

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00665

研究課題名（和文）彩層からコロナまでの広温度域太陽大気プラズマに実験室から迫る

研究課題名（英文）Laboratory approach to the solar atmospheric plasma with a wide temperature range from the chromosphere to the corona

研究代表者

中村 信行（Nakamura, Nobuyuki）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授

研究者番号：50361837

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,200,000円

研究成果の概要（和文）：研究代表者が所有する多価イオン生成装置電子ビームイオントラップ用に真空紫外分光器を独自に開発し、太陽観測衛星Solar-C_EUVST計画で重要となる多価イオンの分光データを取得することに成功した。特にNe VIIの発光線の観測を行い、新たな方法による電離断面積測定を行った。また、より波長の短い極端紫外域の観測を既存の分光器で行うことにより、太陽コロナ診断において重要となるAr XIV発光線の密度依存性やFe XV発光線の電子エネルギー依存性などを調べ、診断に用いられる衝突輻射モデル計算の評価を行うことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Solar-C_EUVSTを用いて近未来に得られるであろう多価イオンの発光スペクトルを実験室で得ることにより、太陽コロナプラズマ診断のモデル計算を実験室の良く定義されたプラズマにより評価した。将来の太陽観測に資するものであり、その学術的意義は大きい。また、太陽物理、プラズマ物理、原子分子物理という異なる分野間の学際的研究により成果を得たことも学術的意義の一つである。本研究課題において得られた顕著な結果については、電気通信大学によってプレスリリースすることで社会に発信し、反響を得た。

研究成果の概要（英文）：We have succeeded in obtaining spectroscopic data of highly charged ions, which are important for the next-generation solar-observing satellite Solar-C_EUVST, by using a new vacuum ultraviolet spectrometer originally developed for the electron beam ion trap in our laboratory. In particular, measurement of ionization cross section by a new method through the observation of emission lines of Ne VII, which are important for the diagnostics with the Solar-C_EUVST. In addition, by observing extreme ultraviolet lines in the shorter wavelength region with an existing spectrometer, the density dependence of Ar XIV emission lines and the electron energy dependence of Fe XV emission lines, which are important for solar corona diagnostics, were investigated, and the collisional radiative model calculations used for the diagnostics were successfully evaluated.

研究分野：原子分子物理、プラズマ物理

キーワード：多価イオン 太陽コロナ 真空紫外スペクトル プラズマ診断

1. 研究開始当初の背景

太陽表面(光球)の温度が約 6000K であるのに対して、外層大気に相当するコロナは 100 万 K 以上の高温を保っている。しかし、その加熱機構は未だ大きな謎である。また、地球まで届く X 線や高エネルギー粒子を放出する爆発現象フレアの発生を予測することは非常に重要であるが、その機構もやはり謎となっている。「太陽コロナはなぜ高温を保てるのか?」「太陽フレアはどのようにして発生するのか?」これらが本研究の核心を成す最大の学術的「問い」である。その答を見出すべくこれまで様々な研究が推進され、例えば打上げから 10 余年が経過した太陽観測衛星「ひので」(Solar-B)でも多くの成果が得られた。ひのでの最大の成果は、光球とコロナをつなぐ彩層のダイナミックかつ微細な構造を捉えたことである。これにより、彩層のダイナミクスがフレア発生およびコロナ加熱の鍵を握ることが明らかになってきた。そこで、この彩層からコロナへのエネルギー輸送を探るため、全温度層を継ぎ目なく観測することが「問い」に向けた新たな課題として打ち出された。その課題に向け、2025 年の打上げを目指し、観測衛星 Solar-C の計画が進められている。この衛星は、真空紫外から極端紫外線までを観測対象とした EUVST と呼ばれる撮像分光望遠鏡から成る。太陽大気のダイナミクスを高空間・高時間分解能でとらえるため、ひので搭載の極端紫外分光望遠鏡 EIS から解像度・感度・時間分解能ともに大幅に向上させた仕様となっている。また、ひので EIS では 10⁶K 以上のコロナ層のみが対象であったため、17-29nm という狭い波長領域のみを対象としてきたが、Solar-C/EUVST では 10-130nm の広い波長領域の分光診断により、10⁴-10⁷K にわたる彩層からコロナを継ぎ目なく捉えることを目指している。欧米の観測衛星 SOHO でも 70~150nm 領域の観測を行っているが、それと比べても感度、時間分解能が大幅に向上している。

2. 研究の目的

本研究では、太陽大気に近い温度・密度特性を持つ電子ビームイオントラップを用い、元素、電荷状態、電子エネルギー、電子密度の 4 つの軸により太陽大気プラズマを解きほぐした形で実験室に再現し、分光スペクトルを得る。この「良く定義された」実験室プラズマのスペクトルをベンチマークとして、輝線波長や断面積など基礎原子データの計算値を検証・評価しながら、太陽大気を記述する非平衡プラズマモデルを構築する。これら実験とモデルから近未来の太陽観測で得られるスペクトルおよびその診断で起こり得る問題を予見する他、診断に必要なデータ・体制を予め整えることが目的である。これは次期観測計画に向けて求められている急務の課題に応えるものである。

3. 研究の方法

本研究で使用する電子ビームイオントラップは、図 1 に示すように 3 つの円筒電極と超伝導コイルから成るペニング様イオントラップの中心を、高密度電子ビームが貫く構造となっている。トラップされたイオンが電子ビーム衝撃による逐次電離を受け、多価イオンが生成・トラップされる。鉄など金属元素の多価イオンを生成するためには蒸着セル内で金属を加熱し、蒸気として導入する。ネオンなど気体試料の場合には微量ガス流量調整バルブを介して導入する。

トラップされた多価イオンからの発光はイオントラップ中央に開けられたスリットを通して観測することが出来る。我々はこれまで、ひので EIS の観測波長域(17-29nm)をカバーする極端紫外域の分光器を設置し、鉄をはじめコロナに存在する多価イオンのスペクトル観測を行ってきた。本研究では新たに真空紫外分光器を導入することで、Solar-C の観測予定波長域(10-130nm)をカバーし、その波長帯で有用とされている輝線を中心に分光測定を行う。電子ビームイオントラップでは、良く定義された環境下でのベンチマークスペクトルを得ることが可能である。

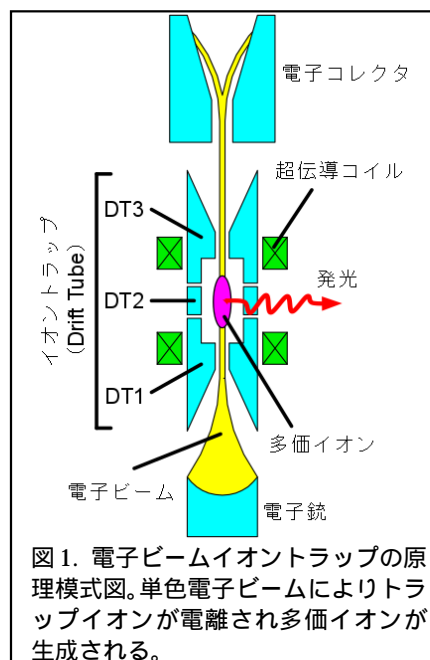


図 1. 電子ビームイオントラップの原理模式図。単色電子ビームによりトラップイオンが電離され多価イオンが生成される。

4. 研究成果

初年度(2019年度)はまず、Solar-C 計画で観測予定波長域(10-130nm)をカバーする新たな真空紫外分光器を電気通信大学の小型電子ビームイオントラップに導入するため、その設計・製作を行った。目的とする波長域を対象とする市販の回折格子分光器もあるが、それらは全て入射スリットを利用するものである。一方、電子ビームイオントラップではスリットをいわずに高効率な測定を行えることが最大の特徴であるため、その特徴を活かす専用の分光器を独自に設計し

た。分光器の検出器としてはマイクロチャンネルプレート（MCP）を5枚用いることで空間分解能を向上させた検出器を選定した。分光器本体は初年度に完成した。並行して核融合科学研究所においては、計算サーバーとファイルサーバーを導入し、原子モデル構築のための体制を整えた。また、核融合科学研究所の電子ビームイオントラップに既存の分光器の検出器のために専用のプリアンプを導入し、電気通信大学に設置予定の分光器に加えて、核融合科学研究所でも真空紫外域のスペクトル観測を行えるよう体制を整えた。

初年度において完成した真空紫外分光器を動作させるための物品がコロナウィルス感染拡大の影響で納品が遅れていたが、2020年度に入って全て揃ったため、それらを組み込んだ上で小型電子ビームイオントラップに接続し、試験運転を行った。その結果、Ar多価イオンの発光線を観測することなどに成功したが、分解能が不十分であることが判明した。原因をレイトレースシミュレーションにより調べた結果、分光器の改良が必要であることが分かった。そのため、改良に必要な部品の設計・製作を行い、2020年度内に改良を完了した。一方、既存の極端紫外分光器では、初年度の実験で課題となっていた電子密度の実測を行うことで、Fe XIIやAr XIVなどの輝線の密度依存性を実験により調べた。弱磁場および強磁場を有する2台の電子ビームイオントラップで実験を行うことにより広範な電子密度にわたる結果を得た。その結果を衝突輻射モデル計算と比較した結果、良い一致が得られることを確認した。この結果については研究会で報告した。Ar XIVについては国立天文台においてHinode EISによるフレア観測結果の解析も進めた。加えて、これまでの研究において実験とモデルの不一致が確認されているFe XVの発光線強度比密度依存性について、不一致の原因を突き止めるべく、核融合研および中部大において詳細なモデル計算を行った。これまでのモデルでは考慮に入れていなかった電離による準安定状態の生成を考慮に入れた計算を行った。

Solar-C_EUVSTによる分光診断で重要となる真空紫外領域を観測するために立ち上げ、2020年度に改良を行った真空紫外分光器を2021年度において小型電子ビームイオントラップに設置し、その性能評価を行った。Solar-C_EUVSTの観測で重要な輝線を持つNe VII多価イオンの発光線の観測に成功し（図2）、分解能や効率に関する評価をすることで分光器の試験を行い、十分な性能が得られていることを確認した。また、太陽フレアなど特に活動的な領域の診断において有用となるAr XIV発光線の密度依存性の観測を2020年度に行ったが、その詳細なモデル計算と解析を行い、その結果（図3）について物理学会で発表した他、Astrophysical Journal誌に投稿し、査読を経た後に掲載された。

最終年度は、Solar-C計画において観測対象としている真空紫外領域において重要となるNe VIIの発光線に注目し、小型電子ビームイオントラップに本研究課題で立ち上げた真空紫外分光器を設置し観測を行った。特に、電子温度評価に重要となる電離断面積測定のため、発光線の経時変化の観測を行った。この結果は多価イオン原子物理国際会議において発表した。また、これまでも着目していた極端紫外領域については、昨年度得られたAr XIV発光線の密度依存データに加え、さらに高温の領域のフレアなど活動的領域の診断に重要となるCa XV発光線の密度依存データを得ることに成功した。この結果もやはり多価イオン原子物理国際会議において発表した。加えて、我々のグループで以前から着目しているFe XV強度比の理論と観測の不一致問題について検討、評価を深めた。これは我々だけでなく、以前の太陽観測でも度々指摘されている問題である。今回、電離の寄与や共鳴の寄与を検討、実験し、その結果を多価イオン原子物理国際会議で発表する他、Astrophysical Journal誌にも投稿し掲載された。

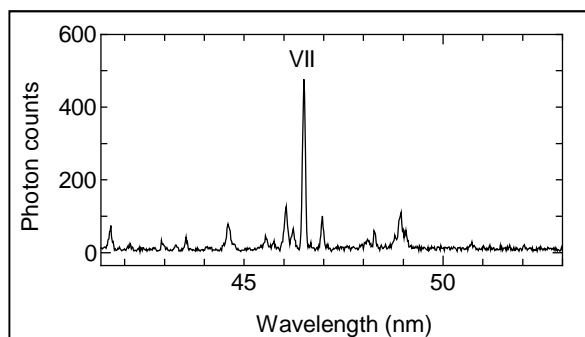


図2. 本研究課題において新規製作した真空紫外分光器で測定したNe VIIのスペクトル。将来のSolar-C_EUVSTにおける観測において重要とされている輝線の一つを実験室で観測することに成功した。

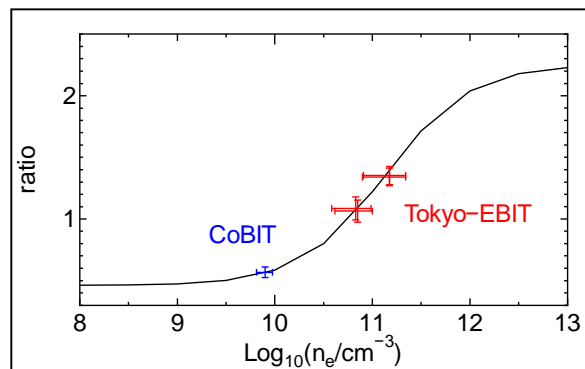


図3. 太陽コロナの中でも特にフレアなどの活動領域で重要な密度診断の指標となるAr XIV発光線強度比の密度依存性（赤、青が本研究による実験値）、実験室のよく定義されたプラズマで診断に使用する衝突輻射モデル計算（実線）を評価した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sakaue Hiroyuki A., Kato Daiji, Yamamoto Norimasa, Murakami Izumi, Hara Hirohisa, Nakamura Nobuyuki	4. 巻 943
2. 論文標題 Energy Dependence of the Line Ratio $I(233.9 \text{ ?})/I(243.8 \text{ ?})$ in Fe xv Observed with an Electron Beam Ion Trap	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 14-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aca895	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kambara Nagaaki, Kawate Tomoko, Oishi Tetsutarou, Kawamoto Yasuko, Sakaue Hiroyuki A., Kato Daiji, Nakamura Nobuyuki, Hara Hirohisa, Murakami Izumi	4. 巻 9
2. 論文標題 Evaluation of Fe XIV Intensity Ratio for Electron Density Diagnostics by Laboratory Measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 60-1~18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms9030060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nakamura Nobuyuki, Numadate Naoki, Sakaue Hiroyuki A.	4. 巻 90
2. 論文標題 A Wide Vacuum Ultraviolet Range Spectrometer for Use with an Electron Beam Ion Trap	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114301-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.114301	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 Nakamura Nobuyuki, Numadate Naoki, Kono Yasutaka, Murakami Izumi, Kato Daiji, Sakaue Hiroyuki A., Hara Hirohisa	4. 巻 921
2. 論文標題 Electron Density Dependence of Extreme Ultraviolet Line Intensity Ratios in Ar XIV	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 115-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1c6f	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 Era Shota, Kato Daiji, Sakaue Hiroyuki A., Umezaki Toshiki, Nakamura Nobuyuki, Murakami Izumi	4. 巻 9
2. 論文標題 Emission Lines in 290-360 nm of Highly Charged Tungsten Ions W20+-W29+	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 63-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms9030063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masashi Monobe, Hiroyuki A. Sakaue, Daiji Kato, Izumi Murakami, Hirohisa Hara, Tetsuya Watanabe, Nobuyuki Nakamura	4. 巻 49
2. 論文標題 Resonant electron impact excitation of highly charged Fe ions studied with a compact electron beam ion trap	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 X-ray spectrometry	6. 最初と最後の頁 511-514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/xrs.3148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Norimasa Yamamoto, Hiroyuki A. Sakaue, Daiji Kato, and Nobuyuki Nakamura
2. 発表標題 Detailed analysis of atomic processes relevant to the line intensity ratio of FeXV(233.9A/243.8A) in a compact electron beam ion trap
3. 学会等名 20th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masayoshi Hosoya, Daiji Kato, Nobuyuki Nakamura
2. 発表標題 Observation of vacuum ultraviolet transitions relevant to astrophysical plasmas with a compact electron beam ion trap
3. 学会等名 20th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasutaka Kono, Norimasa Yamamoto, Daiji Kato, Hiroyuki A. Sakaue, Izumi Murakami, Hirohisa Hara, Nobuyuki Nakamura
2. 発表標題 Observation of extreme ultraviolet spectra relevant to the electron density diagnostics of solar corona active regions
3. 学会等名 20th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuyuki NAKAMURA
2. 発表標題 Plasma atomic processes studied with two complementary electron beam ion traps in Tokyo
3. 学会等名 The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC31) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村信行
2. 発表標題 電子ビームイオントラップを用いた多価イオンの真空紫外分光
3. 学会等名 原子分子データ応用フォーラムセミナー
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神原永昌, 川手朋子, 大石鉄太郎, 川本靖子, 坂上裕之, 加藤太治, 中村信行, 原弘久, 村上泉
2. 発表標題 電子密度診断に用いるMg VII輝線強度比の衝突輻射モデルの構築、及び評価
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河野泰隆, 沼館直樹, 大野望海, 坂上裕之, 加藤太治, 村上泉, 原弘久, 中村信行
2. 発表標題 Ar XIVにおけるEUV発光線強度比の電子密度依存性
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本則正, 加藤太治, 坂上裕之, 中村信行
2. 発表標題 FeXV (233 A/243 A) 線強度比の密度依存性
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Nakamura
2. 発表標題 Spectroscopic studies of heavy ions relevant to astrophysics
3. 学会等名 RIKEN r-EMU workshop
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細谷征由, 河野泰隆, 坂上裕之, 加藤太治, 村上泉, 原弘久, 中村信行
2. 発表標題 多価イオンの極端紫外域発光線の強度比測定
3. 学会等名 原子衝突学会第46回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野泰隆, 細谷征由, 沼館直樹, 坂上裕之, 加藤太治, 村上泉, 原弘久, 中村信行
2. 発表標題 太陽フレアの密度診断に有用なEUV発光線強度比の測定
3. 学会等名 原子衝突学会第46回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野泰隆, 沼館直樹, 大野望海, 坂上裕之, 加藤太治, 村上泉, 原弘久, 中村信行
2. 発表標題 電子ビームイオントラップによる多価イオンEUVスペクトル強度比の電子密度依存性
3. 学会等名 原子分子データ応用フォーラムセミナー
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>【ニュースリリース】太陽コロナを実験室から探る https://www.uec.ac.jp/news/announcement/2022/20220301_4227.html https://www.uec.ac.jp/about/publicity/news_release/2022/pdf/20220301_4227.pdf</p> <p>研究室ホームページ http://yebisu.iis.uec.ac.jp/nakamura/</p>
--

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
研究分担者	原 弘久 (Hara Hirohisa) (20270457)	国立天文台・SOLAR-Cプロジェクト・教授 (62616)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	村上 泉 (Murakami Izumi) (30290919)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授 (63902)	
研究分担者	坂上 裕之 (Sakaue Hiroyuki) (40250112)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	
研究分担者	山本 則正 (Yamamoto Norimasa) (40350326)	中部大学・工学部・准教授 (33910)	
研究分担者	加藤 太治 (Kato Daiji) (60370136)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関