

GRAINE 計画：次期気球実験に向けた

原子核乾板量産体制の構築と環境耐性試験

名大, 愛知教育大^A, 岡山理科大^B, 岐阜大^C, 神戸大^D

○ 白田育矢, 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, 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, 高橋覚^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

1. はじめに

宇宙ガンマ線を観測することは、宇宙で起こる高エネルギー物理現象の探索に有用である。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)では初めて天体検出に成功し、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。次期気球実験からは規模を拡大し、科学観測を開始する。

2. 原子核乾板量産体制の構築

2-1 量産型原子核乳剤製造装置

GRAINE 次期豪州気球実験では口径面積 2.5 平米のエマルジョン望遠鏡を搭載したペイロードを 2 機準備し、2 回フライトによる科学観測の実施を目指している。口径面積が GRAINE2018 の約 13 倍となり、エマルジョン望遠鏡を構成する原子核乾板の必要量は約 600 平米になる。名古屋大学では原子核乾板の供給能力を 1 桁スケールアップするインフラ設備の構築を推し進めてきている。

2019 年から量産型原子核乳剤製造装置

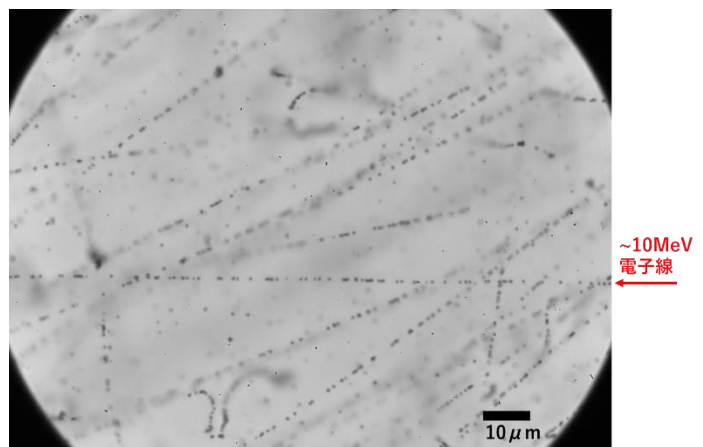


図 1:量産型原子核乳剤製造装置で作成した乾板の顕微鏡画像。最小電離粒子の飛跡が明確に映っている

の新設を開始し、2020年末には全装置連動での乳剤製造に初めて成功した。作業工程の見直し等を経て、量産型の装置で従来装置と同様の乳剤を作ることができている。

2-2 ロール to ロール塗布装置の開発

原子核乳剤をプラスチックフィルムの両面に塗布する工程は、これまで1枚1枚手塗りでおこなってきたが、ロール状に巻かれたフィルムを引き出し→乳剤をコーティング→熱風送風機による乾燥→巻き取りを連続的におこなう、ロール to ロール塗布装置の開発を進めている。図2に名古屋大学で運用中のロール to ロール塗布装置の写真を示す。フィルムの巻出機、巻取機、張力調節機、コロナ処理機、下塗・上塗ゼラチン塗布用のローラーコーター、乳剤塗布用のナイフコーター、スリットノズルと熱風送風機からなる乾燥炉などで構成される。飛跡検出に十分な厚みの乳剤層(片面 $65\mu\text{m}$ 以上)の機械塗布を世界で初めて実現し、手塗りでの塗布に比べて10倍の速さでフィルムを作成できている。

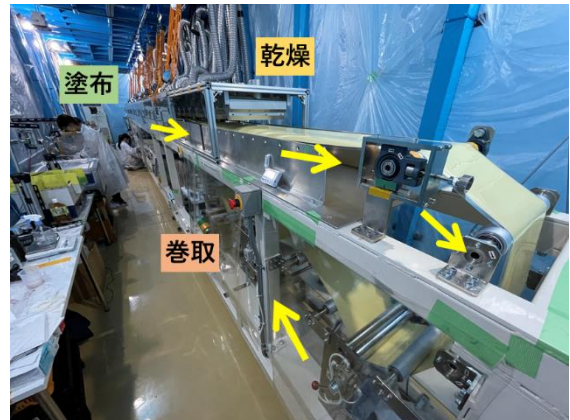


図2:名古屋大学のロール to ロール塗布装置

これらの新しいファシリティは2021年5月から本格運用、実験への供給を開始している。GRAINE次期豪州気球実験に向けては2022年6月頃から乳剤製造、フィルム製造を計画しており、5ヶ月程度で総面積約600平米の原子核乾板を生産する。

3. エマルションフィルムの改良

3-1 薬品添加による潜像退行特性の改善

原子核乾板は高温環境に長時間さらされると蓄積された飛跡が消えてしまう潜像退行という現象が起きる。そのため観測終了後に迅速にフィルムを回収する必要があった。飛翔機会の拡大や長時間フライトの実現可能性を高めるためにも回収までの時間制限を緩和する必要がある。GRAINEで要求される条件は、観測終了後に最高気温 40°C にもなるオーストラリアの荒野で回収までに最長1週間かかったとしても飛跡検出効率を95%以上に保つことができることである。

近年、潜像退行やノイズ増加の環境耐性に改善傾向のある添加薬品が見出された。GRAINE次期豪州気球実験で用いる原子核乾板デザインに対して新たに添加薬品を導入し、その効果を確認する試験をおこなった。

試験フィルムを作成し、電子線を照射した後に 40°C 環境に0,1,5,3,5日間置いたフィルムの潜像退行特性、ノイズ増加特性を確認した。潜像退行特性は Grain Density(GD:飛跡 $100\mu\text{m}$ あたりの現像銀数)、ノイズ増加特性は Fog Density(FD:乳剤層 $1000\mu\text{m}^3$ 中に飛跡と関係なくランダムに発生する現像銀数)で評価をおこなった。

図3に試験結果を示す。薬品添加をおこなったフィルムは従来フィルムに対して、40°C環境に5日おいた後のGD減少率が小さく、FDの増加率も小さい。このことから、薬品添加によって潜像退行特性とノイズ増加特性に有意な改善傾向を確認した。

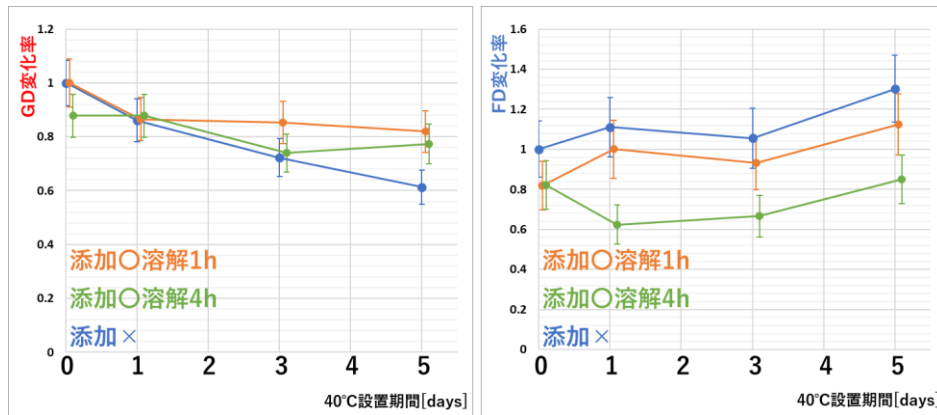
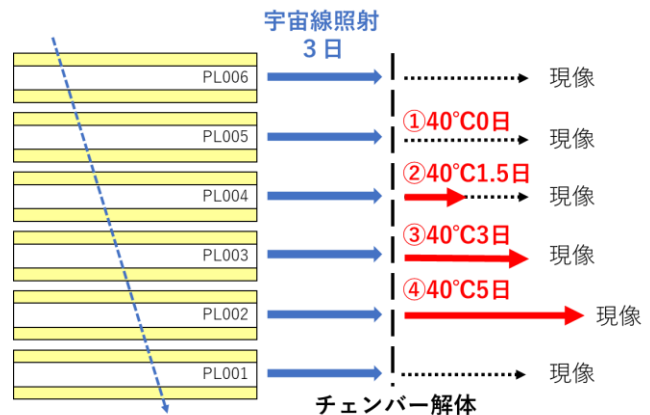


図 3:(左)40°C設置期間に対する Grain Density(GD)の変化率、(右)40°C設置期間に対する Fog Density(FD)の変化率

縦軸はどちらも薬品添加無しの0日を1として、そこからの変化率を表す。

3-2 スキャンデータを用いた潜像退行特性評価試験

図4にスキャンデータを用いた潜像退行特性評価試験のセットアップを示す。40%RHで乾燥したフィルムを1枚ずつパックし、6枚積層したチェンバーを作成した。上下のフィルムをトリガーフィルムとし、その間の4枚を評価フィルムとした。このチェンバーに宇宙線を3日間照射したのちにチェンバーを解体し、評価フィルムを40°C環境にそれぞれ0,1.5,3,5日間置いてから現像した。



現像後のフィルムを高速自動飛跡読み取り装置 HTS で読み取り、評価をおこなった。

自動読み取りではフィルムの乳剤層を片面16層の断層画像で撮影し、直線上に並ぶ銀粒子を飛跡として読み出す。1つの飛跡に対して16層の断層画像のうち何層で銀粒子が存在するかのヒットレイヤー数をパルスハイトと定義し、パルスハイトが7以上のものを飛跡として出力した。読み取る飛跡の角度範囲は $|\tan \theta_{x,y}| < 1.4$ である。飛跡検出効率 η はトリガーフィルム同士で接続した飛跡の本数を $N_{trigger}$ 、トリガーフィルム同士で接続した飛跡の中で評価フィルムにも接続した飛跡の本数を N_{detect} とし、 $N_{detect}/N_{trigger}$ で定義している。

図5は上段が評価フィルム①(40°C0日)、下段が評価フィルム④(40°C5日)のパルスハイト分布と角度ごとの飛跡検出効率の結果である。潜像退行により、評価フィルム①に比べて評価フィルム③ではパルスハイトの分布が小さい方へシフトしている。しかし、出力閾値以下になり飛跡と

して出力されなくなった本数は全体に比べて十分少なく、評価フィルム④でも飛跡検出効率 95%以上を維持できている。

今回の試験結果と GRAINE2018 の量産フィルムで同様の試験をおこなったフィルムを同じ条件でスキャンし、飛跡検出効率を評価したものを比較したものが図 N である。気温の日変動を考慮すると、フィルムの回収までの猶予は横軸の約 2 倍相当になる。今回の試験フィルムでは回収までに 1 週間かかっても飛跡検出効率が 95%以上という要求を満たすものになっていることが分かる。

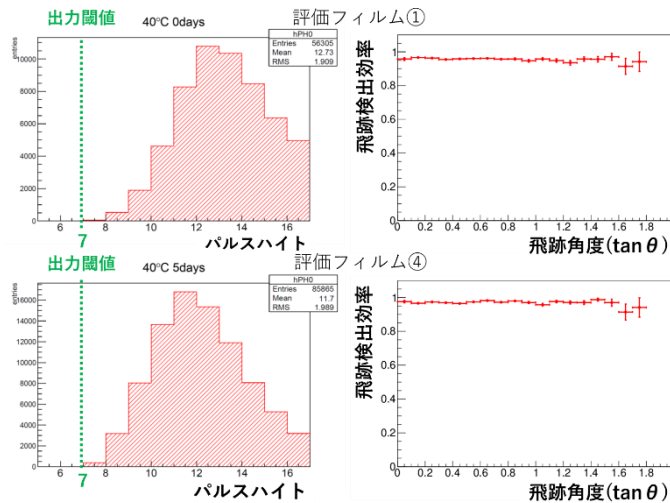


図 5:40°Cに 0 日(上段)と 3 日(下段)置いた後に現像したフィルムの評価結果
(左)パルスハイト分布。(右)角度ごとの飛跡検出効率

4. 乗鞍での大気ガンマ線/宇宙線観測リハーサル

次期豪州気球実験に向けて新ファシリティでのフィルム作成、プロテクションコート、岐阜大学の設備を使用しての現像などの前回実験からのアップデートを取り入れたリハーサル実験をおこなった。標高約 2700m の乗鞍岳で大気ガンマ線、宇宙線の観測実験をおこなった。本番コンバーターサイズ(25cm×50cm)を 50 枚積層したチェンバーを作成した。山頂付近の山小屋に 5 日間設置した後に岐阜大学で現像をおこない、現在解析に向けた準備を進めている。

5. まとめ

次期豪州気球実験に向けて原子核乾板の量産のために量産型乳剤製造装置、ロール to ロール塗布装置を構築し、従来の 10 倍速での量産を可能にして実験への供給を始めている。

潜像退行特性の改善のために新たに添加薬品を導入し、観測後回収までの猶予が長くなり、最長 1 週間という要求を満たすフィルムになっている。本番を想定したりハーサル実験もおこない、解析の準備を進めている。

また、GRAINE2018 ではオーストラリア(シドニー大学)で現像をおこなったが現像にかかる時間を考え、次期豪州気球実験では日本に送り返しての現像を計画しており、それに向けた空輸の確認試験や、フィルムの長期保管特性についても試験を進めて行く。

6. 参考文献

S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (submitted).
A. Nishio et al., Nucl. Instr. And Meth. A 966 (2020) 163850.