

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

神戸大学	○青木 茂樹, 尾崎 圭太, 小田 美由紀, 加藤 拓海, 鳥野 絢花, 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
岐阜大学	仲澤 和馬, 吉本 雅浩
名古屋大学	白田 育矢, 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, 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 MeV \sim 100 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 125cm^2 (多段シフター 2011 モデル), 飛翔時間 4.3 時間 (1.6 時間@35km)

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連動の実戦テスト, 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]

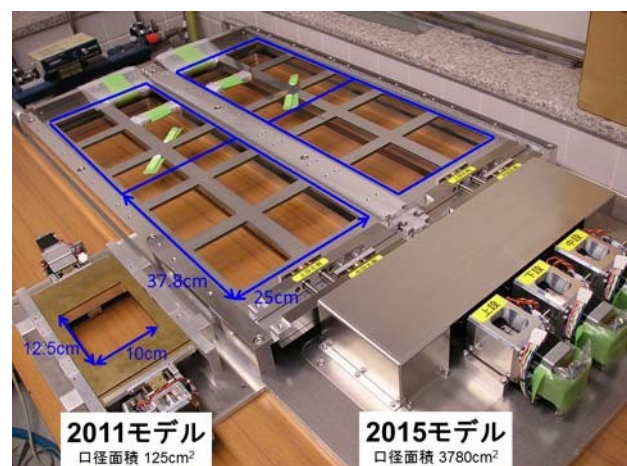


図1: 多段シフター 2011 モデル (左) と 2015 モデル (右)

(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 3780cm²（多段シフター2015モデル），飛翔時間 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，望遠鏡本体から数 m 上方の構造体（放球プレート）で発生したガンマ線事象を有意に捉えて，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た。[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 3780cm²（多段シフター2015モデル），飛翔時間 17.4時間（14.7時間@35~38km）

当初，第3段階として口径面積を 5m²程度まで拡大することを目指して準備を進めていたが，多段シフター2015モデルを再利用して規模を大きく拡大することなく，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，エマルジョン望遠鏡としては初めてとなる天体からのガンマ線の結像を行った。[3]

第3段階：2022年～，本格的な繰り返し科学観測のスタート。面積を 1.25m²まで拡大しても重量が大きく増大しない軽量化大面積ユニットを製作し，それを複数ユニット組み合わせることで数 m²の開口面積を実現し，観測を繰り返すことで統計を蓄積する。

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。

Fermi 望遠鏡の公開データを用いて銀河中心領域を分析したグループから，GeV 帯域でその領域内の既知のガンマ線源の重ね合わせだけでは説明しきれない超過成分が観測されているという報告がなされ，その超過がダークマターの対消滅ガンマ線で良く説明できると主張されている。他方で銀河中心はガンマ線源が密集していて，Fermi 望遠鏡の角度分解能では分解できないガンマ線源の重ね合わせが超過成分を構成している可能性も指摘されている。GRAINE による観測で，銀河中心の検出有意度をその観測量に対して見積もった結果を図2に示すが，5m²の開口面積の観測器であれば，望遠鏡視野を横断する（約6時間の）観測が1回で 2~3σ の有意度が期待できる。

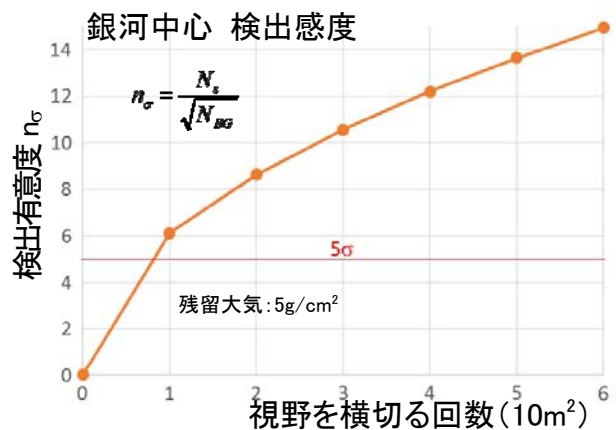


図2:銀河中心の検出有意度

2022年に計画されているオーストラリアでの国外気球実験では、Vela パルサーをさらに高統計で観測することを目標とし、さらに銀河中心などこの帯域での Vela 以外のガンマ線発生源の観測を目指す。

図3に 100MeV 以上の帯域でのおもな高輝度ガンマ線天体のアリススプリングスにおける観測での仰角の時間変化を示す。仰角が 45° 以上となる時間に天体が望遠鏡の視野内を横切ることになる。銀河中心が視野内を横切る時間帯は、他の高輝度天体も視野の中央付近に対応する高い仰角まで上昇し、観測に適した時間帯となる。

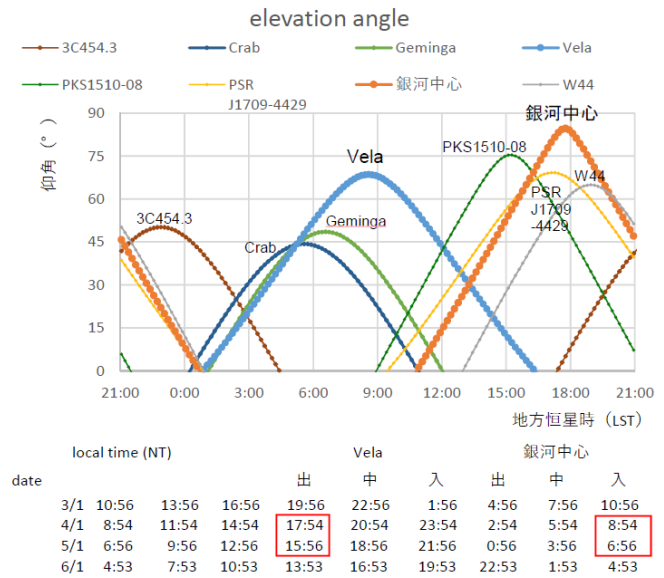


図3: 高輝度ガンマ線天体の仰角の時間変化

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 倍の有効面積に匹敵する開口面積 10m² のエマルジョン望遠鏡の実現を目指す。そのような面積に拡大してもペイロード重量を 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 0.38m²）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いた。これに対して、大面積化にあたっては、厚いベース板や金属板ステージを廃してフィルムを遮光パ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し大幅な軽量化を図る。1.25m² の多段シフターフライトモデルを製作し精度・再現性の評価を行っている。（図4）[4]

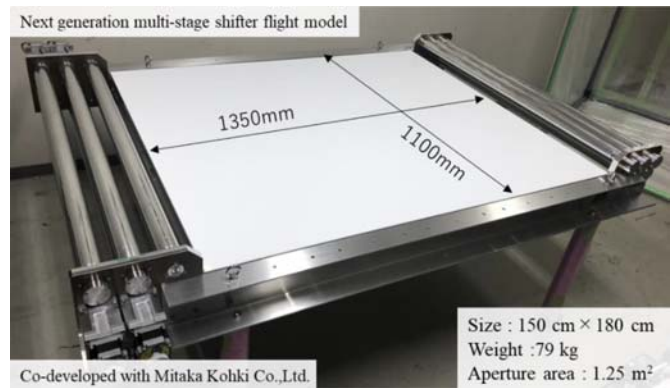


図4: 新型ローラー式多段シフターフライトモデル

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。望遠鏡の大面積化にあたっては、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 m² 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筒型与圧容器をデザインした。（図5）[4] 2018 年の気球実験では、このデザ

インを念頭に置いて短い繭型の与圧容器を製作した。[3]

10m²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。2022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・建設中である。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を名古屋大学内に開発・建設中である。[4]

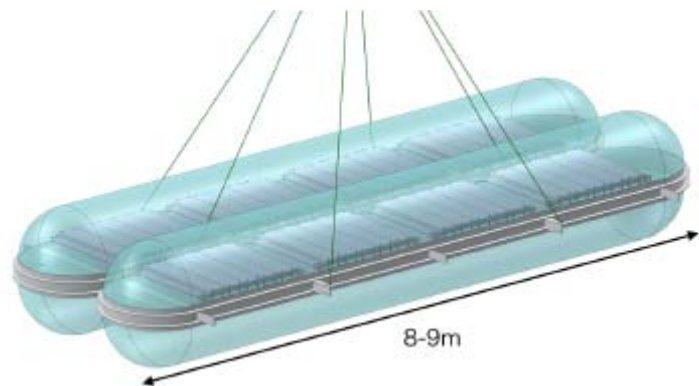


図5:「長繭型」与圧容器

GRAINE2015およびGRAINE2018では、読取速度約0.50m²/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。[5] 10m²の開口面積の望遠鏡の解析には、その100倍の面積1000m²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2.5m²/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、次回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年以内で完了できる見通しである。

5. 次回気球実験への展望

10m²の開口面積の望遠鏡による科学観測の実現を目指した準備を進める一方で、次回の気球実験では放球機会を確実に確保するという観点から、B300での搭載可能重量以内の2ユニットのみの望遠鏡ユニットによる2.5m²の観測器を用いて2回のフライトを実施することにより、5m²に相当する開口面積の観測統計を確保することを目指す。

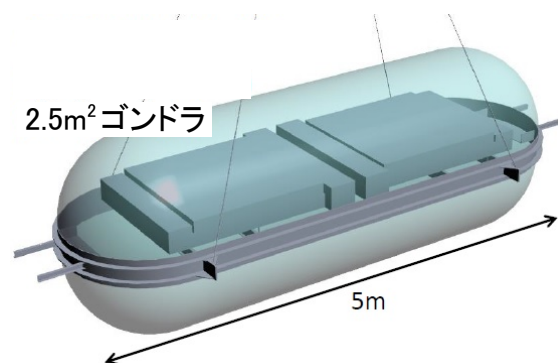


図6:与圧容器ゴンドラ(2ユニット2.5m²)

[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] isas19-sbs-031, isas19-sbs-032, isas19-sbs-033, isas19-sbs-034, isas19-sbs-035, isas20-sbs-002

[4] isas19-sbs-037, isas19-sbs-038, isas20-sbs-004, isas20-sbs-005

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