

大学院教育支援機構（DoGS）海外渡航助成金 報告書

Outcome report

計画名 Plan	コロラド大学ボルダー校訪問及び AGU25 Annual Meeting での研究発表
氏名 Name	井上峻
研究科・専攻・学年 Graduate school/Division/Year level	理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 博士後期課程 2年
渡航国 Country	米国
渡航日程 Travel schedule	2025年12月10日～2025年12月20日

- ページ数に制限はありません。No limits on the number of pages
- 写真や図なども組み込んでいただいて結構です。You can include pictures or illustrations.
- 各項目について具体的に記述してください。Please fill in each item specifically.
- 日本語または英語で記載ください。Please use Japanese or English.

渡航計画の概要 Outline of the travel plan

Fe K α 輝線 (6.4 keV) は、太陽・恒星フレアの X 線スペクトルにしばしば観測される、中性～低電離の鉄輝線である。本輝線の起源は、フレアループからの X 線による光球の光電離に起因するのか、あるいはフレアループ内で加速された非熱的電子による衝突励起に起因するのか、長年にわたり議論が続いてきた未解決問題であった。この問題は、1980年代にひのとり衛星や SMM 衛星などによる太陽の X 線分光観測が盛んであった時代に活発に議論された (e.g., Tanaka et al., 1984, ApJ, 282, 793)。しかし、その後、該当エネルギー帯域での分光観測が長らく行われなかったことから、次第に太陽・恒星コミュニティ内で取り上げられる機会が減少し、「忘れ去られた問題」となりつつあった。

一方、系外惑星研究の観点からは、この輝線が光電離によって放射されている場合、輻射輸送計算と組み合わせることで、空間分解が不可能な恒星フレアループの位置やサイズを推定し、フレアに伴う高エネルギー放射やプラズマ噴出が惑星を直撃するかどうかを評価できる。そこで申請者は、X 線望遠鏡 NICER のアーカイブデータを用いた系統的研究 (Inoue et al., 2025, MNRAS, 541, 1403) と、X 線・紫外線による恒星フレアの同時観測 (Inoue et al., 2026, ApJ, in press) という 2 つのアプローチにより、本問題の究明に取り組んできた。その結果、前者の研究では光電離説を支持する硬 X 線光度と Fe K α 輝線光度の間に見られる正の相関関係を、後者の研究では Fe K α 輝線と熱的 X 線放射の光度ピーク的一致というより直接的な光電離説の証拠を発見し、太陽・恒星フレアの Fe K α 輝線の放射機構として光電離が支配的であることを明らかにした。

そこで、今回の渡航では、これらの成果を携えて、以下の 2 つの活動を行った。

(1) コロラド大学ボルダー校訪問

コロラド大学ボルダー校には、太陽・恒星の磁気活動分野を牽引する研究機関である Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP) や National Solar Observatory が設置されており、当該分野において世界的に活躍する研究者が多数所属している。申請者はコロラド大学ボルダー校を 12/11—12 の日程で訪問し、LASP の定例セミナー (12/11)、およびコロラド大学宇宙物理学科のランチセミナー (12/12) において、「X-ray study of stellar flares on RS CVn-type stars and protostars— From NICER to XRISM」と題して上記の研究結果を発表した¹。また、セミナーの前後には、コロラド大学に所属する野津湧太氏や Adam Kowalski 氏と発表内容について継続的に議論を行った。

(2) AGU 25 Annual Meeting への参加

AGU (American Geophysical Union) 2025 Annual Meeting は、米国をはじめ、世界中の太陽、太陽系内惑星、系外惑星の研究者が一堂に会する、年に一度の極めて大規模な国際会議である。申請者は本会議において、「Origin of the Fe K α line from solar and stellar flares: Statistical and Multiwavelength Approaches」と題したポスター発表を行い、上記の研究成果を紹介した。

¹ セミナーの様子: <https://www.youtube.com/watch?v=wORhA6BbKIE>

成果 Outcome

(1) コロラド大学ボルダー校訪問の成果

LASP セミナーでの発表では、著名な恒星物理学者である Tom Ayres 氏 (CU Boulder) から、自身の研究に対して多数の質問・コメントをいただいた。例えば、「Fe $K\alpha$ 輝線の中心エネルギーが光電離プラズマのイオン化パラメータに依存して変化することのことだが、原始惑星系円盤の回転速度に起因するドップラーシフトと縮退しないのか」という問いである。これは、申請者が今後進める予定の、原始星の Fe $K\alpha$ 輝線およびそれを用いた中心星 X 線放射が惑星形成に与える影響に関する研究に直結する重要な観点であり、セミナー終了後も継続して議論した。

また、コロラド大学宇宙物理学科のランチセミナーにおいても、同大学で活躍する若手研究者を中心に多数の質問・コメントをいただいた。中でも、「Fe $K\alpha$ 輝線を用いたジオメトリ推定において、ループサイズと傾斜角の縮退は最終的に残るのではないか」という点について深く議論した。これらの質疑・議論は、いずれも自身の研究に対する新たな視点からのフィードバックとなり、今後の研究を進める上で大変有益であった。さらに、Tom Ayres 氏をはじめ、コロラド大学の当該分野の研究者と知り合えたことは、今後の米国でのポスドク計画を立てる上でも大きな財産となった。

(2) AGU 25 Annual Meeting 参加の成果

まず、自身のポスターの内容に関しては、Electron Beam Ion Trap (EBIT) を用いた実験的アプローチにより鉄輝線放射の原子物理を研究している Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian の Amy Gall 氏、および Loyola University の Leilya Brent 氏と、原子物理の観点から議論することができた。その結果、観測的研究と実験物理に基づく原子物理研究の連携の重要性を再認識した。さらに、申請者の研究と関連の深い太陽・恒星 CME のシミュレーション研究を行う SETI Institute の Tong Shi 氏のポスター発表について、本人と深く議論した。そこで、観測される紫外線スペクトルのドップラーシフトから各プラズマの速度成分を再構築する手法について学んだ。加えて、太陽フレア、とりわけ X 線放射に着目した口頭講演を複数聴講し、米国における最新の研究成果に関する情報収集を行った。これらの知見は今後の研究方針の指針となる。

今後の展望 Prospects for the future

本渡航を通じて、Fe $K\alpha$ 輝線の放射機構に関する研究成果の発表という当初の目的に加え、新たな視点から自身の研究へのコメントやフィードバックを得ることができた。さらに、Amy Gall 氏 (CfA) のような原子物理を専門とする研究者や、Tom Ayres 氏 (CU Boulder) のような恒星物理学を専門とする研究者と知り合い、自身の研究について深く議論する機会を得た。

今後は、今回構築したネットワークおよび得られた助言を基に、原始星の Fe $K\alpha$ 輝線と、それを用いた中心星 X 線放射が惑星形成に与える影響について研究を進め、投稿論文として取りまとめる予定である。さらに、これらの研究成果を博士論文の執筆にも反映させる予定である。また、今回得られたネットワークを活用し、米国でポスドクを行うための各種公募書類の準備にも着手する予定である。

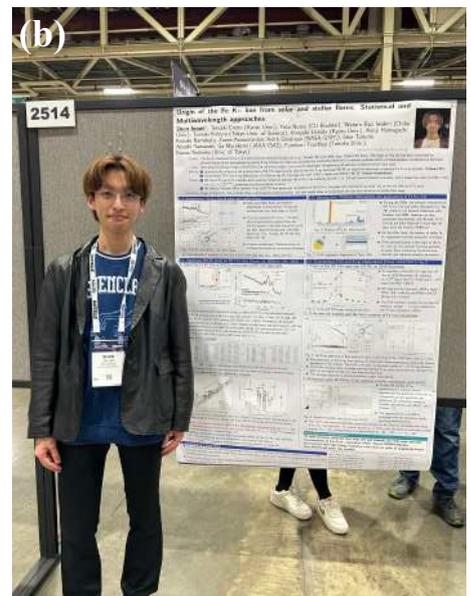
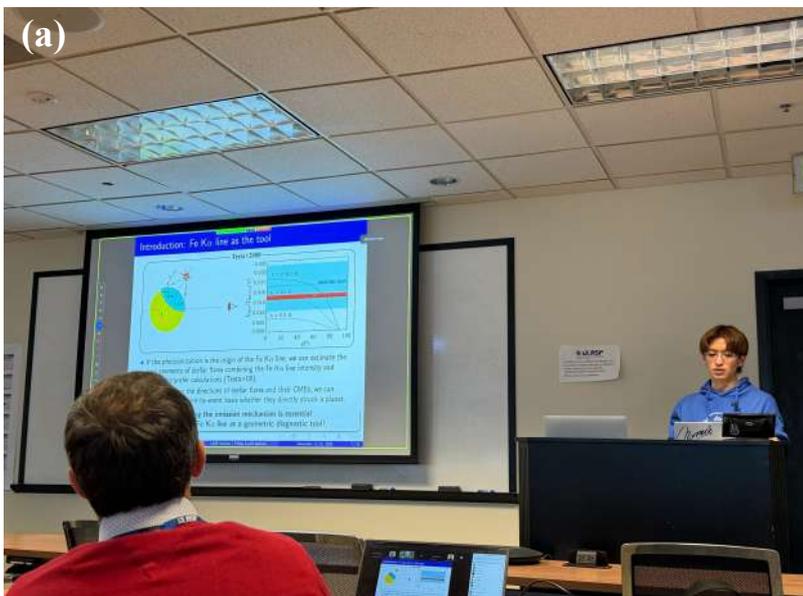


図 1 (a) LASP セミナーでの発表 (b) AGU25 でのポスター発表