

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Sounding Rocket Experiment FOXSI-4: Comprehensive Testing of the Soft X-Ray Cameras and the Launch Operation

氏 名：清水里香（総合研究大学院大学 物理科学
 研究科 宇宙科学専攻 5年一貫制博士課程2-3年（渡航当時））

渡航先：アメリカ アラスカ州

期 間：2024年3月20日～4月26日

2024年4月17日、アラスカ州ポーカーフラット実験施設より、日米共同太陽観測ロケット実験FOXSI-4の打ち上げが実施された（図1）。私は搭載装置の一つである軟X線カメラの主要開発メンバーとして、打ち上げ前の動作試験や通信試験などの最終試験、打ち上げオペレーションに参加した。

太陽フレアの駆動源と考えられる磁気再結合の過程では、反平行の磁力線が繋ぎ変わることで磁気エネルギーが爆発的に解放され、粒子やプラズマの運動・熱エネルギーに変換される。しかし解放されるエネルギーの大きさや、粒子加速・プラ

ズマ放出・プラズマ加熱などへのエネルギーの分配など、未解明な点は多く残る。FOXSI-4はこのような磁気再結合とエネルギー変換に伴うプラズマ現象の追求を目的の一つとし、高精度のX線ミラーとX線センサ（軟X線はCMOSセンサ、硬X線はCdTeセンサ）とを組み合わせることで、太陽フレアに対するX線集光撮像分光観測（光子計測）を行なった。私は軟X線観測用の高速度カメラの開発を担当し、CMOSセンサのX線光子計測能力の評価や、飛行中のコマンド処理やダウンリンクデータ作成のソフトウェア開発など、打ち上げに向けた準備をこれまで進めてきた。

軟X線カメラは他の観測装置との組み上げやロケットへの格納を終え、今年2月にはニューメキシコ州ホワイトサンズ実験場にてロケット全体での振動試験などが完了した。今回の渡航前に、ロケットは発射場であるアラスカ州ポーカーフラット実験施設へ輸送されていた。3月22日の活動初日には、トラック輸送による装置の損傷や変化等がないかを確認するため、観測装置の動作確認を行なった。私は軟X線カメラを担当し、CMOSセンサの前方に ^{55}Fe のX線線源を設置しデータを取得した。得られたデータを解析し、輸送前にホワイトサンズ実験場で行なった同様の実験の結果と比較することで、センサやカメラに異常がないことを確認できた。翌日には、カメラだけでなく光学系の確認を行うため、X線発生装置を望遠鏡の前方十数メートルの位置に設置し、望遠鏡を通してX線をCMOSセンサで検出した。X線光子が検出された位置の分布から、望遠鏡に異常がないことを確認できた。

翌週には、飛行中にダウンリンクデータを確認するGSE（地上支援装置）の表示について、ミ



図1 FOXSI-4打ち上げ（クレジット：NASA）

ネソタ大の担当者と打ち合わせを行った。それまでにオンライン会議等で議論を重ねていたため大まかには実装が完了していたが、細かな確認はできていなかった。そこで模擬データを用いて、撮像の露光パラメタが正しく表示されることを確認した。一方画像データの表示では、正しく表示できているものの、実際に得られるであろう光子の信号値の大きさが考慮されていないことが判明した。観測時には画像が暗く表示され見にくくなるのが懸念されたため、表示スケージングの調整を行い、実際の太陽フレア観測により適ったものへ改良することができた。

4月に入ると、打ち上げウィンドウ中に待機し飛行中にGSEでデータを確認するために使用する部屋へと作業場所を移動し、実際に使用するPCやモニタなどの環境を整えた(図2)。また、コマンドは隣室のオペレーションルームから送るため、飛行中のコマンドの受け渡し方法等の確認を行った。

4月7日に、いよいよ打ち上げウィンドウに入った。ウィンドウ期間中は、一日の初めにカウントダウンオペレーションを予行し、その後打ち上げウィンドウ時間の開始とともにカウントダウンが始まり、打ち上げ3分前で停止する。そのまま打ち上げの判断があるのを待つ間、常に軟X線カメラに異常がないか確認した。打ち上げウィンドウの8日目である17日、Mクラスフレアの発生により、ついにカウントダウン再開が決定された。飛行中、太陽フレアの構造らしき画像データに安堵する間もなく、カメラに異常はないか、露光パラメタはこのままでよいのか、など確認して



図2 使用した作業部屋の様子。一番左が筆者で、モニタにはGSE画面が表示されている。

いるうちに、あっというまに観測時間は終了した。終了後、メンバー皆緊張が解けた様子で、打ち上げを喜び合ったことは忘れられない。

後日、ヘリコプターで観測装置が回収され実験施設に戻ってきた。軟X線カメラをPCに有線接続し、カメラ上のSSDに保存された、飛行中にダウンリンクしていないデータを含む全記録データを無事に取り出すことができた。

現地ではFOXSI-4チームだけでなく、同時打ち上げを実施したHi-C flareチームやフレア予測チームなど、多くの国内外の科学者や技術者と議論を交わすことができた。また同年代の学生とも交流し、大きな刺激となった。この観測ロケット実験に、一つの装置を担当するという大きな役割をもって従事できたことに感謝している。打ち上げオペレーションに参加する機会を与えてくださった早川幸男基金に、深くお礼申し上げます。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Kochel Cosmic Lyman Alpha Workshop, etc.

氏 名：中根美七海（東京大学 宇宙線研究所
M2（渡航当時））

渡航先：ドイツ コッフエル／デンマーク コペン
ハーゲン／イタリア ピサ

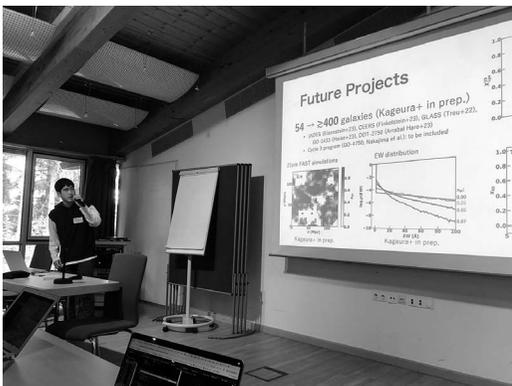
期 間：2024年9月24日～10月10日

本渡航では、ドイツでの国際研究会“Kochel Cosmic Lyman Alpha Workshop”で口頭発表をして議論に参加し、また、デンマークのコペンハーゲンにあるComic Dawn Center (DAWN)とイタリアのピサにあるピサ高等師範学校 (Scuola Normale Superiore; SNS) を訪問してセミナートークをするとともに私の研究について議論させていただいた。研究会には、ライマンアルファに関する銀河周辺物質からの放射機構や輻射輸送、宇宙再電離や宇宙論への示唆など多岐に渡る分野での観測・理論の研究者が集まり、議論や交流が行われた。

まず、9月26, 27日にDAWNを訪問し、セミナートークを行った。トークでは、私が行った、JWSTで観測された高赤方偏移 $z\sim 7-13$ の星形成

銀河のスペクトルに基づいた宇宙再電離と化学進化についての研究発表をした。宇宙再電離研究では、JWST打ち上げ以前はほとんど観測されていなかった $z>9$ の銀河を含めた $z=7-13$ の星形成銀河のライマンアルファ輝線に基づき、銀河間物質の中性水素割合の制限を行った。 $z>9$ における高い中性水素割合から、遅い時代から始まる再電離史という重要な示唆を得た (Nakane+24a)。化学進化研究では、 $z=10.6$ にあるUVで明るい銀河、GN-z11のO/Feの組成比を測定した。得られた低いO/Feの組成比から、 $z\sim 10$ という遠方宇宙において、極超新星／対不安定型超新星または遅延時間の短いIa型超新星が起きている可能性を示した (Nakane+24b)。発表後には、特に宇宙再電離研究に関して中性水素割合の推定方法やモデル依存性など多くの質問をいただいた。2日の間に、DAWNへの訪問を快く受け入れてくださったCharlotte Mason氏とは直接話をさせていただき、JWSTによるライマンアルファ輝線観測の再電離史制限への影響や高赤方偏移の星形成について議論を行った。対面で話をさせていただいたKoki Kakiichi氏には化学進化研究について興味を持っていただき、多くの質問をいただく中で、高赤方偏移銀河のFeの組成比測定についての議論も行った。また、DAWNの中でも主に宇宙再電離に関係して研究を行っているCharlotte Mason氏のグループの定例ミーティングにも参加させていただき、Ting-Yi Lu氏の発表の中で宇宙再電離の進行過程を探る上で重要な電離バブルについての議論を深めた。

9月30日～10月4日には、ドイツ・コッフエルに滞在し、Aspenstein Castleで行われた国際研究会で上記の宇宙再電離研究についての口頭発表を行った。発表後は、中性水素割合の測定方法や結



ドイツでの国際研究会“Kochel Cosmic Lyman Alpha Workshop”における研究発表の様子。

果について多く質問をいただいた。また、私が主に研究行った宇宙再電離以外でのライマンアルファ輝線の輻射輸送など、最新の研究結果から新たな知見を得ることができた。本研究会は参加者全員が集まって食事をする形式になっており、議論や交流の場を多く持った。特に、Mengatao Tang氏やGareth Jones氏とは中性水素割合の推定について深く議論を行うことができた。

10月7, 8日にはSNSを訪問し、宇宙再電離と化学進化の研究についてセミナートークを行った。発表中には測定方法や結果に対して様々な質問をいただいた。発表後は今回のSNSへの訪問を快諾して歓迎して下さったAndrea Ferrara氏と話をさせていただいた。Ferrara氏の高赤方偏移銀河におけるアウトフローとガスの研究から推察されるライマンアルファ輝線のvisibilityや、

O/Feの組成比を説明するモデルについて有意義な議論を交わすことができた。

国際研究会での口頭発表は今回が初めてであった。実際に発表を行い、自身の研究に関連する多くの研究と議論を交わす中で自身の研究の立ち位置を理解し、分野の動向についての知見を深めることができた。また、DAWNやSNSでのセミナートークでは、宇宙再電離研究だけでなく、化学進化研究についても知ってもらえる良い機会となった。本渡航での貴重な経験を通して得られた多くの学びを今後の研究に活かし、精進していきたい。

最後に、非常に有意義であった本渡航をご支援いただいた早川幸男基金ならびに関係者の方々に深く感謝を申し上げます。