LArTPC to the Sky

早稲田大学 寄田研究室 (現 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)

青山一天

aoyama.kazutaka@jaxa.jp

2024年(令和6年)4月30日

1 はじめに

Gamma-Ray and AntiMatter Survey (GRAMS) kt,気球に搭載する液体アルゴン Time projection chamber (LArTPC)を用いて宇宙線反粒子および宇宙 MeV ガン マ線の高感度同時観測を行う日米国際共同実験である [1]。現在, 南極での観測に向けて (1)LArTPC コンプ トンカメラの実機実証,(2)反粒子とArの反応の理解, (3)LArTPC の気球運用実証の三つのマイルストーンを 設定し準備を進めている。LArTPC の気球運用実証に 関して、2023年度に世界初のLArTPC気球搭載試験を 成功させた。マイルストーン (1) と (2) は今後の報告に 譲り、本稿ではマイルストーン (3) について記述する。 はじめに物理や検出原理を簡単に述べ、気球を真にまっ たく知らない状況から LArTPC 気球搭載試験を行うま でを「はじめから」紹介したい。気球搭載試験以外の進 捗は、近々実施する反粒子ビームの LArTPC 照射試験 の結果と共に紹介できると幸いである。

1.1 物理目標

GRAMS において宇宙線反粒子は暗黒物質間接探索の,宇宙 MeV ガンマ線は天体物理の有用なプローブとしてそれぞれ期待されている。

MeV 帯域のガンマ線観測は、コンプトン散乱が優位 であるためエネルギーや方向の再構成が難しい。そのた め、ほかのエネルギー帯域と比較すると観測が進んでい ない(MeV ギャップ)。MeV 帯域は核ガンマ線が多く 含まれるエネルギー範囲であり、天体での元素合成が直 接見えるなど天文学的に重要である。図1上段に示した ように GRAMS では MeV ギャップに感度がある。

宇宙線反重陽子は,宇宙暗黒物質 (DM) の対消滅また は崩壊に起源を持つ可能性がある。図1下段に反重陽子 の期待フラックスと感度を示す。緑実線は反陽子の観測結 果を説明可能な DM 対消滅 (30 GeV/c², 10⁻²⁶ cm³/s) を仮定している。赤破線で示した二次生成起因の反重陽 子は、運動学的制約から低運動エネルギーでの生成が抑 制され5 GeV/n付近にピークを持つ。そのため、核子あ たりの運動エネルギーが数 100 MeV/n に注目をすると、 DM 起因のフラックスが 2 次生成起因のフラックスより 数桁多い。ゆえに、数事象でも見つかると DM 起因で あることの強い証拠となる。先行実験の BESS 実験 [2]、 近々南極での大気球観測が予定されている GAPS 実験 [3] に続く次世代実験として、GRAMS は数 100 MeV/n の反重陽子に対して 10⁻⁶ /m²/s/sr/(GeV/n) レベルの 感度を持つ。



図 1: GRAMS 実験の MeV ガンマ線(上段),反重陽 子感度(下段)[1]

1.2 検出器と検出原理

図2に示すLArTPCと、Time-of-Flight (ToF)プラ スチックシンチレータ(プラシン)がコンセプトデザイ ンである。入射粒子からLArにエネルギーが落ちて発生 する電離電子と蛍光を検出する。有感領域のLArには一 様電場(Z軸)をかけ電離電子をドリフトさせて検出す る。XY位置は電離電子信号を検出したチャンネル番号 から、Z位置は蛍光信号と電離電子信号の時間差から再 構成する。また、反応エネルギーに依存する電離電子数 や蛍光光子数から、荷電粒子の飛跡に沿った dE/dX や、 ガンマ線の各散乱点での反応エネルギーを再構成する。

MeV ガンマ線は LAr をコンプトンカメラの散乱体, 吸収体として使用することで入射エネルギーと入射方向 を再構成する。一方で,反重陽子は次のように検出する。 数 100 MeV/c の反重陽子は数 10 cm の LAr で止まり, Ar 原子核に捕獲される。その後,脱励起に伴い特性 X 線を,核子との対消滅でハドロン群を放出する。荷電反 粒子は LArTPC で完璧にトラッキングでき,到来方向 や運動エネルギーの再構成,対消滅由来ハドロン数のカ ウントができる。このコンプトンカメラ再構成と,反粒 子の原子核捕獲を利用した粒子-反粒子識別はこれまで の LAr 実験にない新しい試みである。

ToF プラシンは MeV ガンマ線観測においては Veto 検出器として機能する。反粒子観測では LArTPC で測っ た dE/dX と組み合わせることで質量識別が可能となる。



図 2: 検出器のコンセプトデザイン

1.3 GRAMS マイルストーン

LAr は極低温の媒質であり,発光波長が真空紫外光で あるなど,LArTPC は運用が難しい。近年,地上・地下 実験で広く使われ技術が成熟してきた。早稲田大学でも 10 年以上に渡る ANKOK 実験(高エネルギーニュース Vol.36 No.4 を参照いただきたい)での経験があり,地 上での Ar 運用はお手のものである。一方で,「気球に搭 載」し,「反粒子」の検出と「MeV ガンマ線のコンプト ン再構成」を行った実験は過去存在しない。そこで,以 下のマイルストーンを設定し開発を進めている。

一つ目はLArTPC コンプトンカメラの実機実証。LAr とガンマ線の反応は良く理解されている。一方で,ガン マ線の入射方向と入射エネルギーのコンプトン再構成は 行われていない。その実証に向けて,数mmの位置分 解能の検出器,かつ数100電子相当の電離電子信号検出 用のエレクトロニクスの開発を進めている。

二つ目は、反粒子とArの反応を理解すること。反粒子の原子核捕獲の利用は先行実験のGAPS実験が採用し、反陽子を用いて検証した。一方で、Arと反粒子の反応は実験的に検証されていない。現在、J-PARCでの反粒子ビーム照射試験に向けて準備を進めている。

三つ目は、今まで飛翔体に搭載されたことがない LArTPC の気球上運用可能性の実証。地上運用とは 異なり、振動や電力の制限など多くの制約がある中で LArTPC を運用する必要がある。可能な限り早く実証 するために簡易的かつコンパクトな LArTPC の搭載試 験を行い、2023 年度に国内で運用実証に成功した。

2 気球実験ことはじめ

著者が所属していた早稲田大学は 2020 年度末に GRAMS 実験に参加したが,スタッフ含め大気球実験 の経験はまったくなかった。そこで,気球実験をやるな らまず検出器の気持ちで自分自身が気球に乗るべきで あると考えた。それに加えて,自前で気球をあげてみる べきである,そのような思いで熱気球への搭乗と,自前 でのラジオゾンデの放球を行った。本題は 2023 年度に 行った LArTPC 気球工学試験であるが,気球実験を始 めるにあたっての事始めを紹介したい。

2.1 熱気球

2021 年 11 月,われわれはまず初めに気球の元世界大 会チャンピオン¹が操縦する熱気球に乗った(さすがに 研究費は使えないので自費)。場所は栃木県の渡良瀬遊 水地。気球は高度1km程度まで上昇する。図3の写真 は熱気球搭乗の様子で、景色が良くハート型の池も見え ることから告白のスポットにもなっているらしい。著者 が所属した研究室の寄田教授を含め、スタッフ2名と学 生3名が2日に分けて搭乗した。1グループ目(11/19) は風が比較的強く,水平方向に1時間で5km以上移動 するフライトになった。(不幸なことに,著者と学生1 人の)2グループ目 (11/24) は風が強すぎて搭乗できず, 後日改めて搭乗することになった。2回目 (11/30)は、 うってかわり風が穏やかで水平方向の移動距離が1時間 で約2kmの浮遊であった。気球は水平方向への動力を 持たず、高度を変えることで望む方向と強さの風を見つ け移動するものだと身をもって知ることができた。

¹熱気球飛行を行い,その正確さや距離,時間を競う大会の元世界 チャンピオン。詳しくは https://www.pukawaku.com/awards



図 3: 熱気球搭乗の様子

また,普通に乗るだけではなく,GPS や地磁気計,ガ イガーカウンター,NaI シンチレータ検出器(図4左) をバックパックに入れ持ち込んだ。NaI 結晶(応用光研, 8B8)のサイズは直径が5 cm,長さが5 cmの円筒型。 光検出器には高電圧回路内蔵の PMT モジュール(浜 松ホトニクス,H11411)を使用した。ラップトップに 繋いだ USB オシロスコープ (PICO TECHNOLOGY, pico2206B)で PMT 信号を取得する。電源には PC 自身 と市販のモバイルバッテリーを使用した。事前に、ミュー オンと⁴⁰K 由来のガンマ線が見えるように設定し、ホテ ルで DAQ を開始し浮遊終了までデータを取得し続けた。

図4に観測結果を示す。横軸は時間,縦軸は高度または イベントレートを示す。図中の黒実線が高度を,黒点が NaI に3 MeV 以上のエネルギーを落としたイベントレー トを表している。また,破線は NaI 結晶のみをモデル化 した簡単な Geant4 simulation[7, 8, 9]の結果で,3 MeV 以上を検出器に落としたイベントをカウントした。各高 度でのフラックスや角度依存性は EXPACS[4, 5, 6]を参 照した。かつて Victor F. Hess が決定づけた高度が上が るほど宇宙線が増加する事実を確認した(100 年前なら ノーベル賞?)。また,図には割愛したが,高度が上が るにつれ⁴⁰K 由来のガンマ線が減少する様子も見るこ とができた。



図 4: NaI セットアップとそのイベントレート,および 熱気球高度

2.2 TARF 見学

北海道大樹町には JAXA/ISAS の大気球実験グループ が気球実験の機会を提供する実験場 Taiki Aerospace Research Field (TARF)[10] がある。国内では,高度 30 km かつ数時間の大型気球実験を行える唯一の実験場である。 LArTPC 気球工学試験も TARF で実施した。2021 年末 の研究会で GRAMS の発表に指摘をいただいた大気球 実験グループの方との縁で,TARF での大気球実験の様 子を見学した。(LArTPC 気球搭載試験を実施するちょ うど1年前の 2022 年 6 月初旬で,1年後に LArTPCを 飛ばせるとは少なくとも著者は思っていなかった。)気 球実験は天候次第のため,見学も3日前に連絡をもら い,1日前に都内から飛行機で現地入り,放球を見て帰 京するという日程だった。実験場や放球の様子,搬入経 路,放球手順といった情報の確認ができた。

2.3 ラジオゾンデ

ラジオゾンデは地上から上空 30 km 以上までの気圧 や気温,湿度,風速などを測定する小型の観測気球で, 毎日 2 回同じ時刻に各地の観測点から放球されている。 また,カメラを搭載し上空撮影なども小型気球でされて きた (スペースバルーン)。数 10 g から数 100 g 程度の 小さな装置を小型のヘリウム気球であげるため,大型気 球に比べ準備期間が短く放球も容易である。ただし,航 空法や電波法などは順守する必要がある。各種手続きを 行った上で,カメラ付きの自作ラジオゾンデを 2022 年 6 月に放球した。

計測装置などのペイロード, ヘリウム気球, パラシュートが装置の基本構成である。この気球には気球自体とパラシュートの切り離し装置は無く,気球が破裂することで上昇から下降に転じる。破裂高度は気球サイズと充填ガス量に依存する。上昇速度は浮力と全体重量,気球形状に依存する。たとえば,使用した気球は,4000 LのHe,600 g のペイロードで到達高度が約 30 km,上昇速度が約 7 m/s になる。

図 5 に放球した装置を示す。筐体には発泡スチロー ルを使用した。オンボード CPU (Raspberry Pi 財団, Raspberry Pi 4B,以下ラズパイ)で、気圧計や温湿度 計,加速度計,角速度計といった環境センサーを読みだ した。ラズパイのバッテリーにはリチウムイオン電池を 使用した。また、上下面にはそれぞれカメラを一つずつ 配置している。浮遊中の位置情報は市販の GPS 付無線 機 (DJ-PV1D, ALINCO)を用いて取得し、放球地点と 着地予想地点付近の2か所で受信し把握する。無線機の 使用は電波法で規制されており、たとえばスマホは飛翔 体では使用できない。上空利用が可能な規格(150MHz 帯デジタル小電力コミュニティ無線機)を使用した。事 前に真空容器内で数時間の運用試験を実施し,真空耐性 や発熱を確認した。ラズパイが真空中で熱暴走したため, 放熱シートを背面に貼り対応した。合計重量は 600 g。 気球とパラシュートは,それぞれ株式会社気球製作所製 のコスモプレン 1000 (重量 1000 g,破裂径 8.2 m)と PC-055 を使用した。ヘリウムは近年供給量が少なく入 手が困難になっている。ガス事業者からのガスボンべの 北海道への納品・輸送が困難だったため,ゴム風船用の He ガスを 10 タンク購入して対応した。

フライトは、人口密度が少なく、広大な平野のある北 海道十勝平野に着地するように計画した。空港周辺など 浮遊が禁止されている範囲や、人口が密集する帯広市街 を避けて浮遊範囲を航空局に申請した。時間は地上の風 が弱く、また、航空機の往来も活発ではない早朝に設定 した。この手続きには2週間程度かかった。放球場所は 申請段階で決定できないため、放球地点には複数地点を 申請した。



図 5: 放球したカメラ付き自作ラジオゾンデ

放球日と放球地点は飛跡シミュレーション (Global Monitoring Laboratory, NOAA GML/OZWV Software Balloon Prediction)を用いて決定した。毎日 AM09:00(JST)と PM09:00(JST) に世界各地で放球さ れるラジオゾンデ観測データを元にしている。日時と気 球の上昇下降速度,放球地点を入力すると予測飛行経路 が出力される。まず,1週間前に放球可能な確率が高い 6/28-30の3日間に絞った。6/27 に現地に入り,その日 の深夜にシミュレーションを更新。6/28 早朝にコスモ プレン 1000 にヘリウムを 3800 L 充填し放球すること に決定した。図 6 の実線が放球直前の飛行予測を表す。 北海道周辺では,夏季に限り 20 km 以上の高層で東風 が吹くため,東に浮遊した後に西に戻り,気球の破裂後 に東に向かう経路を示している。

フライトは打上げ班5人,回収班2人の合計7人で実施した。6/27のPM01:00に帯広空港に入り,放球を実施する可能性が高い3地点を視察した。その日の深夜に 銭湯で行ったシミュレーションで6/28の放球を決めた (AM00:00)。その後,各班は放球地点と着地予想地点に 移動し待機。AM02:00からヘリウム充填を開始し,そ れと並行して観測装置の起動を進めた。学生3人がかり で1.5時間ほど気球を抑え込みながら充填を終え,観測 装置と気球を接続。AM04:00に放球した。

放球後,気球の位置情報を追いながら放球班は着地予 想地点に向かい,回収班も位置情報を取得しながら待 機。図6の点が GPS 位置情報の実データ点である。途 中,データがないのは,武器転用を避けるために14 km 以上では GPS データを通常は使用できないためである。 著者の調査不足でそのことを知らず,データが途絶えた 間は回収を諦めたが,気球が降下し GPS データの受信 が回復した。AM06:15 に着地し,回収班が GPS データ をもとに AM06:30 ごろに回収した。



図 6: 事前の飛行予測と実飛行軌跡



図 7: ラジオゾンデ放球と回収の様子

図 8 の上空 30km で撮影した気球破裂直後の写真に は、地球と破裂した気球の破片などが写っている(地球 が丸く見えているのは魚眼レンズのため)。また、大気 が十分に薄い高度まで上昇し空が黒く見えている。図 8 の下段はこの放球で得た高度と温度のデータである。高 度は圧力から換算した値を使用した。気球サイズと充填 量からの想定通りに 30 km まで上昇した。15 km以下で は外気温の低下に伴い、温度の実測値も低下している。 一方で、外気温が –40°C 程度の 30 km では、測定値が 0°C 付近まで上昇している。これはセンサーへの直射日 光の影響であると考えている。装置は小さく、データの 欠損などがありながらも、ペイロードの準備や申請、放 球,回収といった一連の気球実験を,準備期間2カ月程 度で完遂することができた。



図 8: 破裂直後の画像と高度,温度データ

3 LArTPC の気球工学試験

TARF では宇宙素粒子分野の実験を含め多様な実験 が行われている。GRAMS も 2023 年度に TARF で LArTPC の放球を実施した。LArTPC 気球運用の課題 を以下に列挙する。

- 衝撃や振動:検出器は気球から吊られた状態になり、回転を伴う振り子運動をする。また、放球やパラシュートの開傘、着水の衝撃が加わる。
- 重量の制限:搭載可能な重量は、気球サイズとへ リウム量に依存する。一般に、搭載重量が軽い方が 放球が容易で、放球機会も多い。また、小さな気球 で、より高高度に到達可能。
- 電力の制限:バッテリーや太陽電池から電力を供給 する。今回のフライトではバッテリーを搭載した。 Arを液相に維持できる冷凍機は大きな電力が必要。
 今回の実験では冷凍機は使用していない。
- 外気圧や外気温の変化: 1気圧から数 Pa,室温から-60°Cまで環境が変化する。装置全体を与圧容器に入れるか,低温真空で動作する機器が必要。Arの三重点圧力は 0.068 MPa で、外気圧まで下がる場合は凝固する。放電が発生しやすくなる。
- 検出器の遠隔操作: 光検出器や TPC 電場などの 電圧制御や, DAQ の設定は地上から無線で変更す る。また, 温度や圧力のモニターなども遠隔で取得 する。

 安全な回収:環境への配慮や、データのためにペイ ロードは回収する。回収時にアクセスする人員のリ スクを最小限に抑える必要がある。LArの場合は、 残存したLArの突沸による容器の破裂などがあげ られる。

3.1 気球工学試験 (B23-06)

LArTPC 気球工学試験は、2022 年冬に JAXA/ISAS 大気球実験グループに提案し、2023 年 4 月に B23-06 と して正式に採択された。B23-06 は早稲田大学、東京大学、 大阪大学が中心になり実施した。B23-06 では 3 段階の成 功基準を設定した。ミニマムサクセスは、上昇中に圧力 や温度をモニターし LArTPC が経験する環境を観察す ることであり、フルサクセスは、上昇中に LArTPC を安 定的に運用し LArTPC のデータを取得することである。 そしてエクストラサクセスは、水平浮遊中に LArTPC でガンマ線や宇宙線荷電粒子のデータを取得することで ある。

装置の準備は 2022 年末に開始した。5 月下旬までは 早稲田大学構内にて,LAr 容器やLArTPC,ゴンドラ の構築とテストを行った。早稲田でLAr 容器内をフラ イトモデルにすることを目標にし,輸送前日に信号の 最終確認が完了した。5/23 から 6/16 まで JAXA 相模 原キャンパスで,検出器の制御システム構築や真空恒温 槽試験,大気球実験グループ機器とのかみ合わせを行っ た。6/16 に装置を大樹町に発送し,6/19 に先発隊の学 生 4 人が TARF 入りした。準備を主導した先発隊の学 生 4 人全員がコロナになってしまったが,その間も,教 授が断熱材の切断に参加しながら準備を進めた。6 月下 旬に大気球実験グループ機器との最終かみ合わせ試験, 7/5 に Final Readiness Review (FRR) でフライト準備 が完了していることを確認,名実ともにすべての準備を 終了し放球待機状態に入った。

最初の放球の機会は FRR 直後にあったが,予報が変わり断念した。近年は天候不順で放球可能日数が減少している。2023 年度も待機時間が長く,筆者が大樹町に一人残り LAr のおもりをすることになった。7/20 に大気球実験グループから1週間以内の放球可能性が伝えられ,帰京中の GRAMS メンバーも急ぎ大樹町入り。7/26 の昼間に放球台に気球を設置,7/27 の早朝に放球を実施した。

3.2 ペイロード

ペイロードは先に挙げた課題に対処するように設計した。フライト機器は、気球とその制御装置、パラシュート、ペイロードで構成する。このフライトでは満膨張体

積が 30,000 m³ の気球を使用した。気球と制御装置、パ ラシュートは大気球実験グループが準備した。ヘリウム の排気とバラストで上昇・下降を制御する。また、気球 の切り離し装置を搭載し、任意のタイミングでフライ トを終了できる。放球や気球位置の制御は大気球実験グ ループが行う。ペイロードは、LArTPC 用の真空断熱容 器, バッテリーなどを格納する与圧容器, それらを搭載 するゴンドラからなる。バラスト,気球制御システム, 相乗り実験のスペースもゴンドラに確保した。ゴンドラ は軽量かつ低温脆性がないアルミニウム合金で構成。放 球時の XYZ 軸に 3G, 開傘時の Z 軸に 5G に耐えるよ う構造計算 (Simcenter, Finite Element Modeling And Postprocessing) を行い設計した。外気による機器の冷 却を防ぐために断熱材(デュポン・スタイロ株式会社, スタイロフォーム IB) でゴンドラを覆った。断熱材は 浮き材も兼ね、着水後にゴンドラが横転しないよう配置 した。フライト機器の全重量は 643 kg。GRAMS の装 置はゴンドラが 75 kg, LAr 容器全体が 71 kg, 与圧容 器全体が 31 kg で合計 177 kg (+LAr 重量)。



図 9: ペイロード全体像

3.2.1 LAr 運用系

Ar を液相に保つために約1 atm, -186°C に維持す る。冷凍機を使用せずに,熱流入量を抑えることで LAr を保持した。LAr 用のステンレス真空断熱容器の高さは 80 cm,直径は 25 cm,外壁厚は 3 mm,内壁厚は 2 mm であり,放球などの衝撃に備え,内壁と外壁の間に揺れ 止めピンを二つ配置した。容器を細長くし,底に LAr を 貯めて熱流入量を小さくした。熱流入量は 15 Wで,ガ ス換算 3 L/min,液面高さ換算 0.7 mm/hour の Ar が 蒸発する。蒸発した Ar は,TAVCO 社製の絶対圧力弁 で排気する (図 10-VF1)。動作圧は 1.2 atm,最大流量 は約 20 L/min。この絶対圧弁は BESS 実験が使用した もので,譲っていただいた。通常運用では絶対圧力弁の みで圧力制御できる。検出器内圧は絶対圧力計で,容器 内の温度は白金抵抗温度計で常時測定した。

放球の衝撃などで圧力が急上昇した場合は,最大流量 600 L/min の差圧弁(株式会社ベン,SL-39)で排気す る (図 10-VF2)。作動差圧は+1.5 気圧。また,差圧弁の 排気能力以上の Ar の異常な蒸発や,絶対圧弁と差圧弁 がともに破損した場合には,破裂弁で排気する(図 10-RD)。破裂圧力は+2.0 気圧である。着水後に弁出口が 海面上に出るようにすべての圧力弁に配管をつないだ。 またゴンドラが横転した場合に備え,水をはじく脱脂綿 を出口につけた。また,横転しても少なくとも一つの出 口が海面上に出る。

LAr 高純度化のため,充填前に真空引きする(図 10-VF3)。LAr は液フィルターで水や酸素を除去し充填す る(図 10-VG4-VG2-VG1-VF4)。充填に使用したエル フタンクやフィルター,配管類は充填直後に取り外した。

回収は漁船で行う。回収時の安全確保のためにLArを 上空で排液する。LAr容器底までステンレス配管を伸ば し,容器内外の圧力差を利用した。排液は配管出口の低 温駆動可能な電磁弁(日本アスコ社,J263G210LT)で 開始,停止する。排液が完了時は内圧が外気圧と同じに なる。Arの三重点圧力は 0.068 MPa と上空では配管出 口で凝結する可能性がある。その結果として排液できな い場合,3重の圧力弁で排気する。その場合,LAr全量 相当のガスは排気される時間まで回収を待機することと した。回収班の漁船には事前に決めた短い文字列で状況 を伝える。回収後は,速やかに手動弁を開け排気する。



図 10: LAr 運用系の概形図と LAr 真空断熱容器

3.2.2 LArTPC

LArTPC の形状は立方体で,サイズは 10×10×10 cm。3 種類の PCB (Cathode, Anode, Side Plate)とGridを配置し,鉛直方向に一様 な電場を形成。Anode-Grid 間は 0.5 cm。Side Plate に1 cm 間隔で電極を配置し,抵抗チェーンで接続し ている (100 $\Omega \times 10$)。また, Grid とグランドの間に 250 MΩ 抵抗を配置。Cathode に -2.5 kV の電圧を 印可し, Cathode-Grid 間は 200 V/cm, Anode-Grid 間は 1 kV/cm で運用した。振動対策として Anode はワイヤではなく基板にした。3 チャンネルに電極 を分割し、それぞれを電荷積分型アンプで読み出 している。増幅率は 2 V/pC, 時定数は $\tau = 500 \ \mu s$ $(R = 1 G\Omega, C = 0.5 pF)$ 。シェーパーアンプは実装し ていない。このアンプはノースイースタン大学で開発し たもので、LAr 中で使用可能である。LAr 蛍光信号は 波長変換後に PMT で検出する。TPC 内壁に波長変換 材 (TPB) を蒸着した反射材 (ESR) を設置した。また、 PMT 窓面にも TPB を蒸着している。PMT は+650 V で運用した。早稲田では 30 × 30 × 30 cm, 60 チャンネ ルのLArTPCを既に運用していたが、軽量化と開発の 短期化(半年)のために検出器をダウングレードした。

TPC は LAr 容器のトップフランジから吊るした。容 器内壁に合うアルミ板を TPC 上下に配置し揺れを抑え た。このアルミ板は LAr がトップフランジに跳ねるこ とを防ぐバッフル板の役割も兼ねている。

低真空環境での放電を避けるために,PMT や TPC 電場の高電圧線は自作フィードスルーで容器に導入し た。ブランクフランジに空けた穴に,耐電圧が高い同軸 カプトンケーブルを直接通し穴の周辺を樹脂で固めて封 じた。PMT と電荷積分型アンプの信号や,白金抵抗温 度計用には市販のフィードスルーを使用した。



図 11: LArTPC

3.2.3 制御システム, DAQ

LArTPC 以外の機器は与圧容器(ユニコントロール ズ,TB21D-LG)に格納した。制御用コンピュータには Raspberry Pi 4B を使用した。電源は 1 次電池のリチ ウム電池 (Electrochem, BCX85DD) を用い,ノイズが 小さい特注のボードで各機器に電力を分配している。電 荷信号と蛍光信号波形は USB オシロスコープ (Digilent 社, Analog discovery 2, AD2) で取得し, ラズパイに 保存する。AD2 を 2 台使い, 4 チャンネル, 50 MS/s, 160 µs 幅の波形を記録した。この設定で最大 60Hz の データ取得が可能。トリガーは PMT 信号で発行した。 TPC と PMT の高電圧源にはそれぞれ浜松ホトニクス社 の C14051-15 と C13890-55 を用いた。0–5 V の入力で出 力電圧を制御できる。AD2 から出力した電圧で, TPC・ PMT 電圧を制御した。白金抵抗や加速度計や磁力計の データもラズパイに保存している。結露を防ぐためにシ リカゲルをいれ窒素置換をして与圧容器を閉めた。



図 12: 与圧容器と制御システム

図 13 に簡略化したリモート制御のシステム図を示す。 地上と気球の通信は JAXA 大気球実験グループが担う。 シリアルコマンドとディスクリートコマンドの 2 種類を 使用できる。装置全体の主電源や各モジュールのオンオ フはディスクリートコマンドで,DAQ や電圧の設定は シリアルコマンドで行った。環境データは常に地上で監 視している。LArTPC データは,任意のタイミングで 1 イベントごとに見れるようにした。



図 13: 制御システム簡略図とユーザールーム

3.3 結果

3.3.1 フライト概要

2023/7/27 AM03:55 に放球した。2 時間 4 分後の AM05:59 に最高高度約 28.9 km に到達し,44 分間の 水平浮遊を開始した。AM06:43 に気球とペイロードを 切り離し,ペイロードは AM07:07 に着水,数分以内に 漁船で回収された。図 14 のように気球は東西に往復す る軌道を描いている。ジェット気流が西風,さらに高層 の風が夏季に限り東風のためである。TARFでは,往復 軌道を取ることで浮遊時間を延ばし,陸地に近い海上で の回収を実現している。GPS データは JAXA/ISAS 大 気球実験グループより提供を受けた。

LAr 排出は切り離し前の AM06:33 に開始した。 AM07:00 に LAr の放出完了を確認し,直ちに GRAMS 装置全体の電源を落とした。回収後,ゴンドラを含むす べての機器に破損はなかった。

TPC 電場は放電を避けるために放球時はオフにした。 放球の約5分後に TPC 電場をオンにし,LArTPC の データ取得を開始した。また,排液でLArTPC がガス 相に露出し放電する可能性があり,排液前に TPC 電場 をオフにした。そのため,電離電子信号は放球5分後 (高度約2km)から排液直前まで取得した。PMT 波形 と圧力や温度などの環境データは放球前から全電源停止 まで取得した。トリガー閾値は荷電粒子が取得できるレ ベルに設定していた。ただし,水平浮遊開始直後の約20 分はガンマ線のために閾値を下げてデータ取得した。

3.3.2 LAr 運用

観測終了まで十分に TPC が浸漬する量の LAr を放球 前日に充填した。フライト中の LAr 容器内圧は LAr 排 出開始まで,絶対圧弁により 1.1–1.2 atm に保たれてい る。その間,容器底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。

LAr の排液直後は容器内圧が低下し排液を確認でき たが、数秒程度で液出口が閉まり圧力が上昇した。三重 点以下の気圧のため、LAr が排液管出口付近で凝固した と考えている。詰まることは予想していたが、GRAMS メンバーは嫌な汗をかきながら電磁弁の開閉を繰り返し 行った。気球とペイロードを切り離して高度が下がり、 大気圧が三重点付近まで上昇した後は排液が順調に進ん だ。AM7:00 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(高度4 km 付近)。

フライトの全期間で差圧弁および破裂弁は動作せずに 安定運用できた。



図 14: 航跡図と飛翔高度

3.3.3 LArTPC 信号

電離電子信号は電荷積分型アンプの出力を直接読む ため、電圧の上昇分が信号量に相当する。また、電荷が 入った後はアンプの時定数で減衰する。図 17 は水平浮 遊中に取得した典型的なイベントである。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。また、LAr 蛍光の 2 つの発光時定 数成分 ($\tau = 6$ ns, 1.5 μ s) を確認できる。LArTPC 信号 をフライト全期間にわたって取得できた。

約 20 km 程度まで気球の上昇に伴いイベントレート



図 15: 放球と着水後の様子



図 16: LAr 容器内圧と温度,外気圧

は増加し、さらに高度が上がると減少した(図18)。宇 宙線が大気と相互作用しカスケードシャワーで粒子数が 増加,その後,高度が下がるにつれて1粒子あたりのエ ネルギーが低下し粒子数が減衰していく様子が見えてい る。また、EXPACS の角度情報を持った宇宙線フラッ クスを入力とし, Geant4 を用いてシミュレーションを 行った。ただし、LAr 容器と LAr のみを考慮し、有感 領域に一定以上のエネルギーを落としたイベントを数え る簡易的なシミュレーションである。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いる。



図 17: 高度 29 km で取得した LArTPC 信号波形



図 18: イベントレートの高度依存性

まとめと今後の展望 4

三つのマイルストーンの内、本稿では気球上運用可能 性の実証試験に絞り紹介した。2021年度の気球事始めか ら2023年度にはLArTPCの気球運用試験を成功させた。 この成果を評価され、GRAMS は NASA の Astrophysics Research and Analysis (APRA) program²にも採択され た。LArTPC をアップグレードし、2025 年から 2026 年 にかけて米国内で ToF も搭載する気球実験を行う予定 である。また、反粒子ビーム照射試験の準備や、コンプ トンカメラ実証機の製作も進めている。GRAMS 実験 は 2020 年代後半の南極周回気球観測に向けて順調にス テップアップしている。

謝辞 5

LArTPC 気球工学試験は、宇宙航空研究開発機構宇 宙科学研究所が提供する大気球による飛翔機会を利用し ました。放球の機会を逃さないために、他グループの放 球に続き2日連続で GRAMS の放球をしていただいた 大気球実験グループに感謝致します。この研究は著者だ けでなく、多くのスタッフや学生と共に進めました(特 に中島氏, 内海氏, 新井氏は大樹町での共同生活を含め 長時間ともに過ごした)。本研究は科研費 (22K18277, 22H00133, 23K22523)の助成を受けています。



図 19: B23-06 集合写真,回収直後に漁港にて

参考文献

- [1] T. Aramaki et al., Astropart. Phys. 114, 107-114 (2020).
- [2] K.Sakai et al., Phys. Rev. Lett. 132, 131001 (2024).
- [3] T. Aramaki et al., Astropart. Phys. 74, 6–13 (2016).
- [4]
- T. Sato, PLOS ONE, 11(8): e0160390 (2016). T. Sato, PLOS ONE, 10(12): e0144679. (2015). 5
- T.Sato, http://phits.jaea.go.jp/expacs/. [6]
- [7] J. Allison et al., Nucl. Instrum. Meth. A 835 (2016) 186-225.
- J. Allison et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 (2006) [8] 270-278.
- [9] S. Agostinelli et al., Nucl. Instrum. Meth. A 506 (2003) 250-303.
- [10] H. Fuke et al., Advances in Space Research 45, 490-497 (2010).

2将来の科学ミッションのための新技術の基礎研究と実現可能性実 証の支援が目的の NASA のプログラムの一つ。