

GRAINE 計画: 科学観測実験の展望

神戸大学	○高橋覚, 青木茂樹, 尾崎圭太, 呉坪健司, 柴山恵美, 鈴木州, 立石友里恵, 原俊雄, 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	濱田 要
岡山理科大学	伊代野 淳, 山本 紗矢
名古屋大学	大塚直登, 河原宏晃, 駒谷良輔, 小松雅宏, 佐藤修, 長縄直崇, 中野敏行, 中村光廣, 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

宇宙高エネルギーガンマ線観測は、宇宙における高エネルギー現象に対して直接的な知見をもたらす。ガンマ線が引き起こす電子対生成反応を、エマルジョンフィルムで捉えることで、ガンマ線に対して優れた角度分解能、およびガンマ線偏光に対する感度が実現できる。我々は、エマルジョンフィルムから成るガンマ線望遠鏡を開発し、気球フライトによる宇宙ガンマ線観測を目指す(GRAINE 計画)。

2. これまでに

地上実験において、逆コンプトン散乱ガンマ線ビームを使い、優れた角度分解能および偏光感度の実証をおこなってきた[LEPS/SPring-8(2004年12月)、UVSOR(2008年3月)、NewSUBARU(2013年11月)]。また、山頂高度において、大気ガンマ線を使ったガンマ線検出能の実証[乗鞍(2007年7月、9月、2013年7月)]、その他にも、エネルギー測定精度の研究[東大電子ライナック@東海村(2012年8月)、NewSUBARU(2013年11月)]をおこなってきた。また、タイムスタンパーである多段シフターの開発(2007年6月)や、チェンバー平面性の研究[J-PARC μ ピット(2014年11月)]をおこなってきた。これらの地上における研究開発により、エマルジョンガンマ線望遠鏡の実現可能性を拓いてきた。

これらの研究開発の成果が認められ、JAXA 大気球実験に採択された。2011年6月に、大樹航空宇宙実験場(北海道)において、エマルジョンガンマ線望遠鏡の初めての気球実験を成し遂げた(口径面積 125cm^2 、フライト時間 4.3 時間(高度 34.7km 水平浮遊 1.6 時間))。フライトデータ解析により、望遠鏡の動作・性能実証、バックグラウンドの初めての理解、そして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実現可能性を実証した。

2011年気球実験の経験・実績に基づき、実験設計をはじめ、様々な改良および準備をおこない、望遠鏡のオーバーオールの実証を目指し、2015年5月にオーストラリアにおいて、JAXA 大気球実験をやり遂げた(口径面積 3780cm^2 (約 30 倍)、フライト時間 14.4 時間(高度 36.0–37.4km 水平浮遊 11.5 時間(約 7 倍)))。

これまでの研究開発により、エマルジョンガンマ線望遠鏡による宇宙ガンマ線観測の実現可能性を拓いてきた。

3. 科学観測実験の展望

オーストラリア気球実験拠点は、①日スケールの気球実験が可能である。②南半球であるため、南天の有望なガンマ線源が観測できる(Vela、W44、銀河中心など)。③中緯度に位置しており、地磁気のカットオフ Rigidity が高く、荷電粒子バックグラウンドが抑えられる。以上の点から、エマルジョンガンマ線望遠鏡にとって、他に類を見ない極めて有望な気球実験拠点であると言える。

2015年気球実験は、JAXA 大気球実験室の現体制において初めてとなるオーストラリア気球実験であったが、JAXA 大気球実験室の成功、および我々も先行実験としての役割を果たし、今後もオーストラリア気球実験は継続される方針となっている。我々も口径面積、観測時間の拡大を図り、科学観測の開始を目指す。

高エネルギー帯域におけるガンマ線の偏光観測は、その観測の困難さから未だ有意な観測がなされていない。エマルジョンガンマ線望遠鏡により、高エネルギーガンマ線の偏光観測の開拓を狙う。そして、パルサー、活動銀河核、フレア、ガンマ線バーストの偏光観測を切り拓き、その放射機構や磁場構造の解明、またプランクスケールを超えた新物理の探索を狙っていく。図 1 に Vela パルサーに対する偏光感度を示す。1 周(ガンマ線源が日周運動で望遠鏡の視野を横切る回数(おおよそそのフライト日数に相当))を越えたあたりから偏光度 100%を切るよ

うな有意な偏光観測が実現する。また、照射量(口径面積×観測時間)を蓄積していくことで、偏光感度が高められる。図 2 に、照射量を蓄積した場合の偏光感度を示す。Vela パルサーに対しては、偏光度 10%近くまで探ること可能である。その他にも、明るいパルサー、活動銀河核、フレア、またガンマ線バーストに対しても偏光感度が拓けてくる。

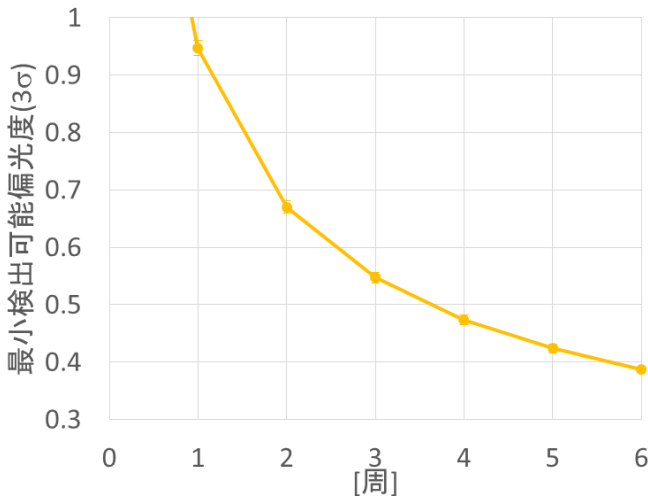


図 1 : Vela パルサー(>200MeV)に対するエマルジョンガンマ線望遠鏡の偏光感度(口径面積 10m²、高度 5g/cm²、アリススプリングス)。

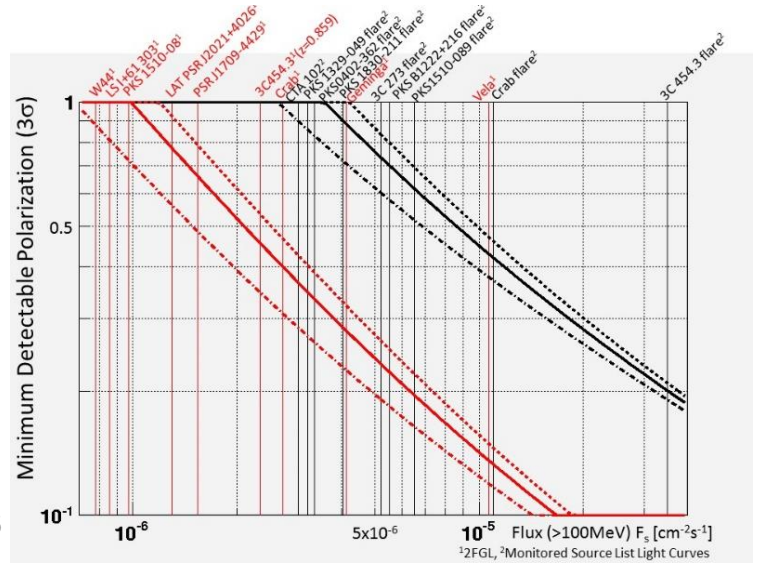


図 2 : エマルジョンガンマ線望遠鏡の偏光感度。黒 : 積算照射量 70m²・日(口径面積×フライト日数)、赤 : 積算照射量 70m²・日×10。高度 5g/cm²、破線 : 4.5GV、実線 : 12GV、一点鎖線 : 12GV&精密測定。

π^0 放射を捉えることにより、陽子加速の直接証拠が得られる。図 3 にフェルミ望遠鏡によって観測された超新星残骸 W44 のエネルギースペクトルを示す。200MeV 以下の落ち込みを捉えることにより、 π^0 放射が捉えられる。フェルミ望遠鏡グループによって、 π^0 放射を捉えたとの報告がなされた。しかしながら、フェルミ望遠鏡の観測では、200MeV 以下において角度分解能が十分ではないため、銀河面の拡散ガンマ線の混入が大きくなってしまい、その不定性のため大きな系統誤差が伴っている。エマルジョンガンマ線望遠鏡による高い角度分解能での観測により、拡散ガンマ線の混入を劇的(~100 分の 1)に抑えた観測が実現でき、系統誤差を抑えた精密スペクトル測定が実現する(図 3(赤の誤差棒つきの点))。 π^0 放射の精密検証を行うとともに、その他の超新星残骸においても普遍的に π^0 放射が見られるのか調べていく。また、低エネルギー側を精密にスペクトル測定することによって、電子起源などの新たな成分が現れてくることも期待できる。また、200MeV 以上においては、高い角度分解能での空間構造の解明によって、ガンマ線放射機構に迫っていける。図 4 に W44 の検出感度を示す。2 周を越えたあたりから有意な観測が開始できる。

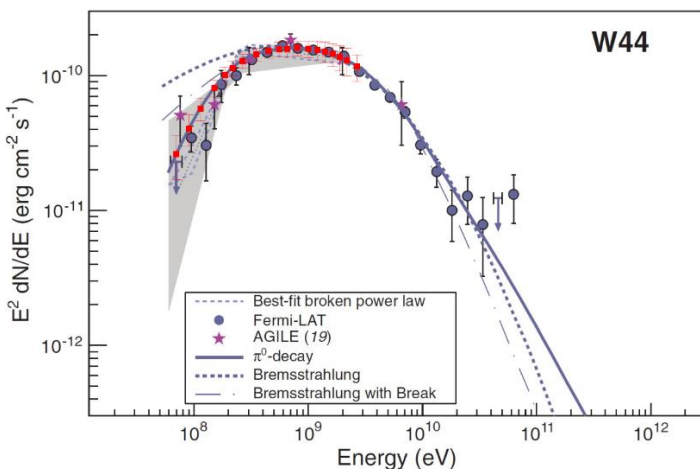


図 3 : 超新星残骸 W44 のエネルギースペクトル[M. Ackermann et al., Science 339, 807 (2013)]. 赤の誤差棒つきの点がエマルジョンガンマ線望遠鏡で観測した場合のシミュレーション(積算観測量 70m²・周(口径面積×視野横断回数)×10、高度 5g/cm²、アリススプリングス)。

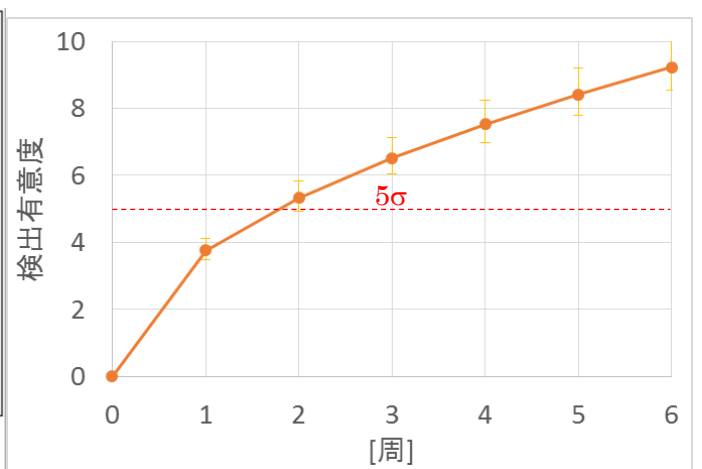


図 4 : エマルジョンガンマ線望遠鏡による超新星残骸 W44(>200MeV)の検出感度(口径面積 10m²、高度 5g/cm²、アリススプリングス)。

フェルミ望遠鏡の公開データを使い、銀河中心領域を解析した複数のグループから、GeV 帯域において既知ガンマ線源に対する過剰が報告された。そして、この過剰がダークマターの対消滅ガンマ線でよく説明できるとの主張がなされている。しかしながら一方で、銀河中心領域はガンマ線源が密集している可能性も考えられており、フェルミ望遠鏡の角度分解能では分解できていないガンマ線源の重ね合わせが、この過剰を構成している可能性も指摘されている。図 5 に、銀河中心領域の GeV ガンマ線過剰に対して、高い角度分解能を実現した場合のシミュレーションを示す。高い角度分解能で銀河中心領域を観測することによって、ダークマター対消滅ガンマ線か未分解ガンマ線源かが判別できる。図 6 にエマルジョンガンマ線望遠鏡による銀河中心領域の検出感度を示す。1 周を越えたあたりから有意な観測が開始できる。

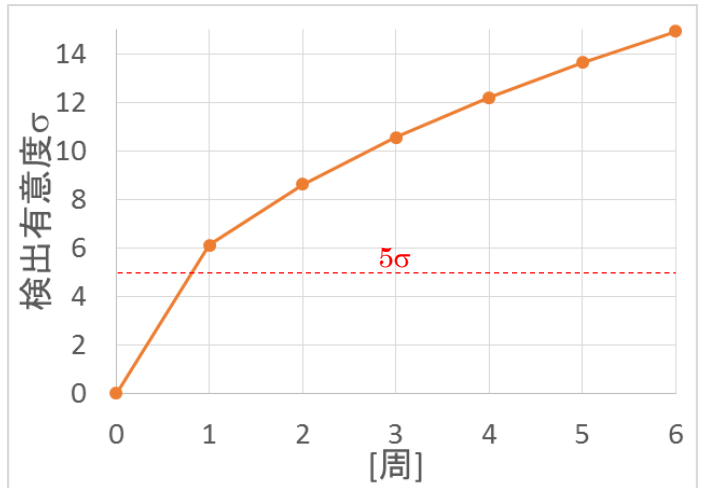


図 6 : エマルジョンガンマ線望遠鏡による銀河中心領域(>1GeV)の検出感度(口径面積 10m²、高度 5g/cm²、アリススプリングス)。

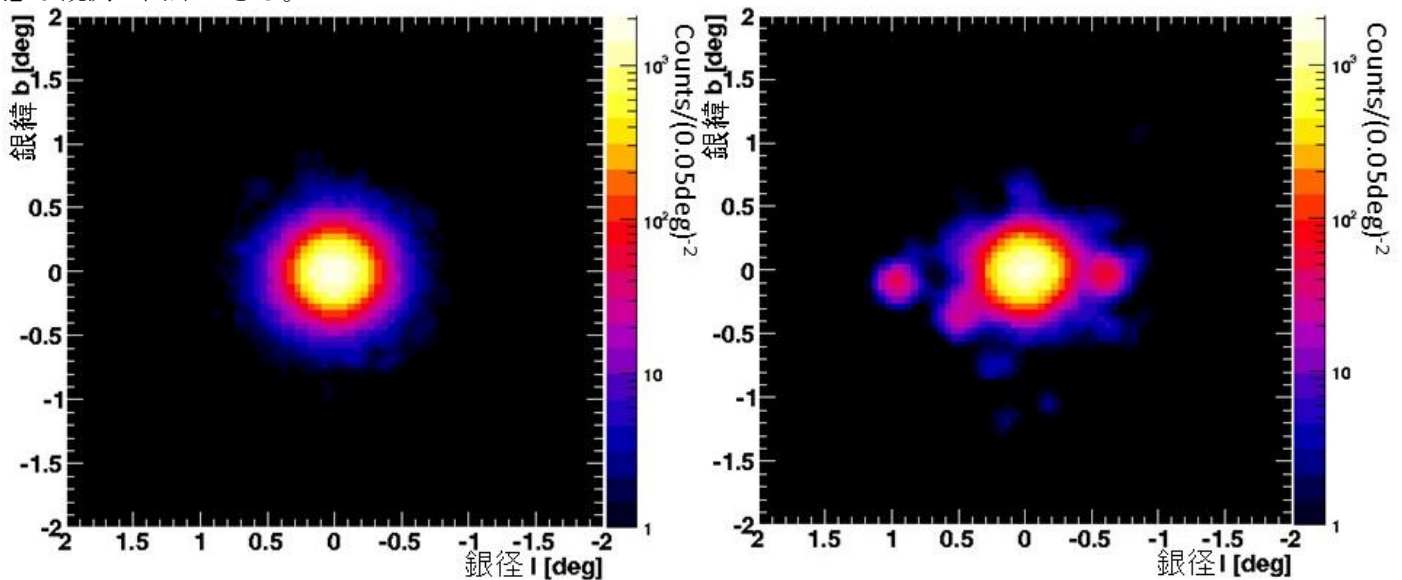


図 5 : 銀河中心領域の GeV ガンマ線過剰(>1GeV)に対して高角度分解能(0.1deg@68%containment(エマルジョンガンマ線望遠鏡の 1GeV での角度分解能に相当))で観測した場合のシミュレーション(4200m²・時間)。(左)ダークマター対消滅ガンマ線を仮定(ガンマ線放射強度の空間分布 \propto (銀河中心からの距離)^{-2.4}, エネルギースペクトル[Daylan et al., PDU 12 (2016) 1-23])。 (右)未分解ガンマ線源を仮定(ミリ秒パルサーの luminosity function[D. Hooper et al., JCAP03 (2016) 049], ガンマ線源の空間分布 \propto (銀河中心からの距離)^{-2.4})。

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新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(70keV-300keV)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[K.Toma et al., PRL 109, 241104 (2012)]。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>100MeV)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、5 桁以上の精密さで CPT 対称性の検証が可能となる。

4. 科学観測実験に向けた研究開発

口径面積 10m²を実現するためには、エマルジョンガンマ線望遠鏡ユニットを展開すればよい。気球に搭載できる重量は 2 トン程度である。口径面積 10m²まで展開した場合、エマルジョンフィルム(100 枚積層)の重量は

1 トン程度となる。2015 年気球実験で使用した多段シフター(開口面積 2500cm²、重量 65kg)を口径面積 10m²まで展開すると 2.6 トンになってしまい、それだけで搭載可能重量を大きく上回ってしまう。したがって、口径面積 10m²を実現する上で、多段シフターの大幅な軽量化が必要不可欠となる。また、観測時間 1 周以上を実現する上で、多段シフターの長時間化も必要となる。そのためには、段間ギャップをつめ、段数を増やすことが必要となる。

多段シフターの大面積化と長時間化を実現するために、私はこれまで開発してきた多段シフターをゼロベースで見直し、新しい機構に基づいた多段シフターを考案した(図 6、7)。従来のステージ駆動型からローラー駆動型にすることによって、ステージガイドやステージ板を無くすことができ、軽量化が図れるとともに、入れ子構造にすることで段間ギャップが大幅につめられ、かつ段数も増やしていける。また、ユニットあたりの口径面積の拡大が図りやすくなり、展開時の口径面積を確保しつつ、展開ユニット数を減らすことができるので、トータルでの軽量化が図れる。



図 6：従来型(ステージ駆動方式)

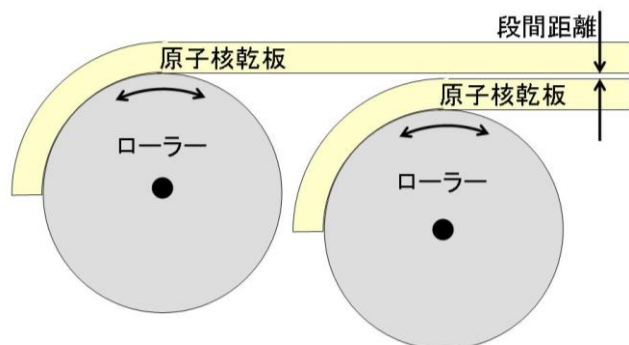


図 7：新型(ローラー駆動方式)

私はこの考えに基づき、これまで多段シフターを共同開発してきた三鷹光器社と打ち合わせを重ね(2014 年 10 月)、仕様を固めていき、詳細設計をおこない、実際に試作機を製作した(図 8)。現在、この試作機の動作・性能実証を進めており、要求駆動精度 1 μ m を切る良い駆動精度が得られつつある。また、この試作機をもとに口径面積 10m²まで展開した場合の重量を見積もると 0.4 トン程度と従来型(2.6 トン)の 6.5 分の 1 の大幅な軽量化の見通しが得られつつある。

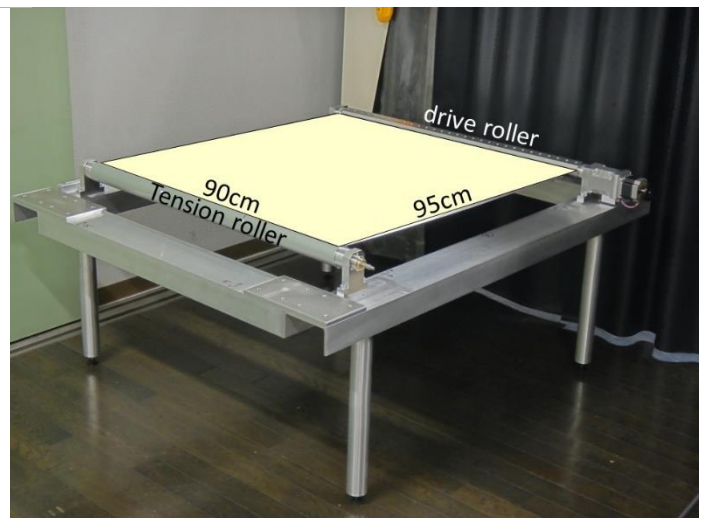


図 8：新型多段シフター試作機。

参考文献

- GRAINE collaboration(エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ), 2004-2016 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.
 S. Takahashi et al., Nucl. Instr. And Meth. A 620 (2010) 192-195.
 H. Rokujo et al., Nucl. Instr. And Meth. A 701 (2013) 127-132.
 S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 043H01.
 K. Ozaki et al., JINST 10 P12018 (2015).
 S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 073F01.
 K. Ozaki et al., Nucl. Instr. And Meth. A 833 (2016) 165.