

## GRAINE 計画：2018 年豪州気球実験に向けて

神戸大学	○高橋覚, 青木茂樹, 尾崎圭太, 吳坪健司, 柴山恵美, 立石友里恵, 中村崇文, 中村元哉, 原俊雄, 松田菖汰, 松本明佳, 丸嶋利嗣, 水谷深志, 藪美智, 山田恭平
愛知教育大学	児玉 康一
ISAS/JAXA	池田忠作, 濱田 要
岡山理科大学	伊代野淳, 松川秋音, 山本紗矢
名古屋大学	大塚直登, 岡田晟那, 河原宏晃, 駒谷良輔, 小松雅宏, 小宮山将広, 佐藤修, 鳥井茉有, 長縄直崇, 中野敏行, 中村光廣, 中村悠哉, 西尾晃, 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、タイムスタンパー、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。

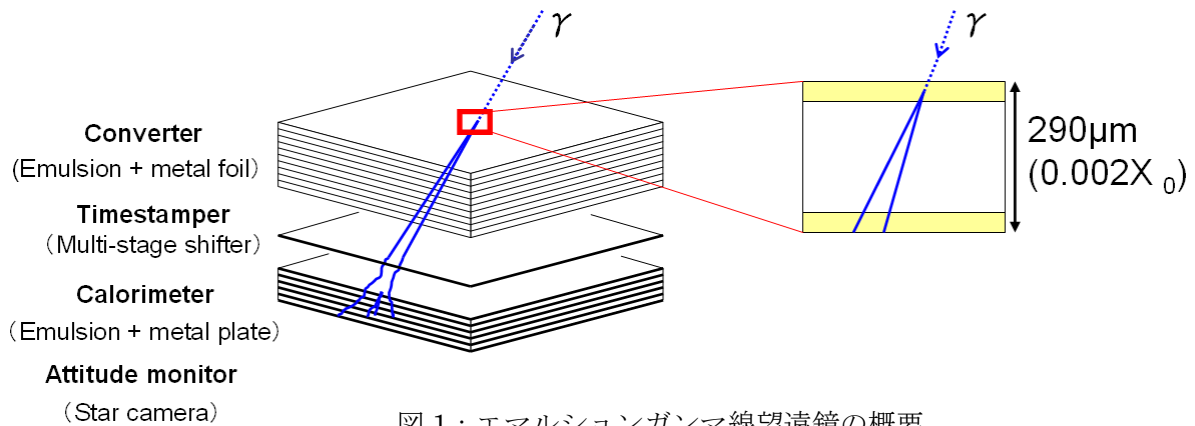


図 1：エマルジョンガンマ線望遠鏡の概要

### 3. これまでに

地上実験において、逆コンプトン散乱ガンマ線ビームを使い、優れた角度分解能および偏光感度の実証をおこなってきた[LEPS/SPring-8(2004年12月)、UVSOR(2008年3月)、NewSUBARU(2013年11月)]。また、山頂高度において、大気ガンマ線を使ったガンマ線検出能の実証[乗鞍(2007年7月、9月、2013年7月)]、その他にも、エネルギー測定精度の研究[東大電子ライナック@東海村(2012年8月)、NewSUBARU(2013年11月)]をおこなってきた。また、タイムスタンプである多段シフターの開発(2007年6月)や、チェンバー平面性の研究[J-PARC  $\mu$ ピット(2014年11月)]をおこなってきた。これらの地上における研究開発により、エマルジョンガンマ線望遠鏡の実現可能性を拓いてきた。

これらの研究開発の成果が認められ、JAXA 大気球実験に採択された。2011年6月に、大樹航空宇宙実験場(北海道)において、エマルジョンガンマ線望遠鏡の初めての気球実験を成し遂げた(口径面積 125cm<sup>2</sup>、フライト時間 4.3 時間(高度 34.7km 水平浮遊 1.6 時間))。フライトデータ解析により、ガンマ線検出能の実証、望遠鏡の動作・性能実証、バックグラウンドの初めての理解、そして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し、エマルジョンガンマ線望遠鏡の実現可能性を実証した。

2011年気球実験の経験・実績に基づき、実験設計をはじめ、様々な改良および準備をおこない、2015年5月にオーストラリアにおいて、JAXA 大気球実験をやり遂げた(口径面積 3780cm<sup>2</sup>(約 30 倍)、フライト時間 14.4 時間(高度 36.0–37.4km 水平浮遊 11.5 時間(約 7 倍)))。また JAXA 豪州気球実験の先行実験としての役割を果たした。2015年気球実験では、望遠鏡の大幅な改良や性能実証を達成し、2011年気球実験から大きく前進した。一方で高度成功基準に挙げていた Vela パルサーからのガンマ線を有意に検出することに関しては、望遠鏡の部分的な不具合があり、ガンマ線収量が制限され、未達成となっている。

2018年豪州気球実験では、実験規模(口径面積やフライト時間)は大きく変更せず、部分的な不具合を対策し、ガンマ線収量の拡大を図り、Vela パルサーからのガンマ線を有意に

検出し、望遠鏡の総合的な性能実証を目指す。現在 2018 年気球実験に向けて、様々な開発、改良、および準備を進めている。

#### 4. 2018 年気球実験に向けて

2015 年気球実験では高銀乳剤(臭化銀結晶の体積充填率 55%)のエマルジョンフィルムをコンバーターでは使っていたが、2018 年気球実験では中銀乳剤(45%)に全面的に置き換える。中銀乳剤にすることによって、安定性が高まり、潜像退行が抑えられる。また、潜像退行抑制のための乾燥処理に対する耐性が改善できる。中銀乳剤にすることで、現像銀粒子数がやや減少するが、飛跡検出効率には問題ないレベルである。逆に、乳剤中の粗大銀などのごみが抑えられ、デッドスペースが減り、フィルム面積あたりの飛跡検出効率の改善が図れる。また、乳剤厚みあたりのガンマ線電子対生成反応確率もやや下がるが、乳剤厚をやや厚くすることで補うことができる。潜像退行が抑えられることによって、気球実験後に回収するまでの時間制限が緩和できる。それによって、気球ゴンドラの着地位置の制限が緩和され、飛翔機会の拡大や長時間フライトへつながる可能性が高まることが期待できる。現在、エマルジョンフィルムの製造を予定通り進めている。輸出前にエマルジョンフィルムの初期化処理をおこない、乾燥後、パックをおこない輸出する。

多段シフターについては、ハードウェアのマイナーな変更によって、大幅な性能改善を図る。ステージ開口面積を 2500cm<sup>2</sup>から 4000cm<sup>2</sup>に拡大し、背板とパックしたエマルジョンフィルムをはめ込むことによって、ステージ間ギャップの制御および低減が図れ、シグナル/ノイズ比の向上(~2 倍)につながる。また、ステージ開口面積の拡大によって、物質量が低減され、有効面積の拡大(~20%@100MeV)につながる。また、背板パックの導入によって、平面性の向上が図れる。また、固定段の追加によって、多段シフターへのインターフェイスとなり、ギャップの制御および低減が図れ、シグナル/ノイズ比の向上(~2 倍)につながる。また、駆動方向の遊び抑制や、ステージ継手の遊び抑制をすることによって、駆動精度の向上が図れる。また、下段原点センサ羽の部材見直しによって、原点出し再現性の温度変化特性の向上(~2 倍)が図れる。

スターカメラについては、電源接続・切断、システム起動・シャットダウン、システムリセット、システム・ストレージのディスク分離、ストレージディスク冗長化など、安定性を高め且つ復旧可能な堅牢なシステムを構築した。

与圧容器ゴンドラについては、2015 年気球実験の球形から拡張性を持たせた繭形へ変更する。また、膜材料を見直し、より高温耐性の優れた膜材を開発した。また低温でのリーク改善の見直しも得られつつある。

気球実験後のエマルジョンフィルムの現像処理はシドニー大学 A. Bakich 氏, K. Varvell 氏, D. Beech 氏らの協力を得て行う。2017 年 10 月 16 日、17 日にかけて、新たな現像室候補の視察も含め、シドニー大学で打ち合わせをおこない、2018 年気球実験の現像処理環境の構築に向け始動した。

2017 年 8 月 21 日から 26 日にかけて、JAXA 大気球実験室の恒温恒圧槽を使い、多段シフターの低温低圧試験をおこなった。また、8 月 26 日から 9 月 1 日にかけて、スターカメラの低温低圧試験をおこない、その中で 44 時間にわたる安定した連続運転を達成した(44 時間後に打ち切り)。10 月 2 日から 8 日にかけて、宇宙研にある大型恒温槽を使い、与圧容

器ゴンドラの低温試験をおこなった。10月に、多段シフターースターカメラ-JAXA 機器 (一部シミュレータ)の連動・動作試験、ゴンドラ実装・動作試験をおこなった。そして10月30、31日に、JAXA 機器とのかみ合わせ・動作試験、電磁ノイズ試験をおこなった。今後、最終調整や仕上げの作業をおこない、12月中の輸出を目指す。

#### 参考文献

GRAINE collaboration (エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ), 2004-2017 年度大気球シンポジウム報告.

S. Aoki et al., Adv. Sp. Res. 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. (2015) 043H01.

K. Ozaki et al., JINST 10 P12018 (2015).

S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 073F01.

K. Ozaki et al., Nucl. Instr. And Meth. A 833 (2016) 165.

高橋覚、青木茂樹、日本物理学会誌 72 巻 10 号(2017) 734 - 742.

S. Takahashi, S. Aoki et al., Adv. Sp. Res. (2017) 10.1016/j.asr.2017.08.029.

H. Rokujo, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (submitted) arXiv:1711.01544.