

# 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, 原 俊雄, 水谷 早希, 六條 宏紀
愛知教育大学	児玉 康一
ISAS/JAXA	斎藤 芳隆, 田村 啓輔, 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, 北川 暢子, 駒谷 良輔, 小松 雅宏, さこ 隆志, 佐藤 修, 鈴木 和也, 中 竜大, 中塚 祐司, 長縄 直崇, 中野 敏行, 中村 光廣, 丹羽 公雄, 濱田 要, 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。X線に関しては、多層膜反射鏡による結像技術および半導体素子による撮像技術が確立され、X線天体の微細な構造に関する議論が可能なまでになっている。これに対して GeV 前後のガンマ線は、1991年に打ち上げられた CGRO 衛星の EGRET 検出器による 100 mrad 程度の観測が存在するのみという状況が長らく続いていたが、近年になって Fermi 宇宙望遠鏡の人工衛星に搭載したシリコン飛跡検出器望遠鏡 LAT による観測が始まり、飛躍的な進歩を遂げた。ガンマ線天体の数はそれまでに確認されていた数の数倍にのぼる約 1900 個が確認された。しかしながら、他波長での観測に較べて角度分解能が不十分であるため、銀河面付近の密集領域などをはじめとして1/4以上が未同定天体となったままになっている。

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 1~10m<sup>2</sup>) 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のできない GeV および sub-GeV のガンマ線観測では、その到来方向はガンマ線によって対生成する電子・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質量で左右される。Fermi 望遠鏡で用いるシリコン検出器1枚の約半分の物質質量に相当するエマルションフィルムは、1枚の両面だけで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 望遠鏡に較べて投影角で 1/10、立体角で 1/100 の解像度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。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、およびガンマ線のエネルギーを測定するためのカロリメータ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。

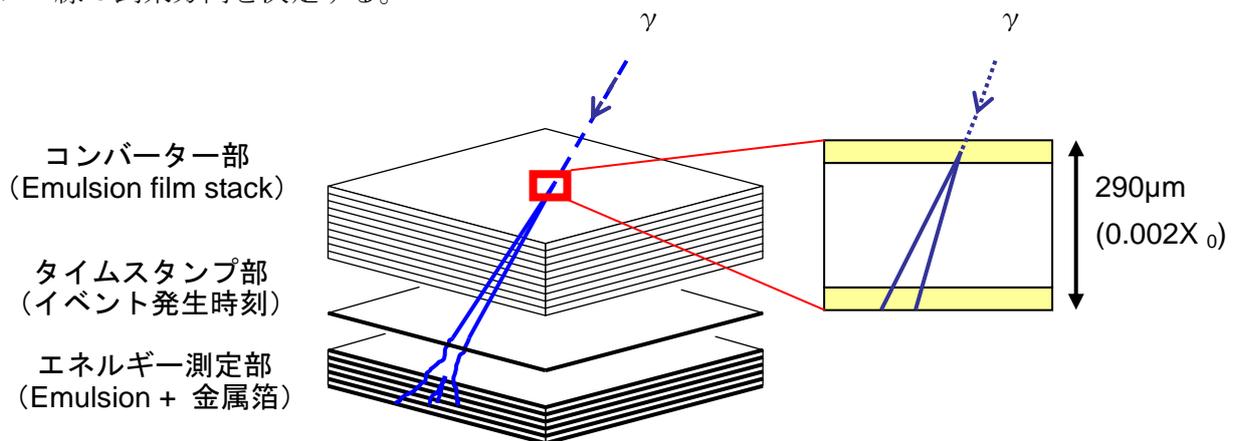


図1：エマルジョン望遠鏡の概念図

### 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の両面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にフェルミ宇宙望遠鏡 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 に設けられている逆コンプトンガンマ線ビーム (Max. 2.4GeV) 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 0.08 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。

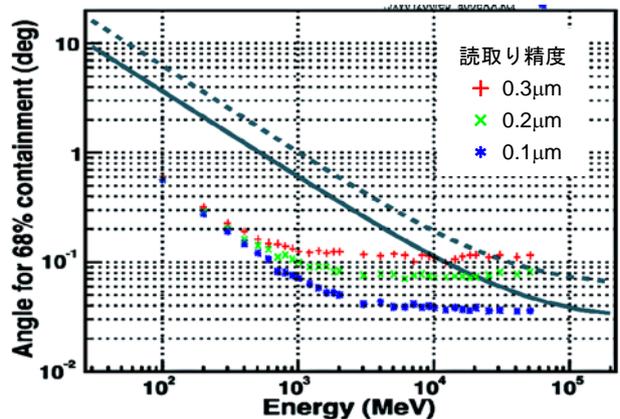


図2: 角度分解能のエネルギー依存性  
(灰色の曲線は Fermi-LAT 望遠鏡)

右図左側は、Fermi 望遠鏡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。右図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 望遠鏡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ている。空間分布に関してより詳細な議論が可能となることわかる。

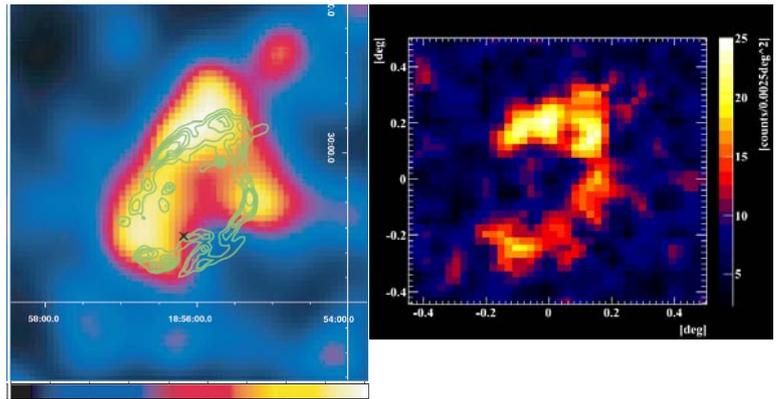


図3:SNR W44 のガンマ線カウントマップ

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)

W44 に関しては、ガンマ線のエネルギースペクトルの測定から、陽子起源のモデルと電子起源のモデル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なのであるが、Fermi 望遠鏡による観測では、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 2 deg の大きさになってしまうために、近接する領域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測ることができない。これに対して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、0.4 deg 以下となり。立体角で 1/25 の大きさにまで縮めることができる。このエネルギー帯の正確なフラックスを含むスペクトルを観測することで、ガンマ線の起源が陽子起源か電子起源かの結論を導くことが可能となる。

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。

#### 4. エマルジョン多段シフターによるタイムスタンプ部

2004 年 5 月に三陸で行った気球実験[1]では、大気トップでのレベルフライト中に一部のエマルジョンフィルムを本体に対してゆっくりと連続的に移動させ、解析の際に両者の相対的な位置関係を再現することによって、飛跡が通過した時間を得るシフター機構を開発し、15 分という時間分解能を得た。ガンマ線望遠鏡のためには秒以下の精度が必要となるが、秒以下の精度を得るために必要な速度で単段のシフターを動かし続けると、そのストロークは 10m 近くになってしまう。これに対して、複数段のシフターを異なる周期で独立に動かすことによって、時計の秒針と分針と時針の組み合わせから 12 時間を秒単位に分割できるように、1 段あたり 100 μm×100 ステップ=1 cm のストロークを 3 段重ねれば、秒単位で動かし続けても 100<sup>3</sup> ステップ=10<sup>6</sup> 秒=約 10 日間にわたってタイムスタンプを押すことができる。この多段シフターによるタイムスタンプ部によって、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、高速データ収集システムや

トリガーシステムは不要となり、シフターの単純な駆動システムだけでガンマ線望遠鏡を実現することが可能となり、観測機器全体を非常にコンパクトなものにすることができる。

## 5. ロードマップおよび準備状況

第1段階として、 $100\text{cm}^2$ 程度の口径面積で3時間程度の観測を行い、①中緯度気球高度における $10\text{MeV}\sim\text{GeV}$ 領域の大気ガンマ線バックグラウンド flux の残留大気圧依存性の実測、②将来の長時間（昼夜）観測へむけた昼光スターカメラの動作確認と限界等級の実測、③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することが確認できており、データの解析も順調に進捗中で、とらえたガンマ線イベントについて天球に対する到来方向を決定し、望遠鏡システムとして働くことを確認した。これらについては本シンポジウムにおける神戸大学の尾崎・六條・高橋の講演を参照していただきたい。[2,3,4]

次に第2段階として、 $2000\sim 2500\text{cm}^2$ の口径面積で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、姿勢モニターも含めた overall な角度分解能の評価などを行う。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、フィルムの輸送方法ないしは現地での現像設備の立ち上げ等に関して検討中で、そのための予算を獲得すべく準備中である。

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行うことを目指す。

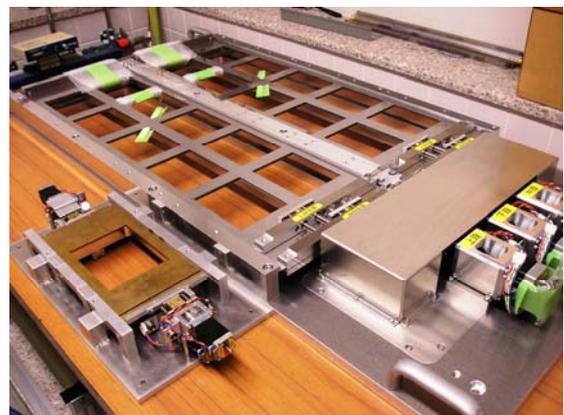


図5: 多段シフター1号機(左)と2号機(右)  
(ともに三鷹光器社との共同開発)

## 6. まとめと今後の計画

角度分解能に優れたエマルジョンガンマ線望遠鏡を実現することにより、広がりを持ったガンマ線天体のより詳細な構造を明らかにするとともに、放射起源を探る上で重要な低エネルギー領域のフラックスを決定することが可能となる。

2011年6月の大樹町での気球実験において、多段シフター1号機を使用したガンマ線望遠鏡プロトタイプ1号機が気球環境で期待通りに動作することを確認した。多段シフター2号機もすでに製作済みで、フライトへ向けで準備中である。

- [1] 青木茂樹 他 および 野中直樹 他, 2004年度大気球シンポジウム報告  
S. Aoki et al., Advances in Space Research Vol.37(COSPAR 2004 Proceedings) pp.2120-2124
- [2] 尾崎圭太 他, 2011年度大気球シンポジウム報告
- [3] 六條宏紀 他, 2011年度大気球シンポジウム報告
- [4] 高橋覚 他, 2011年度大気球シンポジウム報告