

GRAINE 計画：計画のロードマップ

GRAINE project: The roadmap of the project

神戸大学	○青木 茂樹, 東 崇史, 岡本 一紘, 小田 美由紀, 加藤 拓海, 鳥野 絢花, 呉坪 健司, 鈴木 州, 高橋 寛, 長原 翔伍, 中村 崇文, 中村 元哉, 松田 菖汰, 丸嶋 利嗣, 山下 真優, 米野 翔真
愛知教育大学	児玉 康一
岡山理科大学	諫山 雄大, 伊代野 淳, 奥山 萌生, 松川 秋音, 村上 郁哉
岐阜大学	仲澤 和馬, 吉本 雅浩
名古屋大学	臼田 育矢, 駒谷 良輔, 小松 雅宏, 小宮山 将広, 佐藤 修, 志水 凱, 菅波 亜門, 杉村 昂, 鳥井 茉有, 長縄 直崇, 中野 敏行, 中野 昇, 中村 友亮, 中村 光廣, 中村 悠哉, 西尾 晃, 林 熙崇, 南 英幸, 森下 美沙希, 森島 邦博, 山本 紗矢, 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な進歩を遂げた。その一方で、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、単に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高分解能観測を行う。

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]

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^2 （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

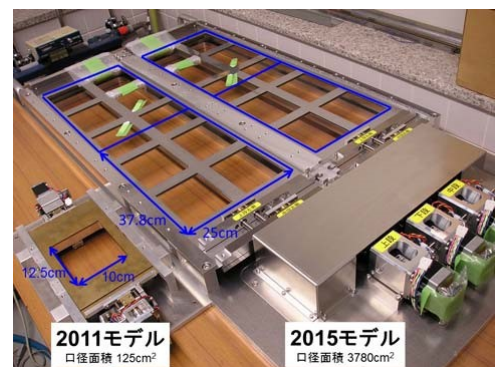


図1: 多段シフター2011版(左)と2015版(右)
(ともに三鷹光器社との共同開発)

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 3780cm^2 （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 5m^2 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：2023年～，本格的な繰り返し科学観測のスタート。面積を 1.25m^2 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 m^2 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。

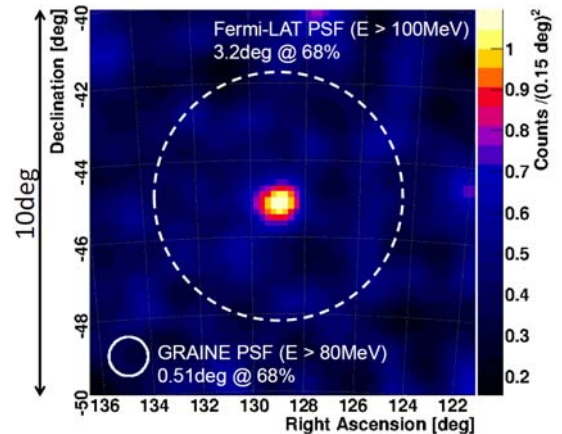


図2: Vela パルサー方向近傍のガンマ線事象のカウントマップ(点線は Fermi-LAT の PSF)

3. 科学観測から期待される成果

Fermi-LAT は，2015 年公表の 4 年分のデータに基づくカタログでは 3033 個の点源を，2018 年公表の 8 年分のデータに基づくカタログでは 5523 個の点源を見つけているが，どちらの場合も約 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。

2023 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指し，加えて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。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。

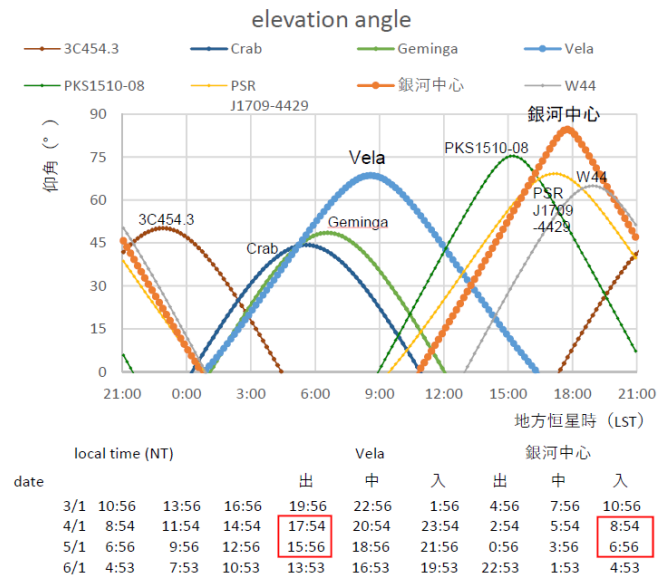


図3: 高輝度ガンマ線天体の仰角の時間変化

Fermi-LAT 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-LAT 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。

銀河中心から 1 度以内の領域で測定されたガンマ線フラックスの内訳を図 4 左に示す。銀河中心は多数の天体の密集域であることに加えて、拡散ガンマ線源が複雑な空間構造を持って分布しており、角度分解能が不十分なフェルミ望遠鏡の観測では、これら背景事象の混入が避けられない。エマルジョン望遠鏡は立体角にして 100 倍となる高解像観測が可能で、銀河中心 0.1 度領域の宇宙ガンマ線を捉えられる。これにより背景事象混入が極めて少ない「真の超過成分」が実測できる(図 4 右)。銀河中心 0.1 度領域に超過成分が「無い」場合でも、2023 年実験で 4σ の有意度で既知の点源検出が期待できる。

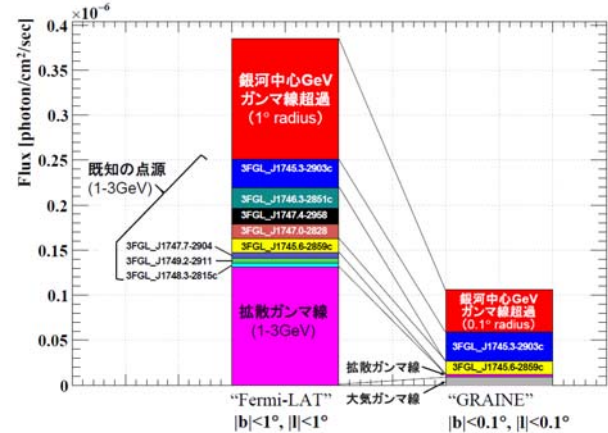


図4: 銀河中心方向からのフラックス比較
銀河中心 GeV 超過は(DM→ γ , NFW, $\gamma=1.26$)を仮定
(左)中心から 1°以内 (右)中心から 0.1°以内

4. 科学観測の開始に向けた大面積望遠鏡の開発

科学観測の最終段階では、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 トン程度にとど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気球環境を模擬した環境試験を重ねている。(図 5) [4]



図5: 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 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た。(図6) 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]

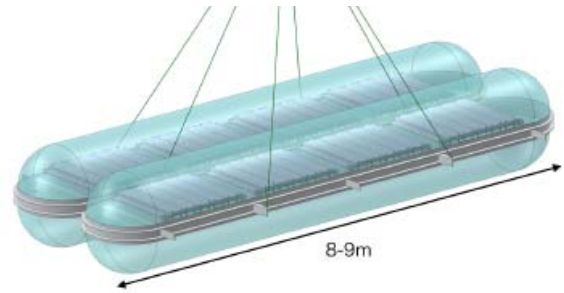


図6:「長繭型」与圧容器

10 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。2023年の気球実験に向けて、名古屋大学内にこれまでの乳剤製造装置の 10 倍規模の（富士フィルム社の製造システムの規模に匹敵する）装置を建設し、さらに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、これまでの手塗り塗布から機械による自動塗布を実現するロール to ロール塗布システムを名古屋大学内に建設した。これらの新たな乳剤製造装置および塗布システムは 2023 年実験のためのフィルムの量産のために現在フル稼働中である。[5]

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。[6] 10 m^2 の開口面積の望遠鏡の解析には、その 100 倍の面積 1000 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

10 m^2 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 2.5 m^2 の与圧容器ゴンドラを準備している。[7] この観測器を用いて 2 回のフライトを実施することにより、 5 m^2 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7: 2.5 m^2 与圧容器ゴンドラ

- [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] 小宮山将広 他 isas19-sbs-038,
 H. Rokujo et al. JINST 14 (2019) P09009 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/P09009>
- [4] 小田美由紀 他 isas19-sbs-037, isas20-sbs-005, isas21-sbs-026, isas22-sbs-020
- [5] 六條宏紀 他 isas20-sbs-004, 臼田育矢 他 isas21-sbs-025, isas22-sbs-019
- [6] M. Yoshimoto et al. PTEP 2017 (2017) 10, 103H01 <https://doi.org/10.1093/ptep/ptx131>
- [7] 六條宏紀 他 isas20-sbs-004, 中村友亮 他 isas22-sbs-021,
 高橋寛 他 isas21-sbs-024, isas22-sbs-018