

GRAINE 計画：次期気球実験に向けた

エマルジョンコンバーターの準備状況

○ 臼田育矢, 駒谷良輔, 小松雅宏, 小宮山将広, 佐藤修, 志水凱, 菅浪亜門, 杉村昂, 鳥井茉有, 長縄直崇, 中野敏行, 中野昇, 中村友亮, 中村光廣, 中村悠哉, 西尾晃, 林熙崇, 南英幸, 森下美沙希, 森島邦博, 山本紗矢, 六條宏紀, 児玉康一^A, 伊代野淳^B, 仲澤和馬^C, 吉本雅浩^C, 青木茂樹^D, 東崇史^D, 岡本一紘^D, 小田美由紀^D, 加藤拓海^D, 鳥野絢花^D, 呉坪健司^D, 鈴木州^D, 高橋寛^D, 長原翔伍^D, 中村崇文^D, 中村元哉^D, 松田菖汰^D, 丸嶋利嗣^D, 山下真優^D, 米野翔真^D
名古屋大学, 愛知教育大学^A, 岡山理科大学^B, 岐阜大学^C, 神戸大学^D

1. はじめに

ガンマ線は磁場の影響を受けずに直進してくるため、宇宙ガンマ線を観測することは宇宙線加速源の解明や宇宙で起こる高エネルギー天体現象を理解する上で重要な手がかりとなる。2008 年に打ち上げられたフェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡は sub-GeV/GeV 帯域のガンマ線天文学を飛躍的に進歩させた。その一方で他波長に比べて分解能が低いことや、偏光有感の観測ができていないなどの課題が残っている。GRAINE 計画では原子核乾板のサブミクロンの高い分解能で電子対生成反応を捕らえることにより、角度分解能を約 1 桁改善した高解像度精密撮像、偏光観測を目指して実験を進めている。

2018 年気球実験(GRAINE2018)では 0.38 m² 望遠鏡で Vela パルサーの撮像に成功し、気球搭載エマルジョン望遠鏡によってガンマ線天体を世界最高解像度で観測可能であることを実証した。2023 年気球実験(GRAINE2023)では口径面積 2.5m² で 2 回フライトをおこなうことで、前回実験の 13 倍規模の科学観測を計画している。

2. GRAINE2023 に向けた原子核乾板の開発

GRAINE2023 では総面積約 600 m² におよぶ原子核乾板を使用する。数百 m² 規模の原子核乾板量産を可能にするために、量産用装置の開発、運用を進めてきた。まず、量産型乳剤製造装置によって従来の 10 倍量の原子核乳剤を一度に製造可能になった。また、従来はプラスチック支持体上に原子核乳剤を手塗りすることで原子核乾板を作成していたが、Roll-to-Roll 機械塗布装置を開発し、「塗布」「乾燥」「巻取」の一連の流れを機械化することによって高速なフィルム化を可能にした。量産型乳剤製造装置で作成した原子核乳剤を機械塗布装置によってフィルム化することで、1 回の運転で約 8~10 m² の両面塗布原子核乾板

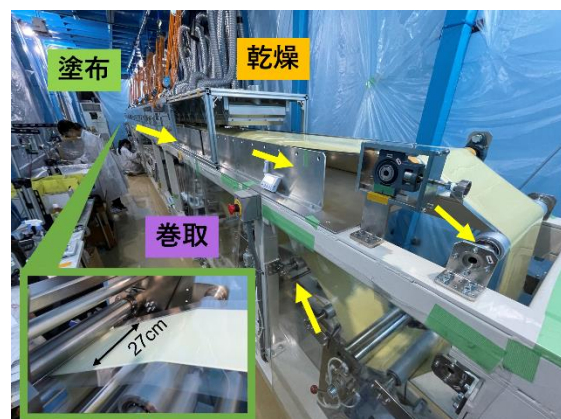


図 1.Roll-to-Roll 機械塗布装置の外観

の作成が可能になっている。2021 年 5 月からは連続運転を開始し、加速器を用いた原子核乾板実験への供給をしてきた。2022 年 6 月からは週 4 回の運転で GRAINE2023 用原子核乾板の量産を開始している。

原子核乾板では、現像するまでの間に蓄積した飛跡が徐々に消えてしまう潜像退行という現象が起こる。潜像退行は、荷電粒子が通過したことによって作られた銀核が酸化されることによって進行する ($\text{Ag}_n + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ag}_{n-4} + 4\text{Ag}^+ + 4\text{OH}^-$) と考えられており、高温になるほど進行が早くなる。豪州気球実験では観測後に原子核乾板が最高で 40°C の高温環境にさらされることになる。そのため過去の気球実験では迅速に回収作業をおこなうことで、潜像退行を抑えていた。2023 年気球実験では原子核乾板中に長期特性を改善する薬品を新たに添加することで、潜像退行や原子核乾板中のノイズ成分である fog の増加を抑えた新デザインの原子核乾板を使用する予定で、その性能評価を進めてきた。

このように、2023 年気球実験では、2018 年と異なる製造方法、異なる処方の原子核乾板を用いるため、基礎性能の評価を進めてきた。

3. GRAINE2023 デザインのコンバーターリハーサル

量産ファシリティを用いて作成した GRAINE2023 デザインの原子核乾板を使って、エマルジョンコンバーターを作成し、宇宙線観測をおこなうことでコンバーターの性能評価をおこなった。ロール状に塗布されたフィルムを $25\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ サイズに切り出し、50 枚積層して真空パックすることでコンバーターを作成した。作成したコンバーターは乗鞍山頂の山小屋に 5 日間設置し、宇宙線観測を実施した。

現像後のフィルムは超高速飛跡読取装置 HTS を用いて蓄積した飛跡を読み出し、飛跡検出効率や飛跡の角度精度、ガンマ線選出をおこなった。

飛跡検出効率は評価フィルムの上下のフィルム同士で接続した飛跡本数を N_{trigger} 、3 枚全てで接続した飛跡本数を N_{detect} としたとき、中央の評価フィルムの飛跡検出効率は、 $N_{\text{detect}}/N_{\text{trigger}}$ で定義される。GRAINE では飛跡角度 $\tan \theta < 1.0$ でフィルム一枚あたりの飛跡検出効率 95% 以上を実験要求としている。図 3 に示すように広い角度範囲にわたって要求を十分に満たす飛跡検出効率を確認した。この評価を積層した 50 枚のフィルム全てに対しておこない、99% 近い高い飛跡検出効率を確認した(図 2)。

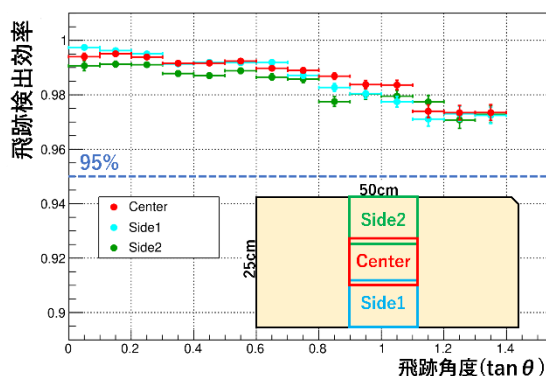


図 3. フィルム 1 枚の各解析領域における飛跡角度ごとの飛跡検出効率

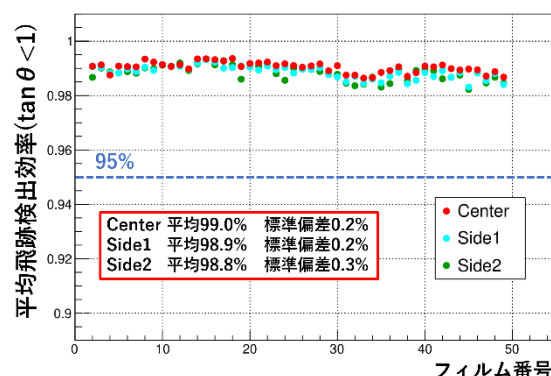


図 2. フィルムごとの平均飛跡検出効率 ($\tan \theta < 1$)

飛跡角度精度は、連続する 6 枚のフィルムで評価する。直線性の高い飛跡を用いて 2 枚のフィルムそれぞれで決定した角度のずれ分布を飛跡角度精度とする。評価した飛跡角度精度は、フィルムの構成や HTS の位置決定精度から期待される値とよく一致していることを評価した(図 4)。

これらの基礎性能を評価した上で、ガンマ線イベントを選出した。コンバーター中で発生する飛跡のうち発生点が近い 2 本の飛跡をガンマ線イベント候補として選出する。選出した電子対の飛跡は多重電磁散乱からエネルギーを付与し、電子対の角度、エネルギーから元のガンマ線を再構成する。乗鞍山頂に設置したコンバーターの 9cm×13cm の領域でガンマ線イベントを選び出し、様々な角度、エネルギーのガンマ線を再構成できた。イベント数から計算されるガンマ線フラックスはモデルからの期待値と良く一致している(図 5)。

これらの評価から、GRAINE2023 デザインのエマルジョンコンバーターが、ガンマ線検出器として十分機能することを実証した。

4. 本番想定 of 長期保管特性評価

気球実験本番では、コンバーターの作成から現像するまで約半年間性能を保持する必要がある。輸送から保管時は冷蔵で 2 ヶ月保管、与圧容器への実装後は常温で 1 ヶ月保管、観測後は回収まで最大 40°C で 1 週間、回収後は現像までに冷蔵で 2 ヶ月を想定している。本番と同サイズの原子核乾板をこのような温度環境にさらし、感度の指標である Grain Density(GD)とノイズの指標である Fog Density(FD)の変化をそれぞれ評価した。その結果、数ヶ月にわたって GD と FD の変化は小さく、解析が十分可能な性能を保持できることを確認した。

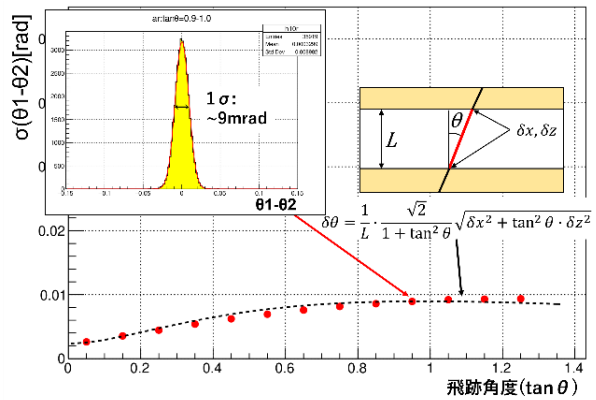


図 4. 飛跡角度ごとの角度精度

赤点はデータ、点線は期待される値

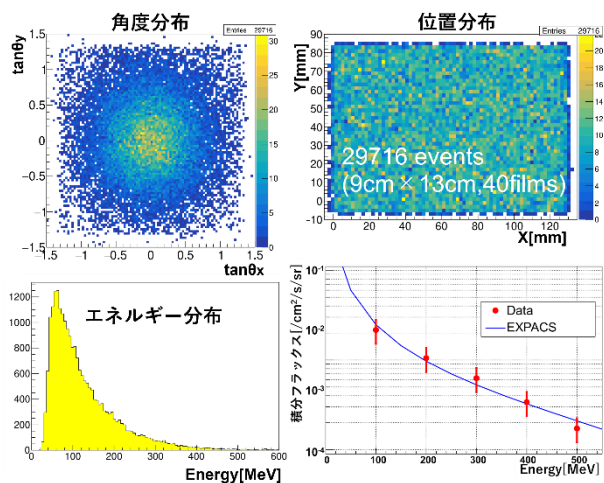


図 5. 乗鞍山頂で観測されたガンマ線イベントの位置、角度、エネルギー分布とガンマ線フラックス

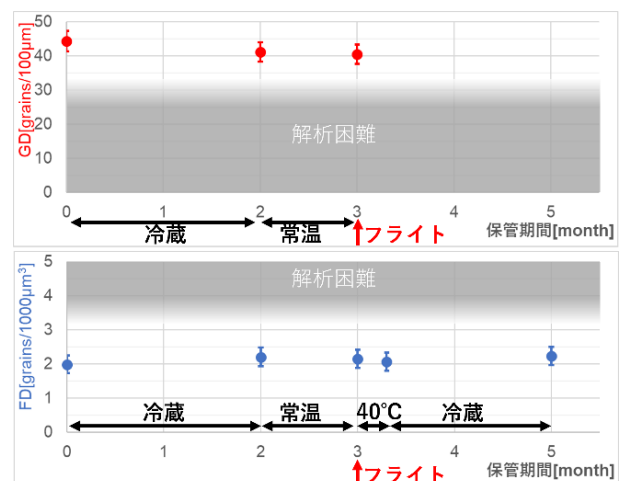


図 6. 長期保管フィルムの GD、FD

灰色の領域に差し掛かると飛跡読取装置による解析が困難になる

5. GRAINE2023 本番用原子核乾板の量産

様々な性能評価試験で、エマルジョン望遠鏡の中核を担う原子核乾板が実験に使用可能な性能であることを確認してきた。2022 年 6 月からは GRAINE2023 本番用の原子核乾板製造を開始している。量産用ファシリティを用いて週 4 運転で乳剤製造と塗布を繰り返すことで、約 35 m²/週ペースで原子核乾板を量産している。塗布されたフィルムのうち、気泡や筋が入ったものは B 級品として省き、状態の良い A 級品フィルムを本番用フィルムにする。B 級品の約半数は塗布装置のトラブルが多発した 7 月のもので、トラブル発生対策をおこない、現在 B 級割合は減少している。2022 年 11 月末までにコンバーター、多段シフター、平面保持フィルムに必要な原子核乾板の量産が完了する見込みである。

また、作成した原子核乾板の一部を切り出して GD、FD を評価している。3 ヶ月分のフィルムは性能が安定しており、これまでにないペースで安定した原子核乾板量産を達成している。

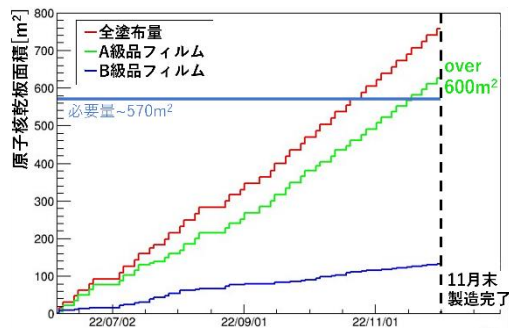


図 7. 量産した原子核乾板量

(11 月以降は最近の実績からの予測)

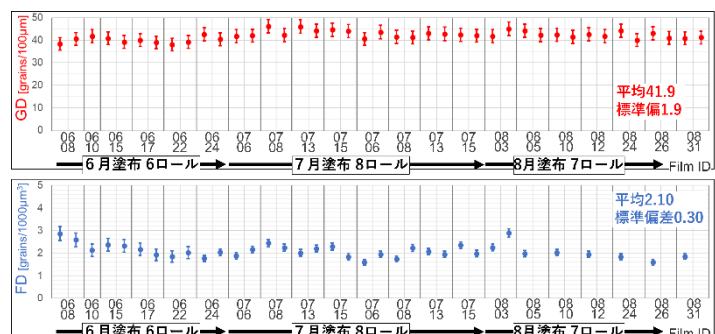


図 8. 量産した原子核乾板の GD、FD

6. 現地での実装に向けた準備

作成した原子核乾板は、実験前に蓄積した飛跡を消去するリフレッシュ処理をおこなった後に、100 枚積層して真空パックすることでコンバーターとする。コンバーターフィルムリフレッシュ用の設備は岐阜大学に構築が完了しており、11/9 よりコンバーターフィルムのリフレッシュを開始し、1 月に全フィルムのリフレッシュ、真空パックを完了させ、豪州へ輸送する。

フィルムの輸送のリハーサルもおこなっており、本番の輸送で用いる容器にフィルムを入れた状態で名古屋から豪州(ブリスベン)までの輸送、返送をおこない、現像後のフィルムに大きな問題が無いことを確認している。今後、輸送時に蓄積した飛跡量を評価することで、フライトフィルム解析でのバックグラウンド量を見積もる予定である。

7. まとめと展望

GRAINE は 2023 年春に 2.5m² エマルジョン望遠鏡で 2 回の気球実験を予定している。GRAINE2023 デザインでのコンバーターフィルム性能評価を進め、十分な性能を確認してきた。現在、原子核乾板の量産とリフレッシュ処理の準備が進んでおり、2023 年 1 月に豪州への輸送、2 月以降のゴンドラ実装に向けて準備を進めている。

参考文献 GRAINE collaboration 2004-2022 年度大気球シンポジウム報告