

GRAINE*計画：全体計画

GRAINE* project: Overall Roadmap

(* Gamma Ray Astro Imager with Nuclear Emulsion)

神戸大学	○青木 茂樹, 尾崎 圭太, 呉坪 健司, 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 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

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、これらの課題を克服するべく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 領域の宇宙ガンマ線の観測を行う。

2. 角度分解能および偏光に対する感度

フィルムに対して垂直に入射したガンマ線について、対生成点すぐ下流側のフィルムで角度測定を行うというシミュレーションを行い、角度分解能のエネルギー依存性を調べた結果を図 1 に Fermi-LAT 検出器のグラフに重ねて示す。フィルム 1 枚の極めて薄い物質で電子陽電子の角度が測定できるという特徴から、すべてのエネルギー領域にわたって、Fermi-LAT 検出器に較べて投影角で約 1 桁 (立体角で約 2 桁) の改善が望める事がわかる。

親ガンマ線の角度決定には、対生成した電子陽電子それぞれのエネルギーで重みをつけた平均を求めることによって精度を高めている。このシミュレーション結果については、SPRING-8, UVSOR

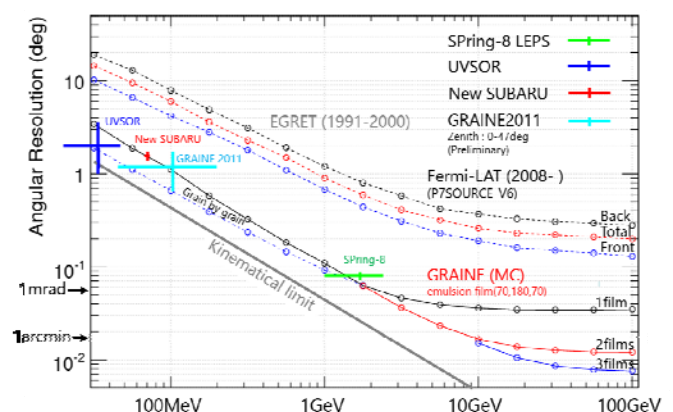


図1: ガンマ線に対する角度分解能
シミュレーション(実線)と実験データ(十字)

および New SUBARU に設けられている逆コンプトンガンマ線ビームを用いてのビームテストによって、その妥当性の検証を行った。シミュレーションと同様に、下流側で測定した電子・陽電子のエネルギーによって重みをつけて、対生成の重心方向を求め、分解能として 2GeV で 0.08 度、1GeV で 0.13 度、および 35MeV で 2 度等のシミュレーションとコンシステントな結果を得ている。

さらに、親ガンマ線の入射軸に対して対生成した電子陽電子が作る方位角のモジュレーションを測ることで、偏光に関する情報が得られる。図 2 は、直線偏光している SPring-8 の逆コンプトンビームで方位角分布を測定した結果であるが、ビームの偏光から期待される値とコンシステントな結果が得られている。[1]

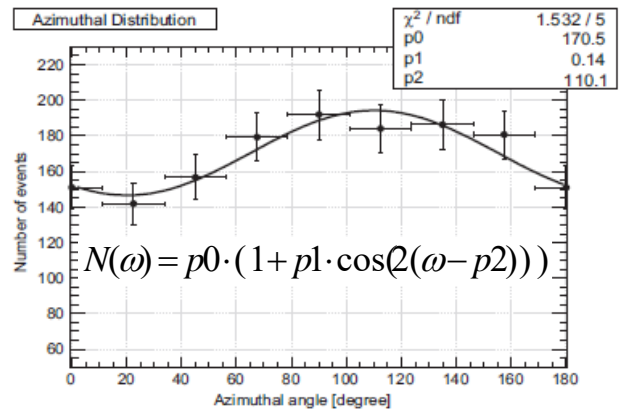


図2:直線偏光ガンマ線による電子対の方位角分布[1]

3. 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 125cm²（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。[2]

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する。その結果から，既知の明るいガンマ線天体（Vela）などのガンマ線源を実際に結像して望遠鏡の総合的な性能評価を行うことを目指した。[3]

第 2.5 段階：2018 年 4 月のアリススプリングス（オーストラリア）での実施のために準備中。当初，口径面積を 2～5m²に拡大することも検討したが，口径面積 3780cm²の多段シフター2015 モデルを再利用し，規模を拡大することなく前回実験で達成できていない Vela からのガンマ線の結像を目指す。

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 10m²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，軽量化大面積化し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。

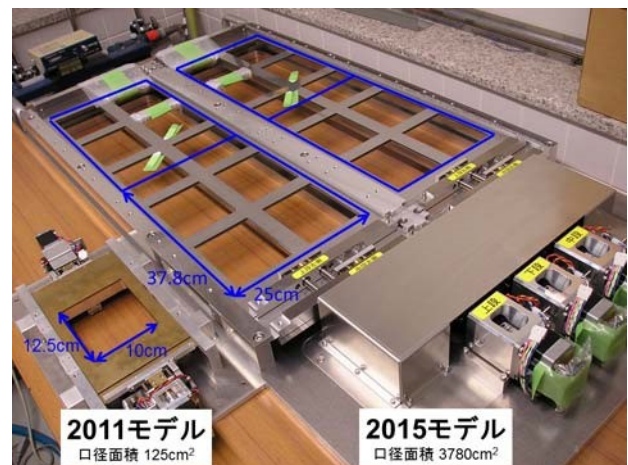


図3:多段シフター1号機(左)と2号機(右)
(ともに三鷹光器社との共同開発)

4. 科学観測から期待される成果

2015年1月にFermi望遠鏡の4年分の観測データに基づく点源カタログが公表され、点源の数が1873個（2年分データ）から3033個へと大幅に増加したが、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5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1000m² 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5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、偏光とパルサー周期に対する位相および両者の相関の分析が可能となり、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領域ガンマ線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。

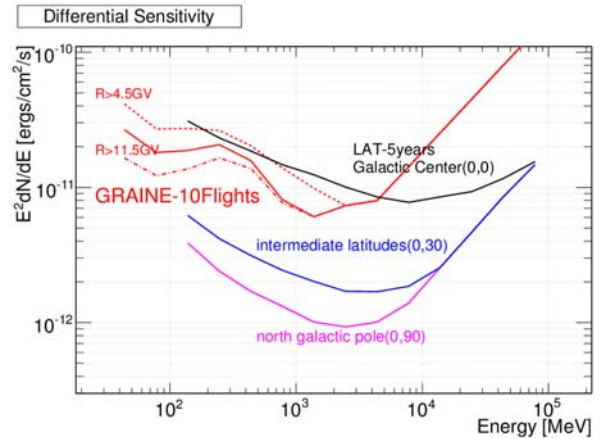
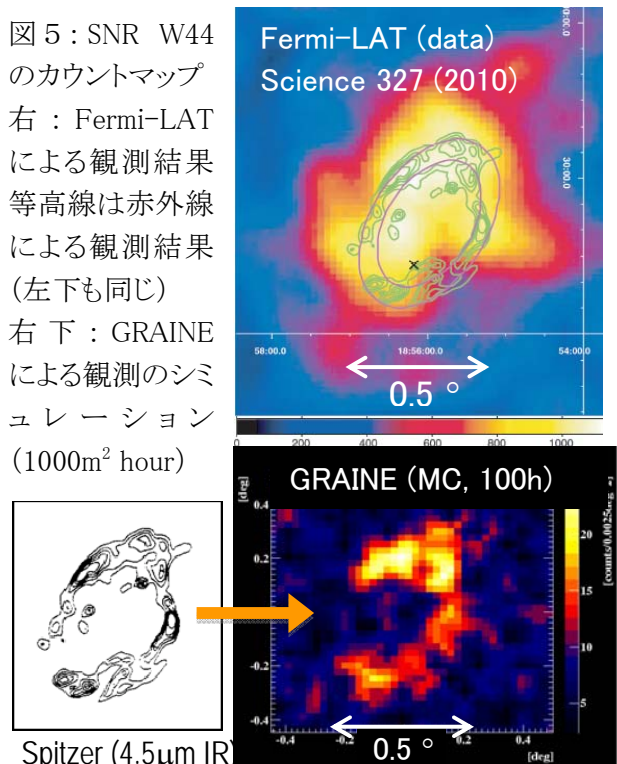


図4：GRAINE計画で目指す感度曲線

図5：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（1000m² hour）



5. 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^2 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設計・製作する。

2015年気球実験での望遠鏡（開口面積約 0.38m^2 ）は、コンバーター本体の重量が約32kgであったのに対して、カロリメーター部が約48kg、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、多段シフターやカロリメーターの重量で面積が制限されてしまう。カロリメーター部を軽量化する工夫とともに、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。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することにより大幅な軽量化を図る。すでに約 1m^2 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6）



図6:ローラー式シフタープロトタイプ

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1.6m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 10m^2 に拡大するためには、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7）

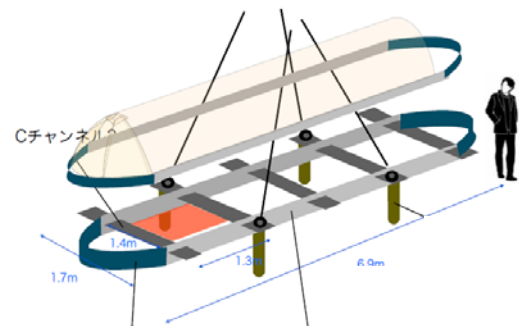


図7:「長繭型」与圧容器

10m^2 のコンバーター部100枚のフィルムの解析には 1000m^2 の面積の解析を1年程度で行える飛跡の読取および解析能力が必要となるが、立ち上げ中の読取システム（HTS:読取速度 $0.24\text{m}^2/\text{h}$ ）の1ヶ月のテスト運用ですでに 10m^2 月のフィルム読取の実績を達成している。[4] さらに読取速度の倍増や稼働率の倍増によって 40m^2 /月の読取速度が達成できる見通しがあり、 1000m^2 の読取を1年程度で完了できる。

[1] K. Ozaki et al. Nucl.Instrum.Meth. A833 (2016) 165-168

[2] S. Takahashi et al. PTEP 2015 (2015) 4, 043H01

[3] S. Takahashi et al. PTEP 2016 (2016) 4, 073F01

[4] M. Yoshimoto et al. PTEP 2017 (2017) 10, 103 H01