



ガンマ線天体観測のためのエマルジョン望遠鏡システムの開発と2015年豪州気球実験の実現化

尾崎, 圭太

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2016-03-25

(Date of Publication)

2017-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6569号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006569>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式4)

論文内容の要旨

氏 名 尾崎 圭太
専 攻 人間環境学
指導教員氏名 青木 茂樹

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)
ガンマ線天体観測のためのエマルジョン望遠鏡システムの開発と
2015年豪州気球実験の実現化

論文要旨

[1章]

宇宙ガンマ線は地球上では再現できない極限環境における粒子加速に伴い放射される。宇宙ガンマ線の精密観測は極限宇宙を探る重要なプローブである。

2008年に打ち上げられたフェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡は4年間の観測で3033のガンマ線天体を発見し、宇宙ガンマ線観測は飛躍的に進展した。一方でガンマ線天体・現象をさらに理解を進めるためには角度分解能を改善し偏光感度を持つ次世代のガンマ線望遠鏡による観測が望まれる。

[2章]

原子核乾板 (エマルジョンフィルム) は1 μm 以下の位置分解能で荷電粒子の通過位置を記録する三次元放射線飛跡検出器である。原子核乾板技術としてこれまでにOPERAフィルムの開発、全自動飛跡読み取り装置の開発、飛跡データの解析手法 (NETSCAN) の開発があり、2010年からは乳剤製造装置の導入によって乳剤研究の革新的発展が期待される。

我々が計画する気球搭載エマルジョン望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画GRAINEは、上記の原子核乾板技術の進展の成果として、実現可能となった。

エマルジョンフィルムで対生成直後の電子・陽電子の飛跡を捉えることで、ガンマ線に対して優れた角度分解能が実現でき、直線偏光に対する感度を持つ。エマルジョン望遠鏡は従来のガンマ線で見えた宇宙の描像を刷新する能力を持つ。GRAINEにとって二回目の気球実験にあたる2015年豪州気球実験では、世界最良の角度分解能でのガンマ線天体 (Velaパルサー) の観測を行ってガンマ線望遠鏡としての性能実証を目指す。Velaパルサーの有意な検出には従来用いていたエマルジョンフィルムであるOPERAフィルムにかわる高感度乳剤フィルムが必要不可欠であった。

[3章]

本研究では、2015年豪州気球実験において新しいエマルジョンフィルムである高感度乳剤フィルムを実用化した。高感度乳剤フィルムとは従来のエマルジョンフィルムと比べ銀量を増やした乳剤を塗布したフィルムのことである。

乳剤に占める銀量を変えて最小電離粒子に対する感度応答を、銀粒子密度の測定とスキニングデータによる飛跡検出効率を評価して調べた。また、高感度乳剤フィルムにガンマ線ビームを照射し、角度分解能・エネルギー分解能を実験データとモンテカルロとで比較評価した。

オーストラリアでの気球実験では高感度乳剤フィルムが実験後回収までに高温環境に長時間さらされる可能性があったことから、飛跡の潜像退行特性を評価した。相対湿度50%下では潜像退行の進行が速いことが分かり、潜像退行を抑制するために乾燥処理が必要であることを見出した。また塗布においては均一なフィルム製作が行える最適な環境を構築した。

2015年豪州気球実験で用いる乳剤の製造やフィルムの塗布作業を全て自分たちの手で行い、その性能評価を同時進行で行った。

製作した高感度乳剤フィルムが保管中に感度が低下する問題が起きたが、リセット処理により対処可能なことを見出した。2015年豪州気球実験の前にシドニー大学におけるリセット処理による感度保証、乾燥処理による潜像退行特性の対策、黒化対策を施した後の真空バックによるエマルジョンフィルムハンドリングを実施することとした。2015年2月から事前テストのために現地作業を一通り実施して期待通りの処理が行えることを確認した後に、2015年4月から気球実験用フィルムの実験前処理を実施した。これにより高い性能を保証した高感度乳剤フィルムを2015年豪州気球実験に導入した。

[4章]

エマルジョン望遠鏡の天球に対する姿勢情報を得るための姿勢モニターとして、スターカメラを開発した。2015年豪州気球実験のためのデイトタイムスターカメラシステムを新たに構築し、地上での星検出試験による新しいCCDカメラの高感度化を確認した。オンラインでのデータ圧縮処理を開発し、数値計算による性能予想を立てた。スターカメラフライトモデルを開発し、地上での長時間動作試験を行って気球実験に備えた。

[5章]

オーストラリア、アリススプリングスの放球拠点にて搭載機器の組み上げ作業を行った。搭載機器は電池の入れ替え等の事案に対応しつつ、ほぼ計画通りにフライトレディを迎えた。

2015年5月12日に、オーストラリア、アリススプリングスにてJAXA海外気球実験として気球実験を実施した。全飛行時間14.4時間のうち11.5時間のレベルフライト (高度36 km以上) の気球フライトに成功した。気球フライト時のテレメトリデータより搭載機器であるゴンドラ与圧容器、多段シフターの正常動作を確認した。

搭載機器は放球拠点から東に1000 km離れたロングリーチ近郊に落下し、放球翌日の5月13日にはエマルジョンフィルムを含むすべての搭載機器の回収が無事に行われた。

回収したフィルムはシドニー大学にて現像処理を行った。

[6章]

2015年豪州気球実験のフライトデータ解析を現在進めている。高感度乳剤フィルムは超高速飛跡読み取り装置HTSを用いて飛跡データを読み取った。2015年12月末に、コンバーターフィルム約400枚のスキニングが完了した。

コンバーターフィルムの飛跡データを用い、フィルムの飛跡検出効率を評価した結果、平均値97%の高い飛跡検出効率を得られた。また、フィルム間の飛跡接続性能 (位置ずれ、角度ずれ)

を評価し、期待される接続性能を確認した。

高い飛跡検出効率は、リセット処理により高感度乳剤フィルムの高い感度を保証し、乾燥処理によって潜像退行を抑制し、真空バックによる黒化対策をし、速やかな回収と現像が行われた、全てのハンドリングの成功を積み重ねた結果として得られたものである。

高感度乳剤フィルムの導入により、2011年気球実験と比べて飛跡データのS/N比は16.5倍の改善が得られた。フィルム一枚あたりのinefficiencyは10分の1に改善した。タイムスタンパーフィルムの開発により高い飛跡検出効率を保持したまま、チャンスコインシデンスは5分の1に抑えられた。

コンバーター内で対生成したガンマ線事象の選出に取り組み始めている。ガンマ線選出処理は信頼性89%で行えることを確認した。100 MeVガンマ線に対して選出効率70%をめざし、モンテカルロとの結果比較を進めている。ガンマ線事象を選出するまでのデータリダクションレートは2011年気球実験と比べて171分の1に改善されている。

[7章]

姿勢モニターであるスターカメラのフライトデータを解析した。姿勢モニターはフライト中に予期せぬ不具合が起き、搭載した三台のうち二台が途中で動作を停止した。

フライト途中で止まった一台と最後まで動作した一台による画像フライトデータを解析し、Velaパルサーがエマルジョン望遠鏡の観測視野内にいる間の望遠鏡の天球に対する姿勢を計3時間26分間にわたり決定した。

星間の観測において、2015年豪州気球実験のために新しく選定したCCDカメラの導入により2011年気球実験の機器と比べ1等級以上の星検出感度の改善を確認した。

姿勢決定精度は2015年豪州気球実験の要求値 (5 mrad) と比べ必要十分であることを確認した。

本研究により2015年豪州気球実験の実現化へと導き、エマルジョン望遠鏡によるVelaパルサー検出のための礎を築いた。

論文審査の結果の要旨

氏 名	尾 崎 圭 太		
論文題目	ガンマ線天体観測のためのエマルジョン望遠鏡システムの開発と2015年豪州気球実験の実現化		
判 定	合 格 ・ 不 合 格		
審 査 委 員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	青 木 茂 樹 印
	副 査	教 授	伊 藤 真 之 印
	副 査	教 授	蛭 名 邦 禎 印
	副 査	理学研究科教授	竹 内 康 雄 印
	副 査	理学研究科准教授	身 内 賢 太 朗 印
要 旨			
本論文は、ガンマ線天体観測をさらに大きく進展させるためのエマルジョン望遠鏡システムの開発、さらにその性能実証のための世界初となるエマルジョンフィルムによる天体観測を目指した2015年豪州気球実験の実現に関して記述されている。 「第1章 序論」では、宇宙線加速の環境と考えられる超新星残骸などの高エネルギー天体に関する情報が宇宙ガンマ線の観測から得られること、2008年に打上げられたフェルミ衛星に搭載されたLAT検出器は高い分解能によって飛躍的な進歩をもたらしたことなど、先行研究の検証を行うとともに、他方で、未同定天体の解決、超新星残骸などの空間的な広がりやスペクトルの観測においては、現状の角度分解能でも不足していること、ガンマ線領域での偏光観測の重要性などの課題を浮き彫りにした。 「第2章 原子核乾板による宇宙ガンマ線観測」では、近年のニュートリノ実験で成果を挙げている原子核乾板の最新技術を示すとともに、ガンマ線観測へ応用した場合の性能について実験データに基づいて議論した上で、この技術を用いた宇宙ガンマ線観測計画GRAINEについて議論し、そのロードマップと2015年の豪州気球実験の目標を示した。			

「第3章 高感度乳剤フィルムの研究開発」では、高性能のエマルジョン望遠鏡を実現するため、旧来品よりも臭化銀濃度を高めた乳剤およびそのフィルムを自家製造することで、電子などの最少電離粒子の検出において高い検出効率を実現できることを示した。また、この高感度乳剤フィルムで確認された潜像退行等の問題に対処するために開発・確立したハンドリング法について述べている。

「第4章 2015年豪州気球実験気球実験で用いる姿勢モニターの開発」では、観測したガンマ線の到来方向を天球上にマップするため不可欠となる姿勢モニターとして開発した昼間スターカメラとその撮像録画システムについて述べている。

「第5章 2015年豪州気球実験気球実験」では、本実験のために開発した与圧容器・ゴンドラの開発、放球基地におけるエマルジョン望遠鏡の組み上げと各種の搭載機器の実装といった放球準備から、さらにフライト・回収およびその後の現像について述べている。

「第6章 高感度フィルムのフライトデータ解析」では、現在進行中のエマルジョンフィルムの解析の状況を説明するとともに、その実データからエマルジョンフィルムが検出器として所期の性能を発揮していることを検証し、事前の開発における予備試験から得られた性能評価に基づく設計・監理が適切であったことを確認している。

「第7章 姿勢モニターのフライトデータ解析」では、姿勢モニターである昼間スターカメラのデータを解析し、一部にトラブルが発生したものの、Velaパルサーの全観測時間6時間の半分以上に相当する時間について姿勢決定を行うことができたことが示されている。

「第8章 まとめ」では、第6章・第7章の成果を総合して期待されるエマルジョン望遠鏡の性能および観測結果について展望している。

論文のいずれの部分においても、テスト実験を重ねて再現性を確認しながら慎重に議論が進められている。エマルジョンフィルムを用いた実験では、乳剤の製造から始まって、フィルムの塗布、観測機器への実装、気球を用いた観測、回収、および現像にいたるまで、長期間にわたってさまざまな行程を経ることになるが、どこかの段階で問題があったとしても、その成否は最後の現像が完了してからしか判断できない。このため、再現性の確認や性能のパラファッキの評価が極めて重要となるが、そうした重要性が十分認識されて系統的な品質管理などがなされたことが成果につながっていると評価される。以上により、学位申請者である尾崎圭太は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。

なお、本論文の主たる成果に基づいて、以下の2本のレフェリー付き論文および本人が発表した国際会議のプロシーディングスが刊行されており、博士取得の要件を満たしている。

- 1) K. Ozaki et al., "Development of new-type nuclear emulsion for a balloon-borne emulsion gamma-ray telescope experiment", JINST, 10 P12018 (2015)
- 2) S. Takahashi, S. Aoki, K. Ozaki et al., "GRAINE project: The first balloon-borne, emulsion gamma-ray telescope experiment", Prog. Theor. Exp. Phys., 043H01 (2015)
- 3) K. Ozaki for the GRAINE collaboration, "GRAINE project: Flight data analysis of balloon-borne experiment in 2015 with emulsion gamma-ray telescope", Proc. of the 34th ICRC, PoS(ICRC2015)1004, (2015)