

## GRAINE\*計画：ロードマップと次期豪州気球実験

## GRAINE\* project: Overall Roadmap and Next Balloon Experiment in Australia

## (\* Gamma Ray Astro Imager with Nuclear Emulsion)

神戸大学	○青木 茂樹, 尾崎 圭太, 小田 美由紀, 呉坪 健司, 佐藤 良紀, 柴山 恵美, 鈴木 州, 高橋 覚, 立石 友里恵, 中村 崇文, 中村 元哉, 原 俊雄, 松田 菖汰, 松本 稔樹, 松本 明佳, 丸嶋 利嗣, 水谷 深志, 藪 美智, 山田 恭平, 山本 知己
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, 杉村 昂, 鳥井 茉有, 長縄 直崇, 中野 敏行, 中野 昇, 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

GeV/sub-GeV 帯域の宇宙ガンマ線観測は2008年に打ち上げられたFermi衛星LAT検出器により飛躍的に進歩した。他方で、この帯域での観測が他波長域に較べて角度分解能が桁違いに不足していることや偏光について有意な観測ができていないなどの、観測統計を量的に増やすだけでは解決できない課題が残されていることも明らかになりつつある。GRAINE (Gamma Ray Astro Imager with Nuclear Emulsion) 計画は、これらの課題を質的に克服するべく空間分解能に優れたエマルジョン望遠鏡 (開口角 $\pm 45^\circ$ 以上, 口径面積約 $1\sim 10\text{m}^2$ ) による気球観測により、 $10\text{ MeV}\sim 100\text{ GeV}$  帯域の宇宙ガンマ線の観測を行う。

## 2. ロードマップ

GRAINE 計画のロードマップを以下に示す。

第1段階：2011年6月8日, JAXA 大樹航空宇宙実験場 (北海道) にて実施, 口径面積  $125\text{cm}^2$  (多段シフター-2011モデル), 飛行時間 4.3 時間 (1.6 時間@ $35\text{km}$ )

各構成要素の気球高度での動作確認, 多段シフターによるタイムスタンプ部と姿勢モニターの運動の実戦テスト, 将来の観測で主要なバックグラウンドとなる中緯度気球高度における大気ガンマ線フラックスの実測などを行った。[1]

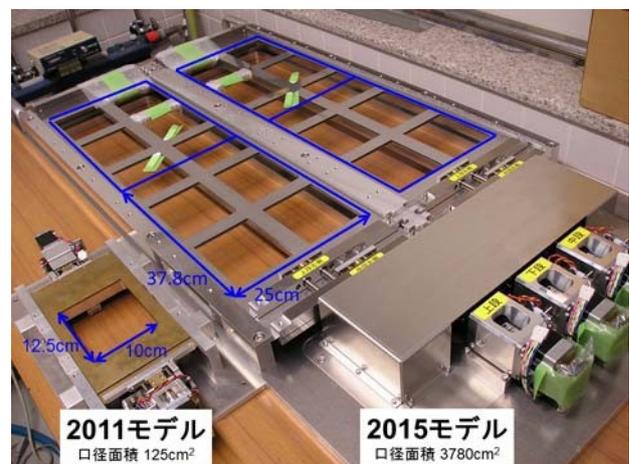


図1: 多段シフター-2011モデル(左)と2015モデル(右)

(ともに三鷹光器社との共同開発)

第2段階：2015年5月12日、アリススプリングス（オーストラリア）にて実施、口径面積 3780cm<sup>2</sup>（多段シフター2015モデル）、飛行時間 14.4時間（11.5時間@37km）

海外での気球観測・回収・現像の流れを確立するとともに、コンバーター全体にわたる系統的なガンマ線事象解析のスキームを確立した。その結果、ゴンドラ内の望遠鏡から数 m 上方の構造体（放球プレート）で発生したガンマ線による事象を捉えて、そのガンマ線の到来方向を再構成して放球プレートのイメージングに成功した。他方で、望遠鏡システムの一部の不具合によって十分な観測統計を得ることができず、当初の目標であった既知の高輝度ガンマ線天体（Vela）からのガンマ線を結像して望遠鏡の総合的な性能評価を行うことは未達成となっている。[2]

第2.5段階：2018年4月26日、アリススプリングス（オーストラリア）にて実施、口径面積 3780cm<sup>2</sup>（多段シフター2015モデル）、飛行時間 17.4時間（14.7時間@35~38km）

当初、口径面積を 5m<sup>2</sup> 程度まで拡大することを目指して準備を行っていたが、多段シフター2015モデルを再利用して規模を拡大することなく、前回実験で未達成の Vela パルサーからのガンマ線の結像を行うことを目的とした観測を行った。観測で得られたデータから、望遠鏡システムが健全に稼働していたことが確認できつつあり、天体からのガンマ線の結像にむけて解析を進めている。[3]

第3段階：2021年～ 本格的な繰り返し科学観測のスタート。面積を 10m<sup>2</sup> まで拡大しても重量が 2 トンを超えない軽量化大面積ユニットを製作し、軽量化大面積化を行っても望遠鏡性能が保てることを検証するとともに科学観測をスタートする。

### 3. 科学観測から期待される成果

Fermi-LAT 望遠鏡は、2015年に公表した4年分の観測データに基づく点源カタログでは 3033 個の点源を、2018年に公表した8年分の観測データに基づく点源カタログでは 5523 個の点源を見つけているが、そのうち約 1/3 が他波長域で観測されている既知の点源との対応が取れないという状況は変わっていない。こうした未同定天体は、天体が密集している銀河中心や銀河面に沿った領域に集まっており、より高解像度での観測が待たれる。

図3右上は、Fermi-LAT の観測によって拡がり確認された超新星残骸 W44 の 2~10GeV のガンマ線のカウントマップである。緑色の実線で示された赤外による観測（Spitzer）に較べると解像度は不十分と言わざるを得ない。図5右下はエマルジョン望遠鏡で 1000m<sup>2</sup> hour の観測が行えた場合のシミュレーション結果である。光子の総数は Fermi-LAT での観測値に基づき、その空間強度分布は赤外による観測結果（図3左下）に比例して分配した。

W44 からのガンマ線のエネルギースペクトルの測定から、陽子起源と電子起源の二つの可能性が議論されている。どちらのモデルが観測に一致するかを結論づけるためには、200MeV 以上のスペクトルに加えて 100~200MeV のフラックスの測定が重要だが、Fermi-LAT では、検出器の角度

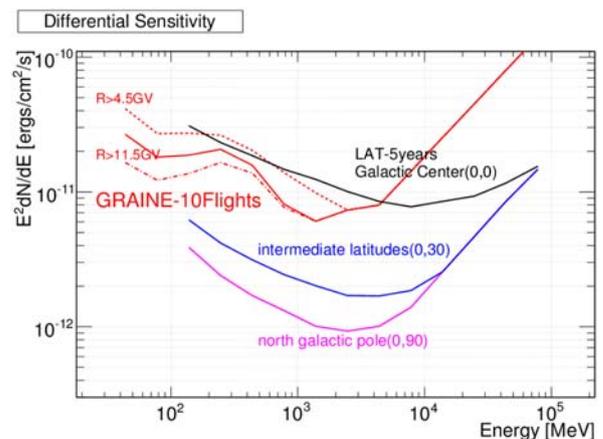
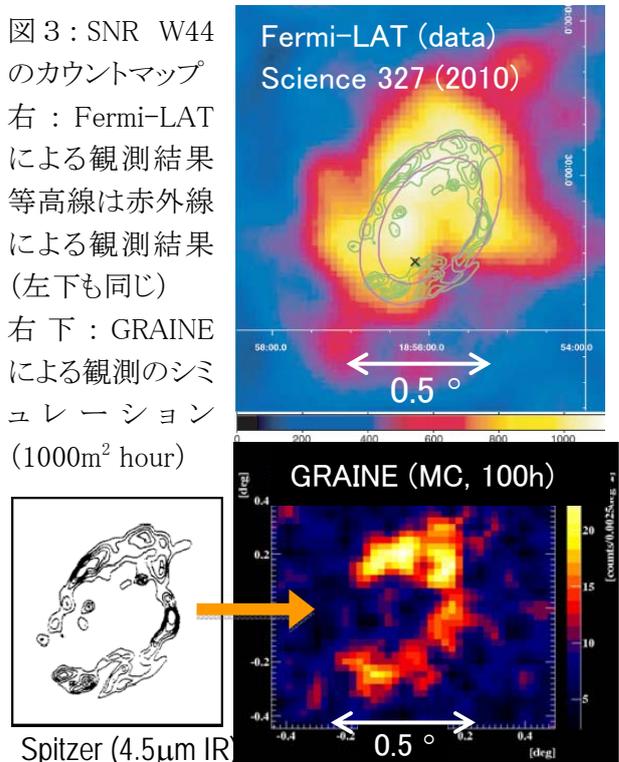


図2：GRAINE計画で目指す感度曲線

分解能から決まるエラーサークルの半径が 3~4 度の大きさととなり、近接する天体や背景の拡散ガンマ線のゆらぎによって W44 からのフラックスだけを正確に求めることができない。エマルジョン望遠鏡では、同じエネルギー帯のエラーサークルの半径は 0.5~1 度となり。立体角で 1/16 以下に縮めることができ、ガンマ線の起源が陽子起源か電子起源かについての重要な情報が得られる。

大面積長時間観測によりガンマ線観測量が増大する Vela パルサーについては、パルサー周期に対する位相や偏光に関する分析が可能となり、放射機構の解明に有用な情報が期待できる。さらには、背景の拡散ガンマ線の影響などにより Fermi-LAT の観測では解像度が不足している銀河中心方向や銀河面に沿った領域には、暗黒物質による放射の可能性も議論されている銀河中心方向からの GeV ガンマ線超過をはじめとするさまざまなガンマ線放射域が密集しており、高解像度による観測が待たれている。

図 3 : SNR W44 のカウントマップ  
右 : Fermi-LAT による観測結果  
等高線は赤外線による観測結果 (左下も同じ)  
右下 : GRAINE による観測のシミュレーション (1000m<sup>2</sup> hour)



#### 4. 科学観測の開始に向けた大面積望遠鏡の開発

科学観測の本格的開始にあたっては、Fermi-LAT の 10 倍に相当する開口面積 10m<sup>2</sup> のエマルジョン望遠鏡による観測を目指す。そのような面積に拡大してもペイロードの重量を 2 トン以内に収めることのできる軽量化大面積化ユニットを開発している。

2018 年気球実験での望遠鏡 (開口面積約 0.38m<sup>2</sup>) は、コンバーター本体の重量が約 32kg であったのに対して、多段シフターが約 75kg の重量を占めており、このままスケールアップして大面積化すると、多段シフターの重量で面積が制限されてしまう。大面積化のためには、多段シフターを大幅に軽量化することが不可欠である。これまでの多段シフターは 10~20mm の厚さのジュラルミンのベース板上に厚さ 1mm の金属板ステージを動かす機構を載せる構造になっており、それらの剛性により機械精度を確保していた。これに対して、大面積化にあたっては、金属板ステージを廃してフィルムを遮光バックしたシートのみを両側のローラーで引っ張って動かす構造を採用することにより大幅な軽量化を図る。すでに約 1m<sup>2</sup> プロトタイプを製作し精度・再現性の評価を行っている。(図 4)

宇宙由来のガンマ線の損失と宇宙線 2 次反応により発生するバックグラウンドを抑制するため、2015 年の



図 4: ローラー式シフタープロトタイプ

気球実験では風船型与圧容器を開発し導入した。直径約 1.6 m の円形リングの上下に半球のシェルを固定して球形の与圧容器を実現した。放球の際のクレーンによる吊り下げ時の機械的干渉を避けるために、与圧容器の幅を増やすことなく検出器面積を  $10\text{ m}^2$  に拡大するために、円形の代わりにレーストラック形のリングを使用して、円筒の両端に半球をつけた形状の長繭型与圧容器をデザインし、リングとシェルの膜材それぞれについて強度計算を行っている。(図 5) 2018 年の気球実験では、これを見越して短い繭型形状の与圧容器を製作した。[3]

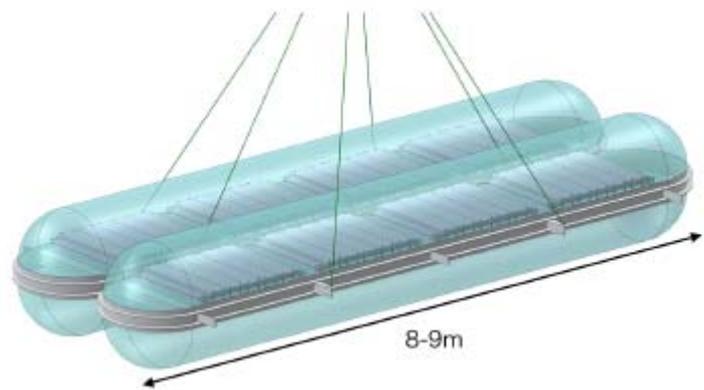


図5:「長繭型」与圧容器

$10\text{ m}^2$  の開口面積は GRAINE2018 の約 25 倍の面積にあたり、その実現のためには乳剤製造およびフィルム製造も 25 倍の規模で行う必要がある。GRAINE2018 の乳剤製造では、一部を名古屋大学内の自前の製造システムにより製造するとともに、かなりの部分を富士フィルム社より購入した。2021 年の気球実験に向けて名古屋大学内に富士フィルム社内の製造システムの規模に匹敵する現行の乳剤製造装置の 10 倍規模の装置を開発・建設する。乳剤からフィルムを製造するための塗布設備についても、これまでの人力による手塗り塗布から機械による自動塗布を実現するためのロール to ロール塗布システムの開発・建設を名古屋大学内にて行う。

GRAINE2015 および GRAINE2018 では、読取速度約  $0.50\text{ m}^2/\text{h}$  の HTS-1 システムによりフィルム読取の実績を達成している。[4]  $10\text{ m}^2$  の開口面積の望遠鏡の解析には、その 100 倍の面積  $1000\text{ m}^2$  のフィルムの読取を行う必要があるが、HTS-1 システムの 5 倍の速度に相当する約  $2.5\text{ m}^2/\text{h}$  の読取速度を実現する HTS-2 システムの開発も進んでおり、次の気球実験ではその本格的な利用が可能となる見込みで、すべてのフィルムの読取を 1 年以内完了できる見通しである。

## 5. 展望

次の気球実験にむけて  $10\text{ m}^2$  の開口面積の望遠鏡を実現し科学観測を開始すべく、さまざまな準備を着実に進めており、次の気球実験では Vela をより高統計で観測するとともに、Geminga など他の高輝度天体の有意な検出も目指す。

[1] S. Takahashi et al. PTEP 2015 (2015) no.4, 043H01 <<https://doi.org/10.1093/ptep/ptv046>>

[2] S. Takahashi et al. PTEP 2016 (2016) no.4, 073F01 <<https://doi.org/10.1093/ptep/ptw089>>

H. Rokujo et al. PTEP 2018 (2018) no.6, 063H01 <<https://doi.org/10.1093/ptep/pty056>>

[3] isas18-sbs-010, isas18-sbs-011, isas18-sbs-012, isas18-sbs-013, isas18-sbs-014, isas18-sbs-015

[4] M. Yoshimoto et al. PTEP 2017 (2017) 10, 103H01 <<https://doi.org/10.1093/ptep/ptx131>>