

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17691

研究課題名(和文) エマルション望遠鏡気球フライトデータの解析～線天体最高解像度イメージング～

研究課題名(英文) Flight data analysis of GRAINE 2015 balloon borne experiment: High resolution gamma-ray imaging using emulsion telescope

研究代表者

六條 宏紀 (Rokujo, Hiroki)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・研究機関研究員

研究者番号：00725814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：2015年5月に実施した気球実験で得られたガンマ線データを使い、エマルション望遠鏡のイメージング性能を評価した。望遠鏡の4.4m上方に固定されていた“放球プレート”は、気球高度において入射する宇宙線(陽子)と反応し2次線を放出するため、望遠鏡の結像性能等のキャリブレーションに利用できる。100-300MeV帯域で結像した放球プレートの線イメージは、角度分解能($1^\circ @100\text{ MeV}$)から期待される広がりを示しており、エマルション望遠鏡がかつてない優れた結像性能を持つことを実証した。この成果は、エマルション望遠鏡による大面積かつ高解像観測が実現可能であることを示す重要な実績となった。

研究成果の概要(英文)：We evaluated the imaging performance of the emulsion gamma-ray telescope using the flight data of the balloon-borne experiment, which was performed in 2015. The emulsion telescope detected signals from a calibration source (gamma rays from the interaction of cosmic rays with an aluminum plate, which was situated 4.4 m above the telescope) with a high significance during the balloon observation and created a gamma-ray image consistent with the source size and the expected angular resolution in the energy range of 100-300 MeV. The flight performance proves that balloon-borne emulsion telescope experiments with larger area are feasible while maintaining expected imaging performance.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：ガンマ線天文学 宇宙線 原子核乾板 気球実験

1. 研究開始当初の背景

2008年に打ち上げられたフェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡(フェルミ望遠鏡)は、新天体の発見、超新星残骸での宇宙線加速を明らかにするなど目覚ましい成果をもたらし、ガンマ線天文学を新時代へと導いた。

2014年、6年間に渡って蓄積した大統計データを解析した複数のグループが天の川銀河の中心でガンマ線の超過があることを発表した。観測光子数から検出した天体が放射する成分と銀河面に分布するガスが放射する成分を差し引いた(−(+))結果、数 GeV 領域に理解出来ない成分が残った。これを発起にダークマターはじめとした様々なモデルによる解釈が乱立し、銀河中心での高エネルギー現象の理解は混沌とした状況である。

2. 研究の目的

GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)計画グループは、フェルミ望遠鏡の角度分解能を約1桁更新する原子核乾板を用いたガンマ線望遠鏡(エマルジョン望遠鏡)の開発に取り組んでおり、長時間気球フライトによるガンマ線天体精密観測を提案している。

2015年5月、観測装置の性能実証を目的とした2回目の気球実験(GRAINE2015)をオーストラリアにて実施し、フライトデータを手にした。本研究では、エマルジョン望遠鏡の性能の中で特に重要な角度分解能に関して、フライト時における性能評価・実証を目的に、データ解析を推し進めた。

3. 研究の方法

GRAINE2015 実験に搭載したエマルジョン望遠鏡は、コンバータ部、タイムスタンパ部、カロリメータ部から構成される。

ガンマ線の検出および角度決定を担うコンバータ部は、名古屋大学で製造した高感度原子核乾板(1枚の乾板は180 μ m厚ポリスチレンフィルムとその表裏に塗布された70 μ m厚の乳剤層から構成される)を100枚積層した構造をしている。厚み方向の放射長は0.53 λ_0 。貫通するガンマ線の約34%が電子陽電子対生成反応(+ (γ) $e^+ + e^-$)を起こし、飛跡対が乳剤層中に記録される。原子核乾板のサイズは37.8 cm \times 25 cm であり、本実験には同構造のユニットを4つ並べて搭載した。各ユニットの最上流にはフラットなアルミハニカムパネルと一緒に真空パックした原子核乾板(アライメントフィルム)を設置しており、コンバータ部を構成する100枚のフィルムそれぞれの歪み・撓みは望遠鏡を貫通する高運動量飛跡を利用して補正する。

原子核乾板に記録された飛跡群は名古屋大学で開発した自動飛跡読取装置を用いてデジタルデータ化し、その中から電子陽電子対生成事象をオフライン処理によって選出す。電子および陽電子の飛跡の角度、それ

ぞれの運動量を求め、親のガンマ線の入射方向とエネルギーを決定する。

4. 研究成果

(1) 気球搭載原子核乾板の全体積高速自動飛跡データ取得

本研究では、原子核乾板の自動飛跡読取には、名古屋大学で開発した最新装置 Hyper Track Selector(HTS)を用いた。GRAINE2015より高感度原子核乾板を導入したことで、高い飛跡認識効率(>95%)、高いシグナル・ノイズ比のスキャンデータが得られた。HTSによる連続的な読取運用は本装置の開発後、初めての試みであったが、大きな問題なく、41m²の気球搭載原子核乾板を約3ヶ月で読取を完了した。これは、過去の原子核乾板を用いた実験の中でも最速の実績である。

(2) 電子陽電子対生成反応の自動選出処理の確立

取得したスキャンデータに幾何的な選出条件を課し電子陽電子対生成反応点を自動抽出する処理、反応点から始まる飛跡対をコンバータ最下流まで追跡する Track Follow Down(TFD)処理、多重クーロン散乱を飛跡の角度変化によって定量測定し電子対それぞれの運動量からガンマ線のエネルギーを再構成する処理をそれぞれ開発・実装し、スキャンデータの自動オフライン処理を確立した。本解析における検出器応答をモンテカルロシミュレーションによって評価し、100 MeV、200 MeV のガンマ線に対する選出効率はそれぞれ 65%、83%という結果を得た。前回の気球実験(小スケールのエマルジョン望遠鏡によって2011年に実施)に比べ、約2倍の改善となった。また本手法での背景事象の混入率は5.3%と評価した。コンバータほぼ全体積のスキャンデータを用いて選出したガンマ線事象は、10⁶事象となり、これは前実験での実績に比べ、10000倍の統計量である。気球高度において入射したガンマ線事象を用いて、大気ガンマ線流速を求め他結果、過去の気球実験と矛盾ない測定値が得られた。

(3) 気球観測高度におけるエマルジョン望遠鏡のガンマ線イメージング性能の実証

選出したガンマ線データを用いて、エマルジョン望遠鏡のフライト中のイメージング性能を検証するデモンストレーション解析を行なった。観測時、望遠鏡の4.4m上方に固定されていた“放球プレート(アルミニウム、4.6 kg)”は、気球高度(約37 km)において入射する宇宙線(主に陽子)と反応し、2次ガンマ線を放出するため、プレート方向からの線を利用することで望遠鏡の結像性能や検出性能のキャリブレーションを行える。100-300 MeV のエネルギー帯域で結像した放球プレートのガンマ線イメージは、角度

分解能(1°@100 MeV)から期待される広がり観測され、エマルジョン望遠鏡が持つ優れたイメージング性能を持つことをフライトデータによって示した。

これまでエマルジョン望遠鏡の角度分解能は、ビームテスト等で小面積に限った評価をせざるを得なかったが、本結果は口径面積を拡張した望遠鏡での全面解析によって初めて評価したものであり、高速飛跡読取、自動オフライン処理の確立と合わせて、大口径ガンマ線望遠鏡開発における極めて重要なマイルストーンとなる成果となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

1. Keita Ozaki, Hiroki Rokujo, et al.,
“Demonstration of polarization sensitivity of emulsion-based pair conversion telescope for cosmic gamma-ray polarimetry”,

Nucl. Instrum. Meth. A, 833, 165-168, (2016), 査読有

2. Hiroki Rokujo and GRAINE collaboration,
“GRAINE balloon experiment in 2015: Precise observations of cosmic gamma rays by a high-resolution emulsion telescope”
EPJ Web of Conferences 145, 06002 (2017), 査読有

3. Hiroki Rokujo et al.,
“Latest nuclear emulsion technology”
EPJ Web of Conferences 145, 19020 (2017), 査読有

4. Hiroki Rokujo and GRAINE collaboration,
“GRAINE balloon-borne experiment in 2015: Observations with a high angular resolution gamma-ray telescope”
PoS(ICRC2017)695, 査読有

5. H. Rokujo et al.,
“First demonstration of gamma-ray imaging using a balloon-borne emulsion telescope”,
PTEP, 採録決定済み, 査読有
DOI: 10.1093/ptep/pty056

[学会発表](計 14 件)

1. H.Rokujo, “Latest Nuclear Emulsion

Technology: Production, Readout, and Interaction Analysis”, 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 22-27 Aug. 2016, Moscow, Russia, ポスター

2. H.Rokujo, “GRAINE balloon experiment in 2015: Precise observation of cosmic gamma rays by high-resolution emulsion telescope”, 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 22-27 Aug. 2016, Moscow, Russia, 口頭

3. H.Rokujo, “GRAINE Project: a balloon-borne emulsion gamma-ray telescope”, KMI 2017, 5-7 Jan. 2017, Nagoya University, Nagoya, Japan, ポスター

4. H.Rokujo, “GRAINE balloon-borne experiment in 2015: Observations with a high angular resolution gamma-ray telescope”, 35th International Cosmic Ray Conference, 12-20 July, 2017, Busan, Korea, ポスター

5. H.Rokujo, “Measurements of Hadronic Interactions using Nuclear Emulsion”, High-Energy Scattering at Zero degrees workshop, 26-29 Sep, 2017, Nagoya University, Nagoya, Japan, 口頭

6. H.Rokujo, “GRAINE project”, ICMaSS, 29-31 Sep, 2017, Nagoya University, Nagoya, Japan, 口頭

7. 六條宏紀, “エマルジョン望遠鏡によるガンマ線天体精密観測計画 GRAINE”, 2016年度日本写真学会年次大会, 2016-06-08, 東京工業大学すずかけ台キャンパス, 口頭

8. 六條宏紀, “GRAINE計画: 2015年豪州気球実験の結果報告 1”, 日本物理学会 2016年秋季大会, 2016-09-21, 宮崎大学 木花キャンパス, 口頭

9. 六條宏紀, “GRAINE 2015年豪州気球実験データ解析報告 1”, 平成28年度大気球シンポジウム, 2016-11-01, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, 口頭

10. 六條宏紀, “気球搭載エマルジョン望遠鏡によるガンマ線天体精密観測計画 GRAINE”, ISEE 研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」, 2017-03-01, 名古屋大学宇宙地球環境研究所, 口頭

11. 六條宏紀, “GRAINE計画: 2015年豪州気球実験報告 1”, 日本物理学会 2017年年次大会, 2017-03-17, 大阪大学豊中キャンパス,

口頭

12. 六條宏紀, "エマルション γ 線望遠鏡: 検出器内部ハドロニック反応を用いた γ 線角度分解能の評価", 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2017-09-13, 宇都宮大学 峰キャンパス, 口頭

13. 六條宏紀, "気球搭載エマルション望遠鏡によるガンマ線イメージングの実証", 画像関連学会連合会秋季大会, 2017-12-02, 京都工芸繊維大学, 口頭

14. 六條宏紀, "GRAINE project: sub-GeV/GeV gamma-ray observation with balloon-borne emulsion telescope", 基盤研究(S)研究会・宇宙線研究所共同利用研究会「高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2017」, 2017-12-19, 東京大学柏キャンパス, 口頭

〔その他〕

ホームページ等

<http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/appli/graine/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

六條宏紀 (Hiroki Rokujo)

名古屋大学・未来材料・システム研究科・
機関研究員

研究者番号: 00725814