

### LHD とひのでの非平衡電離プラズマ研究における鉄イオン分光モデルの 検証

#### Validation of spectroscopic model of Fe ions for non-equilibrium ionization plasma study in LHD and HINODE

村上泉<sup>1</sup>、渡邊鉄哉<sup>2</sup>、鈴木千尋<sup>1</sup>、森田繁<sup>1</sup>、田村直樹<sup>1</sup>、山本則正<sup>3</sup>、加藤太治<sup>1</sup>、坂上裕之<sup>1</sup>、  
原弘久<sup>2</sup>、中村信行<sup>4</sup>、須藤滋<sup>1</sup>

I. Murakami<sup>1</sup>、T. Watanabe<sup>2</sup>、C. Suzuki<sup>1</sup>、S. Morita<sup>1</sup>、N. Tamura<sup>1</sup>、N. Yamamoto<sup>3</sup>、D. Kato<sup>1</sup>、  
H. A. Sakaue<sup>1</sup>、H. Hara<sup>2</sup>、N. Nakamura<sup>4</sup>、S. Sudo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>核融合研、<sup>2</sup>天文台、<sup>3</sup>中部大、<sup>4</sup>電通大  
<sup>1</sup>NIFS, <sup>2</sup>NAOJ, <sup>3</sup>Chubu Univ., <sup>4</sup>Univ. Electro-Communications

太陽遷移層は、太陽の彩層とコロナの間にある電子温度・密度が急激に変化する領域で、このプラズマの挙動解明は、高温希薄な太陽コロナの加熱機構の解明にとって重要な役割を果たす。2006年9月に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」は、太陽コロナの加熱機構解明を目指し、可視光磁場望遠鏡 (SOT)、X線望遠鏡 (XRT)、そして、極端紫外分光撮像装置 (EIS) を搭載し、これらを用いて、光球の微細磁束管の様子、高温コロナガスの加熱状態の観測、そして極端紫外 (EUV) 領域の分光撮像計測によってプラズマ物理状態を調べている [1]。これらの観測を統合して太陽プラズマ研究が進められている。

分光計測によってより正確にプラズマの状態を調べるには、スペクトルを解析する分光モデルがより正確である必要がある。我々は、EIS が計測する EUV 領域鉄多価イオン輝線の精度の高いプラズマ分光ツールを開発し、実験室プラズマによる原子データおよび分光モデルの検証を行い、診断精度の向上を行っている。

分光モデル開発にあたり、我々は鉄多価イオンの原子データを HULLAC 原子コード [2] を用いて計算した。陽子衝突励起速度係数、電子衝突励起速度係数については、既存のデータを収集して比較したデータの評価や [3, 4]、より精度の高い計算が期待できる原子コードを用いた理論計算も行った [5-7]。発光線強度を求めめるために、衝突輻射モデルを構築し、HULLAC によって計算したデータや評価した既存データをモデルに適用して、実験データによる検証を

行った [8-10]。

検証には、電子ビームイオントラップ装置 (EBIT) および大型ヘリカル装置 (LHD) を用いた。電子ビームイオントラップ装置では、電子ビームの電場によって多価イオンを捕獲し、低い電子密度状態のプラズマが生成できる。入射する電子ビームエネルギーを制御することによって、生成するイオンの価数をコントロールすることができるため、計測されるスペクトル線の同定が容易で、分光モデルの検証に適している。我々は、EBIT を用いて、Fe XIII, Fe XIV, Fe XV, Fe XXII の発光線強度比の電子密度依存性を計測し、 $10^{10}\text{cm}^{-3}$  付近の電子密度における分光モデルの検証を行った [9, 11, 12]。

LHD では、太陽遷移層と類似した電子温度のプラズマを生成でき、不純物入射に対しても安定した状態を保ち、電子温度や電子密度が精度よく計測できるため、分光モデルの検証に適している。電子密度は EBIT よりも高い領域の分光モデルの検証ができる [10, 11]。

我々は、LHD プラズマにトレーサー内蔵ペレット (TESPEL) 等で鉄を導入して分光計測を行い、発光線強度比について計測値と理論モデルとを比較した。Fe XIII と Fe XXII の発光線強度比の電子密度依存性を検証し、それを適用して EIS で計測した太陽活動領域の Fe XIII 発光線強度比から電子密度の空間分布を調べた [8, 9]。LHD プラズマでの Fe XXII 発光線強度比からは、陽子・電子密度比の局所時間変化を調べることができた [10]。

太陽の高温活動領域の指標となる Fe XVII 発

光線を LHD プラズマで計測し、検証を行った。特に、2本の発光線 20.465nm と 25.487nm は、発光線の上準位が共通であるため強度比が分岐比によって決まり、電子温度には依存しない。この強度比は、理論値は 1 であるが、EIS による太陽プラズマでの観測値は 2 以上あり、電子温度依存性も示し、一致しなかった。この不一致が、理論原子物理計算に起因するのか、あるいは、EIS の計測の問題なのか、検証を行った。この発光線は非常に弱く、EBIT 装置ではまだ検出に成功していない。

LHD で計測したこの 2本の発光線を図 1 に、強度比を図 2 に示す。図 2 で示すように、プラズマ中心の電子温度が低くなると 1 より大きくなる傾向が得られた。計測の視線にある周辺の低温領域からの鉄イオン発光線(Fe XIII 20.426nm, 20.495nm)が分解できず、中心電子温度が低くなると Fe XIII の相対的な寄与が強度比を大きくしていると考えられる。その寄与分を評価して取り除くと Fe XVII の強度比は、理論計算値に近く、おおよそ理論値を支持する結果を得た。このほか、25nm より長波長側にある Fe XVII 発光線の強度比も理論値に近い結果を示している。

EIS の計測では、これら Fe XIII 発光線はスペクトル上、分離されており、強度比の電子温度依存性を説明することはできない。従って、今後、EIS の問題として、感度補正などの見直しが必要となってきた。

LHD プラズマ実験では、今後も引き続き、ほかの鉄イオンの原子データ・分光モデルの検証を進め、太陽と実験室プラズマの共通分光ツールとして整備し、太陽遷移層プラズマや LHD プラズマの物理過程の研究へとつなげていく予定である。

## References

- [1] T. Watanabe and the EIS Team, Plasma and Fusion Res., 2 (2007) S1011 (6pp).
- [2] A. Bar-Shalon *et al.*, J. Quant. Spect. Rad. Transf. 71 (2001) 179.
- [3] I. Skobelev, I. Murakami, T. Kato, Astron. Astrophys. 511 (2010) A60.
- [4] I. Murakami, *et al.*, accepted to IAEA Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion (2010).
- [5] K. M. Aggarwal *et al.*, Astron. Astrophys., vol. 460 (2006) pp.331-337.
- [6] A. D. Ulantsev and I. Murakami,

NIFS-DATA-111 (2010).

- [7] P. Jönsson *et al.*, NIFS-DATA-113 (2011).
- [8] N. Yamamoto *et al.*, Astrophys. J., 689 (2008) 646.
- [9] T. Watanabe *et al.*, Astrophys. J., 692 (2009) 1294.
- [10] I. Murakami *et al.*, Plasma Fusion Research, 5 (2010) S2021 (4pp).
- [11] H. A. Sakaue *et al.* Appl. Phys. 109, (2011) 073304 (9pp).
- [12] N. Nakamura *et al.*, Astrophys. J., 739 (2011) 17 (5pp).

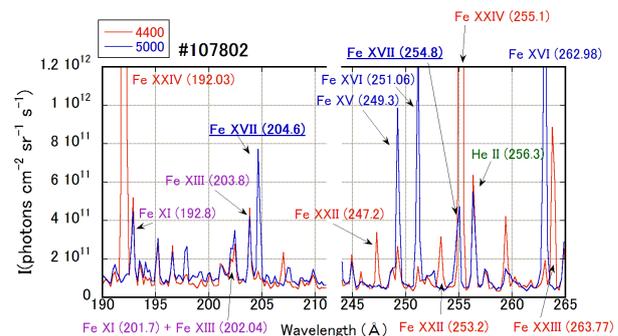


図 1 LHD で計測した EUV スペクトル。4400ms 時 (赤線) は中心電子温度が高く Fe XXIV 等、価数の高い鉄イオンからの発光線が見えているが、中心電子温度が 1keV より下がった 5000ms (青線) ではそれらは弱くなり、Fe XVII 発光線 20.46nm と 25.48nm が同定された。

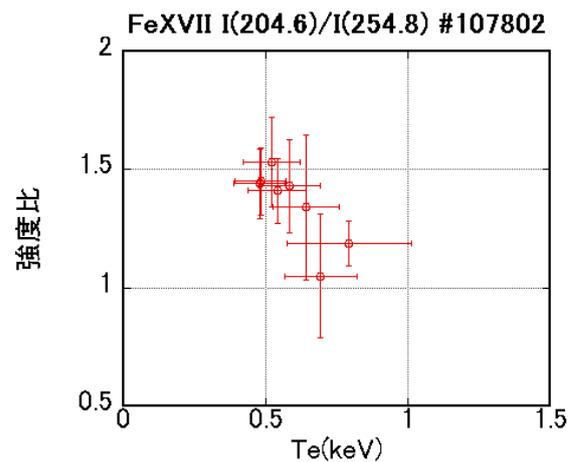


図 2 Fe XVII 20.46nm と 25.48nm の強度比と中心電子温度との相関。Fe XIII の補正前の計測値を示す。