

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

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)
小高裕和, 袴田知宏, 善本真梨那 (大阪大学)
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 (2): Results of the flight

Kazutaka Aoyama, Yorinobu Utsumi, Masashi Tanaka, Riki Nakajima, Kohei Yorita (Waseda University), Hirokazu Odaka, Tomoaki Hakamada, Marina Yoshimoto (Osaka 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 実験概要

GRAMS (Gamma-Ray and AntiMatter Survey) 実験 [1] は、液体アルゴン Time Projection Chamber (LArTPC) を気球などの飛翔体に搭載し、宇宙線反重陽子と MeV- γ 線の高感度同時観測を目指す日米共同実験である。LArTPC は優れた飛跡/エネルギー再構成能力や強力な粒子識別能力を有しており、放射線検出器として多くの素粒子実験で使用されている。既にトンスケールの LArTPC が建造され、地上における運用技術は近年成熟した。一方で、LArTPC の飛翔体搭載の例は存在せず、その上空運用の実証が GRAMS 実験の実現に必須である。そこで、LArTPC の飛翔体搭載実証試験として気球工学フライト B23-06 を実施した。この試験では次の 2 段階の目標を設定した。

1. 上昇中 25km に達するまで冷却容器内部の温度・圧力条件を維持する。上昇中に LArTPC 検出器を実際に動作させデータを取得する。
2. レベルフライトに移行後、LArTPC のデータ取得を行い、気球高度 28 km 程度の宇宙線・大気ガンマ線などの放射線環境データを取得する。

2 B23-06 LAr 運用系と LArTPC

ペイロードは LArTPC 用ステンレス真空断熱容器、CPU などを格納するステンレス与圧容器、それらを搭載するゴンドラからなる。目標達成のため、以下のように LAr 検出器を構築した。

図 1 に LAr 運用系の概略図を示す。赤枠内が飛翔した部分、青枠内は LAr 充填時に使用し地上に残した。LAr は高さ 80 cm、直径 25 cm のステンレス真空断熱容器に保持する。この容器の熱流入量は室温で 10 W 以下であり、24 時間以上に渡って検出器の運用に十分な量の LAr を保持できる。容器内圧上昇による容器破損や圧力低下による LAr の凝固を防ぐために、動作圧が 1.1 (1 atm 環境下)–1.2 (0 atm 環境下) atm の絶対圧弁 (VF1) で容器内圧を保っている。また、容器が横倒しになるなどして急激に圧力が上昇した場合には、動作差圧がそれぞれ 2.5 atm、3.0 atm の差圧安全弁 (VF3) およびラプチャーディスク (RD) で排気される。充填はフィルターを通して行い、水や酸素といった不純物を除去する。放球前日に待機時間を考慮した十分な量のアルゴンを充填した。また、着水や回収時の LAr 突沸のリスクを避けるために、LAr は容器内圧と外気の差圧を利用し上空で排液する。排液用の配管は容器底まで伸びているため、LAr 排液が完了した場合には、容器内部と外気がつながり容器内圧と大気圧が一致する。ただし、高度 3 km 以上では LAr の三重点圧力を下回り排液配管出口での LAr 凝固が予想される。排液は配管先端の電磁弁 (VF5) でコントロールする。

LArTPC は Cathode, Side Plate, Anode の 3 種類の PCB と Grid で構成し、その有感領域は $10 \times 10 \times 10$ cm である。下から順に Cathode ($Z=0$ cm), Grid ($Z=10$ cm), Anode ($Z=10.5$ cm)、また、Side Plate は有感領域の側面に配置している。Cathode に電圧を印可し、Cathode–Side Plate–Grid–GND を抵抗分割することで鉛直方向に電場を形成している。フライトでは Cathode に 2.5 kV を印可し、ドリフト電場が 200 V/cm、Grid–Anode 間は 1 kV/cm で運用した。Anode は図 4 に示すように 3 分割しており、分割した電極ごとに電離電子信号を電荷積分型アンプで増幅し読み出す。LAr 蛍光は可視光に波長変換した後に、LArTPC 下部に設置した PMT で検出する。波長変換

は LArTPC 内壁側面の反射材と PMT 窓面に蒸着した TPB [2] で行う。LArTPC 信号は PMT でトリガーを発行し、与圧容器内のストレージに波形データとして保存する。トリガーレートは CPU 性能により 60 Hz 程度に制限されている。

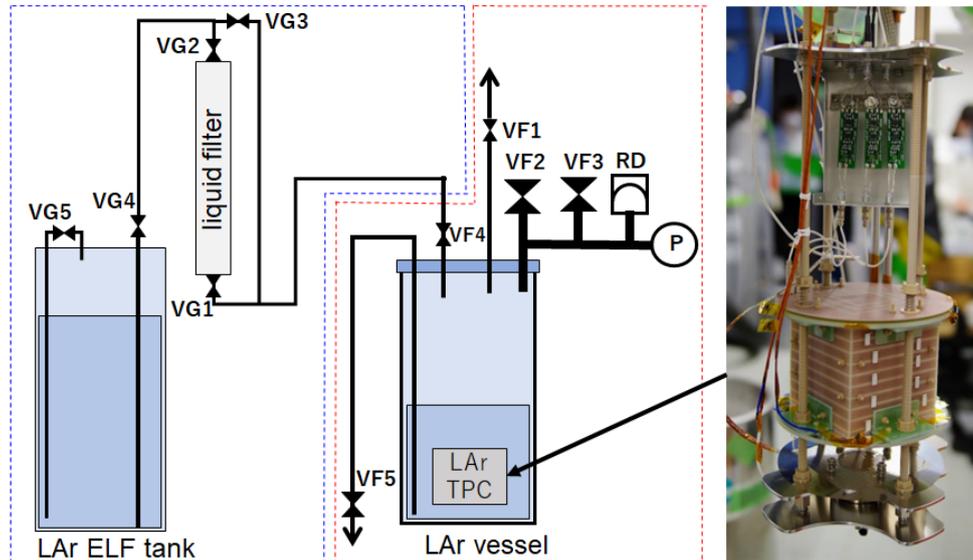


図 1: LAr 運用系の概略図と LArTPC

3 フライト結果

3.1 フライト概要

図 2 に B23-06 のフライト航跡図と飛翔高度を示す。この GPS データは JAXA/ISAS 気球グループより提供を受けた。2023/7/27 AM03:55 に放球し、2 時間 4 分後の AM05:59 に最高高度約 28.9 km で水平浮遊に入った。ゴンドラ切り離し前の AM6:33 に VF5 を開き LAr の放出を開始、AM06:43 に気球とペイロードを切り離した。パラシュートによる軟降下中の AM07:00 に LAr の放出完了を確認し、直ちに CPU を含む全電源を落とした。ペイロードは AM07:07 に着水、数分以内に安全に回収された。回収後のゴンドラや LAr 容器、LArTPC、与圧容器とその中身のいずれも破損はなかった。

圧力や温度などの環境データ、PMT 波形は放球前から全電源停止まで記録した。一方で、Cathode 電圧は、放球時に放電することを回避するために放球から 5 分後に印可した。また、排液により LArTPC がガス相に露出し放電する可能性があったため、排液前に Cathode 電圧を落とした。そのため、電離電子信号波形は放球 5 分後 (高度約 2 km) から排液前まで取得している。

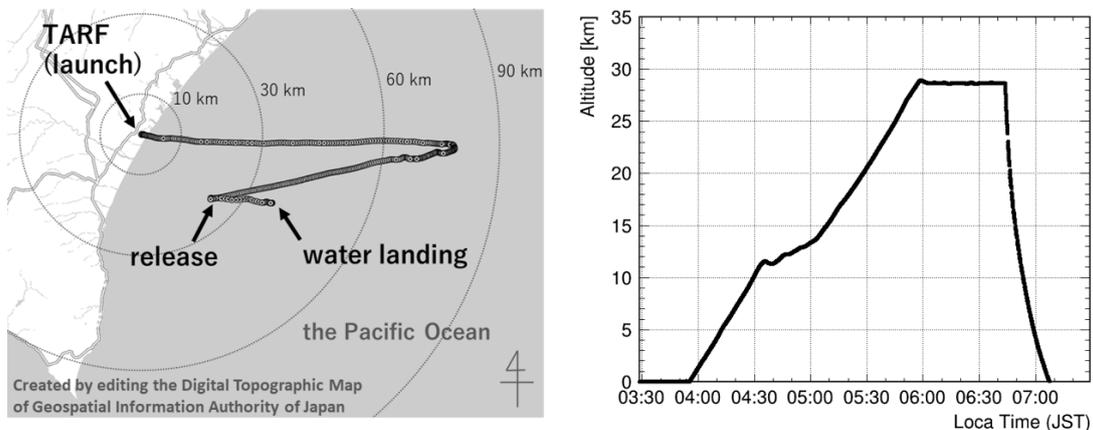


図 2: B23-06 航跡図と飛翔高度

3.2 LAr の安定維持と排液

図 3 に LAr 容器内圧 (赤点) と大気圧 (黒点) の時間変化を示す。ただし、大気圧は高度から国際標準大気モデルを用いて変換した値をプロットしている。また、放球と排液開始、排液完了のタイミングをそれぞれ灰色線で示してある。LAr 容器内圧は放球前から LAr 排出開始まで、絶対圧弁により 1.1–1.2 atm の想定通りの圧力に保たれている。その間、液面以下に設置した温度計は LAr 温度を示しており、放球から排液開始まで液相として維持できたことを確認した。

次に、LAr の排液に着目する。VF5 を開いた直後は容器内圧が低下し排液を確認できるが、数秒程度で液出口が閉まり圧力が上昇している。予想していたように、三重点以下の気圧環境下のため、LAr が排液管出口付近で瞬時に凝固したと考えられる。また、排液管に入った LAr が気化することで、容器内圧が排液開始前より高くなっている。排液が完了するまで VF5 の開閉を繰り返したため、それに伴って内圧の変動が発生している。大気球とペイロードの切り離し後、高度が下がり大気圧が三重点付近まで上昇したことで、排液が順調に進んだ。AM07:00 には容器内圧と大気圧が一致し、排液が完了したことを確認した。今回のフライトでは高度が下がってからの排液となった。今後、排液ラインへのヒーターの導入といった排出方法の改善を検討する。一方で、充填から回収までの全期間で、差圧安全弁およびラプチャーディスクの動作圧まで内圧が上昇することはなかった。

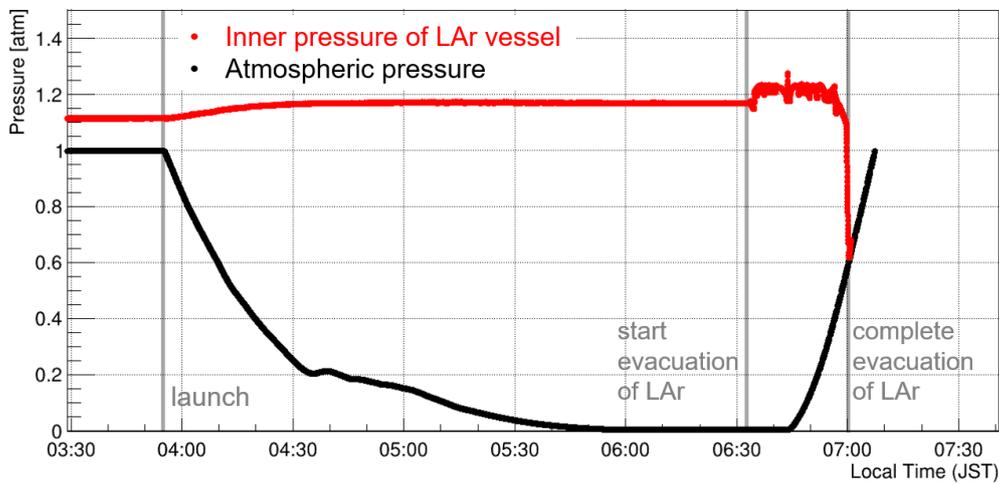


図 3: LAr 容器内圧と大気圧

3.3 LArTPC の宇宙線・大気ガンマ線データ

図 4 の左から順に PMT 波形、電離電子信号波形、Anode の電極形状と対応するチャンネル番号を示す。今回の検出器では電離電子信号は電荷積分型アンプの出力を直接読んでいるため、電圧の変化(上昇分)が信号量に相当する。また、 $t=0 \mu\text{s}$ が $Z=10 \text{ cm}$ に、 $t=120 \mu\text{s}$ が $Z=0 \text{ cm}$ に対応する。図 4 は水平浮遊中に取得したイベントで、荷電粒子が側面から入射し ch1–ch2–ch3–ch2–ch1 の順に通過した後、側面から抜けている。PMT 波形からは、LAr 蛍光の 2 つの発光時定数成分 ($\tau = 6 \text{ ns}, 1.5 \mu\text{s}$) を確認できる。このような LArTPC 信号を放球直後から排液直前まで取得することができた。

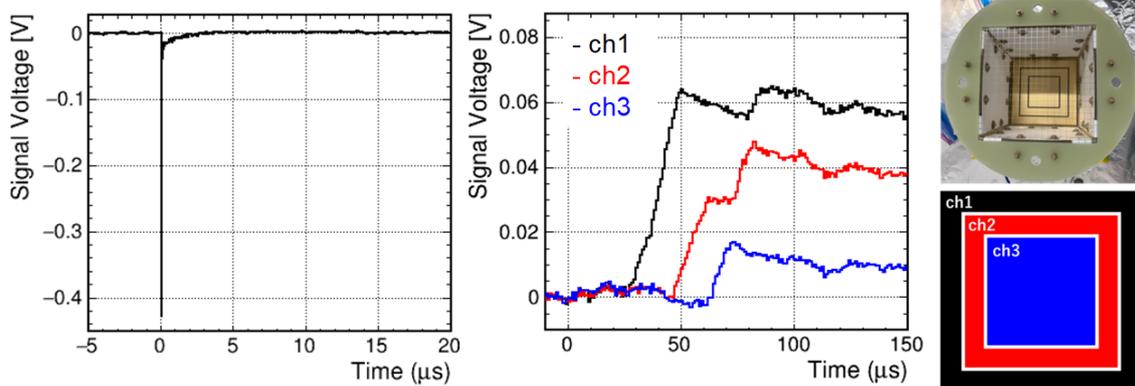


図 4: LArTPC 信号波形と Anode 電極形状

次に、図 5 にイベントレートの高度依存性を示す。青点は 1 秒あたりに発行されたトリガー数で、CPU 性能により制限され 60 Hz 程度で飽和している。黒点はイベント間の時間差分布を指数関数でフィットし算出したレートで、60 Hz の制限を受けない真のイベントレートである。このフィットは各高度ごとに別々に行った。赤点は、シミュレーションで見積もったイベントレートを表す。シミュレーションは、EXPACS [3-5] の角度情報を持った宇宙線フラックスを入力として、Geant4 [6-8] を用いて行った。ただし、LAr 容器と LAr のみをマテリアルとして考慮し、 $10 \times 10 \times 10$ cm の有感領域に一定以上のエネルギーを落としたイベント数を数える簡単なものである。イベントレートは約 20 km 程度まで大気球の上昇に伴って増加し、さらに高度が上がると減少しており、shower maximum が見えている。また、その絶対値についてもおおよそシミュレーションで説明出来ており、より詳細なジオメトリやトリガー効率などを考慮し、精度を上げた解析を行う予定である。

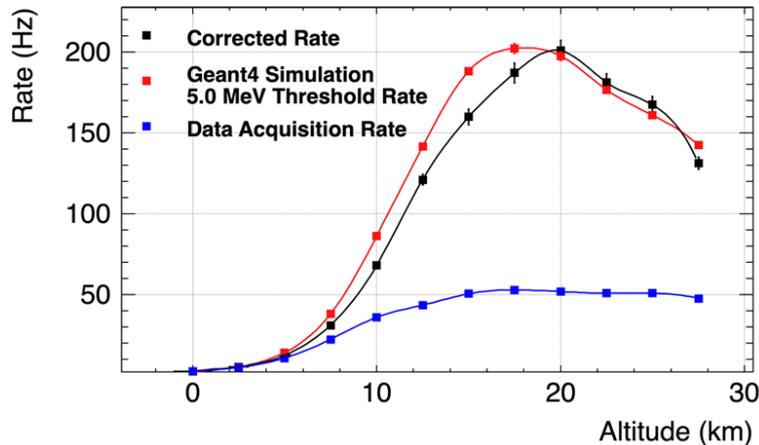


図 5: イベントレートの高度依存性

4 まとめ

LArTPC の飛翔体搭載の最初の試験として気球工学試験 B23-06 を実施した。2023/7/27 の早朝に放球し、44 分の水平浮遊を含むフライトデータを取得した。その結果、高純度の LAr を気球上で維持し LArTPC が運用可能であることを実証した。また、2 つ目の目標であった、水平浮遊中の宇宙線・ガンマ線データの取得も行うことができた。現在、加速度/磁気センサーを用いた姿勢解析や、定量的な LAr 純度算出、入射方向の算出、粒子識別解析などを進めている。

参考文献

- [1] Tsuguo Aramaki et.al, "Dual MeV gamma-ray and dark matter observatory - GRAMS Project, Astroparticle Physics", 114,107, 2020
- [2] K.Aoyama, M.Tanaka, M.Kimura, K.Yorita, "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
- [3] T. Sato, Analytical Model for Estimating the Zenith Angle Dependence of Terrestrial Cosmic Ray Fluxes, PLOS ONE, 11(8): e0160390 (2016)
- [4] T. Sato, Analytical model for estimating terrestrial cosmic ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: Extension of PARMA/EXPACS, PLOS ONE, 10(12): e0144679. (2015)
- [5] T.Sato, EXPACS: Excel-based program for calculating atmospheric cosmic-ray spectrum, <http://phits.jaea.go.jp/expacs/>
- [6] J. Allison et al., Nucl. Instrum. Meth. A 835 (2016) 186-225
- [7] J. Allison et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 (2006) 270-278
- [8] S. Agostinelli et al., Nucl. Instrum. Meth. A 506 (2003) 250-303