

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20382

研究課題名（和文）原子核乾板による高エネルギーガンマ線天体の偏光観測の実現

研究課題名（英文）Polarization measurement for high energy gamma-ray sources with the nuclear emulsion

研究代表者

中村 悠哉（Nakamura, Yuya）

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・特任助教

研究者番号：30964457

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：原子核乾板を用いた宇宙ガンマ線観測気球実験GRAINEにおいて、sub-GeV/GeV帯で実現していない偏光観測を達成するための乾板読み取り装置を開発した。既存の読み取り装置と比べて、一桁近く優れた70--200nmの位置測定精度での飛跡読み取りが実現した。さらに、実際に2018年に行った気球実験のガンマ線データを用いて、既存データよりも3倍近い角度分解能の向上を実証することができた。この新たな装置の解析速度向上も進めながら、2023年春には検出器面積を6.6倍大型化した実験を実施し、開発した装置を適用することでさらなる解像度向上や偏光観測の第一歩を踏み出すことが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高エネルギーなガンマ線を放射する天体は宇宙における天然の加速器として、粒子を加速していると考えられているが、その加速機構には未だ未解明な点が多い。偏光観測は粒子加速において重要な磁場の情報を直接的に得ることができる重要な観測手法である。一方で、その観測の難しさから高エネルギー帯域では未だ観測結果は報告されていない。本研究によって、世界初となる偏光観測の実現に繋がる成果が得られ、これまでの観測とは全く異なる新しい知見を今後もたらすことが期待される。また、角度分解能も既存データと比べて一桁近く向上することが期待され、銀河中心付近での暗黒物質起源ガンマ線の研究にも寄与する。

研究成果の概要（英文）：GRAINE is the experiment for the cosmic gamma-ray observation with nuclear emulsion films. We developed new high-precision emulsion scanning system to realize the polarization measurement for sub-GeV/GeV gamma-rays. The positional resolution with the new system achieved 70--200 nm, and this value is about one order of magnitude higher than that with the current system. We reanalyzed the flight data gamma-ray with the new system, and the angular resolution for gamma-rays is 3 times higher than that with the current system. We continue to develop the new system to improve the analysis speed, and we conducted next balloon experiment with 6.6 times larger aperture area in 2023, and we aim to realize the observation with higher resolution and the first step of the polarization measurement with the new high-precision system.

研究分野：宇宙ガンマ線

キーワード：宇宙線 ガンマ線 偏光 原子核乾板 気球実験

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙ガンマ線の偏光観測は宇宙線の加速現場での磁場情報を直接的に得ることができる重要な観測である。一方で、Sub-GeV/GeV のエネルギー帯ではその観測の難しさから、衛星実験による 15 年以上の観測でも未だに偏光観測は実現していない。GRAINE グループでは空間分解能に優れた原子核乾板を用いることでこの偏光観測の実現を目指している。原子核乾板の原理的な空間分解能であれば実現が期待される一方で、乾板中の飛跡を高速に読み取る自動飛跡読み取り装置の測定精度によって得られるデータの分解能は悪化してしまう。これにより、現行の装置では偏光測定は非常に困難であり、原子核乾板の原理的な分解能を活かすことができる高精度な読み取り装置の開発が不可欠であった。

2. 研究の目的

原子核乾板の原理的な空間分解能(~70nm)を保持しつつ、乾板に記録されたアナログな飛跡情報をデジタルデータとして読み取る装置の開発を目指した。さらに、高精度な測定を実現できても、過去に人の目で乾板を読み取っていた時代のように読み取り時間が膨大にかかってしまうと、実験規模の拡大は困難となるため、既存の高速読み取り装置との組み合わせ解析の手法を開発することで、高精度、高速な飛跡読み取りを実現することを目的とし、最終的には気球実験データに適用することで、ガンマ線の角度分解能向上や偏光観測の実現を目指した。

3. 研究の方法

まず、高精度な読み取り装置、読み取りアルゴリズムを開発した。これを電磁散乱が無視できる高エネルギー陽子ビームを照射した乾板に適用することで、読み取り装置の測定精度の評価を行なった。そして、実際の 2018 年に行なった GRAINE の気球実験データに適用して、ガンマ線に対する性能実証を行なった。また、現状組み合わせ解析をしている高速読み取り装置よりも、より高速化した装置の開発も進められており、開発した精密読み取り装置の読み取り速度が現状では解析速度を律速してしまう懸念があったため、性能実証後には解析速度向上のためのハードウェア・ソフトウェアの開発をさらに進めた。そして、将来的に開発した装置を適用して偏光測定に着手するために、実験規模を拡大した 2023 年の GRAINE 気球実験のデータの解析を進めた。

4. 研究成果

既存の読み取り装置では、対物レンズとカメラを用いて得られる原子核乾板の離散的な断層画像から、直線探索をすることで飛跡を認識していたが、新たに開発した装置では、異なるレンズとカメラを用いてより細かいピクセルサイズの断層画像を取得し、さらにそれを従来の画像間の間隔も従来の 1/10 程度にまで細かく撮像することで、単純な直線ではなく飛跡を構成する銀粒子 1 つ 1 つを認識する手法を開発することができた。その測定精度を評価すると、乾板の平面方向には 70nm 程度、それに垂直な深さ方向には 200nm 程度の空間分解能が得られ、既存の高速な読み取り装置と比べると一桁近く高い分解能を達成することができた。

開発した装置を使って、陽子ビームを照射した乾板を読み取り荷電粒子に対する角度分解能を評価したところ、現行の高速読み取り装置と比べて 2-10 倍の向上が得られた。さらに、高速読み取り装置との組み合わせのために、異なる読み取り装置間の座標系を高い精度を維持したまま変換する手法を新たに開発した。これを用いて、実際の気球実験データでのガンマ線に対する角度分解能を評価すると、500-700MeV の帯域において、3 倍程度の角度分解能向上が得られた。これにより、開発した読み取り装置によってこれまでにない高精度な測定が実現可能なことが実証され、今後の偏光観測の実現が期待できる結果を得られた。

装置の初期開発、性能実証を経て、さらなる解析速度向上のための開発を進めた。ハードウェアでは、初期開発に用いた対物レンズでは、収差の影響が大きく視野の端のデータは精度が劣化してしまう問題があったため、解析領域を絞っていたが、より収差の小さい対物レンズを新たに導入することで収差の影響が従来よりも 1/20 にまで低減することが可能なことを示した。これにより、解析可能な領域が広がり、読み取り速度も 2-3 倍の高速化が可能となった。さらに、ソフトウェアも改良を加えた。個々の銀粒子の検出アルゴリズムを 1 から見直してプログラムを刷新した結果、解析速度が 2.5 倍ほど向上することができた。これにより、従来の 5 倍以上の解析速度となり、開発している新たな高速読み取り装置と比べても、全体の解析速度を律速しない処理時間を達成可能になった。

2023 年 4 月には、偏光観測の着手を目指して、口径面積を 6.6 倍拡大した気球実験を実施した。大型化に伴う検出器の改良を経て、無事に気球フライトを成功させることができた。現状は実験に用いた乾板をまずは高速読み取り装置で読み取っている。実験規模拡大に伴い得られるデータ量も膨大になったが、これらを効率よく処理するためのプログラムの改良も加えながら、解析を進行している。まだ部分的なデータではあるが、検出器の内部で発生したガンマ線を用いた性能評価によって、当初の目標通りの性能でガンマ線データが得られていることを実証でき

た。今後解析をさらに進めながら、開発した高精度読み取り装置をこのデータに適用することで、偏光観測に着手することを目指している。実験実施直前に、気球実験に用いるヘリウムガス価格の高騰によって実験規模が縮小したこともあり、今回の期待される観測統計量では、天体からのガンマ線に対して明確な偏光検出は困難な可能性が高いが、天体からのガンマ線放射の偏光度が高い場合には、その兆候を捉えることができる可能性はあり、これまで誰も得たことがない高エネルギーガンマ線天体の偏光観測に対して新たな知見をもたらすことが期待される。

本研究によって、当初の目標とする高精度なガンマ線事象読み取りを実現し、ガンマ線偏光観測を実現可能な測定装置を開発が達成された。実際の偏光観測を2023年気球実験データで行うことを最終目標としていたが、前段階の既存の装置を用いた解析が間に合わず、研究期間内の達成には至らなかったが、気球実験は無事に成功させることができ狙い通りの性能のデータが得られつつあるため今後の解析によって偏光観測への着手も期待できる成果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yuya Nakamura for GRAINE Collaboration
2. 発表標題 GRAINE Project, balloon-borne sub-GeV/GeV gamma-ray telescope with nuclear emulsion
3. 学会等名 ISVHECRI2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuya Nakamura for GRAINE Collaboration
2. 発表標題 New high-precision measurement system for emulsion gamma ray telescope in sub-GeV/GeV
3. 学会等名 ICRC2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------