

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

IAUS 397, “UniversAI: Exploring the Universe with Artificial Intelligence”

氏 名: 大久保宏真 (筑波大学数理物質科学研究
群 物理学専攻 D1 (渡航当時))

渡航先: ギリシャ アテネ

期 間: 2025年6月2-6日

本渡航の概要

2025年6月2日-6日にギリシャ・アテネのHarokopio大学で開催されたIAUS 397, “UniversAI: Exploring the Universe with Artificial Intelligence” で口頭発表を行った。本シンポジウムは、IAU初のArtificial Intelligence (AI) をテーマとしたものである。私は、銀河進化研究・ビッグデータ時代における天文研究の発展を支えるために、機械学習と説明可能なAI (XAI) を駆使した新たな解析方法を発表した。この発表を通して、本研究の役割と意義を発信できた。さらにシンポジウム全体を通して、AI活用研究の課題を世界規模で共有・議論でき、新たな視点を取り入れる貴重な機会となった。

IAUS 397, “UniversAI” の主旨

本シンポジウムの目的は、天文学・宇宙物理学×AIの学際的な連携の促進である。この背景には、ビッグデータとマルチメッセンジャー観測の新たな時代に突入しつつあることが挙げられる。このような時代に突入しつつある今、データ量は増加し続けるため、新たな構造化・処理・可視化手法を確立しなければ、最大限にデータを活用できない。そのため、この問題を解決できるAIの導入は不可欠であり、本シンポジウムはその一助として、研究成果の報告や議論によるAIを駆使したデータ活用の推進を目指している (詳細はUniversAI公式サイトを参照)。

研究内容と成果

私は “Potential of Feature Extraction Methods Using Kernel PCA and Kernel SHAP in Astronomy” というタイトルで口頭発表を行った。本研究は、銀河の多輝線解析において輝線間の非線形関係を捉えることで、物理現象ごとのデータに再構築・可視化するための手法の確立を目的としている。

具体的には、輝線間の非線形関係を捉えることが可能な教師なし機械学習であるカーネル主成分分析 (kernel PCA) を、近傍銀河NGC 1068のALMA Band3多輝線データに対して適用する。このデータはOkubo et al. (2025) で線形的なPCAに適用されているため、kernel PCAとPCAの比較が可能になる。kernel PCAはPCAでは捉えられない非線形関係の可視化を可能にする一方で、その結果と輝線の対応関係を把握できない。そのため、得られた結果の物理的な意味付けは容易ではない。そこで、XAIのkernel SHapley Additive exPlanations (kernel SHAP) を導入する。XAIとは、機械学習や深層学習の持つブラックボックス性を解消できることで注目されている情報科学の一分野であり、kernel SHAPはXAIにおける新しい手法である。

本研究の成果は主に二つある。

(1) kernel PCAを適用した結果、PCAでは得られなかったNGC 1068のAGNアウトフローの特徴を可視化することに成功した。この結果は主観的な視認に基づくだけでなく、二標本のt検定によって統計的にも有意であることが確認された。

(2) kernel SHAPを用いることでkernel PCAのブラックボックス性を解消し、輝線の寄与を定

量化することでkernel PCA結果に物理的意味を与えることに成功した。これは、単にkernel SHAPを適用しただけに留まらず、先行研究との比較や推定した物理量との相関を取ることで、物理的に意味を持つことを明らかにした重要な結果である。

(1), (2) より、物理現象ごとにデータを再構築することで今まで見落とされていた現象の発見が期待される (Okubo et al. 2025)。また (2) より、ブラックボックス性を解消することで、機械学習や深層学習を用いた研究のさらなる進展が見込まれる。さらに本手法はデータの質と量にほとんど制限がなく、ビッグデータとマルチメッセンジャー観測の新時代にも対応できるため、まさに本シンポジウムが求めている手法と言える。

シンポジウム全体を通して得られた成果

聴講を通して、天文学・宇宙物理学×AI研究における最先端の動向と今後の期待を把握できた。特に興味深かったのは、招待講演者であるJean-Luc Starck氏の講演である。過去・現在・未

来におけるimagingの概観を話されており、深層学習 (特にU-Net, SU-Net) を用いたdeconvolutionによる高精度なデータ作成を期待されていた。

また、多くの研究者との議論を通して、AI活用研究における課題を共有できた。大半の研究者が、機械学習や深層学習の持つブラックボックス性を問題視していた。天文学や宇宙物理学においては、むしろ結果の解釈が重要になるため、この問題への対処方法が常に議論の中心であった。その中で私の研究は、kernel SHAPを用いて解釈性を担保できることを、物理的観点との整合性を明らかにした点が評価され、関心を持っていただいた。

謝 辞

AIの原理は理解できても、それを天文・宇宙物理研究にどのように応用するかが難しいところです。本シンポジウムを通して応用方法を一挙に把握でき、新たな視点を取り入れることができました。この貴重な機会に参加できたのは、渡航援助あってこそです。関係者の皆様、そして早川幸男基金に深く感謝申し上げます。ありがとうございました。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

European Astronomical Society Annual Meeting 2025 (EAS2025)

氏 名: 札本佳伸 (千葉大学先進科学センター
特任助教 (渡航当時))

渡航先: アイルランド コーク

期 間: 2025年6月21-28日

本渡航では、2025年6月23-27日にアイルランド・コークにて開催されたEuropean Astronomical Society Annual Meeting 2025 (EAS2025) に出席し、1件の招待発表と1件の口頭発表の計2件の発表を行いました。その中でも、EAS2025における「S10 Science with gravitational lensing in

the multi space-telescope era: new prospects and opportunities」において招待講演の依頼をいただき、「Opening Extreme Galaxy Observations through Individual Stars in Cosmological Distances」という題目にて発表を行い、またスペシャルセッション「SS16 A new picture of galaxy evolution from Cosmic Dawn to Cosmic Noon: after the first years of JWST operation and towards the ELT」において、口頭講演を受理していただき「Galaxy Over-Density in the Heart of Cosmic Reionization at $z=8.47$ 」という題目にて発表を行

いました。EAS2025は欧州のみならず米国やアジアから多数の研究者が参加する、欧州最大の研究集会の一つであり、総計で1000件を超す口頭発表と900件を超すポスター発表が行われました。筆者自身が発表を行ったセッションのみならず、そのほかのセッションにも参加することで多様な天文学研究についての発表を聞くことができ、現在急速に進展しつつある様々な分野の進展に触れるとともに、多数の研究者との議論を通して極めて有意義な国際研究会参加となりました。

「S10 Science with gravitational lensing in the multi space-telescope era: new prospects and opportunities」における招待発表では、強力な重力レンズ効果を利用した遠方銀河内部における恒星の観測的研究における最前線について講演を行いました。特に、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）を用いた時間軸観測により遠方銀河内部においてマイクロレンズ効果により発生する明るさの時間変動を多数捉えることによる進展は目覚ましく、私も先日発表した遠方銀河内部の個別恒星の検出についての研究などを取りまとめ紹介しました。また、新たに得られた観測データについて議論を行うとともに、筆者がPIとして行う2025年12月から2027年12月にかけてのJWSTの観測についての議論を行いました。発表後には、同分野の専門家から観測手法やデータ解析・今後の展望に関する質問を多数いただくとともに、現地に於て共同研究についての提案なども受け、活発な議論が行われました。また、他の発表者の講演にて数多くの刺激的な研究成果に出会うことができました。特に、これらのマイクロレンズ効果により捉えられた遠方銀河内部の個別星の検出を元に遠方銀河の星形成活動における初期質量関数（Initial Mass Function; IMF）の制限に応用するための研究を行なっている香港大学のSung Kei Li氏の発表では、実際にIMFへの強力な制限が可能であることを示していることを知り、自身の研究への実装と、今後行われるJWSTの観測への

新たな指針とするとともに、今後同氏との共同研究への契機となる議論を行うことができました。

「SS16 A new picture of galaxy evolution from Cosmic Dawn to Cosmic Noon: after the first years of JWST operation and towards the ELT」において行った口頭発表では、JWSTを用いた観測により宇宙再電離中期（ $z=8.47$ ）における銀河過密領域の発見とその性質について報告しました。本研究ではJWSTを用いた高感度の面分光観測により、現在知られている中で最遠方の銀河過密領域を同定しました。特に、現状理論的に予測されている銀河過密領域の個数密度と、今回の発見に齟齬がある可能性を指摘し、今後の更なる観測的研究の重要性とそれに向けた議論を行いました。また、本発表を通じ、4-5年後にファーストライトを迎えるExtremely Large Telescope（ELT）を用いた多天体分光観測を用いた追観測の重要性について指摘し、多くの研究者と議論を行いました。特に、JWSTよりも感度、波長・空間分解能に優れるELTを用いることはこれら銀河過密領域がどのように宇宙再電離に寄与したのかを理解する上で欠かせないことを多くの研究者との議論を通して確認することができました。

今回、EAS2025への参加を通して最も印象に残ったことはJWSTを通して得られた様々な驚くべき研究成果もさることながら、いよいよ2029-2030年にファーストライトが迫り、次第に大きく盛り上がっている、人類初の40 m級望遠鏡ELTへの期待とその研究課題の探究に関連した議論が熱意を持って盛んに行われていることでした。筆者自身、2件の発表を通して今後のELTが果たす重要な役割を指摘するとともに、本研究会参加を通して具体的にELTで計画されている検出器の性能をより詳しく知る機会に恵まれ、これまでにない強力な空間分解能・感度に圧倒されるとともにそこから広がる将来の天文学研究に魅了されました。その研究計画に少しでも貢献し、そして自身の研究でも活かすためにも、欧州研究者

との更なる交流・共同研究は今後欠かすことができないものであることを実感しました。

このように現地で自身の発表を基に交わす議論だけでなく、そのほかに参加する人々の発表や、将来の望遠鏡計画への熱意を目の当たりにすることは国際研究会に現地参加ができて初めて得ることのできる極めて貴重な経験であると考えています。本渡航は、日本天文学会早川幸男基金による援助があって初めて可能となったものであり、そ

のような貴重な経験を得る機会を与えてくださった関係者の方々に心より感謝いたします。今回の国際研究会参加においては当初期待していた以上の成果を上げることができ、そこで得た知見を基に、自身の今後の観測や研究に反映させることはもとより、日本で行われている天文学研究にその欧州で感じた将来研究への熱意を伝えていきたいと考えています。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 *Hinode-18/IRIS-16 meeting*

氏 名：内藤由浩（総合研究大学院大学 D2（渡航当時））

渡航先：イギリス ロンドン

期 間：2025年6月21-28日

本渡航では、2025年6月23-27日にかけて、イギリス・ロンドンの University College London で開催された太陽物理学分野に関する国際研究会“Hinode-18/IRIS-16 meeting”に参加しました。当研究会では、太陽観測衛星「ひので」および「IRIS」による結果を中心とした太陽物理学分野の最新の研究成果についての議論が行われました。

申請者は当研究会において、“Penetrating waves along spicules to the corona”という題目で口頭発表を行いました。本研究では、太陽の低層大気である光球・彩層からコロナまで、磁力線に沿って伝播するアルヴェン波の彩層における伝播過程に着目しました。アルヴェン波は、惑星間空間まで開いた磁力線が占めるコロナホールにおいて、高速太陽風の追加速とコロナ加熱のためのエネルギー源をコロナまで輸送すると考えられています。しかし、コロナ手前の遷移層で反射されてしまう波動のエネルギー量の評価が観測からなされていないという課題があり、光球・遷移層間の彩

層を伝播する波動がコロナへ運ぶエネルギー量は、観測から定量的に得られていないのが現状です。本研究では、彩層・遷移層下部のアルヴェン波を時空間分解が可能な「IRIS」の Si IV 輝線による分光観測を用い波動ごとにエネルギーフラックスを導出し、反射波・進行波の平均したエネルギーフラックスを求めることで、コロナへ輸送されるエネルギーフラックスを定量的に評価しました。結果として、分光スリットに沿って伝播する、視線方向に横揺れを示すような横波が示す輝線のドップラー速度の特徴的な時空間変動から120例の波束を検出することに成功しました。遷移層で反射された上昇波が下降波として観測されると仮定すると、遷移層を通過したアルヴェン波がコロナへ輸送するエネルギーフラックスは $1.0 \times 10^5 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となり、上昇波が輸送するエネルギーフラックスの半分が、遷移層を透過してコロナへ輸送されることを初めて示しました。さらに、Si IV スペクトル形状の時間変動に着目すると、波束由来の速度成分は見積もられた速度振幅より2-3倍の大きさを持つ可能性があり、現在の値は過小評価されていることが示唆されました。速度振幅の2乗がエネルギーフラックスの値に比例することから、本研究で求めた値はコロナ加

熱・太陽風加速に必要とされる $5 \times 10^5 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Withbroe 1988) と同程度になる可能性があります。このように、本研究では、遷移層における反射を加味しても、彩層を伝播するアルヴェン波がコロナホールの太陽風加速・コロナ加熱のための十分なエネルギーフラックスをコロナへ輸送していることを初めて観測的に実証しました。

私の発表は現地時間の25日午後1つ目のセッションに行われました。本発表のセッション前後や発表後の質疑応答において、太陽大気中の波動についての理論・観測研究が盛んなイギリスのノーザンブリア大学、アルヴェン波による太陽風形成の数値計算についての研究が盛んなベルギーのルーベン・カトリック大学、「IRIS」衛星の開発母体であるロッキード・マーティン太陽物理学研究所（以下、LMSAL）などの研究者の方々と活発な議論をすることができました。特に、ノーザンブリア大学の Richard Morton 氏と James McLaughlin 氏からは、本研究で検出した遷移層で反射される前のアルヴェン波の速度振幅と、SDO衛星のコロナの撮像観測で計測できる、遷移層を通り抜けてコロナへ伝播した後の波動の速度振幅を、周波数に関して比較することで、遷移層での波動の反射率についてより詳細に知れるのではないかというご助言をいただきました。また、SDO衛星のコロナの撮像観測を用いて波動を検出する際に彼らが用いている NUWT (Northumbria University WaveTracking) コードも提供していただき、本研究成果を論文化した後の発展的研究のための足がかりを築くことができました。さらに、LMSALの Bart De Pontieu 氏とは、本研究で議論していた Si IV 輝線スペクトル

の複数の視線方向速度成分の重ね合わせによる LOS 速度の過小評価について意見を交わすことができました。複数速度成分の重ね合わせが存在する場合はスペクトルがガウス関数的な形状から逸脱しますが、そのようなスペクトルを機械的に判断するため、まずはスペクトル形状の非対称性を指標として使うとわかりやすいのではないか、というご助言をいただきました。

私が主に研究を進めている波動についての発表や、「ひので」・「IRIS」衛星に関連した発表以外にも、ここ数年で観測を本格的に開始し、多大な研究成果を出し始めている探査機「Solar Orbiter」や、口径4 mの太陽望遠鏡「DKIST」といった、日本の研究者の間ではまだ研究が進んでいない観測データを用いた発表も多く存在しました。そのため、ひとつひとつの講演が非常に刺激的で、自身の研究を進める上で視野が広がったと感じました。

私自身にとっても、国際学会における口頭発表を初めてするとともに、今まであまり議論をする機会のなかったイギリスの研究者の方と活発に議論ができた素晴らしい経験となりました。また、現在ノーザンブリア大学に在籍している国吉秀鷹氏には、海外での研究生活についての貴重な経験をお聞きするとともに、ノーザンブリア大学に所属している研究者の方とのコミュニケーションのきっかけ作りなどで手助けをしていただきました。改めて、ここに深く感謝の意を表します。最後になりますが、今回の渡航に際し多大な援助をしてくださった日本天文学会早川基金の関係者の皆さまには心からお礼申し上げます。本当にありがとうございました。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Hinode-18/IRIS-16 meeting

氏 名：大津天斗（京都大学理学研究科附属天文台 D3（渡航当時））

渡航先：イギリス ロンドン

期 間：2025年6月22-28日

本渡航では、イギリス／ロンドンにおいて2025年6月23-27日の期間で開催された“Hinode18-IRIS16 meeting”に参加した。Hinode-IRIS meetingは太陽物理に関する権威ある国際会議であり、私は今回が3回目の参加である。今回の開催では、太陽物理に関する最先端の研究のみならず、自身の研究と直接的に関わる太陽-恒星をつなぐような研究についても複数の講演が行われ、良い刺激を受けることができた。

私は本会議において、“Statistical Study of Appearance Timing of H α Postflare Loops: Simple Scaling Law Based on Radiative Cooling”という題目で口頭発表を行った。磁氣的に活発な恒星では恒星フレアと呼ばれる突発的な増光現象がしばしば観測され、太陽フレアと同様のモデルで統一的に説明できると期待されている。恒星フレアにも太陽フレアで観測されるような多様な活動性が関与していることが観測的に示唆されており、その放射には様々な現象からの寄与が含まれていると考えられる。私は近年の研究において、ポストフレアループと呼ばれるループ状のプラズマからの放射がフレアの総H α 線放射に無視できない寄与を与えることを明らかにした（Otsu et al. 2024）。本研究では、太陽・恒星のポストフレアループについてより定量的な比較を可能にすることを目的として、太陽H α 線ポストフレアループの出現時刻の統計的な調査を行った。結果として、軟X線のピーク時刻からH α 線ポストフレアループ出現時刻の時間差 Δt と軟X線ピークフラックス F_X が負の相関を示すことを明らかにした。 Δt と F_X の



Hinode-18/IRIS-16 meetingにおける口頭発表の様子

関係は、電子密度 n_e に対する放射冷却時間 τ_{rad} の依存性； $\tau_{\text{rad}} \propto n_e^{-1}$ 、および軟X線フラックスの依存性； $F_X \propto n_e^2$ から導かれる $\tau_{\text{rad}} \propto F_X^{-1/2}$ と整合的である。この結果は、H α 線ポストフレアループの出現時刻が放射冷却によって決定されることを示している。恒星フレア観測においても、軟X線ピークとH α 線での2つのピークが検出され、さらに軟X線フラックス F_X とH α 線第2ピーク出現時刻までの時間差が上述のスケーリング則に従うなら、恒星フレアに伴う彩層温度のポストフレアループを検出したと結論づけることができる。H α 線ポストフレアループに関して、このような定量的スケーリング則を与えたのは本研究が初めてであり、太陽・恒星ポストフレアループの定量的比較の基礎となり得る。また、このスケーリング則の空間スケール依存性にも注目し、ポストフレアループの出現タイミングと軟X線観測から、恒星フレアの空間スケールを評価する方法も提案した。

本渡航では、口頭発表を通して本研究の内容を周知することを主目的としていた。実際に、講演中のみならず講演後にも本研究について多くの研

究者らと議論することができ、当初の目的を達成できたと言える。特に、アメリカ・ハワイ大学の J. Reep 氏からはフレアループに沿った下降流に由来する電子密度の減少について有益なコメントをいただいた。また、イギリス・ノーザンブリア大学の P. Antolin 氏からは本研究を他の温度帯 (e.g., HeII 304 Å: 10^5 K) へ拡張できるかについて議論を行った。近年、P. Antolin 氏は SDO/AIA の 304 Å データから 10^5 K のプラズマ成分を抽出する手法を開発された (Antolin et al. 2024)。この手法をもとに本研究を他の波長に拡張できると考えている。今回の議論をもとに、今後の共同研究を推進していきたい。

また、本会議では私の専門である太陽-恒星の比較研究を行っている、ドイツ・ポツダム天体物理研究所の A. Pietrow 氏、中国・南京大学の X. Liu 氏、中国・北京大学の Z. Hou 氏と議論を行うことができた。これほど多くの太陽-恒星の比較研究を推進する研究者らと同時に議論することができたのは、私にとって初めてのことであり、非

常により刺激となった。私と同氏らは、全員が異なる観測装置を用いており、それらの観測装置をどのように組み合わせていくかが、本研究分野の今後の展開において鍵になると考えている。本会議で同氏らと対面で議論を行い、交流を深めることで、今後の国際協力を推進していく上での基盤を構築できたと確信している。

さらに、本会議において、かねてから交流のあった国吉秀鷹氏 (学振PD: イギリス・ノーザンブリア大学) と再会することができた。国吉氏からは研究についてコメントをいただいたのみでなく、海外での研究生活について実際の体験談を伺うことができた。自身の今後のキャリアについて検討するうえでの重要な判断材料となる、貴重な機会であったと実感している。

以上のように、本渡航は、自身の研究の周知、同分野の研究者らとの交流、海外で活躍する日本人研究者との交流を通して、非常に実りあるものとなった。本渡航を援助していただいた早川幸男基金の関係者の方々へ心より感謝の意を表する。