

宇宙ガンマ線精密観測計画 GRAINE ~ 現状報告 ~

尾崎 圭太 (神戸大学大学院 人間発達環境学研究所)

Abstract

GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion) は 10MeV ~ 100GeV 領域において宇宙ガンマ線の精密観測を目指す気球実験である。主検出器に用いる原子核乾板 (Nuclear Emulsion) は荷電粒子の通過位置をサブミクロンの精度で捉えることが出来る 3 次元飛跡検出器である。ガンマ線が対生成反応をして生じた電子陽電子対 (e^+e^-) を電磁散乱の影響を抑えて測定することで、Fermi-LAT に比べて一桁程度良い角度分解能が実現出来る。

ここでは、GRAINE の検出器性能に関するシミュレーション結果及び実証試験結果について紹介する。また、2011 年に大樹航空宇宙実験場で行ったテストフライトの概要を紹介する。

1 Introduction

宇宙ガンマ線観測は宇宙空間における非熱的現象を探る重要な手法の一つである。100MeV 以上のガンマ線観測は Fermi 衛星 LAT¹ 検出器により大きく進展している。超新星残骸やパルサー、活動銀河核といった天体からのガンマ線放射が観測され、これまでに 1873 個のガンマ線天体を検出している (P. L. Nolan et al. 2012)。

特に超新星残骸の観測においては、ガンマ線放射の空間構造と電波観測によって得られる分子雲構造との相関関係の議論がされ始めている。例えば超新星残骸 W44(A. A. Abdo et al. 2010) について、Fermi-LAT よりも良い角度分解能で空間構造を観測することが出来れば、宇宙線起源の解明においてさらなる進展が期待できる。

我々は原子核乾板からなるエマルジョン望遠鏡を開発し、大気球に搭載し高度 35km の大気トップで宇宙ガンマ線を観測する。この計画を GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion) と呼ぶ。

原子核乾板 (エマルジョン) は荷電粒子の通過位置をサブミクロンの精度で捉えることが出来る 3 次元飛跡検出器である (T. Nakamura et al. 2006)。原子核乾板は支持体であるプラスチックベースの両面に荷電粒子に感度のある乳剤層が塗布されている。

図 1 にエマルジョン望遠鏡の概念図を示す。エマ

ルジョン望遠鏡は、コンバーター (エマルジョンと金属箔を 100 枚積層)、タイムスタンプ、カロリメーター (エマルジョンと鉛の積層) からなる。コンバーター部で対生成した e^+e^- の角度を測定し、タイムスタンプ部で時刻情報を与え、カロリメーター部でエネルギーを測定する。

原子核乾板は解析に手間のかかる検出器であったが、最近の超高速・広視野画像読み取り、及び飛跡認識処理技術の開発により、十分な統計を得るために必要な観測面積 (10m²) は解析可能である (K. Morishima and T. Nakano. 2010)。

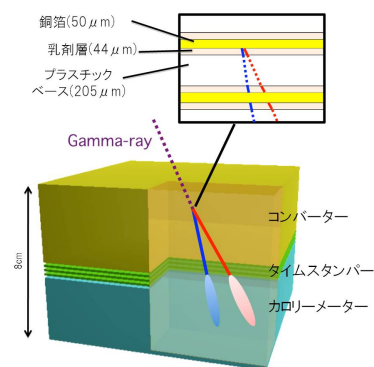


図 1: エマルジョン望遠鏡の概念図

¹Large Area Telescope

2 Detector performance

エマルジョン望遠鏡の基本性能を表 1 に示す。

表 1: エマルジョン望遠鏡の基本性能

Energy range	10MeV-100GeV
Angular Resolution ¹	
100MeV	0.93deg(16mrad)
1GeV	0.10deg(1.7mrad)
Polarization sensitivity	Yes
Aperture Area	10m ²
Field of View	>2.2sr
Time resolution	<1s

Notes. ¹Normal incidence

2.1 Angular resolution

ガンマ線の到来方向 θ_γ は対生成した e^+e^- の角度 $\theta_{e^+}, \theta_{e^-}$ 、運動量 p_{e^+}, p_{e^-} より、

$$\theta_\gamma = \frac{p_{e^+}\theta_{e^+} + p_{e^-}\theta_{e^-}}{p_{e^+} + p_{e^-}} \quad (1)$$

で決定出来る。また電子の角度は物質中を通過する際の電磁散乱により不定性をもち、散乱角は

$$\theta_{rms} = \frac{13.6\text{MeV}/c}{\beta cp} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \quad (2)$$

で表される。物質量の大きなコンバーターを用いると対生成確率が上がり統計を稼ぐことができるが、散乱角が大きくなり角度分解能が悪くなるというトレードオフの関係にある。

図 2 にエマルジョン望遠鏡と Fermi-LAT の角度分解能を示す。Fermi-LAT の最小ユニットの物質量 ($0.03X_0$ (W. B. Atwood et al. 2009)) に対し、エマルジョンフィルム 1 枚の物質量 ($0.003X_0$) は小さく散乱を抑えた観測が可能のため、10MeV ~ 1GeV 付近の角度分解能が改善する。SPring-8(Max.2.4GeV) 及び UVSOR(Max.47MeV) での逆コンプトン散乱ガンマ線ビームを用いて角度分解能の実証試験を行った結果をあわせてプロットしている。

高角度分解能の特徴を生かし、空間的に広がった超新星残骸の精密観測を行うことを目指す。

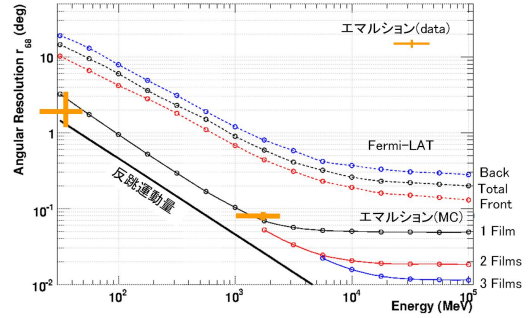


図 2: 角度分解能のエネルギー依存性を示す。実線はエマルジョン望遠鏡のシミュレーション結果、誤差棒付きのプロットは実験データ、点線は Fermi-LAT の軌道上データである。

2.2 Polarization sensitivity

ガンマ線の直線偏光は対生成した e^+e^- の方位角が偏光方向と相関を持つことを利用して検出する (C. de. Jager et al. 2004)。

SPring-8(Max.2.4GeV) の逆コンプトン散乱ガンマ線ビームを用いてエマルジョンの直線偏光に対する感度の実証試験を進めている。 e^+e^- の方位角の測定結果を図 3 に示す。現状では期待値と矛盾のない結果が得られている。

GRAINE により高エネルギーガンマ線領域で世界初となる直線偏光観測を目指す。観測対象は Vela や Crab 等のパルサー天体や crab フレアや明るい GRB 等の突発発光現象である。

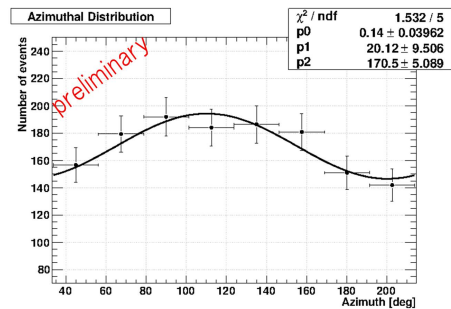


図 3: 観測した方位角分布を示す。誤差棒付きのプロットは実験データ、実線は $N(\omega) = p_2 + p_0 \cdot \cos^2(\omega - p_1 - 90)$ でフィットした結果を示す。ここで、 p_0 は振幅、 $p_1 + 90$ は偏光方向、 p_2 はベースラインを表す。

3 GRAINE Roadmap

1. 口径面積 12.5cm^2 のエマルジョン望遠鏡 1 号機を開発し、宇宙ガンマ線観測においてバックグラウンドとなる大気ガンマ線の実測を行う。このテストフライトは 2011 年 6 月に大樹航空宇宙実験場にて JAXA 大気球実験室の協力のもと実施した。

2. 口径面積 2500cm^2 のエマルジョン望遠鏡 2 号機を開発、明るいガンマ線天体の検出、 100MeV 領域で世界最高精度でのイメージングを目指す。エマルジョン望遠鏡多段シフター 1 号機、2 号機を図 4 に示す。

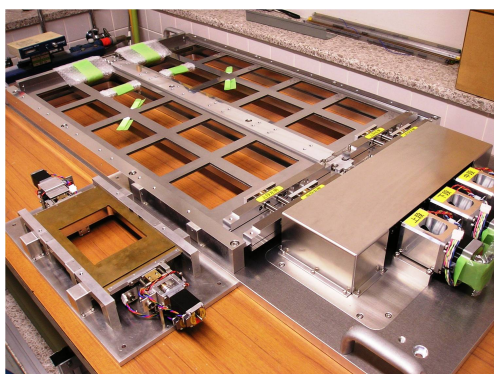


図 4: エマルジョン望遠鏡多段シフター 1 号機、2 号機

3. 口径面積 10m^2 のエマルジョン望遠鏡を開発する。1 週間程度の気球フライトを 10 回程度繰り返すことにより Fermi-LAT による観測でおよそ 2 年分に相当する統計を得ることを目指す。角度分解能が良いことを生かし、Fermi-LAT が苦勞している銀河面領域でより高感度な観測を行うことを目指す。

3.1 Balloon experiment in 2011

2011 年 6 月 8 日に北海道大樹航空宇宙実験場にて気球実験を行った。口径面積 12.5cm^2 のエマルジョン望遠鏡の他に、姿勢モニター (スターカメラ)、GPS、残留大気圧計を搭載し、4.3 時間のフライト (うち高度 34.7km のレベルフライトを 1.6 時間) を行った。本フライトの目的は各搭載機器の動作検証、大気ガンマ線バックグラウンドの実測である。フライトの様子及び気球の航跡図を図 5 に示す。

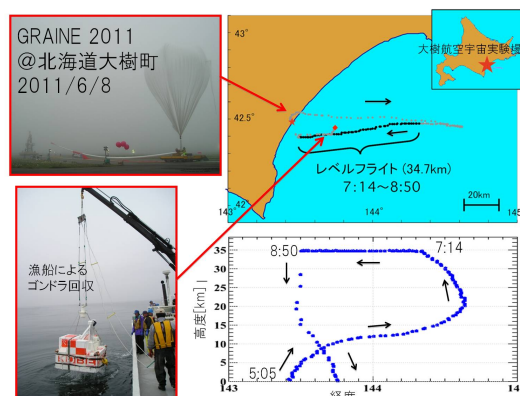


図 5: 左上: 放球前, 左下: 回収時の様子。右上: 気球の航跡図, 右下: 高度変化を示す。

3.1.1 Attitude monitor

狭視野の望遠鏡では観測天体に向けて姿勢制御をかけるが、エマルジョン望遠鏡は広視野であるため制御はかけない方針である。しかし望遠鏡の天球に対する姿勢は時々刻々と変化するため、常時姿勢をモニターをする必要がある。

我々は姿勢モニターとしてスターカメラを採用している。スターカメラは天球の星を見ることでカメラの視線方向を決定する。スターカメラは 24 時間以上のフライトでも動作する、すなわち太陽が出ている昼間の観測でも星が見えることが要求される。

本フライトでは波長 610nm 以下の光を遮断する red filter と近赤外に高感度な CCD カメラを採用した。結果として、太陽が出ている時間帯でも星画像の取得に成功した。カメラの限界等級は 6 等級、稼働率 74%、姿勢を 0.4mrad 以下の精度で決定することが出来た (K. Ozaki et al. 2012)。

3.1.2 Multi-stage shifter

エマルジョン望遠鏡のタイムスタンプ部である多段シフターは、原子核乾板を駆動ステージに載せ、ステップモーターを用いて一定時間間隔にステージ位置を精密にシフトする機構を持つ。異なるステージ間で通過荷電粒子の飛跡を再構成をすると、シフト量に対応する位置ズレを持つ飛跡集団が生じ、位置ズレ量は時刻情報に直すことが出来る。多段シフ

ターは本来時間分解能を持たない原子核乾板に時刻情報を与えられ、軽量、コンパクト、高電圧不要という、気球実験に適した検出器である。

新しく考案したこのシフター機構は、2 段シフターを用いた原理実証 (S. Takahashi et al. 2010) を経た後、3 段シフターの 1 号機を 2011 年気球実験に導入した。詳細な解析結果は (H. Rokujo et al. 2013) を参照されたいが、sub-second の時間分解能で通過荷電粒子に時刻情報を付与することに成功した。

3.1.3 Atmospheric gamma-ray observation

エマルジョン望遠鏡のコンバータ部で対生成した e^+e^- の飛跡の選び出しを行った。また、 e^+e^- の飛跡をタイムスタンプ部まで繋ぎ時刻情報を与え、高度 34.7km(残留大気圧 6.6g/cm²) におけるガンマ線イベントを選び出した。詳細な解析結果は (S. Takahashi et al. 2012) を参照されたい。観測した大気ガンマ線の積分フラックスを図 6 に示す。

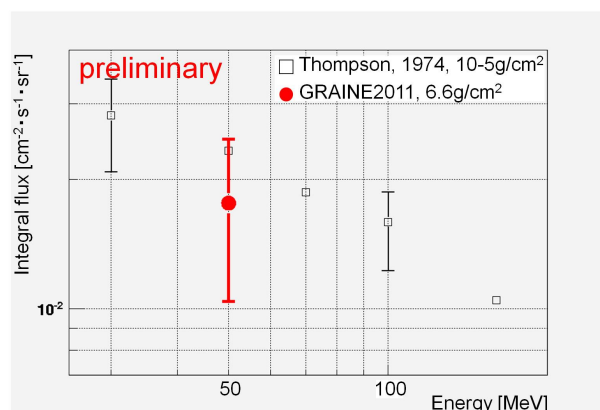


図 6: 観測した大気ガンマ線の積分フラックスを示す。Thompson らの過去の観測結果と矛盾のない結果が得られている。

3.2 Next balloon experiment

GRAINE にとって 2 回目の気球実験を 2014 年にオーストラリアで実施することを目指している。高度 35km のレベルフライトを 24 時間程度行う予定で

ある。

本フライトの目的は明るいガンマ線天体 (Vela pulsar) の 5σ での検出、100MeV 領域での世界最高解像度でのイメージングである。多段シフターによる時刻情報の付与、姿勢モニターによる姿勢情報の付与を行って、エマルジョン望遠鏡によるガンマ線天体の結像性能の評価を行う。

4 Summary

10MeV ~ 100GeV 領域での宇宙ガンマ線観測計画 GRAINE を進めている。GRAINE の主な特徴は高角度分解能、直線偏光に対する感度、大口径望遠鏡が実現可能、である。これらの特徴を生かし、超新星残骸の空間構造の解明、Fermi-LAT が苦労している銀河面領域の高感度観測、世界初の偏光観測、突発現象の検出を目指す。

GRAINE は 2011 年に技術実証を目的とした気球実験を行い、各検出器が正常に動作したことを確認した。次の気球実験を 2014 年にオーストラリアで行うべく、準備を進めている。そこでは明るいガンマ線天体を検出し、望遠鏡としてのオーバーオールな性能実証を目指す。2015 年以降に 10m² スケールの望遠鏡を開発し、科学観測を目指す。

Reference

- P. L. Nolan et al. 2012. The Astrophysical Journal Supplement Series, 199:31
- A. A. Abdo et al. 2010. Science, 327
- T. Nakamura et al. 2006. Nucl. Instr. and Meth. A, 556
- K. Morishima and T. Nakano. 2010. JINST, 5
- W. B. Atwood et al. 2009. APJ, 697
- C. de. Jager et al. 2004. Eur. Phys. J. A, 19
- K. Ozaki et al. 2012. 大気球シンポジウム集録原稿
- S. Takahashi et al. 2010. Nucl. Instr. and Meth. A, 620
- H. Rokujo et al. 2013. Nucl. Instr. and Meth. A, 701
- S. Takahashi et al. 2012. 大気球シンポジウム集録原稿