

令和 7 年度 (2025) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名 和文：気球搭載エマルジョンガンマ線望遠鏡のための低エネルギー宇宙線飛跡観測手法の開発

英文：Development of a low-energy cosmic ray observation method for balloon-borne emulsion gamma-ray telescopes

研究代表者 六條宏紀（九州大学）

参加研究者 阿部笙太郎，臼田育矢，河原剛義，田澤要輝，長原翔伍，中村悠哉，林熙崇，中野敏行（名古屋大学），村井那帆，市村雅一（弘前大学），伊代野淳（岡山理科大学），青木茂樹（神戸大学），仲澤和馬（岐阜大学）

研究成果概要

本研究では、原子核乾板を用いた高角度分解能ガンマ線観測技術の高度化を目的として、低エネルギー宇宙ガンマ線の観測手法および時刻付与技術の開発を進めた。特に、原子核乾板とエレクトロニクス検出器を組み合わせた「ハイブリッド型エマルジョン望遠鏡」の基礎実証を行い、将来の長時間・大面積気球観測に向けた観測基盤の構築を進めた。

GRAINE 実験では、原子核乾板を用いたガンマ線望遠鏡により、sub-GeV/GeV 帯域における高解像度宇宙ガンマ線観測を推進している。原子核乾板は、サブミクロンの臭化銀結晶を用いて荷電粒子飛跡を三次元的に記録する検出器であり、ガンマ線の電子対生成反応を極めて高精度に測定できる特徴を持つ。この特徴を活かし、従来の衛星観測では到達困難な高角度分解能観測を実現し、銀河中心ガンマ線超過やパルサー放射機構の解明等を目指している。

これまで GRAINE 実験では、2018 年の気球実験において sub-GeV 帯域における Vela パルサーの高解像度イメージングに成功し、世界最高角度分解能のガンマ線望遠鏡としての性能を実証した。さらに 2023 年には、望遠鏡面積を 0.4 m²から 2.5 m²へ大幅に拡張した気球観測実験を実施し、銀河中心領域を含む観測データを取得した。現在、銀河中心領域におけるガンマ線解析を進めている。

一方で、将来の科学観測では、観測器のさらなる大面積化と長時間飛翔化が必要となる。そのため本研究では、原子核乾板に加えてシンチレーションファイバー検出器 (SFT) を組み合わせたハイブリッド型望遠鏡の開発を進めた。本方式では、原子核乾板が高精度なガンマ線反応測定を担い、SFT が高時間分解能の時刻情報を付与することで、従来法では困難であった長時間観測への対応を目指している。また、将来的には NASA 大型気球を利用した長時間観測への展開も視野に入れている。

2025 年 8 月、乗鞍宇宙線観測所（標高 2700 m）において、ハイブリッド望遠鏡のテ

スト観測を実施した。観測には、過去の気球実験で使用した小型の多段シフター・SFTを再利用し、3日間にわたる宇宙線観測を行った。ガンマ線コンバーター部には45枚積層した原子核乾板を用い、SFTには $\phi 0.7$ mm シンチレーションファイバーによる4層構造検出器を使用した。

取得した原子核乾板について、自動飛跡読取装置を用いた読み出しと解析を実施し、電子対生成反応事象の選出および低エネルギー電子飛跡の多重電磁散乱法による運動量測定を行った。その結果、sub-GeV帯域の大気ガンマ線フラックスを測定し、宇宙線大気シャワー計算コード EXPACS による予測値と整合する結果を得た。これにより、原子核乾板を用いた低エネルギー大気ガンマ線観測手法の妥当性を確認した。

さらに、乾板内で観測された電子対飛跡と SFT イベントとの接続解析を行った。その結果、SFT 単独では位置・角度精度が不足し、一意なイベント対応付けが困難であったが、多段シフターによる約 10 分精度の時刻情報を組み合わせることで、電子対飛跡と SFT イベントの対応付けに成功した。これにより、ハイブリッド方式による約 200 MeV 大気ガンマ線の検出を実証した。

本研究成果は、ICRC2025、日本物理学会、大気球シンポジウム等において発表を行った。また、本研究で開発したハイブリッド観測技術を基盤として、2028年に予定されている JAXA 豪州大気球実験に向けた検討を進めている。同実験では、2.5 m²望遠鏡による銀河中心精密観測に加え、日米共同によるハイブリッド望遠鏡プロトタイプの新飛翔を目指している。