

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 | 太陽・恒星フレアの放射モデル構築に向けた Non-LTE 輻射輸送計算の習得 |
| 氏名 Name | 大津 天斗 |
| 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 3年 |
| 渡航国 Country | チェコ共和国 |
| 渡航日程 Travel schedule | 2025年11月3日 ~ 2025年11月16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

報告者はこれまで、太陽・恒星の突発的な増光現象である太陽・恒星フレアに関する比較研究を観測データの解析を基軸として行い、双方の理解を深めてきた。その過程で、同一の物理プロセスであっても、恒星のタイプの違いによって、スペクトルや光度変化が大きく異なる可能性を導き出してきた。そのため、スペクトルや光度変化から物理情報を正確に引き出すためには、非局所熱平衡（Non-LTE）輻射輸送に基づく理論的なスペクトルや光度変化の計算が不可欠である。そこで、本渡航では、チェコ共和国・オンドジェヨフ天文台を訪問し、太陽・恒星の輻射輸送計算の専門家である Petr Heinzl 氏と Non-LTE 輻射輸送計算に関する議論を行うことを目的とした。具体的な到達目標として、以下の3点を設定した。

(1) MALI code の習得

Heinzl 氏が開発した Non-LTE 輻射輸送計算コードである MALI code (Heinzl 1995 A&A) の基本的な使用方法を習得する。

(2) 実践的な計算の実施

具体的な応用例として、Leitzinger et al. 2022 A&A における恒星フレアに伴うプラズマ噴出のモデル化の再現を行う。

(3) セミナー発表および共同研究体制の構築

セミナー発表およびその後の議論を通して、申請者自身のこれまでの研究成果 (Otsu et al. 2022 ApJ, Otsu&Asai 2024 ApJ, Otsu et al. 2024 ApJL) を Heinzl 氏やその共同研究者らと共有するとともに、今後の共同研究体制を構築する。

成果 Outcome

以下では、上記到達目標の各項目について成果を述べる。

(1) MALI code の習得

渡航準備段階では、1次元の構造を扱う最もシンプルなコードである「MALI 1D」の習得を目標としていたが、Heinzl 氏との議論を通して、より現実的な2次元の構造の計算が可能な「MALI 2D」の使用方法を学ぶこととなった。Heinzl 氏より、計算に必要な幾何学構造の設定、星からの入射光の設定、温度や圧力などの熱力学的パラメータの設定について学んだ後、自身のノート PC を用いてテスト計算を行った。図 1 にテスト計算の 1 例を示す。この計算で

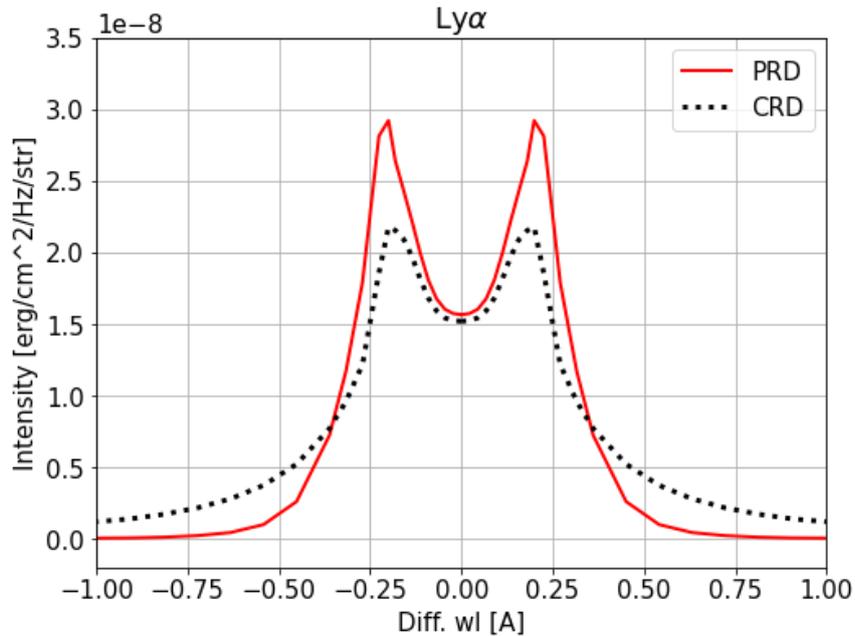


図 1. MALI 2D を用いた Ly α 線スペクトルの計算例。横軸は Ly α 線中心波長からの波長差。縦軸は放射強度。赤実線は PRD、黒点線は CRD を仮定した場合の結果をそれぞれ表す。

は、太陽大気中に浮かぶプロミネンスと呼ばれる低温のプラズマの塊から放射される「Ly α 線スペクトル」のシミュレーションを行った。このテスト計算では「PRD」、「CRD」という2つの異なる条件で計算を行い、両者の違いが明確に現れることを確認した。「PRD」および「CRD」は Non-LTE 輻射輸送計算の核となる部分の1つであり、両者の違いが生じる物理的解釈についても、Heinzl 氏との議論を通じて理解することができた。以上より、MALI code の習得については十分な水準で達成できたと言える。

(2) 実践的な計算の実施

当初再現を予定していた Leitzinger et al. 2022 A&A は 1 次元の計算に基づいている。項目 (1) において、2 次元の構造を扱える MALI 2D の使用方法を習得したことを受けて、2 次元の構造の計算を扱ったより最新の論文である Jecic et al. 2025 A&A の再現を行うこととした。(1) のテスト計算では静止しているプロミネンスを扱ったが、Jecic et al. 2025 A&A では一定速度で運動するプロミネンスを扱い、Ly α 線強度の運動速度への依存性を調査している。具体的な計算例として、この運動速度依存性の再現を試みた。図 2 に Jecic et al. 2025 の結果と報告者の計算の比較を示す。図 2 左は Jecic et al. 2025 A&A の図 5 を示しており、赤枠内紫シンボルの再現を試みた。Jecic et al. 2025 A&A では、速度が大きいほど Ly α 線強度が低下するという傾向が見えている。図 2 右が MALI 2D を用いた報告者の計算結果で、100 km/s を超えた範囲では、速度が大きいほど Ly α 線強度が低下するという、Jecic et al. 2025 A&A と整合的な結果が得られた (図 2 右②)。一方で、今回の計算では低速範囲 (<100 km/s) において、Jecic et al. 2025 A&A より速度刻みを細かく設定して計算した結果、この範囲では速度が大きいほど Ly α 線強度が増大するという傾向が現れた (図 2 右①)。これら①、②はそれぞれ、「ドップラー増光効果 (DBE)」、「ドップラー減光効果 (DDE)」と呼ばれる効果であり、運動する物体からの放射に特有の現象である。特に、今回の再現計算で②の DDE に加えて①の DBE が現れたのは、Ly α 線が中心波長付近で凹んで、少し中心波長から離れるとピークをもち、さらに離れると減光していくという特殊なスペクトル形状をもっていることを反映している (図 1 参照)。また、今回の計算では、DBE から DDE に変化する速度が Ly α 線のスペクトル形状と定量的に整合していることも確認できた。報告者は今後、運動する物体からの放射計算を実行

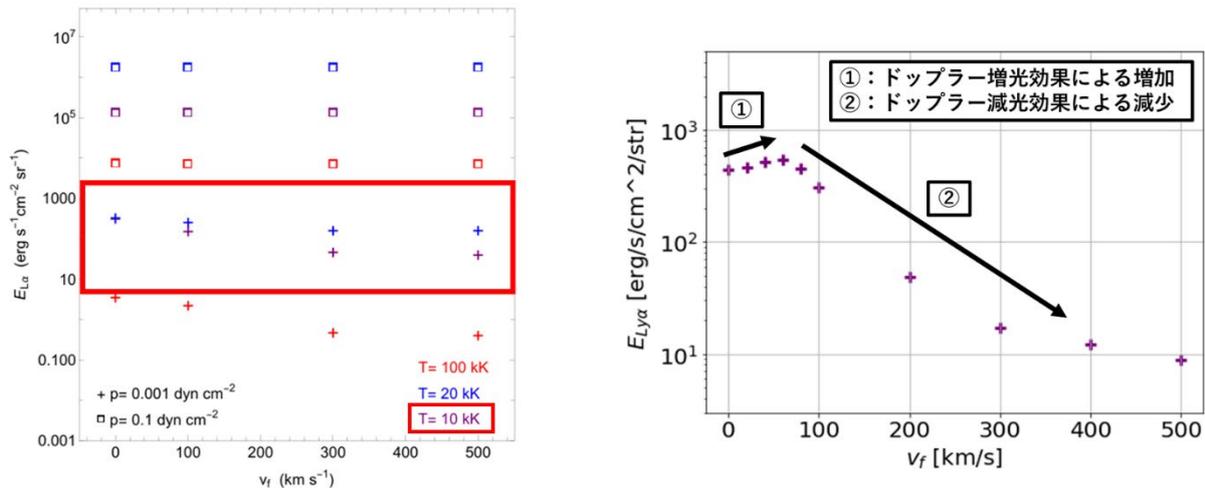


図 2. (左) Jecic et al. 2025 A&A における Ly α 線強度の運動速度依存性。赤枠内紫シンボルが報告者の計算範囲に相当する。横軸は運動速度、縦軸は Ly α 線強度 (Jecic et al. 2025 A&A, Fig. 5 に加筆)。(右) MALI 2D を用いた Ly α 線強度の運動速度依存性に関する報告者の計算結果。横軸は運動速度、縦軸は Ly α 線強度。

する予定であり、今回の再現計算から、その基礎的な部分の理解につながる重要な知見を得ることができた。以上より、実践的な計算についても高い水準で達成できたと言える。

(3) セミナー発表および共同研究体制の構築

セミナーでは、「Statistical Study of Appearance Timing of H α Postflare Loops: Simple Scaling Law Based on Radiative Cooling」というタイトルで、太陽フレアにおける低温ループの出現タイミングに関する統計的な研究について発表を行った。本研究は太陽の観測データに基づいているが、恒星研究への応用を主目的としている。セミナーでは Heintzel 氏と実際の恒星研究への応用について議論することができた。さらに、低温のフレアループに関する輻射輸送計算について具体的な課題を検討することもできた。また、Stanislav Gunar 氏からは、星表面からの放射と低温ループの見え方についてコメントをいただき、輻射輸送計算を用いた低温ループの仮想観測の重要性を再確認した。本セミナー発表における議論および項目(1), (2)を通して、具体的な研究課題について、Heintzel 氏と計画を練ることができたため、帰国後も引き続き共同研究を推進していく予定である。

セミナー後には、Gunar 氏から太陽・恒星の比較研究に関する最新の論文について紹介していただいた。また、本渡航期間中にオンドジェヨフ天文台において、変光星・系外惑星に関するワークショップが開催されており、参加者らと交流する機会を得た。特に、Wrocław 大学(ポーランド)の Kamili Bicz 氏からは、恒星フレアに関する最新の研究成果を紹介していただいた。さらに、ワークショップのエクスカーションとして、オンドジェヨフ天文台の望遠鏡の見学に参加させていただいた。数多くの興味深い望遠鏡を見学したが、2 m の口径をもつ Perek 望遠鏡は、高い波長分解能で恒星を分光観測することが可能とのことで、恒星フレア/プロミネンスの輻射輸送計算との比較にも直結する。今後の自身の研究とも関連する可能性がある望遠鏡を実際に見ることができたのは貴重な経験となった(図3)。

以上のように、今回のセミナー発表およびその後の議論等を通して、今後の共同研究体制の基盤を構築することができた。

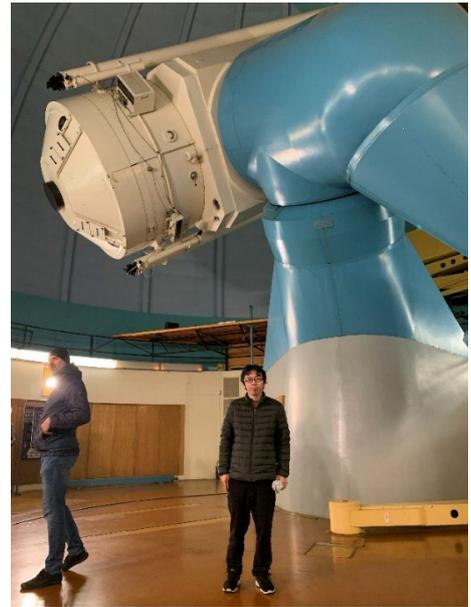


図 3. オンドジェヨフ天文台の望遠鏡。(左) 電波望遠鏡と夕日。(右) 2 m Perek 望遠鏡と報告者。

今後の展望 Prospects for the future

本渡航では、限られた期間の中で輻射輸送計算コードの習得や今後の共同研究体制の構築など、十分な成果を得ることができた。特に、Heinzel 氏とは具体的な研究課題について議論を深めることができたため、帰国後も引き続きオンラインでの議論を行い、共同研究を推進していく予定である。また、2026 年 6 月には低温度星に関する大規模な国際学会である Cool Stars 23 が日本で開催される。Heinzel 氏も参加予定とのことなので、その際には再び対面で議論することを楽しみにしている。