

GRAINE*計画：ロードマップと次回豪州フライトの目標 (* Gamma Ray Astro Imager with Nuclear Emulsion)

神戸大学	○青木 茂樹, 井上 達貴, 尾崎 圭太, 小坂 哲矢, 柴山 恵美, 鈴木 州, 高橋 覚, 立石 友里恵, 田中 僚, 田輪 周一, 原 俊雄, 水谷 深志, 藪 美智, 山田 恭平
愛知教育大学	児玉 康一
ISAS/JAXA	斎藤 芳隆, 田村 啓輔, 濱田 要, 吉田 哲也
宇都宮大学	佐藤 禎宏, 手塚 郁夫
岡山理科大学	伊代野 淳, 山本 紗矢
名古屋大学	石黒 勝己, 大塚 直登, 河原 宏晃, 北川 暢子, 駒谷 良輔, 小松 雅宏, 塔 隆志, 佐藤 修, 中 竜大, 長縄 直崇, 中野 敏行, 中村 光廣, 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

宇宙からのX線やガンマ線は、宇宙線の加速起源など高エネルギー現象に関する重要な情報をもたらす。GeV 前後の帯域のガンマ線観測は 2008 年に打ち上げられた Fermi 宇宙望遠鏡のシリコン飛跡検出器による広角望遠鏡 LAT により飛躍的に進歩した。しかしその一方で、この帯域での観測が他波長域の観測に較べて角度分解能が桁違いに不足していることや、偏光について感度をもった観測がなされていないことなどの残された課題が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 $1\sim 10\text{m}^2$) を用いての気球観測により、10 MeV \sim 10 GeV 領域の宇宙由来のガンマ線観測を行う。

2. 角度分解能および偏光に対する感度

垂直に入射したガンマ線について、対生成点のすぐ下流側のフィルムで角度測定を行うというモンテカルロ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。その結果を図 1 に Fermi-LAT 検出器のグラフに重ねて示す。角度分解能は、対生成直後の電子陽電子の方向を決定するまでに必要となる物質質量での電磁散乱によって支配され、すべてのエネルギー領域にわたって、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。

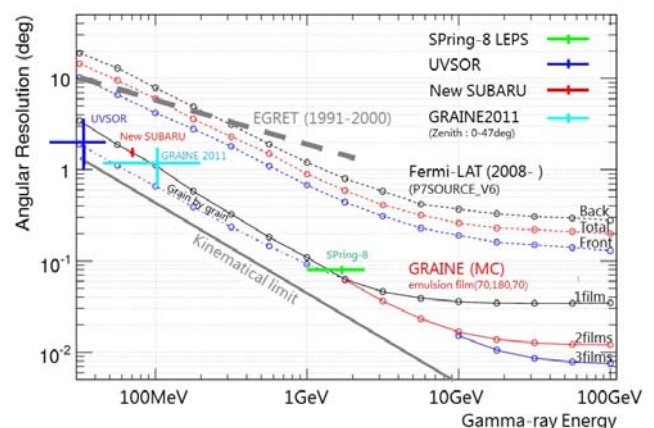


図1: ガンマ線に対する角度分解能(Fermi 望遠鏡、原子核乾板のシミュレーションと実験データ)

対生成した二次粒子それぞれのエネルギーの重みをつけた重心を求めることによって、親のガンマ線の入射方向をより正確に求めている。このシミュレーション結果については、SPring-8 および UVSOR に設けられている逆コンプトンガンマ線ビーム (Max.2.4GeV および Max.47MeV) 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 度というシミュレーションとコンシステントな結果を得ている。

さらにエマルジョン望遠鏡は、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、ビームの偏光からの期待とコンシステントな結果が得られている。

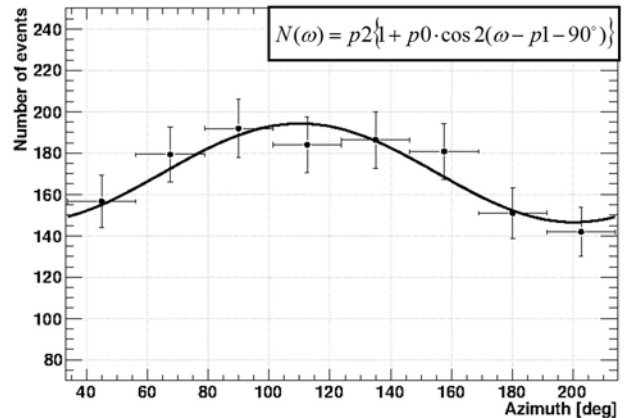


図2: 直線偏光ガンマ線による電子対の方位角分布

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)、口径面積 125cm² (多段シフター 1 号機)、飛行時間 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 10 MeV~GeV 領域の大気ガンマ線フラックスの残留大気圧依存性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)、口径面積 3780cm² (多段シフター 2 号機)、飛行時間 14.4 時間 (11.5 時間 @37km)

現在、顕微鏡によるデータ収集およびデータ解析の進行中。既知の明るいガンマ線天体 (Vela) からのガンマ線を観測し、実際に結像することで、望遠鏡としての総合的な性能評価を行う。[2]

第 3 段階: 2017 年から、中緯度地域、口径面積 1~10m²、36 時間以上の長時間フライト

大面積軽量かつ長時間対応の多段シフターを開発・製作することで、大口径面積の望遠鏡を実現し、長時間フライトを繰り返すことでデータを蓄積し、科学観測を実施する。

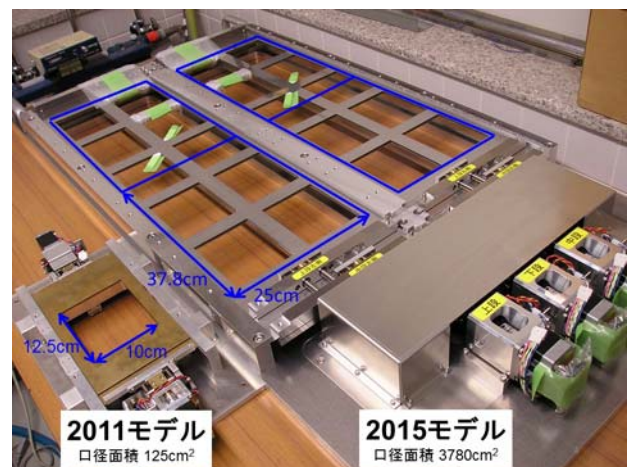


図3: 多段シフター1号機(左)と2号機(右)

(ともに三鷹光器社との共同開発)

4. 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ている。

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。

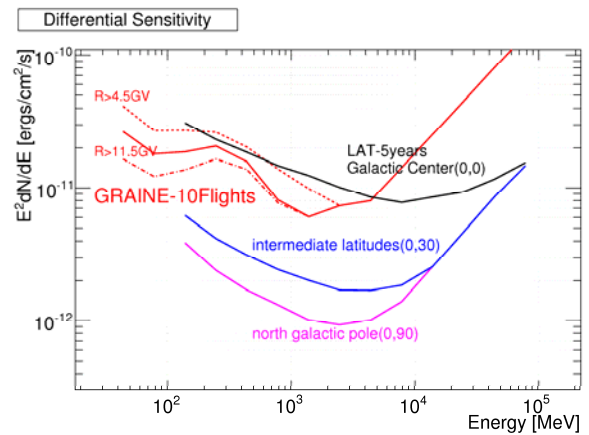
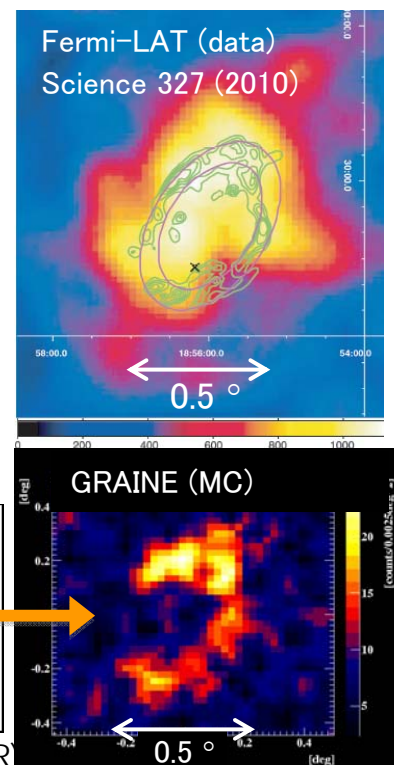


図4:GRAINE 計画で目指す感度曲線

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)



Spitzer (4.5µm IR)

5. 科学観測実施の展望

科学観測の本格的開始のためには、望遠鏡の開口面積の拡大と気球観測時間の延長により、ガンマ線の観測量を増やすことが不可欠である。開口面積 10m^2 の望遠鏡を開発し 7~10 日間の長時間観測を実現できれば、それを複数回重ねる事で Fermi 望遠鏡の年間観測量に匹敵する観測が行える。

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。[3]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ことになる。また、さらなる高速化を目指して新たな読取システムおよびオフライン解析システムの開発も計画されている。

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厚さ 10 ないし 20mm 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実機デザインの検討を開始している。(図 6)



図6:ローラー式シフタープロトタイプ

長時間の気球フライトに関しては、過去の原子核乾板気球実験において JACEE による南半球で豪州→南米の大陸間フライト、RUNJOB による北半球のシベリア大陸横断フライトの実績があり、7~10 日間の宇宙線の蓄積があっても原子核乾板フィルムが解析可能であることは確認できている。しかしながら、近年は人口密集地域の上空を横断する気球フライトが許されず、このような規模の長時間フライトの機会を獲得することが困難になっている。

GRAINE の次回の計画としては、JAXA の豪州気球実験で 36~48 時間の気球フライトで目標天体が望遠鏡の視野を 2 回以上横断する観測を目指す。この観測時間での宇宙線の蓄積は原子核乾板フィルムの許容量に対してわずかであるため、場合によっては、回収後のコンバーターやカロリメーターをそのまま次の気球観測に再利用して、複数回の観測を蓄積してから現像することにより、飛跡の読取や解析を集約する可能性も検討したい。

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

[2] 高橋 覚 他、2015 年度大気球シンポジウム報告 (isas15-sbs-028)

[3] 吉本 雅浩 他、2015 年度大気球シンポジウム報告 (isas15-sbs-031)