

GRAINE 計画：エマルション望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画

神戸大学	○高橋 覚, 青木 茂樹, 尾崎 圭太, 小坂 哲矢, 柴山 恵美, 鈴木 州, 立石 友里恵, 田輪 周一, 原 俊雄, 水谷 深志, 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
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, さこ 隆志, 佐藤 修, 中 竜大, 中塚 祐司, 長縄 直崇, 中野 敏行, 中村 光廣, 丹羽 公雄, 宮西 基明, 森島 邦博, 吉本 雅浩, 六條 宏紀

1. はじめに

宇宙には極限的な環境が普遍的に存在しており、そこから放たれるガンマ線は極限宇宙に対して直接的な知見をもたらす。また、ガンマ線は宇宙を探るうえでの強力なプローブにも成り得る。そして、ガンマ線の観測を通して、宇宙の壮大なスケールや極限的な環境を利用した、地上では決して成し得ない実験を可能にする。これまでのガンマ線観測により、宇宙線(起源、加速機構、伝播など)、高エネルギー天体(超新星残骸、パルサー、パルサー風星雲、活動銀河核、ガンマ線バースト、太陽など)、宇宙論(系外背景光の分布など)、基礎物理(プランクスケールでのローレンツ不変性の検証、暗黒物質の対消滅もしくは崩壊からのガンマ線の探索、原始ブラックホールの探索、反物質ドメインの探索など)に対する知見が得られている。

現在、フェルミ望遠鏡によって、高エネルギー帯域におけるガンマ線の観測は大きく進展している。これまでに 3000 ものガンマ線源が検出されており、そこから多くの知見が得られている。また一方で、新たな課題も浮かび上がってきている。この帯域における観測では、天体観測において決定的に重要な性能のひとつである角度分解能が、他波長に比べ桁違いに悪い。また、光子がもつ独立な情報のひとつである偏光については、その観測の困難さから、いまだ感度をもった観測がなされていない。これらの克服はこの帯域における観測を新たなステージへと導く。

2. GRAINE 計画

エマルションフィルムは、少ない物質質量($\sim 10^{-3}X_0$)で、高い空間分解能($< 1\mu\text{m}$)をもつ、強力な飛跡検出器である。エマルションフィルムで、ガンマ線による電子対生成の始まりを捉えることで、ガンマ線に対して優れた角度分解能、及び直線偏光に対する感度を持つことが期待できる。

我々は、エマルションフィルムから成る大口径面積(10m^2)のガンマ線望遠鏡を開発し、長時間気球フライト(~ 7 日間)を繰り返し、宇宙ガンマ線($10\text{MeV} - 100\text{GeV}$)の観測を目指す。この計画を GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)計画と呼ぶ。

エマルションガンマ線望遠鏡は、コンバーター、タイムスタンパー、カロリメーター、そして姿勢モニターから成る。エマルションフィルムを積層したコンバーターで電子対の始まりを捉え、捉えた事象に対して、タイムスタンパーでタイムスタンプを押し、その時刻情報を基に姿勢モニターの情報と併せることで、ガンマ線の天球に対する到来方向が決定できる。

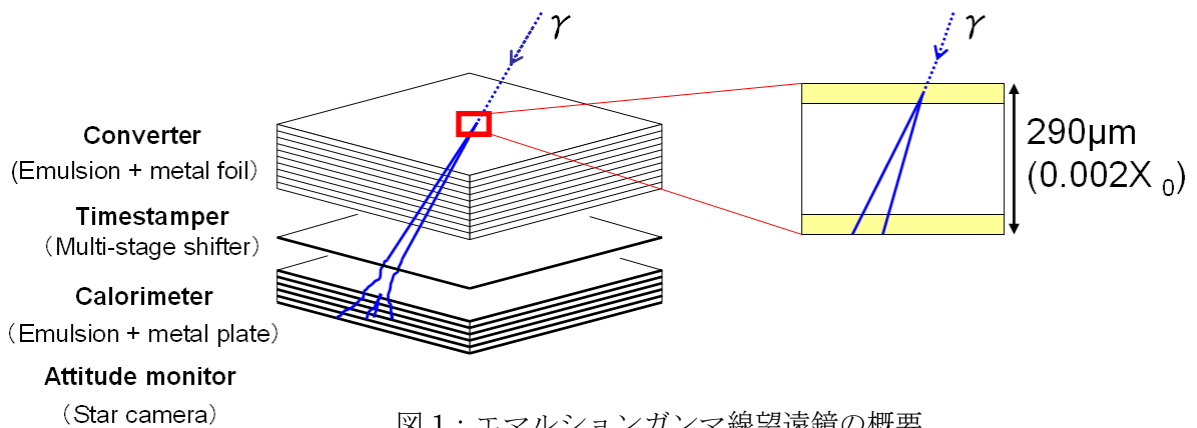


図 1：エマルジョンガンマ線望遠鏡の概要

GRAINE で目指すサイエンスをここでいくつか紹介する。

π^0 放射に特徴的なエネルギースペクトルを捉えることにより、陽子加速の直接的な証拠が得られる。フェルミ望遠鏡によって、超新星残骸 W44 や IC443 から、 π^0 放射に特徴的なエネルギースペクトルを捉えたとの報告がなされた。しかしながら、現状の測定は、 π^0 放射の特徴が明確になるエネルギー領域 ($<200\text{MeV}$)において、系統誤差が大きくなってしまっている。これは主要には、銀河面領域における拡散ガンマ線混入の不定性のためである。エマルジョンガンマ線望遠鏡は、フェルミ望遠鏡に対して、一桁近く優れた角度分解能を持っており、この拡散ガンマ線の混入を 100 分の 1 程度に抑えたスペクトル測定が実現できる。また、W44 や IC443 のような比較的明るい超新星残骸だけでなく、その他の超新星残骸についても系統誤差を抑えたスペクトル測定をおこない、超新星残骸における陽子加速が普遍的であるのかを系統的に調べる。また、より低いエネルギーまで精度良くスペクトルが測定できれば、新たな成分が現れてくることも期待でき、もし電子起源の成分が捉えられれば、超新星残骸における陽子/電子比の初めての直接測定につながる。

パルサーや活動銀河核などの放射機構に迫る上で、偏光観測は強力な手段と成り得る。しかしながら、その観測の困難さから、偏光に感度を持った観測は未だ成されていない。フェルミ望遠鏡による観測が始まり、エネルギースペクトルからパルサーの放射モデルとしてアウターギャップモデルが支持されたが、さらに観測が進んでいくと、また別の成分が現れはじめ、これを説明するために様々なモデルが提唱される状況になっている。例えば、アウターギャップモデルでは、高い偏光度 ($\sim 70\%$) でパルス位相ごとに偏光方向が変わることが予測されており、偏光観測は放射モデルの選別を可能にする。

宇宙論的な距離を伝播するガンマ線を利用することで、プランクスケールを超えた基礎物理の探求が可能となる。量子重力理論はローレンツ不変性の破れを予言しており、プランクスケールを超えて基本的な対称性を検証することは、量子重力理論に対して観測的な制限が与えられる。フェルミ望遠鏡によって、ガンマ線バーストからのガンマ線の到来時刻のエネルギー依存性が調べられ、プランクスケールでのローレンツ不変性が示された。また、GAP によるガンマ線バーストの偏光観測 ($70\text{keV}-300\text{keV}$) によって、プランクスケールを超えて CPT 対称性が成り立っていることが示された。CPT 対称性の破れ (ここでは偏光ベクトルの回転角) は、光子のエネルギーの 2 乗に比例して大きくなるため、高エネルギーガンマ線 (例えば $>100\text{MeV}$) で遠方の活動銀河核やガンマ線バーストからの偏光を観測することによって、既存の制限に対して、4 桁以上の精密さで CPT 対称性の検証ができる。

これまでに、加速器ガンマ線ビームや、山頂高度における大気ガンマ線を使って、地上で試験を重ね、エマルジョンガンマ線望遠鏡が実現可能であることを示してきた。気球実験のはじめのステップとして、

口径 1/10m で 3 時間程度のフライトをおこない、各構成要素の動作・性能試験、及びそれらの連動試験、またバックグラウンドとなる大気ガンマ線の実測をおこなう。次に、口径 1/2m で 1 日程度のフライトをおこない、既知の明るいガンマ線天体の観測による、オーバーオールでの性能実証をおこなうと共に、最高解像度での観測の開始を目指す。そして、観測面積、フライト時間の拡大を図り、フェルミ望遠鏡と同程度の exposure を目指し、科学観測を開始する。

3. 2011 年度気球実験

2011 年 6 月 8 日に、大樹航空宇宙実験場(北海道)において、JAXA 大気球実験をおこない、口径面積 12.5cm×10cm で、フライト時間 4.3 時間(そのうち高度 35km の水平浮遊 1.6 時間)の気球フライトに成功した。この実験では、はじめのステップとなる各構成要素の動作・性能試験、及びそれらの連動試験、またバックグラウンドとなる大気ガンマ線の実測を目指す。

フライトデータ解析では、エマルジョンフィルム全面(12.5cm×10cm)にわたり、低いエネルギー閾値(<50MeV)、大入射角(>45 度)、高信頼性(>97%)でのガンマ線事象の系統的な検出に成功した。また、時間情報を併せ、コンバーター内で発生しているガンマ線(ハドロン誘起事象や電子誘起事象)を識別し、バックグラウンドが抑えられるだけでなく、ガンマ線データの校正(方向、時刻、エネルギー、偏光、検出効率など)に使えることを見出した。実際に、フライトデータを使い、高い角度分解能や、十分な時間分解能が得られることを実証した。そして、大気ガンマ線フラックスを導出し、エマルジョンガンマ線望遠鏡の気球フライトにおけるバックグラウンドの初めての理解が得られた。ガンマ線事象を検出し、時刻情報を付与し、姿勢モニターの情報を併せ、ガンマ線の天球に対する到来方向を決定する一連の流れを確立し、エマルジョンガンマ線望遠鏡のファーストライトに成功した。これらをまとめ、エマルジョンガンマ線望遠鏡の初めての気球実験として論文を投稿した。

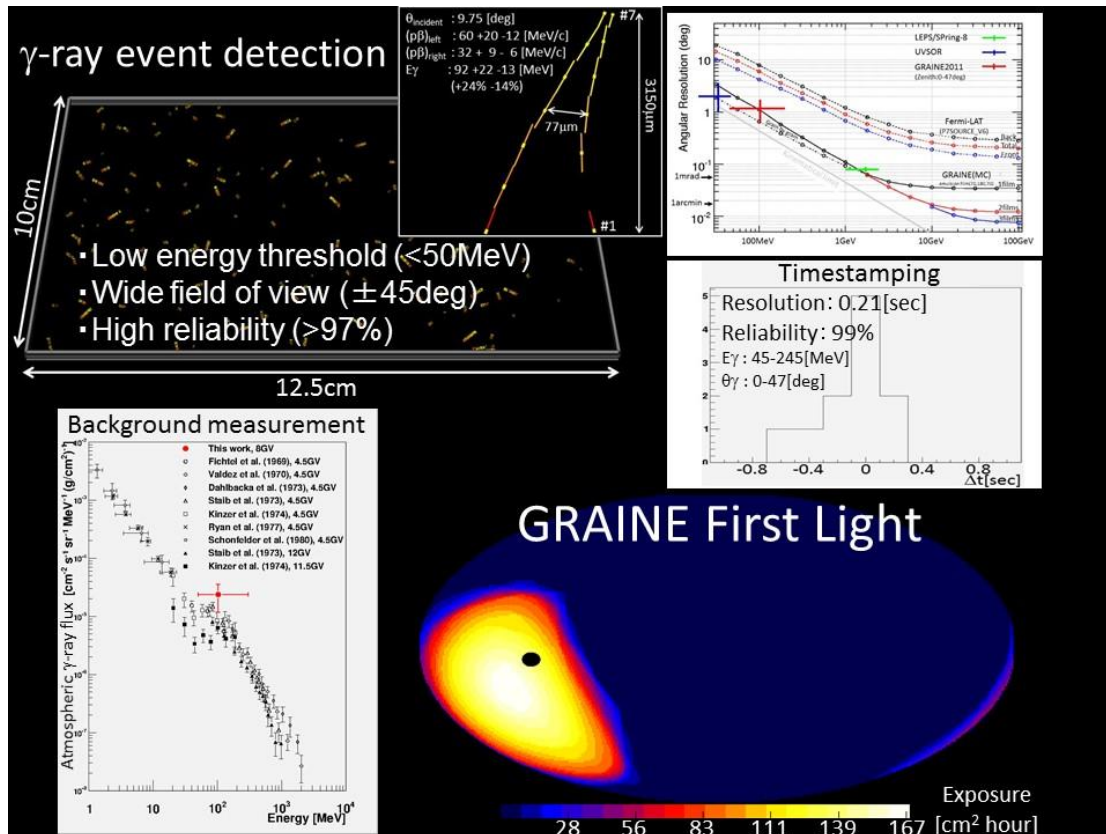


図 2 : 2011 年度気球実験フライトデータ解析

4. 次期気球実験

2015年5月に、アリススプリングス(豪)で、CSIRO-JAXA 国際大気球実験を予定している。次期気球実験では、口径面積 3600cm^2 (2011年度気球実験の ~ 30 倍)、1日スケールのフライト(~ 6 倍)、ミリ秒オーダーの時間分解能(~ 10 倍)を目指す。そして、既知の明るいガンマ線天体である Vela パルサーを 5σ 以上で検出し、オーバーオールでの性能実証を目指すとともに、立体角で ~ 100 倍の高解像度での観測の開始、この帯域において初めてとなる偏光計測のためのデータ取得の開始、89ミリ秒周期のパルス放射の位相分解に挑戦していく。

2011年度気球実験の経験や実績に基づき、様々な改良を推し進め、それらが実現しつつある。昨年度の報告に加え、ユニットサイズの拡大($12.5\text{cm} \times 10\text{cm} \rightarrow 37.75\text{cm} \times 25\text{cm}$)によるエッジ効果損失の低減(損失率 $50\% \rightarrow 20\%$ @45度入射)、口径面積の拡大($2500\text{cm}^2 \rightarrow 1.5$ 倍 $\rightarrow 3600\text{cm}^2$)、多段シフターの低温特性の改良(-35°C における負荷トルクを5.5分の1に低減し、動作限界温度を -35°C から -60°C 以下まで引き下げ、ミリ秒オーダーの時間分解能を実現するステージ速度での運用見通しを得た)、多段シフターのステージ間ギャップの均質化(ばらつき $0.11\text{mm} \rightarrow 0.05\text{mm}$)、GPS の PPS による多段シフターの制御、現像において連携を進めている A.Bakich ら(シドニー大)との覚書の取り交わし、次世代読取装置 HTS による読取速度の高速化が実現しつつある。また、準備も着々と整いつつある。

参考文献

青木茂樹 他, 2004-2012 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.

高橋寛 他, 2007-2009, 2011-2013 年度大気球シンポジウム報告.

S. Takahashi et al., *Nucl. Instr. And Meth. A*, 620 (2010) 192-195.

六條宏紀 他, 2010, 2011, 2013, 2014 年度大気球シンポジウム報告.

尾崎圭太 他, 2011, 2012 年度大気球シンポジウム報告.

H. Rokujo et al., *Nucl. Instr. And Meth. A*, 701 (2013) 127-132.

水谷深志 他, 2014 年度大気球シンポジウム報告