

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔令和2（2020）年度 研究進捗評価用〕

平成29年度採択分  
令和2年3月31日現在

気球搭載型エマルジョン望遠鏡による宇宙ガンマ線未解決課題の解明

Cosmic gamma-ray observation by balloon borne emulsion telescope

to study unsolved issues

課題番号：17H06132

青木 茂樹（AOKI, Shigeki）

神戸大学・大学院人間発達環境学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

宇宙で生起する高エネルギー現象のプローブとなるガンマ線の観測において、解像度の不足等により未解決となっている課題の解明のため、銀塩写真と同じ原理で荷電粒子の飛跡を高精細に記録するエマルジョン（原子核乾板）フィルムを用いて、ガンマ線を高解像度で捉え、さらに偏光に関する情報をも得るエマルジョン望遠鏡を実現し、質的に新たな観測を開始する。

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ガンマ線、原子核乾板、エマルジョン

1. 研究開始当初の背景

光（電磁波）の中で最もエネルギーの高いガンマ線は宇宙での高エネルギー現象に直結する情報をもたらすが、X線以下のエネルギーの電磁波とは異なり反射・屈折・干渉を利用した結像ができず、望遠鏡の実現が困難であった。2008年に打ち上げられたNASAのFermi衛星に搭載されたLAT検出器は、物質中でガンマ線が対生成する電子・陽電子の飛跡を半導体検出器で捉え、その進行方向から親ガンマ線の到来方向を求めるという手法により宇宙からのガンマ線を「撮像」して5000個を超える天体を検出し、ガンマ線天文学に飛躍的な進展をもたらした。

他方で、空間構造を他波長での観測結果と比較するには解像度が不十分で、検出された天体のうち約3割は他波長との対応がつかないままになっている。また、観測結果を既知の発生源の重ね合わせで説明しようとしても銀河中心方向に未知の余剰成分が有意に残ってしまうなどの注目すべき課題も浮上している。さらに、発生メカニズムの議論に有用な偏光に関する情報を得ることが困難であることも課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、銀塩写真と同じ原理のエマルジョン（原子核乾板）フィルムを用いて電子・陽電子の飛跡を高精細に測定することで、ガンマ線を高解像度で捉えた上で偏光に関する情報も得られるエマルジョンガンマ線望遠鏡を実現し、上記の技術的課題の解決を通じて質的に新たな観測を開始する。

3. 研究の方法

空間分解能に優れたエマルジョンフィルムを用い、角度分解能をFermi-LAT検出器に較べて投影角で1桁（立体角で2桁）改善する大面積かつ広視野角（ $\pm 45^\circ$ 以上）の10MeV~100GeV帯域のガンマ線望遠鏡を実現して科学観測気球に搭載し、大気トップ（残留大気圧1000分の5気圧以下）で飛翔させ、宇宙から飛来するガンマ線を観測する。エマルジョンフィルム内でガンマ線が電子・陽電子対生成を起こすと、図1のような



図1：エマルジョンフィルムで捉えた

電子・陽電子対生成

飛跡を残す。エマルジョンフィルムを積層し対生成した飛跡を捉えてガンマ線の入射角度を測定するコンバーター部、入射時刻を得るタイムスタンプ部、さらに入射時の観測

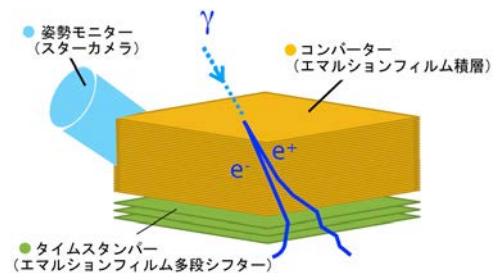


図2：エマルジョン望遠鏡の概念図

器の天球に対する姿勢をモニターするスターカメラにより望遠鏡を構成する。(図2)

超高速飛跡自動読取装置 (HTS) により、現像後のエマルジョンフィルムに記録されているすべての飛跡を読み出す。読み出した飛跡情報を分析し積層されていたフィルム相互の位置関係を再現し、ガンマ線事象を再構成する。

フィルム内の飛跡が製造後から現像までのどのタイミングで記録されたかは基本的にはわからない。天球の日周運動や上空での観測器の姿勢変化のため、天球上でのガンマ線の到来方向決定には入射時刻の再現が不可欠である。このため、観測器の下側の複数枚のフィルムを観測中にそれぞれ異なる周期で往復させ、解析の際にその位置ズレの組み合わせを再現して各飛跡に対して記録時刻を得る多段シフターによるタイムスタンプ法を考案し、装置を製作・実装してエマルジョン望遠鏡を実現した。

#### 4. これまでの成果

2018年4月、オーストラリアにてエマルジョンガンマ線望遠鏡を気球に搭載し宇宙ガンマ線観測実験を実施した。超高速飛跡読取装置 HTS により、原子核乾板約 42m<sup>2</sup> に記録された飛跡データの読取を完了し、飛跡データの解析を進めている。

コンバーター部の積層したフィルムをつないで飛跡を再構成し、その幾何学的特徴から電子・陽電子対生成候補を選び出し、全体積から約 10<sup>7</sup> イベントのガンマ線事象を抽出し、それぞれにエネルギー決定を行った。

これと独立にタイムスタンプ部を貫通するすべての荷電粒子について、多段シフター内での飛跡の接続の分析から各飛跡の通過時刻を求めた。その単位時間当たりの本数を観測器の高度変化とともに図3に示す。

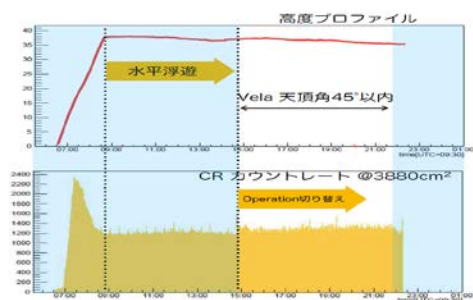


図3: 観測器の高度とタイムスタンプ部の単位時間当たり貫通飛跡数の時間変化

ガンマ線事象の飛跡をタイムスタンプ部につないで入射時刻を得て、さらに姿勢モニターからの情報と総合することにより、得られたガンマ線の到来方向を天球上にマップした。図4に示す通り Vela パルサーからのガンマ線を有意に捉え、期待される解像度を得られていることを確認した。

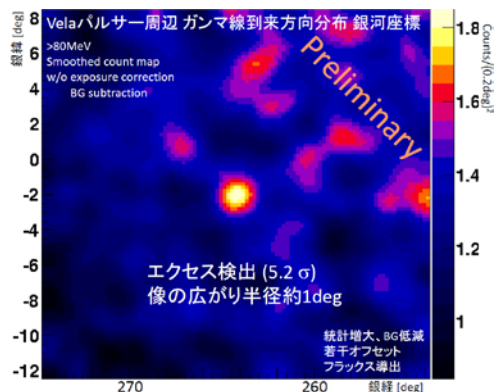


図4: Vela パルサー方向近傍のガンマ線事象のカウンタマップ (「露光時間」の違いは未補正)

#### 5. 今後の計画

研究課題期間中に開口面積 2.5m<sup>2</sup> のガンマ線望遠鏡を実現し、本格的科学観測をスタートさせる。Vela パルサーからのガンマ線をより高統計で捉え、GeV 帯域での結像能力を立証する。これにより、銀河中心方向の未知の余剰成分などで注目される GeV ガンマ線を高分解能で解像できることを立証する。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- 青木茂樹, 高橋寛, 六條宏紀 for GRAINE collaboration, 気球搭載型エマルジョン望遠鏡による宇宙高エネルギーガンマ線精密観測計画 GRAINE, RADIOISOTOPES, 68, 877–891 (2019), doi: 10.3769/radioisotopes.68.877
- H. Rokujo et al., “Development of a balloon-style pressure vessel gondola for balloon-borne emulsion gamma-ray telescopes”, JINST 14, P09009 (2019), doi: 10.1088/1748-0221/14/09/P09009
- Satoru Takahashi, Shigeki Aoki for GRAINE collaboration, GRAINE project, prospects for scientific balloon-borne experiments, Advances in Space Research 62, 2945–2953 (2018), doi: 10.1016/j.asr.2017.08.029
- Hiroki Rokujo et al., First demonstration of gamma-ray imaging using a balloon-borne emulsion telescope, Prog. Theor. Exp. Phys. 2018, 063H01 (2018), doi: 10.1093/ptep/pty056

#### 7. ホームページ等

- 「宇宙ガンマ線精密観測実験 GRAINE」  
<http://neweb.h.kobe-u.ac.jp/labo/aoki/graine.html>
- 「宇宙ガンマ線精密観測計画 GRAINE」  
<https://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/app/li/graine/>