

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22355

研究課題名(和文) MeVガンマ線宇宙高感度観測を目指した液体アルゴンコンプトンカメラの開発

研究課題名(英文) Development of the liquid argon Compton telescope toward future high-sensitive MeV gamma-ray observations

研究代表者

米田 浩基 (Yoneda, Hiroki)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：30881867

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)：現代宇宙物理学において、数百keVから数十MeVの「MeVガンマ線」と呼ばれる観測帯域は、X線やGeVガンマ線と比べ、大きく観測的発展が滞っている。本研究では、液体アルゴンタイムプロジェクト用チェンバーを用いたMeVガンマ線観測計画「GRAMS」の実現に向け、液体アルゴンコンプトンカメラの要素技術の開発を行った。成果は3つあり、(1) 多重コンプトン散乱イベントの解析アルゴリズムの開発 (2) MPPCを用いた光波形の信号取得システムの構築 (3) MeVガンマ線重要天体「ガンマ線連星」の多波長スペクトル解析であり、液体アルゴンを用いた観測実現に向けた要素技術を完成させることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MeVガンマ線天文学は、1990年代の観測以降、衛星を用いた観測が行われておらず、長らく大きな観測的発展がなかった。一方で、この観測領域は、我々を取り巻く元素が宇宙でどのように作られてきたかを知る上で重要であり、物質の起源を理解する上で欠かすことができない。本研究では、より感度の高い観測実現に向けて不可欠な解析技術や装置開発を行った。それらの要素技術を完成させることができ、液体アルゴンを用いた観測という新たなアイデアの実現に向け、前進することができた。

研究成果の概要(英文)：In modern astrophysics, the energy range from several hundred keV to several tens of MeV has been still curtailed compared to X-ray and GeV observations. To pioneer MeV gamma-ray astrophysics, in this study, we developed the elemental technology of the liquid argon Compton camera for the MeV gamma-ray observation project "GRAMS". The main results are (1) the development of an algorithm to analyze multiple Compton scattering events, (2) the development of a readout system of MPPC signals at liquid argon temperature, and (3) broadband spectral analysis of the gamma-ray binary LS 5039 which is an important MeV gamma-ray source. With these results, we have completed the several elemental technologies to realize the future observation using the liquid argon detector of the GRAMS project.

研究分野：X線ガンマ線天文学

キーワード：MeVガンマ線天文学 コンプトン望遠鏡 液体アルゴン検出器

1. 研究開始当初の背景

現代天文学は、近年の重力波やニュートリノ観測の発展を代表として、マルチメッセンジャー天文学という新たなパラダイムに突入している。その中で、数 100 keV から数 10 MeV の「MeV ガンマ線」と呼ばれる電磁波領域は、到達感度が X 線や GeV ガンマ線と比べると 1 桁以上悪く、感度の谷と呼ばれている。この帯域は、核ガンマ線や加速粒子からの非熱的放射を観測できるため、宇宙元素合成や宇宙粒子加速といった高エネルギー宇宙物理の研究において重要性が高まっており、将来観測に向けて高感度の MeV ガンマ線撮像検出器の開発が求められている。

そこで、MeV ガンマ線の高感度観測を実現する新しい方法として、液体アルゴンタイムプロジェクト用チェンバー (LArTPC) を用いた大体積のコンプトン望遠鏡を、我々は考案している。液体アルゴンを用いることで、半導体検出器やガス検出器ではコストや密度の観点から実現することが難しい大有効面積を比較的低いコストで実現することが可能である。現在、日米国際共同研究として「GRAMS」というプロジェクトを立ち上げている。140×140×20 cm³ の LArTPC を用いた気球実験を当面の目標としている。

2. 研究の目的

本研究では、LArTPC を用いた宇宙 MeV ガンマ線高感度観測の実現に向けて、LArTPC コンプトンカメラの概念実証を目的とする。これまでに、LArTPC を用いたコンプトン望遠鏡は、これまでに開発されておらず、その実現に向けた要素技術の洗い出し、各検出器コンポーネントに要求される性能を明らかにすることから始める必要がある。

また、GRAMS で用いる大型で単一物質からなるコンプトン望遠鏡では、入射ガンマ線が何回もコンプトン散乱を繰り返す多重コンプトン散乱イベントが支配的になると考えられる。このような複雑なイベントの解析技術を確立することも、LArTPC コンプトンカメラの概念実証に欠かせないため、本研究の目的とする。

さらに、MeV ガンマ線帯域では、これまで発見された天体数が 32 天体にとどまるように、観測データ自体が乏しい。したがって、既存の X 線 GeV ガンマ線データを用いた観測的研究から MeV ガンマ線重要天体の観測的研究を進める必要がある。そして、将来観測計画の策定に向けて、MeV ガンマ線のサイエンスケースを明らかにすることが重要である。

3. 研究の方法

研究方法は大きく以下の 3 点に分けられる。

(1) 多重コンプトン散乱イベントのコンプトン再構成アルゴリズムの開発

多重コンプトン散乱イベントの再構成アルゴリズムは、

- ・検出されたヒットの散乱順序の推定
- ・入射ガンマ線が検出にエネルギーを全て落としたか (全吸収イベント)、もしくは、落とす前に有感領域から逃げてしまったか (エスケープイベント) のイベントタイプの判定
- ・エスケープイベントだった場合、抜け出たエネルギーの補正

という 3 つのタスクを行う必要がある。本研究では、検出器内で多重コンプトン散乱が生じた時の物理・測定プロセスを記述した確率モデルを作り、そこから得られる事後確率をもとにしてイベントを再構成するというアプローチを採用する。そのために、まず、検出内でガンマ線が起こす、光電吸収・コンプトン散乱などの物理プロセスの定式化を行う。次に、効率的な計算を実現するために、必要な近似化を導入し、実用的なアルゴリズムになるように実装を行う。最後に、Geant4 を用いた検出器シミュレーションをもとに、その評価を行う。

(2) LArTPC のシンチレーション光検出器システムの構築

LArTPC は、原理として、ガンマ線がアルゴンと反応したときに発生するシンチレーション光と電離電子を両方検出することで、エネルギーと位置情報を得る。本研究では、特に、シンチレーション光の検出器開発に重点を置いて研究を進める。GRAMS では、光検出器として、従来の PMT と比べて、小体積・低電圧動作などのメリットのある MPPC を導入するが、液体アルゴン温度 87K での MPPC の使用実績例が多くなく、また、液体アルゴン検出器の強みであるガンマ線・中性子の波形分別の性能を十分発揮できるような回路設計の研究も乏しい。そこで、基礎スタディから開始し、87K で動作可能な回路構成を明らかにし、MPPC の信号波形を増幅し、トランスインピーダンス変換した上で読み出せるようなシステムを構築する。

(3) MeV ガンマ線重要天体「ガンマ線連星」の広帯域スペクトル解析

MeV ガンマ線で強い放射することが知られている「ガンマ線連星」に着目して、多波長データ解析を実施する。この天体は、大質量 X 線連星の一部ではあるが、多くの X 線連星

に見られるような熱的な放射が見られず、TeV ガンマ線まで伸びるような高エネルギーのガンマ線放射が観測されている。これは、電子加速が電磁気学的な加速限界に達していることを示唆し、MeV ガンマ線帯域の重要なテーマである「超高効率な粒子加速物理」を解く上で格好の観測対象である。本研究では、硬 X 線に高感度を持つ NuSTAR 衛星と、GeV ガンマ線に高い感度を持つ Fermi 衛星を駆使し、現状手に入る最もよい統計で、ガンマ線連星 LS 5039 の高エネルギースペクトルを解析する。

4. 研究成果

それぞれの研究成果を以下に述べる

(1) 多重コンプトン散乱イベントのコンプトン再構成アルゴリズムの開発

検出器内での物理プロセスとして、光电吸収・コンプトン散乱・電子陽電子対生成を、測定プロセスとして、検出器の位置・エネルギー分解能を取り込んだ確率モデルを構築することに成功した。ここでは、クライン仁科効果も取り入れ、散乱方向の非等方性も反映している。さらに、GRAMS を想定して、30cm 立方もしくは $140 \times 140 \times 20 \text{ cm}^3$ の LArTPC の Geant4 シミュレーションを用いた評価を行った。その結果、8 回散乱が起こるような複雑なイベントでも、入射エネルギーの推定・散乱順序どちらにおいても、アルゴリズムが精度良く機能していることを確かめることができた (図 1)。アルゴリズムのイベントタイプの推定精度は、1MeV で 75%以上、特に散乱回数が多い場合には、95%と非常に良好な性能を示した。散乱順序の決定精度は、解析上重要な最初から 2 番目までの散乱ポイントについては、3 回反応イベントで 40%、8 回反応イベントで 80%程度の高い精度を得た。また、既存のアルゴリズムと比較しても優れた性能を示すことがわかった。以上の結果から、多重コンプトン散乱を用いたコンプトンイメージングが可能であることが、アルゴリズムの観点から実証することができた。本研究は、現在、論文として提出済みである。また、ニューラルネットを用いたアルゴリズムの研究も行い、論文が受理されている (論文④)。

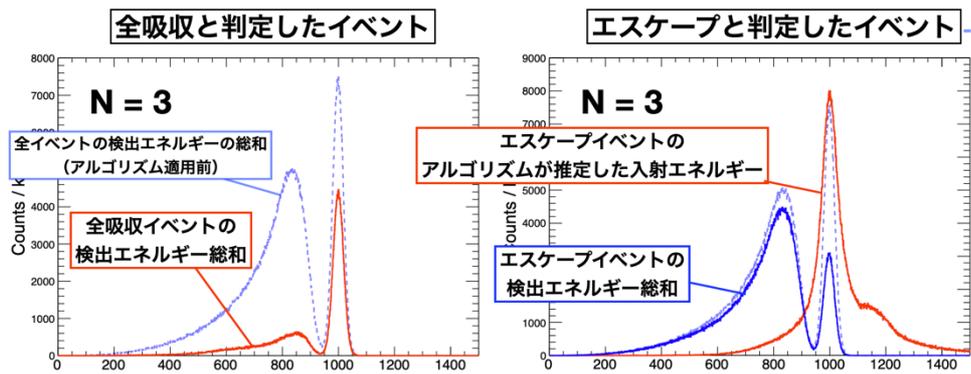


図 1 開発したアルゴリズムによる、イベントタイプの推定・エネルギー補正

(2) LArTPC のシンチレーション光検出器システムの構築

まず、87K で動作する回路を理解するため、低温での回路素子の性能変化を調べ、性質の変化の少ない、コンデンサ・抵抗・オペアンプを選定することができた。次に、それに基づき、87K で動作可能な MPPC 用の IV アンプの設計・実装を行った。浜松ホトニクス製の S13360-3050CS を用いた、常温・87K の 2 環境での動作試験を行い、図 2 に示すように非常に応答速度の早い IV アンプの開発に成功した。10ns 程度の信号立ち上がりを実現し、電子・中性子波形弁別に必要とされる 100ns 程度の対して十分に早い信号波形を取得できるシステムを構築することができた。今後は、この回路システムを用いて、LArTPC に導入する MPPC の選定・多重読み出しシステムの構築へと発展させる予定である。

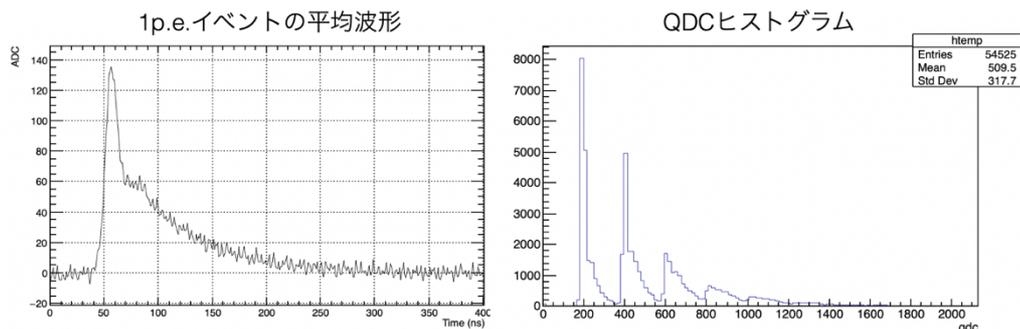


図 2 開発した IV アンプを用いた MPPC の取得波形

(3) MeV ガンマ線重要天体「ガンマ線連星」の広帯域スペクトル解析

ガンマ線連星 LS 5039 を、NuSTAR 衛星・Fermi 衛星を用いて解析を行った結果、これまで最も統計のよい広帯域スペクトルを取得することに成功した。さらに、詳細な解析の結果、MeV 帯域から GeV 帯域にかけて、異なる 2 つの放射成分があることが明らかになった。これらは、既存のガンマ線連星の広帯域スペクトルの理論モデルでは説明することができておらず、新たな問題を提唱することに至った。我々は、宇宙線加速の標準理論である衝撃波加速ではなく、より高効率の磁気リコネクションなどの加速機構が働いている新たな可能性を提示している。この結果は、ガンマ線連星の加速機構に対する新たな示唆を与えるとともに、MeV ガンマ線の観測重要性を高めることに繋がった。この結果は、論文①として受理されている。

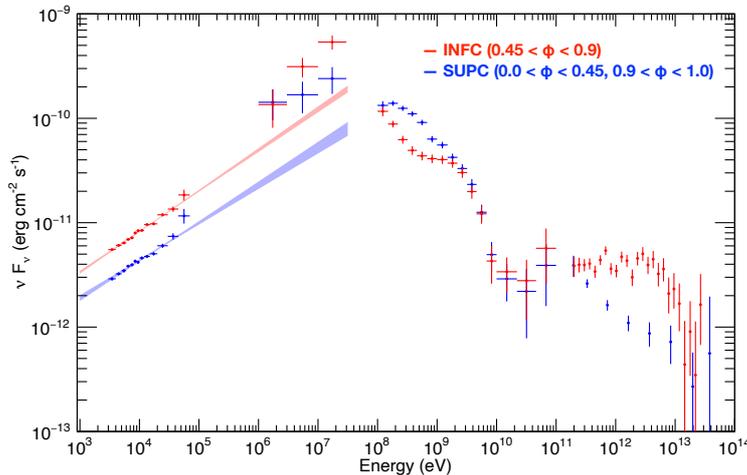


図 3 ガンマ線連星 LS 5039 の広帯域スペクトル

(4) 関連したその他の研究結果

本研究に関連して、MeV ガンマ線帯域で検出可能な天体をリストアップし、将来観測計画へと繋げるために、硬 X 線・GeV ガンマ線の天体カタログを用いた、MeV ガンマ線点源モデルの構築を進めた (論文②)。また、コンプトン望遠鏡を近接イメージングに応用した実験も行った。ここでは、Si/CdTe コンプトンカメラを用いて、カメラから数 cm の距離にある ¹¹¹In や ¹³¹I からのガンマ線のイメージを取得することに成功した (論文③)。

<引用文献>

- ① H. Yoneda, D. Khangulyan, T. Enoto, K. Makishima, K. Mine, T. Mizuno, T. Takahashi, “Broadband High-energy Emission of the Gamma-Ray Binary System LS 5039: Spectral and Temporal Features Using NuSTAR and Fermi Observations”, The Astrophysical Journal, American Astronomical Society, 917, 90, 2021
- ② N. Tsuji, H. Yoneda, Y. Inoue, T. Aramaki, G. Karagiorgi, R. Mukherjee, H. Odaka. “Cross-match between the Latest Swift-BAT and Fermi-LAT Catalogs”, The Astrophysical Journal, American Astronomical Society, 916, 28, 2021
- ③ G. Yabu, H. Yoneda, T. Orita, S. Takeda, P. Caradonna, T. Takahashi, S. Watanabe, F. Moriyama, “Tomographic Imaging by a Si/CdTe Compton Camera for ¹¹¹In and ¹³¹I Radionuclides”, IEEE TRPMS, 6(5), 592, 2022
- ④ S. Takashima, H. Odaka, H. Yoneda, Y. Ichinohe, A. Bamba, “Event reconstruction of Compton telescopes using a multi-task neural network”, NIM A, in press, 2022

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takashima Satoshi, Odaka Hirokazu, Yoneda Hiroki, Ichinohe Yuto, Bamba Aya, Aramaki Tsuguo, Inoue Yoshiyuki	4. 巻 in press
2. 論文標題 Event reconstruction of Compton telescopes using a multi-task neural network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 166897 ~ 166897
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2022.166897	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tsuji Naomi, Yoneda Hiroki, Inoue Yoshiyuki, Aramaki Tsuguo, Karagiorgi Georgia, Mukherjee Reshmi, Odaka Hirokazu	4. 巻 916
2. 論文標題 Cross-match between the Latest Swift-BAT and Fermi-LAT Catalogs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 28 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yoneda Hiroki, Khangulyan Dmitry, Enoto Teruaki, Makishima Kazuo, Mine Kairi, Mizuno Tsunefumi, Takahashi Tadayuki	4. 巻 917
2. 論文標題 Broadband High-energy Emission of the Gamma-Ray Binary System LS 5039: Spectral and Temporal Features Using NuSTAR and Fermi Observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 90 ~ 90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0ae1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yabu Goro, Yoneda Hiroki, Orita Tadashi, Takeda Shin'ichiro, Caradonna Pietro, Takahashi Tadayuki, Watanabe Shin, Moriyama Fumiki	4. 巻 6
2. 論文標題 Tomographic Imaging by a Si/CdTe Compton Camera for 111In and 131I Radionuclides	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences	6. 最初と最後の頁 592 ~ 600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TRPMS.2021.3104665	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 米田浩基
2. 発表標題 GRAMS計画 4: MeVカンマ線観測・タークマター探索気球実験
3. 学会等名 日本天文学会 2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米田浩基
2. 発表標題 MeVカンマ線宇宙観測の展望と要求されるデータ解析
3. 学会等名 データサイエンス的手法により探求する天文学
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroki Yoneda
2. 発表標題 Mystery of the strong MeV gamma-ray emission from gamma-ray binary systems magnetars in disguise?
3. 学会等名 Seminar at Ben-Gurion University of the Negev (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Yoneda
2. 発表標題 Mystery of the strong MeV gamma-ray emission from gamma-ray binary systems magnetars in disguise?
3. 学会等名 Seminar at Institute of Astronomy of Russian Academy of Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Yoneda
2. 発表標題 Spectral and temporal analysis of the gamma-ray binary LS 5039 with Fermi Suzaku and NuSTAR
3. 学会等名 INTEGRAL: towards the third decade of X and Gamma ray observations (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Yoneda
2. 発表標題 Efficient electron acceleration in compact binary systems
3. 学会等名 Particle Acceleration in Solar Flares and the Plasma Universe -- Deciphering its features under magnetic reconnection (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小高裕和
2. 発表標題 GRAMS実験 5: 全体報告
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高嶋聡
2. 発表標題 GRAMS実験 6: マルチタスク深層学習によるイベント再構成手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青山一天
2. 発表標題 GRAMS実験 7: 液体アルゴンTPCにおける光子・電子信号のエネルギー分解能測定
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小高裕和
2. 発表標題 GRAMS実験 8: ステータス報告
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 一戸悠人
2. 発表標題 GRAMS計画 3: MeV ガンマ線観測・ダークマター探索気球実験
3. 学会等名 日本天文学会 2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米田浩基
2. 発表標題 GRAMS 実験 3: 全体報告・イベント再構成アルゴリズムの開発
3. 学会等名 日本物理学会2021年春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小高裕和
2. 発表標題 GRAMS実験 1: MeVガンマ線観測・ダークマター探索気球実験ミッション概要
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高嶋聡
2. 発表標題 GRAMS実験2: 液体アルゴン検出器における多重コンプトン散乱イベントの解析
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高嶋聡
2. 発表標題 GRAMS実験4: 液体アルゴン検出器のエネルギー測定性能と宇宙線バックグラウンドの研究
3. 学会等名 日本物理学会2021年春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小高裕和
2. 発表標題 GRAMS計画1: MeVガンマ線観測・ダークマター探索気球実験
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小高裕和
2. 発表標題 GRAMS計画2:MeVガンマ線観測・ダークマター探索気球実験
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsuguo Aramaki
2. 発表標題 GRAMS PROJECT GAMMA-RAY AND ANTIMATTER SURVEY
3. 学会等名 Fermi Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021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			
米国	Northeastern University	Columbia University	SLAC National Accelerator Laboratory,	他3機関