

機関番号：14401

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740397

研究課題名 (和文) 実験室太陽模擬プラズマを用いた非平衡放射モデルの開発

研究課題名 (英文) Development of non-equilibrium plasma model with laboratory solar-like plasma

研究代表者

山本 則正 (YAMAMOTO NORIMASA)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究中心・特任研究員

研究者番号：40350326

研究成果の概要 (和文)：

本研究の目的は、太陽プラズマを模擬した地上実験の結果を用いて、非平衡放射モデルを開発することである。核融合科学研究所 (NIFS) の大型ヘリカル装置 (LHD) と電子ビームイオントラップ (EBIT) を用いた模擬実験を遂行し、対応する放射モデルの開発及び、実験データの解析を行った。その中で、実験データを十分に解析できるモデルの構築を行うことができた。より一般的な非平衡モデルへ発展させるための基礎モデルが、十分な精度で開発することができた。

研究成果の概要 (英文)：

The subject of this research is developments of non-equilibrium plasma model with the obtained data of solar plasma-like laboratory experiments. In this research, experiments with large helical device (LHD) and electron beam ion trap (EBIT) in National Institute for Fusion Science (NIFS) were carried out and plasma model of these was developed. Experimental data was analyzed by the model. Therefore, the more general non-equilibrium model was able to develop a basic model to develop it with enough precision.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	563,302	210,000	773,302
年度			
年度			
年度			
総計	2,263,302	720,000	2,983,302

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：衝突輻射モデル、太陽プラズマ、模擬実験

1. 研究開始当初の背景

2006 年 9 月 23 日に日本の太陽観測衛星 HINODE (Solar-B) が内之浦で打ち上げられた。HINODE 衛星は、コロナ加熱メカニズムの解明、強磁場形成の解明、さらに太陽フレアのトリガーの解明を科学的ミッションとして打ち上げられた。これらの物理現象を解明するために、HINODE には 3 つの計

測器が搭載されている。可視光磁場望遠鏡 (SOT)、極端紫外線撮像分光器 (EIS)、X 線望遠鏡 (XRT) である。SOT は、温度域として光球・彩層からの可視域の発光線に現われるゼーマン効果から磁場強度を計測し、各種発光線計測から三次元磁場構造を構成することができる。EIS は、 $\lambda/\Delta\lambda \sim 4000$ の非常に高い波長分解能を有し、EUV 発光線形状の観

測から、遷移層・コロナ領域の速度場が計測できる。加えて、観測域 (170-210Å と 250-290Å) で多数観測される鉄イオン線 (FeVIII-FeXXIV) から電子密度や微分エミッションメジャーの推定などのプラズマ診断を行うことができる。XRTはコロナ域を観測しコロナの構造を計測出来る。先に挙げた3つの科学的ミッションは、SOT、EIS、XRTの3つの検出器を用いた複合的観測及び解析を持って成し遂げられると期待されている。本研究では、特に太陽コロナの加熱メカニズムの解明に注目する。

2. 研究の目的

太陽は、光球ではよく知られている 5-6000 度の温度であるが、その外側に向かって温度が急激に上昇し(遷移層)、最終的に数 100 万度のコロナを形成するに至る。このコロナ形成に至る加熱メカニズムは、現在でも解明されていない太陽物理の最重要課題である。X線を放射するコロナの形成は、太陽だけでなく、宇宙に数多存在する恒星の X線放射メカニズムの理解に直結することからも非常に重要な研究対象であると考えられる。

太陽のコロナ加熱メカニズムを分光学的見地から研究するには、太陽プラズマからのスペクトル線解析を行うためにも、電離非平衡放射モデルの開発は必須である。電離非平衡とは、電離平衡でのプラズマ中のイオン密度比が電離過程と再結合過程の釣り合いにより決定されるのに対して、その釣り合いが成立していない状況を意味する。太陽プラズマで電離平衡からの逸脱が期待される理由として、温度・密度分布の存在と、プラズマ粒子の拡散が挙げられる。

コロナ加熱メカニズムの解明には、EISの観測結果を反映させるプラズマ中の原子過程を詳細に取り扱った放射モデルと、SOTとXRTの観測結果を反映させるプラズマ粒子の運動の効果、両者を結合した非平衡放射モデルが不可欠である。更に高精度の計測器の結果に耐えるにはモデルの高精度化も重要で、そのため太陽模擬プラズマ実験に基づいたモデル開発を行う。

3. 研究の方法

本研究で進める非平衡放射モデルの開発は、先ず電離平衡衝突放射モデルの開発を経て行なう。衝突放射モデルとは、衝突励起や放射遷移等の様々な原子過程における反応速度から、時々刻々の、もしくは定常的なプラズマ中イオンが、ある特定の電子状態にある占有密度を求めるモデルである。以下の項目を重点的に進める。

(1) 電離平衡モデルの整備

非平衡放射モデルの基礎モデルとなる電離平衡モデルの検証を行う。

(2) 原子データの改善

原子データのうち最も重要なものは、スペクトル線強度に直接関わってくる電子衝突励起断面積と放射性遷移率である。核融合科学研究所の原子分子データ研究室の村上氏に協力を求める。

(3) プラズマ装置を用いた模擬実験

非平衡プラズマのモデルを、解析において実用に耐えるモデルにまで突き詰めて開発するには、模擬実験を行い、モデルへ適用することが最も良いと考える。核融合研 LHD への鉄ペレット入射実験で、EUV スペクトル線計測を行なっている。LHDを用いた計測は、電子温度・密度分布が時間分解能を持って常に計測されており、非平衡プラズマの解析を行うには最適な装置である。また、電通大の EBIT 実験を、100-2000eV の低エネルギー電子実験を狙った Compact-EBITを用いて EUV 分光計測を行う。

(4) 一次元非平衡放射モデルへの拡張

非平衡プラズマでは、プラズマ粒子の拡散項が重要になってくるため、この項を取り入れたモデル開発に発展させる。

4. 研究成果

本研究の成果として、電離平衡衝突放射モデルの高精度化を行い、模擬実験データの解析によるモデルおよび原子データの評価を行った。また粒子拡散項を含むことによる一次元不純物輸送計算のToyモデルまで構築することが出来た。更に予定していた光電離過程の算入による非平衡光電離プラズマへの応用の可能性を議論した。理論部分では自然科学研究機構核融合科学研究所の村上氏と、模擬実験部分では同研究所の坂上氏や電気通信大学の中村氏と協力して遂行した。非平衡モデルの基礎部分を用いた模擬実験の解析により、鉄イオンプラズマ及び光電離プラズマに関する研究発表を行った。電子イオンビームイオントラップ (EBIT) を用いた模擬実験の解析結果の一つは現在論文投稿中である。以下、投稿論文をもとに各成果を報告する。

(1) Fe XIII-XV (現在投稿中)

EBIT による模擬実験の結果取得した FeXIII-FeXV のスペクトル (図 1 参照) を、相当する放射モデルを開発し、解析を行った。Fe XIII では、ライン強度比 203.8A/202.0A と 200.0A/202.0A、FeXIV では 264.8A/274.2A と 219.1/211.3 と 270.5 274.2、FeXV では 233.9A/243.8A を解析した (図 2 参照)。その結果、実験データをよく再現するモデルの構築を行うことができた。また、FeXV では、モ

デル計算との不一致も見られるなど、実験及びモデル計算における今後の課題が見出された。

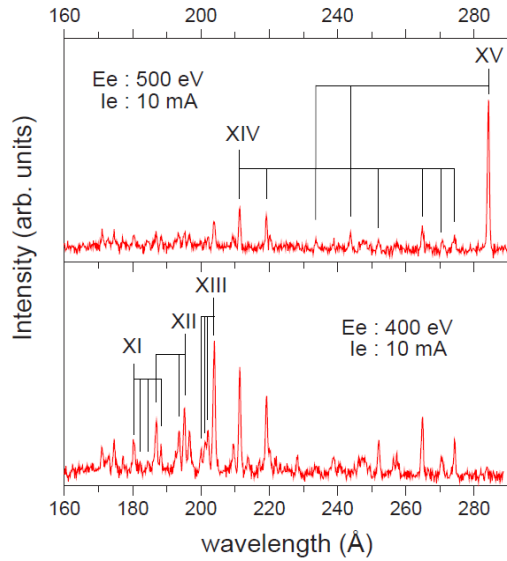


図1 EBITの電子エネルギー500eVと400eVのスペクトル。

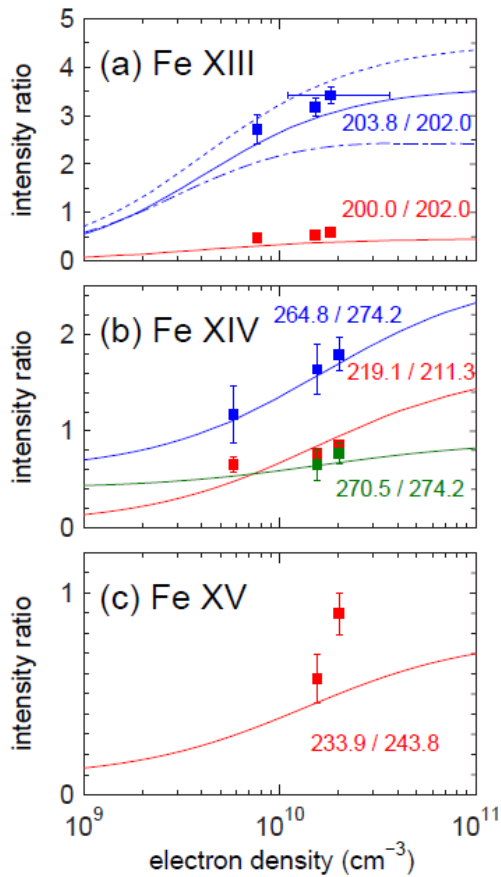


図2 Fe XIII のライン強度比 203.8A/202.0A と 200.0A/202.0A、Fe XIV の 264.8A/274.2A と 219.1/211.3 と 270.5 274.2、Fe XV の

233.9A/243.8A、各ライン強度比とモデル計算との比較。

(2) Fe XXII (投稿済論文)

LHDとEBITによる模擬実験の結果取得したFeXXIIのスペクトル(図3参照)を、相当する放射モデルを開発し、解析を行った。特に、電子密度に依存する、114.4Aと117.1Aのライン強度比に注目して解析を進めた(図4参照)。その結果、実験結果をよく再現するモデルの構築を行うことができ、各時刻の密度診断まで行うことができた。

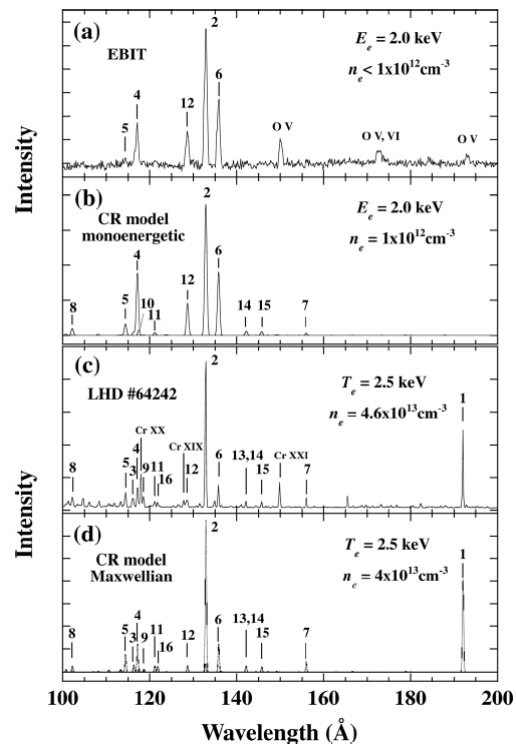


図3 LHD、EBIT、モデル計算のスペクトル。

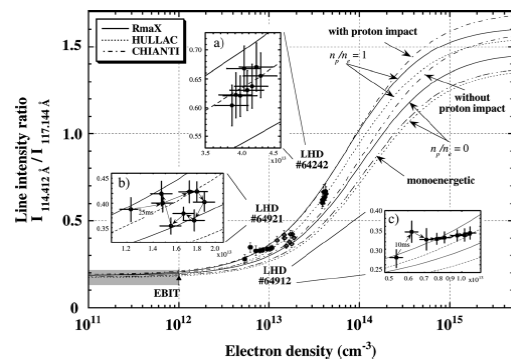


図4 $2s2p^2\ ^2P_{3/2} \rightarrow 2s2p^2\ ^2P_{3/2}$ (114.412 A) と $2s2p^2\ ^2P_{1/2} \rightarrow 2s2p^2\ ^2P_{1/2}$ (117.144 A) のライン強度比のLHD、EBIT、モデル計算との比較。

(3) Fe XXI (投稿済論文)

FeXXIIと同様に、FeXXIに対してもLHD実験結果の解析を行った。

(4) 光電離プラズマ (投稿済論文)

非平衡放射モデルとして、光電離プラズマを扱うことも応用として考えていた。特に光電離前の予備プラズマのモデル開発及び、光電離過程算入のための、素過程反応速度の計算手法の検討を行った。

模擬実験としては、協力者と核融合研の大型ヘリカル装置 (LHD) での鉄ペレット入射実験を実施し、鉄のEUVスペクトル線の計測を行った。特に、幅広い温度域で存在するネオン様鉄イオンからの発光 (Fe XVII) に注目して計測を行った。昨年度の実験では解析した結果、Fe XVIIの計測は出来たが、十分な精度で計測できていなかったため再実験を試みた。現在、その解析途中である。今後、本研究で構築したモデル及び、得られた知見を生かすことで、これまでの模擬実験との比較を更に進め、現在のモデルをさらに発展させる予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

①H. A. Sakaue, N. Yamamoto, S. Morita, N. Nakamura, C. Chen, D. Kato, H. Kikuchi, I. Murakami, S. Ohtani, H. Tanuma, T. Watanabe and H. Tawara, "Electron density dependence of intensity ratio for FeXXII EUV emission lines arising from different ground levels in Electron Beam Ion Trap and Large Helical Device", Applied Physics (2011) 印刷中 査読有

②N. Yamamoto, S. Fujioka, H. Nishimura, D. W. Salzmänn, F. Wang, Y. Li, Y. Zhang, S. Wang, Q-L. Dong, J. Zhong, J. Zhang, Y-J. Rhee, Y-W. Lee, J-M. Han, D. Kwon, G. Zhao, K. Mima, H. Takabe, "X-ray Spectroscopy of Non-thermal Equilibrium Laboratory Photo-ionized Plasma", Journal of Physics: CS244 (2010), 042013-042016 査読有

③I. Murakami, H. A. Sakaue, N. Yamamoto, D. Kato, S. Morita and T. Watanabe, "Analysis of FeXXI Spectral Lines Measured in LHD Plasma", Plasma and Fusion Research: RA5 (2010), S2021-2024 査読有

有

[学会発表] (計7件)

①山本則正, "ひのちによる太陽プラズマ研究と原子分子過程", プラズマ・核融合学会第26回年会, 2009.12.1, 京都市国際交流会館

② 山本則正, "X-Ray Spectroscopy of Non-Thermal-Equilibrium, Laboratory Photo-Ionized Plasma", The Sixth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2009) 2009.9.7, InterContinental Hotel in San Francisco (米国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 則正 (YAMAMOTO NORIMASA)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員

研究者番号: 40350326