

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14314

研究課題名(和文) 極端紫外線・軟X線撮像分光観測を用いた太陽フレアにおける加速電子診断法の確立

研究課題名(英文) Development of procedures to diagnose nonthermal electrons in solar flares via ultraviolet and soft x-ray line spectroscopy

研究代表者

川手 朋子 (Kawate, Tomoko)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・招聘研究員

研究者番号：10647100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で得られた主たる成果は次の3つである。(1)原子データをインプットとして任意の電子エネルギー分布に対する輝線スペクトル強度を計算できる環境が構築された。(2)計算手法をもとに大型ヘリカル装置で得られた軟X線輝線スペクトルを解析し、高エネルギー電子の割合を導出することにより、加速電子診断手法の妥当性を評価した。(3)提案中の次期太陽観測望遠鏡Solar-C_EUVSTの計測波長帯において非熱的プラズマ診断に適切な輝線を特定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、太陽フレアのみならず衝突プラズマ一般において、過去および将来の紫外線・X線分光観測から高エネルギー電子の定量評価が可能な環境が整ったことが大きな意義となる。ただし、適切な輝線の組み合わせが限られること、またインプットとなる原子データの不定性により高エネルギー電子の誤差推定が難しくなることがあげられる。したがって、さらなる原子過程の理解と理論的・実験的な原子モデルの精度向上が今後の課題として挙げられる。

研究成果の概要(英文)：The major results of this study are as follows; (1) Development of procedures to calculate emission line intensities under arbitrary electron energy distributions by using atomic data. (2) Derivation of fractions of high energy electrons from soft x-ray spectra observed in the large helical device, and confirmation that the developed model is valid with these emissions. (3) Identification of suitable lines for thermal non-equilibrium plasma diagnostics by measurements of the next solar space-borne telescope "Solar-C_EUVST".

研究分野：プラズマ物理

キーワード：太陽物理 原子物理 分光学 粒子加速

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

太陽フレアに伴う粒子加速現象は、フレアのエネルギー解放・散逸過程を理解する上で重要な役割を担っている一方、高エネルギー粒子がどこで・どのように加速されているか、未だ解決されていない問題である。未解決問題であることのひとつの要因として、観測手法が制限されていることが挙げられる。太陽フレアに伴い加速された高エネルギー電子は、一部は磁場に捕捉されジャイロシンクロトロン放射をギガヘルツ帯の電波で放出し、一部は密度の高い彩層に突入し制動放射により硬 X 線を放射する。しかし、電波・硬 X 線の観測は波長帯の制約により直接的な結像が困難であり、電波干渉計や回転式コリメータを用いた撮像による観測となるため、空間分解能が最大で 5 秒角程度に制限される。磁気リコネクションに伴い形成されるプラズマの塊は 3 秒角程度以下と、エネルギー解放から加速に渡る空間スケールを分解するには現在の電波・硬 X 線観測では難しい。

コロナ観測において一般的な極端紫外線・軟 X 線輝線は、熱的電子のほか非熱的電子の情報も含まれ、また結像光学系による 1 秒角程度の観測も可能である。ただし、極端紫外線・軟 X 線は急激な加熱に伴うイオンの熱的非平衡を考慮しなければならず、未だ詳細な電子分布の導出は行われていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、極端紫外線・軟 X 線放射の数値計算、プラズマ実験、太陽観測データを用いて、太陽フレアに伴う高エネルギー電子のエネルギー分布を極端紫外線・軟 X 線分光観測から検出する手法を確立することである。極端紫外線・軟 X 線分光観測から電子エネルギー分布を導出する上で重要となるものが原子データおよび電子・イオンの輸送計算である。極端紫外線・軟 X 線分光観測から高エネルギー電子の分布・輸送過程の導出が可能となれば、1 秒角での加速領域の空間分解が可能となり、粒子の加速・加熱の過程を詳細に理解することができると考えられる。

3. 研究の方法

研究方法は主に下記の 3 項目である。

- (1) 原子データの収集を行う。また原子データをもとに任意の電子分布および粒子輸送に対する放射計算を行う環境を構築する。
- (2) 実験室プラズマにおける検証として、核融合科学研究所との共同研究により、電子温度・電子密度が別途計測されている大型ヘリカル装置中の高エネルギー電子のエネルギー分布を X 線・EUV 輝線分光により推定する。
- (3) 太陽観測データへの適用に向けて、紫外線・軟 X 線分光による電子エネルギー分布を推定する手法について検討し、適切な輝線の組み合わせを特定する。

4. 研究成果

(1) 原子データ収集と輸送・放射計算環境構築

本研究の目的は、熱的非平衡プラズマからの放射を数値計算により導出することである。手法として、原子コード Flexible Atomic Code[1]により計算した原子データ、また論文等で報告されている原子データにより、イオンの各エネルギー状態間の遷移に対する反応断面積を取得する。それをもとに自作の数値計算コードにより任意の電子エネルギー分布関数による遷移確率を計算することで、熱的非平衡プラズマからの放射スペクトルの強度を導出する。また熱・粒子輸送計算に電離・再結合過程を組み込むことで、加熱の時間発展に対する放射スペクトルを計算する。

本研究により任意の電子エネルギー分布における紫外線・X 線スペクトルの放射強度が得られるようになった。ただし課題として、原子データ自体の確度を定めるのが困難であることが挙げられる。特に禁制遷移では原子モデル自体の不定性が大きく、その結果として輝線強度比をもちいた診断結果の誤差を推定することが難しくなる。実験による原子データの検証などにより、原子データの確度を向上させることにより、物理診断結果の精度を向上させることが今後必要となる。

(2) 大型ヘリカル装置における高エネルギー電子診断

本研究の目的は、非マクスウェル分布を持つ電子エネルギー分布をもつ実験室プラズマにおいて高エネルギー電子の割合を推定することで、(1)で得た導出手法を検証することである。核融合プラズマにおいて効率的なプラズマ加熱のためには、高エネルギー粒子とバルクプラズマ

のエネルギー輸送の理解が必須であり、大型ヘリカル装置においても低密度条件において X 線制動放射光の観測から高エネルギー電子の存在が示唆されている [2]。

本研究は 1.85 Å 周辺の 23-24 価の鉄輝線群に着目した。これらの輝線群は、内殻電離・内殻励起・共鳴励起などの高エネルギー電子に感度が高い遷移と、二電子性再結合によるバルク電子の温度にのみ感度を持つ遷移により形成されており、輝線強度比が数 keV 程度の電子エネルギー分布に大きく依存する。これらの輝線を分光計測することにより、非熱的電子の情報を得ることができる。

実験は大型ヘリカル装置において、中性粒子ビーム加熱・電子サイクロトロン加熱の条件を変えながら、ステンレス壁から放出された鉄イオン由来の輝線について、X 線結晶分光器により計測した。またトムソン散乱計測およびミリ波干渉計によりプラズマの電子温度および電子密度の空間・時間分布を計測した。得られた温度・密度を用いて鉄イオン由来の輝線放射の時間・空間変化について原子データをもとに数値的に計算し、熱平衡時の輝線強度の指標とした。その結果、輝線強度比により導出した温度および熱平衡時の温度はそれぞれ異なる値を示した。鉄イオンの密度が電子密度と比例すると仮定した場合、輝線群の強度を説明するためには、2keV 程度のバルクの熱的電子に対して 4-8% 程度の高エネルギー電子が必要となる (図 1)。またプラズマの密度を変化させた実験データを比較した結果、高密度ほど高エネルギー電子の割合は減少する傾向が得られた。この結果は高密度ほど熱緩和しやすいという定性的な傾向と一致し、また導出された高エネルギー電子の割合は X 線制動放射光により導出した先行研究と比較して妥当な値であった。これらにより、本研究の手法から高エネルギー電子が定量評価できていると考えられる。

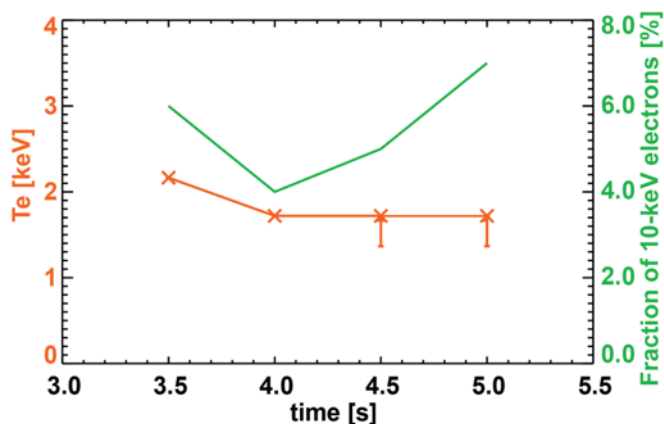


図 1 輝線強度比から導出された物理量の時間変化。バルク電子の温度 (赤)、バルクに対する高エネルギー (10 keV) 電子の割合 (緑)

(3) 太陽観測データに対する検討

太陽研究分野では現在高感度紫外線分光観測衛星 Solar-C_EUVST を提案し、検討している。Solar-C_EUVST は 168 - 220 Å の極端紫外線、460 - 1250 Å の真空紫外線の広波長域を計測することで、プラズマ診断を重点的に行う望遠鏡である。本研究では望遠鏡のベースライン仕様 [3] をもとに、Solar-C_EUVST による熱的非平衡過程の理解をめざして、電子エネルギー分布および陽子温度診断の可能性を検討した。手法は実験室プラズマの解析のものと同様に、高エネルギー電子および陽子を熱平衡時から変化させた場合の強度比の依存性を調査した。その結果、Solar-C_EUVST の観測範囲においては 21 価の鉄 (Fe XXII) からの輝線の強度比を用いることで、熱的非平衡プラズマにおける陽子・電子温度診断が可能であるという示唆が得られた (図 2)。

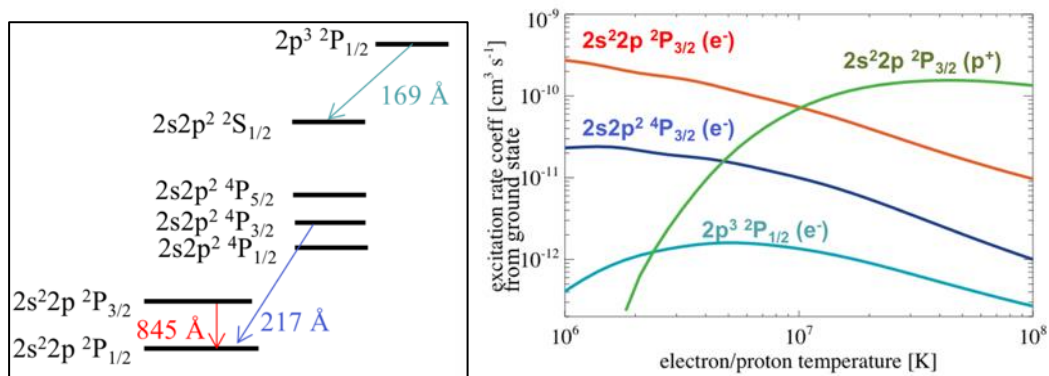


図 2 Fe XXII 輝線のグロトリアン図 (左図)、および電子衝突・陽子衝突に対する衝突励起確率の温度依存性 (右図)

本研究を通して理解されたこととして、過去の太陽観測において熱的非平衡プラズマ診断に適した輝線の組み合わせを取得しているのは、空間分解能のない X 線分光観測、とくに 1980 年代に観測を行っていたひのとり衛星太陽軟 X 線輝線スペクトル観測器(SOX)があげられる。ひのとり衛星 SOX のデータは 2019 年度末に強度校正が完了し、JAXA 宇宙科学研究所ホームページから全データの取得が可能となった。本研究で得られた診断手法を用いて、過去に蓄積された、また将来取得される観測データを詳細に解析することにより、粒子加速過程の理解がより深まると考えられる。

<引用文献>

- [1] Gu, M.F. “The flexible atomic code” Can. J. Phys., 86, 675-689 (2008)
- [2] Muto, S. et al. “First measurement of hard x-ray spectrum emitted from high-energy electrons in electron cyclotron heated plasma of LHD”, RScI, 74, 1993-1996 (2003)
- [3] Kawate, T. et al. “Concept study of Solar-C_EUVST optical design”, SPIE Proc, 11118, 111181N (2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shimizu, Toshifumi; Imada, Shinsuke; Kawate, Tomoko et al.	4. 巻 11118
2. 論文標題 The Solar-C_EUVST mission	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2528240	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kawate, Tomoko; Shimizu, Toshifumi; Imada, Shinsuke; Tsuzuki, Toshihiro; Katsukawa, Yukio; Hara, Hirohisa; Suematsu, Yoshinori; Ichimoto, Kiyoshi; Warren, Harry; Teriaca, Luca; Korendyke, Clarence M.; Brown, Charles	4. 巻 11118
2. 論文標題 Concept study of Solar-C_EUVST optical design	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2527957	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Suematsu, Yoshinori; Shimizu, Toshifumi; Hara, Hirohisa; Katsukawa, Yukio; Kawate, Tomoko; Ichimoto, Kiyoshi; Imada, Shinsuke	4. 巻 11118
2. 論文標題 Development of Solar-C_EUVST structural design	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2529010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shimojo, Masumi; Kawate, Tomoko; Okamoto, Takenori J.; Yokoyama, Takaaki; Narukage, Noriyuki; Sakao, Taro; Iwai, Kazumasa; Fleishman, Gregory D.; Shibata, Kazunari	4. 巻 888
2. 論文標題 Estimating the Temperature and Density of a Spicule from 100 GHz Data Obtained with ALMA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/ab62a5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Macrae, Connor; Zharkov, Sergei; Zharkova, Valentina; Druett, Malcolm; Matthews, Sarah; Kawate, Tomoko	4. 巻 619
2. 論文標題 Lost and found sunquake in the 6 September 2011 flare caused by beam electrons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201832896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tei, Akiko; Sakaue, Takahito; Okamoto, Takenori J.; Kawate, Tomoko; Heinzel, Petr; UeNo, Satoru; Asai, Ayumi; Ichimoto, Kiyoshi; Shibata, Kazunari	4. 巻 70
2. 論文標題 Blue-wing enhancement of the chromospheric Mg II h and k lines in a solar flare	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Anan, Tetsu; Yoneya, Takurou; Ichimoto, Kiyoshi; UeNo, Satoru; Shiota, Daikou; Nozawa, Satoshi; Takasao, Shinsuke; Kawate, Tomoko	4. 巻 70
2. 論文標題 Measurement of vector magnetic field in a flare kernel with a spectropolarimetric observation in He I 10830 A	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawate, Tomoko; Hanaoka, Yoichiro	4. 巻 872
2. 論文標題 Infrequent Occurrence of Significant Linear Polarization in H Solar Flares	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aafe0f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 T. Kawate, T. Shimizu, S. Imada, T. Tsuzuki, Y. Katsukawa, H. Hara, Y. Suematsu, K. Ichimoto, H.P. Warren, L. Teriaca, C. M. Korendyke, C. Brown, B. De Pontieu
2. 発表標題 EUVST instrumental design and observation capability
3. 学会等名 Hinode-13/IPELS（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川手朋子、花岡庸一郎
2. 発表標題 太陽フレアにおけるHa偏光の発生可能性についての観測的検証
3. 学会等名 日本地球惑星連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川手朋子、岡本文典、岩井一正、増田智、下条圭美
2. 発表標題 ALMA観測による太陽大気構造の理解
3. 学会等名 日本地球惑星連合大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoko Kawate, Toshifumi Shimizu, Shinsuke Imada, Toshihiro Tsuzuki, Yukio Katsukawa, Hirohisa Hara, Yoshinori Suematsu, Kiyoshi Ichimoto, Harry Warren, Luca Teriaca, Clarence M. Korendyke, and Charles Brown
2. 発表標題 Concept study of Solar-C_EUVST optical design
3. 学会等名 SPIE（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川手朋子
2. 発表標題 EUVST によるフレア加速粒子診断
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kawate, M. Goto, I. Murakami, T. Watanabe
2. 発表標題 Detection of Non-thermal Electrons in LHD plasmas via Fe-line Spectroscopy
3. 学会等名 International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川手朋子, 阿南徹, 一本潔, 上野悟
2. 発表標題 赤外Ca II線を用いた太陽フレアにおける直線偏光の起源の調査
3. 学会等名 「プラズマ分光計測と原子分子素過程研究の融合最前線」 「原子分子データ応用フォーラムセミナー」 合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kawate, M. Goto, I. Murakami, T. Watanabe
2. 発表標題 Detection of Non-thermal Electrons in LHD plasmas via Fe-line Spectroscopy
3. 学会等名 Eleventh International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications (ICAMDATA 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川手朋子, 後藤基志, 村上泉, 渡辺鉄哉
2. 発表標題 Fe XXVの分光計測によるLHDプラズマにおける非熱的電子の検出
3. 学会等名 原子分子応用データフォーラム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川手朋子
2. 発表標題 EUVSTを用いたフレア加速粒子診断
3. 学会等名 Solar-C_EUVST-SUNRISE-DKISTへの展望
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川手朋子
2. 発表標題 太陽フレアにおける高温プラズマと粒子加速
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理連絡会研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川手朋子
2. 発表標題 鉄イオンの分光計測によるLHDプラズマにおける非熱的電子の検出
3. 学会等名 日本物理学会春季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----