測を行うことで、電子ビーム径とイオン雲の径を求めた。電子ビーム径の測定には、EUV 領域におけるスペクトル幅やピンホールカメラの原理を用いたイメージングにより得られた像を用いた。これら得られた像に

ガウシアンフィッティングを行った後、受光器のピクセルサイズを用いて線幅に変換することで電子ビーム径が求められる。EUV 分光器およびピンホールカメラの倍率は、それぞれ 0.25 倍および 12.1 倍であった。ただし、Tokyo-EBIT では EUV 領域におけるイメージがビーム径を反映していない可能性が考えられており、更にピンホールカメラによる直接観測が難しいことから、EBIT における電子ビームの径を表す経験式を用いている。この経験式は CoBIT における議論についても用いている。また、磁気双極子遷移のスペクトルが観測される可視領域には、Tokyo-EBIT、CoBIT 共にツェルニ・ターナー型分光器を使用し、回折格子には反射型平面回折格子 (300gr/mm) を、受光器である CCD カメラには Tokyo-EBIT に Princeton Instruments 社の背面照射型 CCD カメラ (PIXIS-OX:400B) が、CoBIT には Andor 社製の背面照射型 CCD カメラ (iDus 416) が使用している。本研究では、イオン雲の径を導出することが目的となるため入射スリットは全開となる 2mm としており、Tokyo-EBIT 及び CoBIT における倍率はそれぞれ 0.85 倍とほぼ等倍であった。

3 結果と考察

3.1 EUV スペクトル及び強度比

Ar XIV の実験において、Tokyo-EBIT 及び CoBIT の電子ビームエネルギーはどちらも 750eV に、電子ビーム電流は Tokyo-EBIT では 5.7 と 15mA に、CoBIT では 15mA に設定した。このとき、Tokyo-EBIT および CoBIT の中心磁場はそれぞれ 1T と 0.05T であった。

Ca XV イオンの生成は、図 2.1 においてピンホールカメラとなっている部分を蒸着セル (K-Cell) に換装した後、セル内部で金属カルシウムを加熱することで気化させ導入することで行った。このとき、K-Cell での加熱温度は Tokyo-EBIT で 600 °C、CoBIT で 450 °C であった。Ca XV の測定において、Tokyo-EBIT 及び CoBIT の電子ビームエネルギーはどちらも 890eV、電子ビーム電流は Tokyo-EBIT では 15mA に、CoBIT では 14mA に設定し、スペ

クトルの取得時間は 120 分とした。このとき、Tokyo-EBIT および CoBIT の中心磁場はそれぞれ 1T と 0.056T であった。

強度比のエラーは、フィッティングエラーと CCD における感度補正や回折格子の回折効率を考慮したものを表示している。CCD で取得されるカウント数は受光面に到達した光子のエネルギーに依存する。Ar XIV を例とすると、187.96Å の強度は 194.40Å の強度より 3% 程強く取得されると考えられる。また、CCD カメラの量子効率により 187.96Å の強度が 1% 増加すると決定した。加えて、使用した回折格子における波長ごとの相対効率を示したデータ [8] を用いて、3% 程 187.96Å の強度が増加すると決定した。以上より 187.96Å の強度は 194.40Å の強度より 8% 増強されていることを考慮して補正を行った。

3.2 実効電子密度決定

(I) 電子ビームの空間分布決定

電子ビームの空間分布 Γ_e は、EUV スペクトルの線幅、ピンホールカメラによる直接観測、および経験式よりそれぞれ導出した。ただし、Tokyo-EBIT では経験式のみを用いている。

(i) EUV スペクトル幅による導出

CoBIT の DT2 における電極の間隔は電子ビームの幅に比べて十分に広く、EUV 分光器はスリットを用いない構造となっているため、EUV スペクトルの線幅は全て電子ビーム径を反映しているものと考えられる。よって、スペクトルの線幅は全て同様として考えフィッティングを行っている。

(ii) ピンホールカメラによる導出

CoBIT においては、ピンホールカメラによる電子ビームの直接観測を行っている。ただし、Ca XV の測定では試料導入のためにカメラを取り外したため、測定を行っていない。例として Ar XIV で取得した電子ビームイメージの例を図 3.1 に示す。

(iii) 経験式による導出

電子ビームエネルギーやビーム電流、トラップ領域における中心磁場、電子銃の陰極表面に

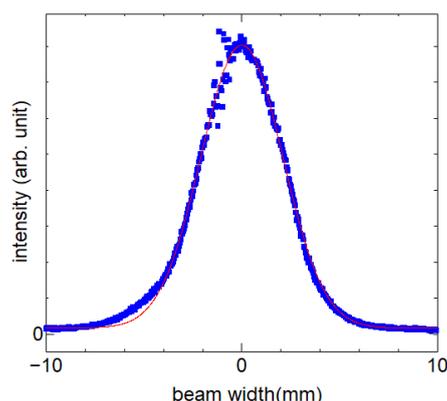


図 3.1 ピンホールカメラによって得られた電子ビームイメージの例。青点が測定点、赤点がフィッティング結果を表している。

における電子温度、陰極の半径といったパラメータが分かれば、EBIT 内の電子ビーム半径は経験式 [9] により求めることが出来る。この経験式を使用した電子ビーム径の導出方法は、直接観測との比較のため CoBIT においても用いた。

(II) イオン雲の空間分布決定

イオン雲の空間分布は、可視光領域における 441nm (Ar XIV)、569nm (Ca XV) の発光の像を求めることにより得た。Ar XIV の測定において得られた像とフィッティング結果を図 3.2 に示す。CoBIT で取得したラインについてはフィッティングを問題なく行えたが、Tokyo - EBIT で取得したラインは単純なガウシアンフィッティングは行うことが出来なかった。しかし、EBIT-I を使用して行われた Fe XII-XIV を対象とした実験 [10] においてイオン雲の測定の際に同じようなラインが観測されており、ここでは半値全幅の違う二つのガウス分布の重なりとして扱われていた。よって、本研究においてもこの方法を適用してフィッティングを行っている。

各電子密度について、最大値と最小値をそれぞれ求めた。Tokyo-EBIT における最大値は電子ビームの空間分布 Γ_e と狭いイオン雲の空間分布 Γ_{i1} を用いて式 (2.4) により求めた値、最小値は電子ビームの空間分布を Γ_{i1} とし二重のガウス分布を考慮した場合に実効電子密度を表す式 [10] を用いた値とした。また、CoBIT における最大値および最小値は、電子ビーム径の測定に

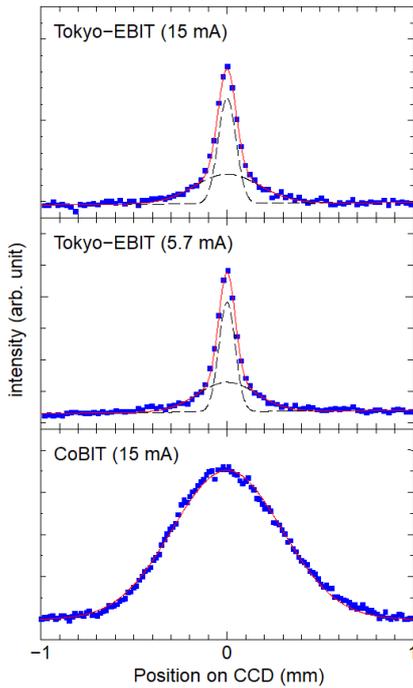


図 3.2 Tokyo-EBIT(上中図) 及び CoBIT(下図) における 441nm のライン観測結果とフィッティング結果。スリットは全開 (2mm) として取得し、横軸は CCD のカタログ値より Tokyo-EBIT では 1pixel=24 μ m、CoBIT では 1pixel=15 μ m として計算した。青点がスペクトル測定点、赤線がフィッティング結果。また、Tokyo-EBIT の観測結果における黒破線はそれぞれ狭い分布と広い分布に対して行ったフィッティング結果を示している。

用いた最大 3 種類の方法よりそれぞれ求めた値により決定した。

以上により得られた Ar XIV の強度比 R と実効電子密度 n_{eff} を表 3.1 に、Ca XV における強度比 R および実効電子密度 n_{eff} を表 3.2 に示す。

3.3 CR モデルの評価結果および考察

以上の結果を元に、Ar XIV および Ca XV のそれぞれについて実験的に求めた強度比の電子密度依存性を用いて CR モデル計算値を評価した。Ar XIV についての結果を図 3.3 に、Ca XV についての結果を図 3.4 に示す。また、CR モデルの計算にはどちらも Flexible Atomic Code(FAC) と呼ばれる原子計算コードを用いており、単色光として計算を行った。太陽大気におけるプラズマの発光は EBIT 内部のような単色光ではなく広い波長領域を持つため、電子のエネルギー分布がマクスウェル分布に従う場合

の Ar XIV の強度比 R_1 を 3,6,9MK の電子温度について CR モデルより計算した結果も図 3.3 中に示している。この結果、高密度領域においては電子温度による強度比の変化が見られたが、全て同様の電子密度依存性を示していた。

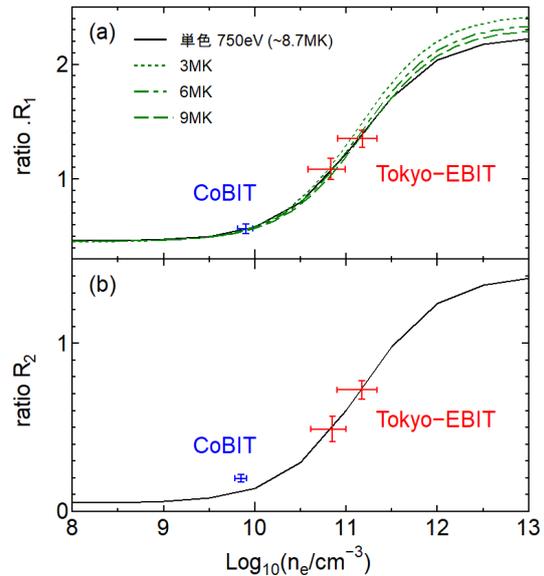


図 3.3 Ar XIV における強度比の電子密度依存性と CR モデルの評価結果。上図が $R_1 = I_{187.96}/I_{194.40}$ における評価結果、下図が $R_2 = I_{257.37}/I_{243.79}$ における評価結果を示している。赤線が Tokyo-EBIT における強度比の電子密度依存性であり、高密度側がビーム電流を 15mA、低密度側が 5.7mA とした場合の実験結果である。また、青線が CoBIT における強度比の電子密度依存性であり、黒実線が CR モデルを用いて Ar XIV の強度比の電子密度依存性を計算した結果である。また、 R_1 については図中に電子密度分布がマクスウェル分布に従い、電子温度が 3,6,9MK のそれぞれにおける CR モデルの計算結果を緑線で示している。

今回の評価において、Tokyo-EBIT における電子ビームの空間分布測定に経験式のみを用いていることや、CoBIT において電子ビームの径の見積もりに差があるといった課題は残っているが、Ar XIV と CaXV の両方において Tokyo-EBIT と CoBIT のどちらにおける実験値も理論値に対して良い一致を示したといえる。このことから、太陽フレアの観測で必要とされる 3.0×10^6 K 以上の温度領域について Ar XIV および Ca XV のラインに対して CR モデルを用いた電子密度診断が有用であると言える。

表 3.1 Ar XIV の実験により得られた強度比および実効電子密度の一覧

装置	R_1	$\log_{10} n_{\text{eff}}$	R_2	$\log_{10} n'_{\text{eff}}$
Tokyo-EBIT(15mA)	1.35 ± 0.07	10.9 - 11.3	0.72 ± 0.06	10.9 - 11.3
Tokyo-EBIT(5.7mA)	1.09 ± 0.09	10.6 - 11.0	0.49 ± 0.08	10.6 - 11.0
CoBIT(15mA)	0.58 ± 0.04	9.89 - 9.97	0.20 ± 0.02	9.78 - 10.4

表 3.2 Ca XV の実験により得られた強度比および実効電子密度の一覧

装置	R	$\log_{10} n_{\text{eff}}$
Tokyo-EBIT(15mA)	1.30 ± 0.20	11.64 - 11.81
CoBIT(14mA)	0.31 ± 0.14	10.08 - 10.11

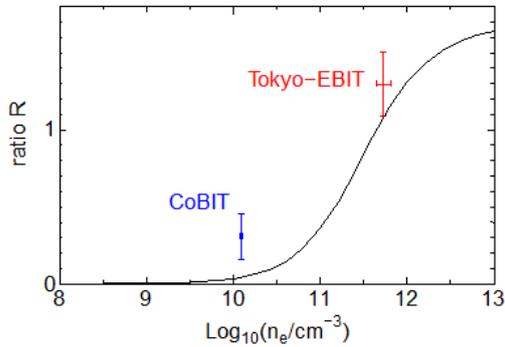


図 3.4 Ca XV における強度比の電子密度依存性と CR モデルの評価結果。赤線が Tokyo-EBIT における強度比の電子密度依存性であり、青線が CoBIT における強度比の電子密度依存性である。黒実線は CR モデルを用いて Ar XIV の強度比の電子密度依存性を計算した結果である。

4 結論

本研究では、EBIT と呼ばれる多価イオン観測装置を用いて、天体プラズマの電子密度診断に用いられる衝突輻射モデルの評価を行った。評価を行うため、Tokyo-EBIT と CoBIT と呼ばれる 2 台の装置を用いて、電子密度に敏感である準安定状態への遷移を含む Ar XIV のスペクトルおよび Ca XV のスペクトルを取得し、基底状態への遷移に対する準安定状態への遷移における強度比を求めた。それと同時に多価イオンのトラップ領域における実効電子密度を求めることで、強度比の電子密度依存性を実験的に取得することで、Flexible Atomic Code と呼ばれる原子コードを用いて衝突輻射モデルにより計算された電子密度依存性の理論値を比較し評

価を行った。この結果、Ar XIV と Ca XV のどちらにおいても Tokyo-EBIT および CoBIT における実験値と理論値は良い一致を示しており、 $3.0 \times 10^6 \text{K}$ 以上の温度領域について Ar XIV および Ca XV のラインに対して CR モデルも用いた天体プラズマの電子密度診断が有用であることが結論付けられた。

参考文献

- [1] Takenori J. Okamoto et al. (2015) ApJ 809 71
- [2] P.R. Young et al. (2008) A&A 495 600
- [3] P. L. Dufton et al. (1990) ApJ 353 323-328
- [4] N. Nakamura (2013) PFR 8 1101152-2
- [5] J. D. Gillaspay et al. (1995) Physica Scripta. T59 392-395
- [6] A. Lapierre et al. (2006) PRA 73 052507
- [7] E. Shimizu et al. (2017) A&A 601 A111
- [8] B. Tu et al. (2017) AIP Adv. 7 045219
- [9] M. A. Levine et al. (1988) Physica Scripta. T22 157-163
- [10] T. Arthanayaka et al. (2020) ApJ. 890 77