

## 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技術の確立

小高 裕和, 新井 翔大, 高嶋 聡, 馬場 彩 (東京大学・大学院理学系研究科),  
田中 雅士, 青山 一天, 内海 和伸, 寄田 浩平 (早稲田大学・理工学術院),  
高橋 弘充, 須田 祐介, 深沢 泰司 (広島大学・大学院理学研究科),  
Tsuguo Aramaki (Northeastern University),  
Georgia Karagiorgi (Columbia University)

## Development of a balloon-borne liquid argon radiation detector for the GRAMS experiment

Hirokazu Odaka, Shota Arai, Satoshi Takashima, Aya Bamba (The University of Tokyo), Masashi  
Tanaka, Kazutaka Aoyama, Yorinobu Utsumi, Kohei Yorita (Waseda University), Hiromitsu  
Takahashi, Yusuke Uchida, Yasushi Fukazawa (Hiroshima University),  
Tsuguo Aramaki (Northeastern University), Georgia Karagiorgi (Columbia University)

### 概要

GRAMS (Gamma-Ray and AntiMatter Survey) 実験は、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、ブラックホールや中性子星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。大有効面積を実現できる液体アルゴン time projection chamber 放射線検出器 (liquid argon TPC, LArTPC) は、素粒子物理学実験の分野で実用化が始まっている先進的な実験装置であり、これを気球に搭載し、遠方天体からの微弱なガンマ線や暗黒物質由来の非常に希少な低エネルギーの反重陽子や反ヘリウム核を検出することがGRAMSの基本的なコンセプトである。LArTPCを飛翔体に搭載し上空で稼働させた例は世界でもこれまでになく、その実現がGRAMS計画における現時点での大きな技術的課題となっている。本講演では、この課題解決のためのJAXA国内気球実験を含む研究開発計画について述べる。最初の工学実証実験の目的は、気球搭載用に設計された小型のLArTPCを製作し、世界に先駆けて気球に搭載して、上空で安定的に動作させる運用方法を技術的に確立することである。研究計画では、次の3項目を実施する：(1) 気球搭載可能なLArTPCの製作、(2) 地上設備を用いたLArTPC運用の気球環境模擬試験、(3) 気球搭載による実機運用試験。

## 1. 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ガンマ線の観測はほぼ実現しておらず、「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、それが崩壊・対消滅する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重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。

GRAMSの技術的な基盤となるのが液体アルゴン (liquid argon, LAr) を用いたtime projection chamber放射線検出器 (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が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2025年から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することであり、2030年代の実現を目指している。

## 2. 工学気球実験の目的

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 (図1)。これに先立ち、アルゴン質量50キログラム級の中型LArTPCによるMiniGRAMSサイエンスパスファインダー実験を、JAXAの海外気球実験 (オーストラリア、アリススプリングス放球場) の枠組みで行うことも想定している。現在の計画実施状況は、MiniGRAMS検出器を設計するための、基礎的な概念実証段階にある。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、それがGRAMS計画を進める上での現時点での大きな技術的課題となっている。今回提案する工学気球実験は、この技術課題の解決を図るものである。

本実験の目的は、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る。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[2,3]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。気球搭載実験に向けて、放球前の液体アルゴン充填作業、飛行中の揺動への対応、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を全て検討し、これを安全に実施できることが必要である。さらに、上空で実際にLArTPCによる測定を行い、将来の本格的なサイエンスフライトのために必要な大気由来ガンマ線や宇宙線などの気球高度放射線環境データを取得する。

### 3. 研究計画

#### (1) 気球搭載可能なLArTPCの製作

本実験のために、気球搭載可能な最小構成のLArTPCの製作を行う。実験装置(図2)は容器配管系と検出器系の2つに分けることができる。液体アルゴンを維持する容器配管系を構成するのは、ステンレス製・円筒形の真空断熱容器(蓋つきオープンバス)であり、大きさは外径25cm、高さ80cm、容量約20Lである。容器の蓋(トップフランジ)に液体の充填・排出口、ガスの排気口、圧力計、検出器への電源線・信号線のポート等の全ての必要な機能を集約する。

検出器系は最も単純な構成のTPCとする。TPC全体は容器内で高純度の液体アルゴンに浸かっている。TPCの有感領域の大きさは10cm x 10cm x 10cmであり、鉛直Z軸方向に最大5kVの電圧をかける。LArTPCはアルゴンと放射線の相互作用により生じる微弱なシンチレーション光と電離電子の信号を測定する装置である。シンチレーション光は光電子増倍管(photomultiplier, PMT)1基により読み出し、電離電子は分割された陽極から4チャンネルの電流波形信号として読み出される。データ取得系はデジタル波形プロセッサと小型計算機で構成される。

#### (2) 地上設備を用いたLArTPC運用の気球環境模擬試験

製作したLArTPCが気球飛行環境で安全かつ安定して動作するかどうかについて、地上試験設備を利用して検証する。実際のフライトの温度・圧力環境とその時間変化を模擬したスペースチャンバーで動作試験を実施する。液体アルゴンおよび容器の上部に存在する気相部分の温度・圧力、液面位置の変化を測定し、検出器の全機能を動作させてデータ取得が問題なく実施できることを確認する。この試験を通じて、放球場に持ちこめる可搬型の高純度液体アルゴン充填装置などの地上準備設備も構築する。

#### (3) 気球搭載による実機運用試験

LArTPC実機を気球に搭載し、飛行中に全機能を動作させる運用を実施する。温度・圧力センサによる状態管理と液面の計測を行う。このフライトを通して、実験装置が受ける加速度は加速度センサにより常時モニタし、ゴンドラの揺動や姿勢の変化による検出器への影響を評価する。上昇時・レベルフライトへの移行・その後の姿勢安定までが実験装置の挙動の評価の対象である。下降開始直前に、容器内の液体アルゴンを排出し、着水・回収時には容器内のアルゴンは空になり、大気に解放されている状態とする。分離放球後に姿勢が落ち着

けば、加速度センサ・液面状態のテレメトリデータを検討し、地上からのコマンドで検出器のデータ取得を開始する。陽子・電子などの宇宙線、大気由来のガンマ線・中性子を計測する。

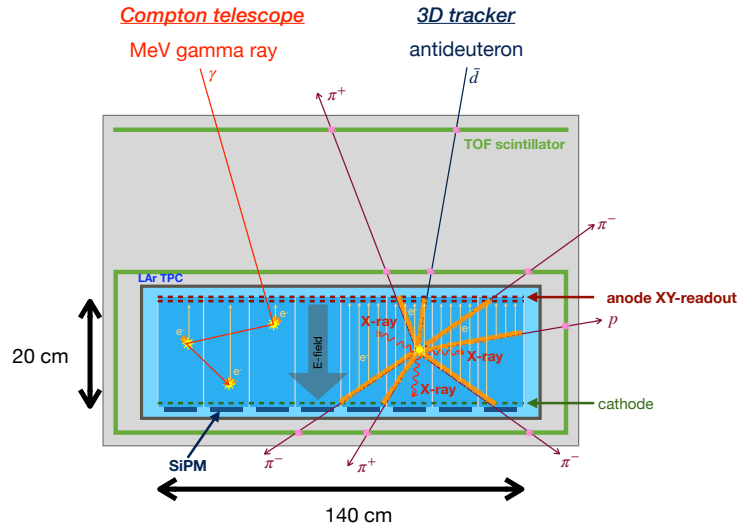


図1: フルスケール気球実験GRAMS-Iの検出器概略図。同一検出器系がMeVガンマ線コンプトン望遠鏡と反粒子を捉える3次元粒子飛跡検出器として動作する。

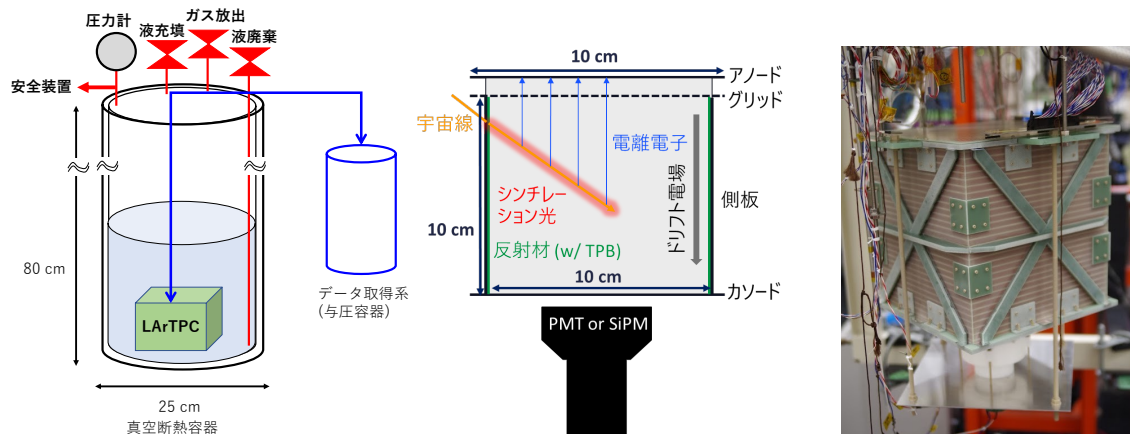


図2: 今回提案する気球実験の装置概略。容器配管系の全体 (左) とLArTPC検出器本体 (中央)。右写真は2022年10月に早稲田大学で実施した試験で使用した30 cm大のTPC実機であり、工学気球実験にはこれをスケールダウンしたものを搭載する予定。

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] Aoyama, K., Tanaka, M., Kimura, M., & 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

[3] Kimura, M., Aoyama, K., Tanaka, M., & 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