

GRAINE 計画: 2015 年豪州気球実験全体報告

神戸大学	○高橋覚, 青木茂樹, 井上達貴, 尾崎圭太, 小坂哲矢, 柴山恵美, 鈴木州, 立石友里恵, 田中僚, 田輪周一, 原俊雄, 水谷深志, 藪美智, 山田恭平
愛知教育大学	児玉 康一
ISAS/JAXA	斎藤 芳隆, 田村 啓輔, 濱田 要, 吉田 哲也
宇都宮大学	佐藤 禎宏, 手塚 郁夫
岡山理科大学	伊代野 淳, 山本 紗矢
名古屋大学	石黒勝己, 大塚直登, 河原宏晃, 北川暢子, 駒谷良輔, 小松雅宏, さこ隆志, 佐藤修, 中竜大, 長縄直崇, 中野敏行, 中村光廣, 丹羽公雄, 宮西基明, 森下美沙希, 森島邦博, 吉本雅浩, 六條宏紀

1. はじめに

宇宙には極限的な環境が普遍的に存在しており、そこから放たれるガンマ線は極限宇宙に対して直接的な知見をもたらす。また、ガンマ線は宇宙を探索するうえでの強力なプローブにも成り得る。そして、ガンマ線の観測を通して、宇宙の壮大なスケールや極限的な環境を利用した、地上では決して成し得ない実験を可能にする。これまでのガンマ線観測により、宇宙線(起源、加速機構、伝播など)、高エネルギー天体(超新星残骸、パルサー、パルサー風星雲、活動銀河核、ガンマ線バースト、太陽など)、宇宙論(系外背景光の分布など)、基礎物理(プランクスケールでのローレンツ不変性の検証、暗黒物質の対消滅もしくは崩壊からのガンマ線の探索、原始ブラックホールの探索、反物質ドメインの探索など)に対する知見が得られつつある。

現在、フェルミ望遠鏡によって、高エネルギー帯域におけるガンマ線の観測は大きく進展している。これまでに 3000 以上ものガンマ線源が検出されており、そこから多くの知見が得られている。また一方で、新たな課題も浮かび上がってきている。この帯域における観測では、天体観測において決定的に重要な性能のひとつである角度分解能が、他波長に比べ桁違いに悪い。また、光子がもつ独立な情報のひとつである偏光については、その観測の困難さから、未だ有意な観測がなされていない。これらの克服はこの帯域における観測を新たなステージへと導く。

2. GRAINE 計画

エマルジョンフィルムは、少ない物質質量($\sim 10^{-3}\text{Xo}$)で、高い空間分解能($< 1\mu\text{m}$)をもつ、強力な飛跡検出器である。エマルジョンフィルムで、ガンマ線による電子対生成の始まりを捉えることで、ガンマ線に対して優れた角度分解能、及び直線偏光に対する感度を持つことが期待できる。

我々は、エマルジョンフィルムから成る大口径面積($\sim 10\text{m}^2$)のガンマ線望遠鏡を開発し、長時間気球フライトを繰り返し、宇宙ガンマ線(10MeV–100GeV)の観測を目指す。この計画を GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)計画と呼ぶ。

エマルジョンガンマ線望遠鏡は、コンバーター、タイムスタンプ、カロリメーター、そして姿勢モニターから成る。エマルジョンフィルムを積層したコンバーターで電子対の始まりを捉え、捉えた事象に対して、タイムスタンプでタイムスタンプを押し、その時刻情報を基に姿勢モニターの情報と併せることで、ガンマ線の天球に対する到来方向が決定できる。

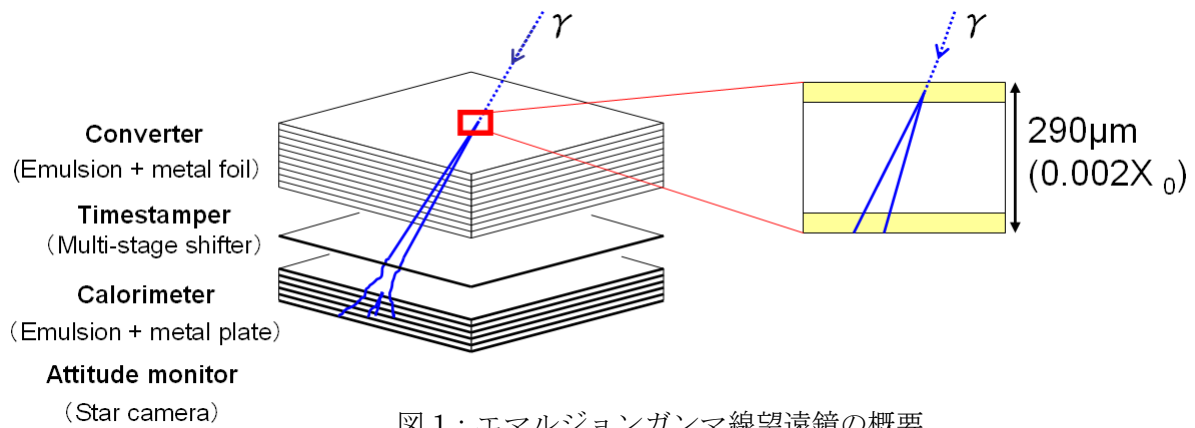


図1：エマルジョンガンマ線望遠鏡の概要

これまでに地上において様々な試験を行い、本シンポジウムにおいて報告してきた。特に、加速器ガンマ線ビーム試験によって、優れた角度分解能およびガンマ線偏光に対する感度を示した。また、山頂高度における大気ガンマ線観測試験により、宇宙線の蓄積するエマルジョンフィルムから、電子対を捉えることによるガンマ線事象の系統的な検出が可能であることを示した。また、本来時間分解能を持たないエマルジョンフィルムに秒以下の時間分解能の付与を実現する多段シフターを開発した。これらの地上における研究開発により、気球搭載エマルジョンガンマ線望遠鏡による宇宙ガンマ線観測の展望を拓いた。

エマルジョンガンマ線望遠鏡の気球フライト環境下における動作・性能実証、及び宇宙ガンマ線のバックグラウンドの実測を目指し、2011年6月8日に、大樹航空宇宙実験場(北海道)においてJAXA大気球実験をおこなった。口径面積 $12.5\text{cm} \times 10\text{cm}$ で4.3時間のエマルジョンガンマ線望遠鏡の初めての気球フライトに成功した。フライトデータ解析により、実際の気球フライト環境下において、ガンマ線事象が捉えられ、高い角度分解能、及び十分な時間分解能が得られることを実証した。また、気球フライト環境下におけるエマルジョンガンマ線望遠鏡のバックグラウンドに対する初めての理解を得た。そして、ガンマ線事象を捉え、時間情報を付与し、姿勢モニターの情報と併せることで、ガンマ線の天球に対する到来方向を決定する一連の流れを確立するとともに、エマルジョンガンマ線望遠鏡のファーストフライトに成功した。また、一部に新型原子核乾板を導入しており、フライトデータ解析により、角度空間で一様で高い飛跡検出効率(平均97.7%)が得られることを示した。本気球実験で得られたこれらの技術成果をまとめた論文がPTEPに掲載されている。

3. 2015年豪州気球実験

GRAINE計画の次の段階として、実際に既知のガンマ線放射天体(Velaパルサー)を検出し、すべて通しでのエマルジョンガンマ線望遠鏡の性能実証に取り組んだ。2015年5月12日に、オーストラリアにおいてJAXA大気球実験をおこない、口径面積 3780cm^2 (前回比30倍)、14.4時間(前回比3倍)の気球フライトをやり遂げた。実験遂行にあたり、2011年気球実験の経験・実績に基づいて、実験設計(2012年12月)をはじめ、望遠鏡の様々な改良や準備、そしてオーストラリア国内での作業のための手配や調整(2013年2-3月にかけて、気球放球拠点であるアリススプリングスの視察、オーストラリア国内での原子核乾板ハンドリング拠点としてシドニー大学 Particle Physics グループと交渉)をおこなってきた。これらについては、これまでの本シンポジウムにおいて報告してきたので、以下ではそれらの一部について簡単に紹介する。

2015年気球実験では、全面的に新型原子核乾板を導入した。名古屋大学の乳剤製造装置や塗布設備を使い、自分達の手で、実験で使う原子核乾板を製造した。乳剤製造は計245回おこない、のべ194.7kgを2014年1月-6月、10月-2015年2月にかけて製造した。これだけの量の乳剤を実験者自らの手で製造した実験は、これまでで初めてではないかと思われる。また、2014年5月-6月、12月-2015年3月にかけて、のべ66.8m²の原子核乾板を塗布した。製造した原子核乾板については、系統的な品質管理、長期特性試験、潜像退行特性試験をおこない、本番実験で実用可能である見通しを立てた。

タイムスタンプである多段シフターは、2011年気球フライトモデルの約30倍となる大面積化を図った。また、気球フライト時の低温環境下(最低~60℃)においても、時間分解能に直結する高速動作(500μm/秒)が実現可能となる改良に成功した。また、ステージ板の改良や原子核乾板の設置方法の工夫により、ステージ間ギャップをつめる改良を施した。これらの改良により、数ミリ秒での時間分解能の実現見通しが得られた。

地上実験では一般的な技術ではあるが、真空に近い環境にさらされる気球実験で、あえて原子核乾板の真空パックを導入した。これにより、乾板間のスリップの抑制、乾板間の密着性の向上、良い平面性が実現でき、堅牢な原子核乾板スタックが実現できる。また、湿った空気を遮断することにより、潜像退行を抑制でき、遮光・防水を兼ねることにより、気球実験後の確実な回収が見込める。他方で、気球フライト高度(~5hPa)で真空パックを保つために、与圧容器を導入する必要が生じた。与圧容器でのガンマ線の発生や吸収を極力抑えるため、気球実験 ATIC グループの超薄シェル型与圧容器を踏襲し、差圧300hPaを維持し、上方の物質量を~0.1g/cm²に抑えた与圧容器を開発した。

姿勢モニターであるスターカメラは、フード長の見直し、高感度(特に赤外側)CCDカメラの選定、3方向設置により、姿勢決定率や精度(特に視線方向まわりの回転)の改善を図った。

シドニー大学で、原子核乾板の実験前処理(初期化处理、潜像退行抑制のための乾燥処理、真空パック)や、実験後の現像処理をおこなうために、2015年2月21日-3月15日にかけてシドニー大学で、原子核乾板(一部)や処理設備の輸送、処理環境の立ち上げ、処理テストをおこなった。

原子核乾板をはじめ、各搭載機器などの準備を2015年3月までに完了させ、オーストラリアに向けて発送した。

2015年4月2-17日に、シドニー大学で原子核乾板の実験前処理(初期化处理、潜像退行抑制のための乾燥処理、真空パック)をおこなった。処理した原子核乾板は、4月27日に陸上冷却輸送で発送し、5月1日にアリススプリングスに到着した。4月15日-5月5日に、放球拠点であるアリススプリングスにおいて、望遠鏡の組み上げ、動作確認、放球リハーサル等をおこない、オンスケジュールでのフライトレディーとなった。1週間程度の風待ちを経て、5月12日に風の条件が整った。5月12日6:33(オーストラリア中部標準時)にアリススプリングスから気球を放球し、8:50に高度37kmの水平浮遊に入った(図2、3)。気球が東方へ1000km程流れたのち、その日の20:00に観測を終了した。20:22に気球を切り離してパラシュートで緩降下させ、20:55に回収拠点であるロングリーチの北方約130kmの地点に着地した。のべ14時間22分、高度37kmの水平浮遊11時間32分の気球フライトをおこない、Velaパルサーが天頂角45度の範囲内(望遠鏡の視野にほぼ相当)を横切る時間帯(14:15-20:20)をほぼカバーするフライトができた。その翌日(13日)の午前中には着地地点に到着し、パックされた原子核乾板およびデータ貯蔵ディスクともにダメージなく、その日のうちに迅速で確実な回収に成功した。回収した原子核乾板を5月18日にロングリーチから陸上冷却輸送で発送し、5月20日にシドニー大学に到着した。シドニー大学では、5月15日から本番現

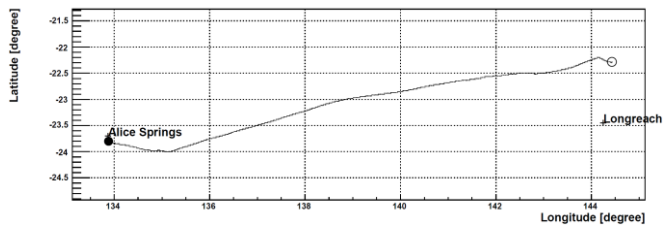


図 2：航跡図。アリススプリングスーロングリーチ間は 1059.2km。

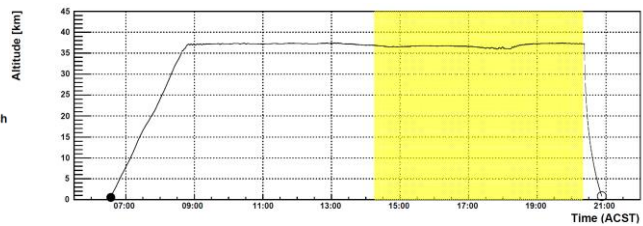


図 3：高度プロファイル。網掛け部は Vela パルサーが天頂角 45 度の範囲内にいる時間帯を表す。

像のための最終準備や最終リハーサルをおこなった。フィルムが到着した 20 日に、そこから小片を切り出して現像し、問題がないことを確認した。翌 21 日から 24 枚/日の処理速度で本番現像を開始した。23 日から処理速度を 48 枚/日にあげ、現像処理を進めた。この処理速度は、OPERA フィルムの銀量ベースで 1100 枚/日、19brick/日に相当する。6 月 1 日までに、のべ 509 枚、48.1m²、すべてのエマルジョンフィルムの現像を完了した。現像したエマルジョンフィルムは顕微鏡で目視観察し、荷電粒子の飛跡が鮮明に見えることを確認した。また、一部に人為的な失敗による損失もあるが、その損失率は面積ベースで 1%以下である。また、今回の大量現像にあたり、事前に現像液の処理能力の見直しをおこなった。銀量ベースで従来の 2 倍量を処理しても有意な性能劣化が見られないことを見出し、本番現像においてこの条件を採用する大幅な見直しを達成している。

現在は、日本に持ち帰り、表面銀取りを完了し、膨潤処理による膜厚調整、新型飛跡読取装置 HTS による飛跡読み取り、データ処理、ガンマ線事象の選出を進めている。フライトデータ解析から、本気球実験における改良の成果も得られつつある。2011 年気球実験の原子核乾板にくらべ、S/N 比が ~ 20 倍向上し、面積あたりのデータサイズが ~ 20 分の 1 に低減した。また乾板あたりの飛跡検出効率が向上し、inefficiency が ~ 10 分の 1 に低減した。それらの結果として、ガンマ線事象検出のためのデータリダクションレートを ~ 100 分の 1 に低減した。また、ガンマ線事象検出効率も ~ 2 倍の向上が期待できる。2011 年気球実験の原子核乾板解析の経験・実績に基づき、次期気球実験では新型原子核乾板を全面的に導入することが決定的に重要であることを示してきた。それがこのような劇的な改善として実を結びつつある。

今後フライトデータ解析を進めていき、Vela パルサーを検出し、すべて通しての性能実証をおこなうと共に、世界最高解像度での観測開始や、世界初となる偏光観測のためのデータ取得を開始していく。また、タイムスタンプである多段シフターは、数ミリ秒での時間分解能を狙った運用をおこなっており、89 ミリ秒周期を持つ Vela パルサー放射の位相分解に挑戦していく。また、本気球実験は、JAXA 大気球実験室現体制における初めての豪州気球実験であり、本気球実験により、先行実験としての役割を果たした。

参考文献

- GRAINE collaboration(エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ), 2004-2015 年度大気球シンポジウム報告. S. Aoki et al., Advances in Space Research Vol.37 (COSPAR 2004 Proceedings) pp.2120-2124.
 S. Takahashi et al., Nucl. Instr. And Meth. A, 620 (2010) 192-195.
 H. Rokujo et al., Nucl. Instr. And Meth. A, 701 (2013) 127-132.
 S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 043H01 (2015).
 S. Takahashi et al., Proc. 34rd Int. Cosmic Ray Conference, 970 (2015).