

宇宙ガンマ線観測・暗黒物質探索実験 GRAMS に向けた液体アルゴン放射線検出器の気球搭載試験 (1): 全体報告

小高裕和, 袴田知宏, 善本真梨那 (大阪大学)
 青山一天, 内海和伸, 田中雅士, 中島理幾, 寄田浩平 (早稲田大学)
 新井翔太, 加藤辰明, 高嶋聡, 馬場彩 (東京大学), 丹波翼 (JAXA)
 辻直美 (神奈川大学), 荒牧嗣夫 (Northeastern University)
 高橋弘充 (広島大学), 大熊佳吾, 中澤知洋 (名古屋大学)

An engineering balloon-borne test of a liquid argon radiation detector for the GRAMS experiment (1): overview

Hirokazu Odaka, Tomoaki Hakamada, Marina Yoshimoto (Osaka University),
 Kazutaka Aoyama, Yorinobu Utsumi, Masashi Tanaka, Riki Nakajima,
 Kohei Yorita (Waseda University), Shota Arai, Tatsuaki Kato, Satoshi Takashima,
 Aya Bamba (University of Tokyo), Tsubasa Tamba (JAXA),
 Naomi Tsuji (Kanagawa University), Tsuguo Aramaki (Northeastern University),
 Hiromitsu Takahashi (Hiroshima University), Keigo Okuma,
 Kazuhiro Nakazawa (Nagoya University)

1 GRAMS の科学目標

GRAMS (Gamma-Ray and AntiMatter Survey) 実験 [1] は、大型の液体アルゴン放射線検出器を気球などの飛翔体に搭載し、中性子星やブラックホールといった高エネルギー天体からのメガ電子ボルト (MeV) ガンマ線放射の観測および低エネルギー反粒子の検出による暗黒物質探索を同時に開拓することを目指す日米国際共同実験計画である。観測天文学において、低エネルギーの電波から TeV ガンマ線に至るまで 20 桁もの広い電磁波波長域がカバーされるようになった現在でも、宇宙 MeV ガンマ線 (0.5-20 MeV) の観測例は、COMPTEL [2] による先駆的観測など、極めて限られており「未開拓の波長域」となっている。このエネルギー帯域には、原子核の相互作用に伴う核ガンマ線が存在し、GRAMS によりこの帯域の高感度観測が実現すれば、138 億年の宇宙史において様々な元素がどこでどのように創られたのか、その直接的な証拠を捉えることができる。

GRAMS のもう 1 つの目的は、宇宙の全物質の大部分 (85%) を占める暗黒物質の正体を突き止めることである。暗黒物質の理論的な有力候補は素粒子の標準モデルの枠外にある未知の重い粒子であり、それが対消滅や崩壊を起こすことによって検出可能な粒子に変換される。その中でも、GRAMS がターゲットにするのは、特に低エネルギーの反陽子や反ヘリウム核であり、それらは自然界に通常は存在しないと考えられており、発見すれば暗黒物質を構成する素粒子の極めて有力な手がかりになる。同様の科学目的を目指している先行計画として GAPS 実験 [3] があり、GRAMS はさらに大型化し MeV ガンマ線望遠鏡としての機能を持たせたものになる。

GRAMS の技術的な基盤となるのが液体アルゴンを用いたタイムプロジェクションチェンバー放射線検出器 (liquid argon time projection chamber, LArTPC) である。検出器媒体に液体を採用することで、高密度かつ大容量の充填が可能であり、大きな検出有効面積を実現できる。この巨大な有効面積という特徴が、遠方天体からの微弱な核ガンマ線を捉え、暗黒物質由来の希少な反粒子を捉えるための鍵になる。LArTPC はニュートリノ実験や暗黒物質の直接探索実験などの希少事象の検出に必要な素粒子物理学の実験で実用化が始まっており、この先進技術を飛翔体搭載実験へと展開することが、GRAMS のコンセプトの根幹となっている。長期計画は大きく 2 段階に分けられ、GRAMS-I は 2020 年代後半から 2030 年代初頭にかけて NASA の 1 ヶ月以上の長時間気球フライトを南極大陸やニュージーランドで複数回実施する。GRAMS-II では人工衛星によるさらに本格的な常時サーベイ体制を構築し、2030 年代の実現を目指している。

2 GRAMS-I 観測機器の概要

本節ではフルスケール気球ミッションである GRAMS-I の観測機器について概要を述べる。図 1 に GRAMS-I の主観測装置となる LArTPC の概略図を示す。円筒型の真空断熱容器に検出器媒体となるマイナス 186 度の液体アルゴンを充填する。検出器としての有感領域は直径 140 cm、高さ 20cm

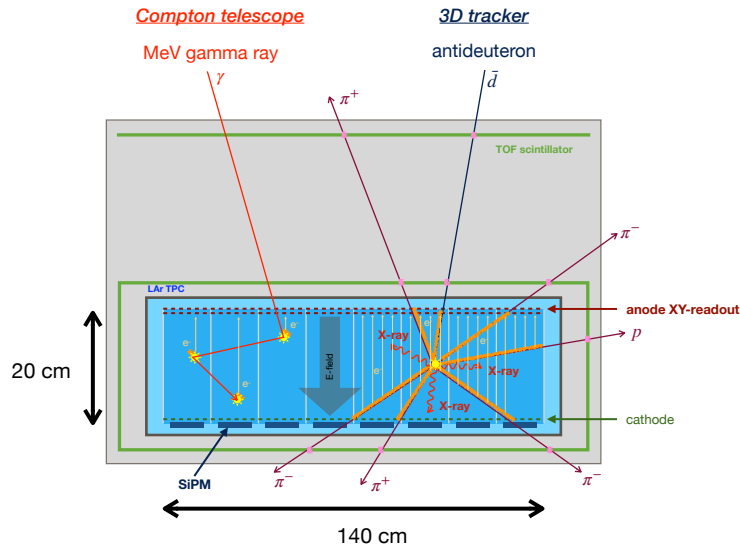


図 1: GRAMS-I の LArTPC 検出器の概略図。同一の検出器が MeV ガンマ線コンプトン望遠鏡および反粒子識別のための 3 次元飛跡検出器として動作する。概略を示したものであり、詳細設計と大きさのスケールは実際とは異なる。

となり、かつてない大有効面積を実現する。ガンマ線や宇宙線などの放射線が液体アルゴンと相互作用すると、アルゴンの励起によるシンチレーション光と電離による電子が生成する。シンチレーション光は SiPM 光検出器により検出され、電離電子は TPC 内部の電場により陽極に向かってドリフトし、分割された陽極電極から読み出される。シンチレーション光と電離電子の情報を用いて放射線反応の 3 次元位置やエネルギー損失の決定が行われる。

GRAMS 検出器の特徴は、同一検出器が MeV ガンマ線コンプトン望遠鏡と荷電粒子の 3 次元飛跡検出器として動作することである。GRAMS のコンプトン望遠鏡は、従来の散乱体検出器と吸収体検出器の 2 種類で構成されるコンプトン望遠鏡と異なり、一種類のアルゴン散乱体のみで構成される。これは十分な検出器物質の厚さ (密度 1.4 g cm^{-3} の液体アルゴンを厚さ 20 cm) を確保することで、多重コンプトン散乱がガンマ線検出イベントの主体となり、吸収体なしでもイベント再構成解析を可能にする新しいコンセプトを採用しているためである [4, 5]。このガンマ線検出のコンセプトにより、従来検出器の課題であったガンマ線検出効率を飛躍的に高め、従来検出器の 100 倍にもなる 3000 cm^{-2} を超えるような非常に大きな有効面積を実現する計画である。

暗黒物質の間接探索のためには 3 次元飛跡検出器が持つ粒子識別能力が重要である。宇宙から飛来する反粒子は、LArTPC の上方に配置される 2 層のプラスチックシンチレータによって速度が測定され、その後 LArTPC に入射し、測定されたエネルギー損失量や対消滅パターンにより粒子識別される。暗黒物質の証拠として重要になるのは、宇宙線相互作用ではほとんど生成しないと考えられている低エネルギーの反重陽子や反ヘリウム核であり、これらを宇宙線反粒子の主要成分である反陽子から高い精度で選別する。

3 B23-06: GRAMS 液体アルゴン放射線検出器の気球搭載試験

本実験グループは、GRAMS 計画の実現に向けて、世界初の液体アルゴン放射線検出器の気球搭載試験を 2023 年度 JAXA 国内気球実験 B23-06 として実施した。本節では実験の目的を述べ、搭載装置およびフライト結果の概要を報告する。気球実験に搭載した LArTPC の設計と結果の詳細は、本講演に続く青山・他「宇宙ガンマ線観測・暗黒物質探索実験 GRAMS に向けた液体アルゴン放射線検出器の気球搭載試験 (2): フライト結果」において述べる。

3.1 目的

フルスケールの気球実験である GRAMS-I はアルゴンの質量にして数百キログラムとなる大型の LArTPC を搭載する。現在の計画実施状況は、GRAMS 検出器を設計するための、基礎的な概念実証・技術実証段階にあり、ガンマ線コンプトン望遠鏡と反粒子識別のための LArTPC のプロトタイプ

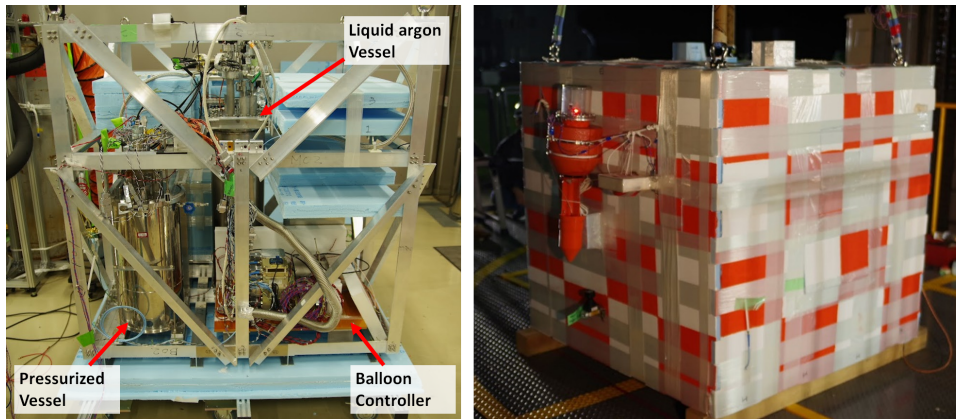


図 2: ペイロード外観。左がゴンドラパッキング前、右がパッキング後のフライト準備が完了した状態である。中央に LArTPC が収まる実験容器を配置し、左手前にあるのがデータ取得系を納める与圧容器である。

機の開発を日米で並行して進めている。一方で、地上で動いている LArTPC 装置を気球に搭載して正常に動作させることができるのか、という飛翔体搭載への対応が GRAMS 計画を進める上での大きな技術的課題であった。液体アルゴンは冷却容器内で 1 気圧・マイナス 186 度の状態で安定的に維持管理することが必要である。本実験グループは、これまでに暗黒物質直接探索実験 ANKOK [6, 7] において、大深度地下環境で LArTPC を長期間安定して動作させるノウハウを蓄積してきた。気球搭載実験では、放球前の液体アルゴン充填作業、飛翔中の揺動への対応、上空環境への対応、落下・回収のオペレーションといった地上実験にはない要素が存在し、これを安全に実施することが必要である。

工学的実験 B23-06 の目的は、気球搭載用に設計された小型の LArTPC を製作し、実際に気球に搭載することで、高純度の液体アルゴンの状態を維持して、TPC 検出器を上空で動作させる運用方法を技術的に確立することであった。そのために以下の 2 項目を主要目標として実験を実施した。

- 上昇中、最高高度 (25 km 以上) に達するまで冷却容器内部の温度・圧力条件を維持し、LArTPC を安定的に動作させる。上昇中に LArTPC 検出器を動作させ環境放射線データを取得する。
- レベルフライト (高度 25 km 以上, 28 km 付近を想定) に移行後、LArTPC のデータ取得を行い、将来の本格的なサイエンスフライトのために、宇宙線・大気ガンマ線などの環境放射線データを取得し、気球高度における LArTPC の挙動を理解する。

3.2 搭載装置の概要

図 2 に気球ゴンドラの写真を示す。ゴンドラの構造はアルミニウム合金のフレームで製作され、中央に LArTPC が入る真空断熱容器があり、これを実験容器と呼ぶ。実験容器はアルゴン充填・排気用のポート、容器内圧制御のための絶対圧安全弁、バックアップの安全対策として大容量の差圧安全弁、ラプチャーディスクを備える。また検出器の電源線や信号線のポートも備えている。本実験のために設計した LArTPC は大きさ 10 cm の小型のもので、実験目的を達成するための最小構成とした。液体アルゴンのシンチレーション光は 1 つの光電子増倍管を用いて測定し、電離電子は 3 チャンネルの分割陽極から低温動作可能な低ノイズのチャージアンプにより読み出される。電源系やデータ取得系は、実験容器とは別の与圧容器に収められており、気球高度でも地上と同じ 1 気圧を維持する。データ取得系は小型計算機 Raspberry Pi 4 を用いて構築した。フライト準備完了状態のゴンドラの重量は 269.5 kg であり、放球時には液体アルゴン 14.9 kg (約 10 L) が実験容器に充填されていた。

3.3 フライトの成果

放球は 2023 年 7 月 27 日 3 時 55 分 (JST) に北海道の大樹航空宇宙実験場から行われた。約 2 時間後の 6 時頃に太平洋上高度 29 km において水平浮遊状態に入り、約 40 分間水平飛行を継続した。その後、気球から観測機器を積んだゴンドラを切り離して降下を開始し、7 時 7 分に着水した。

LArTPC の光電子増倍管は放球前から高圧印加しデータ取得を開始した。電離電子信号については放球の後に姿勢が安定して、コマンド送信が可能になった段階で、LArTPC に 2.5 kV の高電圧を

印加し、データ取得を開始した。気球上昇中および水平飛行中のフライト全体を通して、実験容器内部の温度・圧力は安定しており、LArTPC 検出器は正常に動作した。上昇中から最高高度に到達するまで、LArTPC による環境放射線データの取得に成功した。これに加えて、水平浮遊中は検出器のトリガースレッシュホールドの変更によりエネルギー数 MeV の大気ガンマ線データも取得できたと考えられ、現在解析を進めている。取得したデータは Raspberry Pi 4 のストレージに保存され、ゴンドラとともに回収した。

本実験における LArTPC システムの重要な検証項目が液体アルゴンを飛翔体搭載することによる観測装置の安全性であった。実験容器の内圧制御は LArTPC の安定運用だけでなく、安全面で極めて重要であり、絶対圧安全弁により容器内圧は 1.2 気圧に機械的に自動制御される。さらに追加の安全対策として、容器の圧力上昇が絶対圧安全弁の排出能力を超えた場合に対応する大容量の差圧安全弁と万が一のためのラプチャーディスクを備え「3重の安全対策」とした。また、着水後のゴンドラ回収作業時において実験容器が高圧状態になることが原理的にないようにするため、着水前に電磁弁をコマンドで開くことにより液体アルゴンを全量排出する計画とした。この液体アルゴン排出オペレーションは水平浮遊の最終段階で実施する予定であったが、切り離し前に完了しなかったため、ゴンドラ降下中にも電磁弁開放コマンドを送信し、高度 4 km で全量排出の完了をテレメトリにて確認した。

4 結論と今後の展望

世界初の液体アルゴン放射線検出器の気球搭載試験は 2023 年 7 月 27 日のフライトに成功し、気球搭載 LArTPC の安定的運用を実現して、目的を達成した。現在は取得した気球高度における環境放射線データの詳細な解析を進めている。本実験の成果を踏まえ、次のステップとして、サイエンスフライトに向けた検出器の飛行試験を目的とするプロトタイプフライト pGRAMS を米国において実施する予定である。pGRAMS はより大型の LArTPC に加えて粒子速度計測を行う time-of-flight シンチレーションカウンタを備え、6 時間以上の飛行を 2025–2026 年頃に米国アリゾナ州を放球地候補として行う計画である。

謝辞

本実験の実施にあたり JAXA 大気球実験グループに多大な支援をいただきここに感謝いたします。特に PI 担当の斎藤芳隆氏、水越慧太氏には実験に必要な多くの技術協力をしていただきました。本研究は以下の研究助成金のサポートを受けており、感謝申し上げます: 東レ科学技術研究助成 20-6104, 科研費 22K18277, 22H00128 (小高), 22H00133 (寄田), 22H01252 (田中), 23H01211 (馬場)。

参考文献

- [1] Aramaki, T, Adrian, P., Karagiorgi, G., & Odaka, H., “Dual MeV Gamma-Ray and Dark Matter Observatory—GRAMS Project”, *Astroparticle Physics*, 114, 107, 2020
- [2] Schönfelder, V., “The imaging gamma-ray telescope COMPTEL aboard GRO”, *Advances in Space Research*, 11, 313, 1991
- [3] Mori, K., et al., “A novel antimatter detector based on x-ray deexcitation of exotic atoms”, *The Astrophysical Journal*, 566, 604, 2002
- [4] Yoneda, H. et al., “Reconstruction of multiple Compton scattering events in MeV gamma-ray Compton telescopes towards GRAMS: The physics-based probabilistic model”, *Astroparticle Physics*, 144, 102765, 2023
- [5] Takashima, S. et al., “Event reconstruction of Compton telescopes using a multi-task neural network”, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 1038, 166897, 2022
- [6] Aoyama, K., Tanaka, M., Kimura, M., and Yorita, K., “Development of a liquid argon detector with high light collection efficiency using tetraphenyl butadiene and a silicon photomultiplier array”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2022, 043H01, 2022
- [7] Kimura, M., Aoyama, K., Tanaka, M., and Yorita, K., “Liquid argon scintillation response to electronic recoils between 2.8–1275 keV in a high light yield single-phase detector”, *Phys. Rev. D*, 102, 092008, 2020