

## エマルション望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 GRAINE (Gamma Ray Astro Imager with Nuclear Emulsion)

|           |   |
|-----------|---|
| 神戸大学      | ○青木 茂樹, 尾崎 圭太, 釜田 啓樹, 鈴木 州, 高橋 覚, 中川 諒,<br>原 俊雄, 水谷 早希, 水谷 深志, 六條 宏紀  |
| 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   |
| 名古屋大学     | 石黒 勝己, 河原 宏晃, 北川 暢子, 駒谷 良輔, 小松 雅宏, さこ 隆志,<br>佐藤 修, 鈴木 和也, 中 竜大, 中塚 祐司, 長縄 直崇, 中野 敏行,<br>中村 光廣, 丹羽 公雄, 宮西 基明, 森島 邦博, 吉田 純也 |

### 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。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広角望遠鏡LATにより、GeV前後のガンマ線観測は飛躍的に進歩し、ガンマ線天体の数はそれ以前の数倍となる約2000個が確認されるまでになっている。しかしながら、他波長での観測に較べると角度分解能が不十分なため、銀河面付近の密集領域などをはじめとしてその1/4以上は未同定天体となったままである。

GRAINE (Gamma Ray Astro Imager with Nuclear Emulsion) 計画は、10 MeV～10 GeV 領域の宇宙由来のガンマ線をエマルション望遠鏡 (開口角 $\pm 45^\circ$ 、口径面積約  $1\sim 10\text{m}^2$ ) でとらえ、その個々のガンマ線の到来方向を1 mrad の角度分解能で観測し、ガンマ線天体の広がりや構造を観測することを目的とする。

### 2. エマルションガンマ線望遠鏡

可視光線 (やX線) のように反射鏡で結像させることができない GeV および sub-GeV のガンマ線観測では、その到来方向は対生成した電子・陽電子の方向から測定するより他ない。電子や陽電子に対する角度分解能は、角度測定のために必要となる検出器の物質厚で左右される。Fermi-LAT で用いているシリコン検出器1枚の約半分の物質厚に相当するエマルションフィルムは、1枚の両面で mrad 精度の角度測定ができるため、物質による散乱を低減し、同じエネルギーのガンマ線に対して Fermi-LAT に較べて投影角で数倍、立体角で数 10 倍の分解能での観測が可能となる。

図1にエマルション望遠鏡の概念図を示す。対生成を起こさせるためのエマルションフィルムのスタックからなるコンバーター部、個々のイベントの発生時刻を知るためのタイムスタンプ部、および対生成後の電子陽電子のエネルギー測定部から構成される。大気の影響を避けるため気球に搭載して大気トップで観測を行う。照射後検出器を回収し、現像処理の後にコンバーター部の全面スキャンを行う。コンバーター部内で対生成を見つけたら、電子・陽電子の発生角度の測定を行うとともに検出器下流側へ向かって追い下げる。コンバーター部最下流面とタイムスタンプ部との対応

づけを行い、イベント発生時刻を知る。追い下げた電子・陽電子の飛跡については多重散乱から運動量測定を行い、それぞれの運動量の重みをつけて親のガンマ線の入射方向の測定を行う。タイムスタンプ部で得られるイベント発生時刻に基づきその時刻の姿勢モニターの情報と併せて、天球上でのガンマ線の到来方向を決定する。

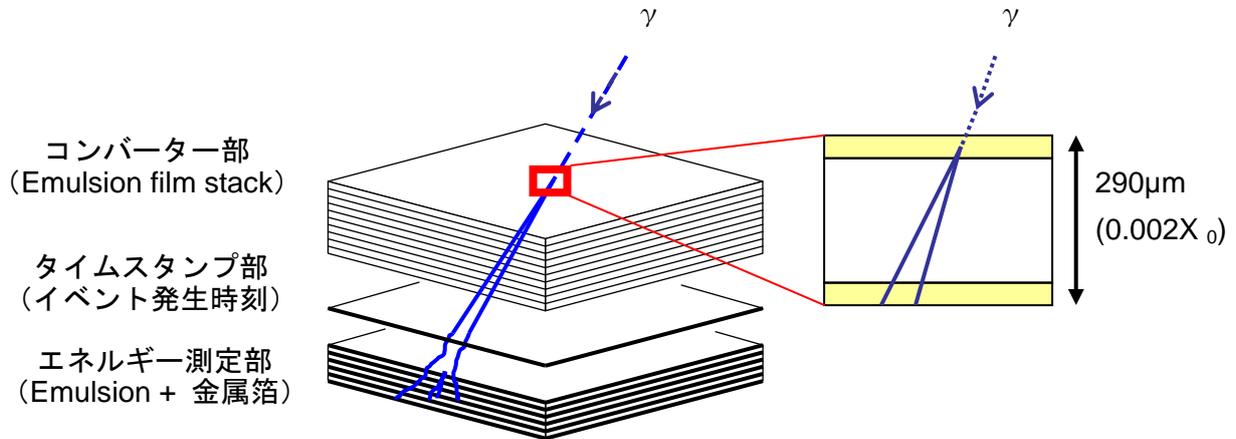


図1：エマルジョン望遠鏡の概念図

### 3. 角度分解能

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2に Fermi-LAT 検出器のグラフに重ねて示す。

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値を得た。

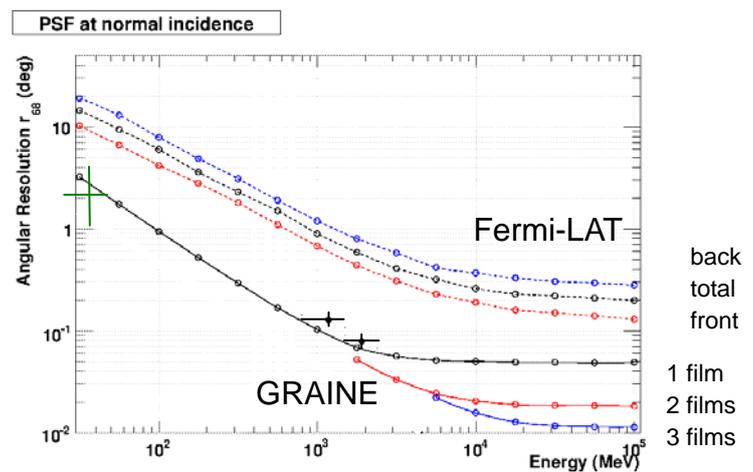


図2: 角度分解能のエネルギー依存性

GRAINE のグラフは MC(Geant4)による値、  
十字のプロットはビームテストの結果

図3左側は、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。deconvolute 処理を施しても緑色の実線で示された赤外による観測に較べると解像度は不十分と言わざるを得ない。図3右側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。

また、対生成の際のアジマス角を物質による電磁散乱を大きく受ける前に測定する事が可能で、将来、大面積×長時間フライトによって高統計の観測ができれば、このエネルギー領域で初めてとなる偏光の観測が可能となる。

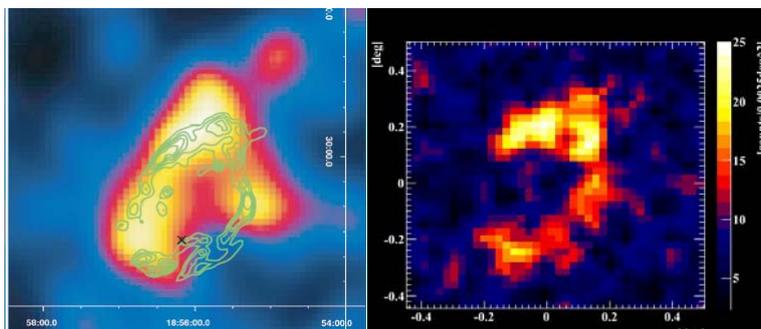


図3:SNR W44 のガンマ線カウントマップ

左:Fermi-LAT 検出器によるデータ(2~10GeV)

右:エマルジョン望遠鏡のシミュレーション結果

(1~10GeV 1000m<sup>2</sup> hour の観測)

#### 4. エマルジョン多段シフターとデイトタイムスターカメラによる姿勢決定

コンバーター部の下流側に、ミクロンの再現性でエマルジョンフィルムを往復させることのできるシフターを複数段置き、フライト中にシフター各段を独立な周期で動かすことによって、アナログ時計の秒針と分針と時針の組み合わせのように 12 時間を秒単位に分割できる多段シフターを開発し、タイムスタンプ部として採用した。ファイバートラッカーのように高電圧を必要とする読出しデバイスや、トリガーや高速データ収集系は不要となり、シフターの単純な駆動系だけでタイムスタンプ部を実現でき、観測器全体を非常にコンパクトなものにすることができた。[1]

姿勢モニターとしては、将来の長時間（昼夜）観測へむけてデイトタイムスターカメラを開発している。これらを組み合わせることにより、フライト中のエマルジョン望遠鏡の天球に対する姿勢を決定することができる。[2]

#### 5. ロードマップ

第 1 段階として、口径面積 125cm<sup>2</sup> の多段シフター 1 号機を用いた望遠鏡で 3 時間程度の観測を行い、①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と②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などを行う。これについては、2011 年 6 月に大樹町において気球実験を行った。各構成要素が期待通りに動作したことが確認できており、データの解析も順調に進み、大気ガンマ線の高度依存性の測定などが確認できている。[2,3]

次に第2段階として、口径面積  $2500\text{cm}^2$  の多段シフター2号機(右図)を用いた望遠鏡で12~24時間の観測を行い、北半球であれば Geminga、南半球であれば Vela などの明るいガンマ線天体を実際に観測し、望遠鏡としての overall な性能評価を行う。現状では、12~24時間のフライトのためには海外でのフライトを目指す必要があり、2013年10月に計画されているオーストラリアでのフライトを目指して準備中である。

第3段階では、第1段階と第2段階の観測をふまえた上で、口径面積  $1\text{m}^2$  以上の多段シフターを開発・製作し、中緯度地域での150時間オーダーの長時間フライトによる観測を繰り返し科学観測を行う。

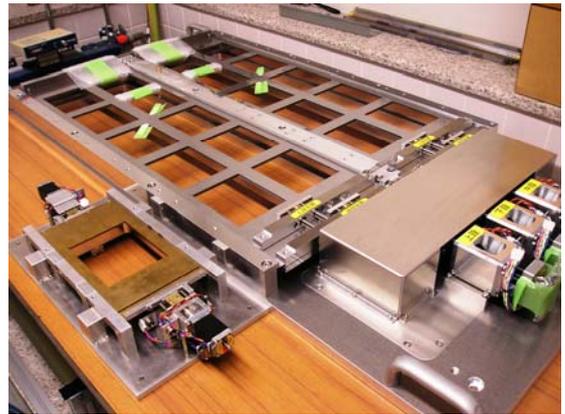


図5:多段シフター1号機(左)と2号機(右)  
(ともに三鷹光器社との共同開発)

## 6. 2013年10月のフライトへ向けての準備状況

数  $10\text{MeV}$  領域のガンマ線検出においては、電子や陽電子のフィルム1枚での検出効率が重要となる。2011年6月の大樹町での気球実験において、これまで標準的に用いてきたフィルムに較べて高い銀粒子密度の飛跡が得られる高感度乳剤を用いたフィルムを一部に導入し、最少電離粒子の飛跡に対して従来品より高い検出効率が得られることを確認した。この高感度乳剤を用いたフィルムを次のフライトで本格的に使用するため、フィルムの量産に不可欠な乳剤塗布に要する時間の短縮のためのフィルム製造装置を試作し、条件出しのためのテスト中である。

ガンマ線天体のエネルギースペクトルの決定においては、電子・陽電子の運動量測定精度がカギとなる。多重電磁散乱による運動量測定法は、ハドロンやミューオンに対しては豊富な実験データで検証された手法であるが、制動輻射を伴う電子に対しては未検証の部分がある。東京大学東海村キャンパスにあるライナック研究施設の  $35\text{MeV}$  電子ビームを用いて、望遠鏡コンバーター部への照射実験を行った。運動量測定精度に関する preliminary な測定値として  $32.1^{+7.6}_{-8.8} \text{ MeV}/c$  という値を得た。

多段シフター2号機については、エマルジョンフィルムを用いて宇宙線を捉えるテストを常温で行い、装置の大きさが数倍となっても1号機と同程度の精度を確保していることが確認できた。2012年中に低温・真空環境での動作テストを予定している。

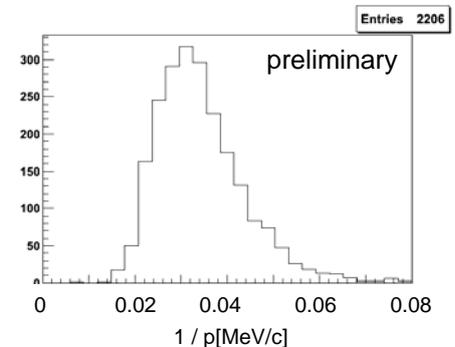


図6:  $35\text{MeV}/c$  電子ビームに対するフィルム10枚による運動量測定結果

- [1] 六條宏紀 他, 2011年度大気球シンポジウム報告
- [2] 尾崎圭太 他, 2011年度大気球シンポジウム報告
- 尾崎圭太 他, 2012年度大気球シンポジウム報告
- [3] 高橋覚 他, 2012年度大気球シンポジウム報告