

GRAINE 計画:2018 年豪州気球実験に向けた エマルジョンフィルム準備状況報告

○中村悠哉¹、GRAINE collaboration²

名古屋大学^{1,2}、愛知教育大学²、ISAS/JAXA²、宇都宮大学²、岡山理科大学²、神戸大学²

1 はじめに

宇宙からのガンマ線は宇宙線の加速起源など高エネルギー現象を探る上での重要なプローブとなる。2008年に打ち上げられフェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡によってそれまでの10倍以上にもなる3000個以上のガンマ線天体が検出され、ガンマ線天文学は飛躍的に進歩した。その一方で、他波長に比べて分解能が桁違いに低いことや偏光有感の観測ができていないことなど課題も残っており、観測データの質的な改善が求められている。

原子核乾板(エマルジョンフィルム)はサブミクロンの高い空間分解能を持ち、かつ3次元的に荷電粒子の通過位置を記録することができる飛跡検出器である。エマルジョンフィルムを用いることでガンマ線の電子対生成反応点直下を精密に測定することができる。そのため、ガンマ線(10 MeV-100 GeV)に対する角度分解能は Ferimi-LAT と比べ一桁近く改善され、電子対放出面の方位角を測定することでガンマ線の偏光情報も得ることができる。

GRAINE 計画ではエマルジョンフィルムからなる大面積($\sim 10\text{m}^2$)、広角($< 45^\circ$)の望遠鏡を気球に搭載し、数日 \sim 1週間程度のフライトを繰り返すことによりガンマ線天体の精密観測を目指す[1]。これまでに2011年大樹町での気球実験[2]、2015年オーストラリア・アリススプリングスでの気球実験[3]を行ってきた。現在は2018年に再びアリススプリングスで行う気球実験(GRAINE2018)に向けて準備を進めている。ここでは、エマルジョンフィルムの準備状況について報告する。

2 GRAINE2018 に向けたエマルジョンフィルムの改良

GRAINE では2015年気球実験に向けて、それまで用いられていた OPERA フィルムという富士フィルム製のエマルジョンフィルムではなく、高感度フィルムと呼ばれる名古屋大学で製造した高銀原子核乳剤(臭化銀結晶の体積充填率55%)を用いたフィルムを開発した。その結果、OPERA フィルムを用いた GRAINE2011 では荷電粒子の飛跡検出効率が80%程度であったのに対して、GRAINE2015 ではコンバータフィルムほぼ全面において98%程度という高い値にまで改善された[3]。

高感度フィルムには潜像退行と呼ばれるフィルムに記録された飛跡が消える現象に関して課題が残っていた。この現象は高温であるほど、フィルムの水分量が多いほど反応が促進されるため、フィルムを乾燥させてから真空パックすることで反応を抑制する。一方で、フィルムを乾燥させていくと徐々に柔軟性が失われていき割れる危険性が高まってくる。2014年に行われた高感度フィルムの潜像退行特性試験では、フィルムを乾燥可能な最低レベルの相対湿度($\sim 22\%RH$)まで乾燥させても実際のオーストラリアでの回収を想定した温度環境において飛跡検出効率95%以上を保つには、観測終了後3日以内にフィルムを回収する必要があるという結果であった。実際の GRAINE2015 気球実験の際は半日程度で速やかに回収を行うことができたため問題はなかった[4]。

飛行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。また安全性を高めるためにフィルムの乾燥湿度を高めることも求められる。そこで、GRAINE2018 では使用する乳剤をより潜像退行特性に優れた中銀乳剤(臭化銀結晶の体積充填率45%)へ変更した。

3 潜像退行特性試験

3.1 試験概要

GRAINE で要求される条件は、観測終了後に最高気温 40℃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。これを考慮して実際に中銀乳剤で製造したフィルムを用いて潜像退行特性試験を行った。図 1 が実験セットアップである。40%RH まで乾燥させたフィルムを 5 枚積層し、上下のフィルムをトリガーフィルムとして間の 3 枚のフィルムを評価フィルムとした。このチャンバーに宇宙線を 3 日間照射したのち、評価フィルムをそれぞれ 0,1.5,3 日間 40℃環境に置いてから現像した。気温の日変動を考慮すると今回 40℃環境に置いた日数のおよそ 2 倍の日数が回収までにかかる日数に相当する。

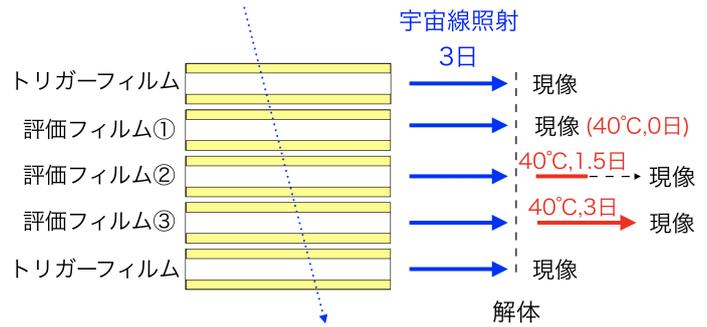


図 1: 潜像退行特性試験の実験セットアップ。

現像後のフィルムを現行で最速の自動飛跡読み取り装置である HyperTrackSelector(HTS) で読み取った [5]。自動読み取りではフィルムの乳剤層を 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。一つの飛跡に対して 16 層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して定義し、今回はパルスハイトが 8 以上のものを飛跡として出力するようにした。読み取り角度範囲は $|\tan\theta_{X,Y}| < 1.4$ である。飛跡検出効率はトリガーフィルムでの接続飛跡本数を N_{trigger} 、トリガーフィルムで接続した中でさらに評価フィルムにも接続した飛跡の本数を N_{detect} とし、 $N_{\text{detect}}/N_{\text{trigger}}$ で定義している。

3.2 試験結果

図 2 は上段が評価フィルム①、下段が評価フィルム③のパルスハイト分布と角度に対する飛跡検出効率の結果である。潜像退行によって評価フィルム③では評価フィルム①に比べてパルスハイトの分布が全体に小さい方向へシフトしている。しかし、評価フィルム③の閾値付近での分布を見ると、閾値以下にまで小さくなり出力されなくなった飛跡の本数は全体の本来数に比べて十分少ないことがわかる。その結果、評価フィルム①と③で比較してみても飛跡検出効率はほとんど低下しておらず高い値を保つことができている。この試験結果と 2014 年に行われた高感度フィルムでの試験結果とを比較したものが図 3 である。青色のプロットが高感度フィルム、赤色が今回用いたフィルムの 40℃環境に置いてから現像するまでの日数に対する飛跡検出効率の関係を表す。気温の日変動を考慮して横軸を 2 倍相当として考えると、フィルムパック時の乾燥湿度は高くより割れの危険性が少ないにも関わらず、今回用いたフィルムではおよそ 1 週間程度回収までに時間を要し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がわかった。

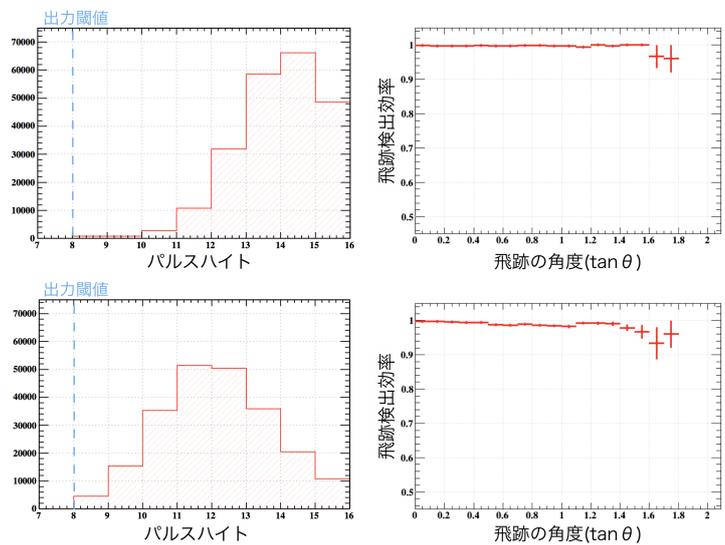


図 2: 40℃に 0 日 (上段),3 日 (下段) 置いてから現像した評価フィルムの結果。左:パルスハイト分布。右:飛跡の角度に対する検出効率。

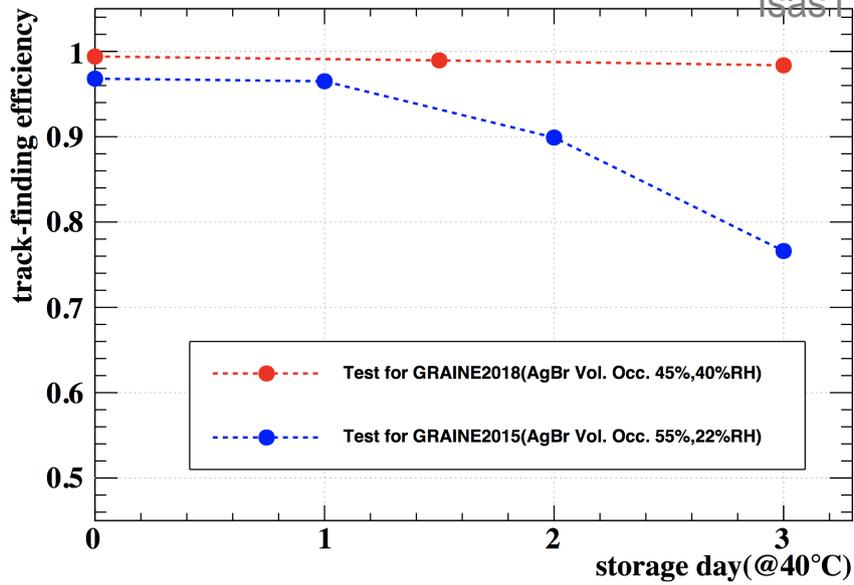


図 3: 現像まで 40 °C環境に置かれていた日数に対する飛跡検出効率。青色のプロットが 2014 年に行った高感度フィルムの潜像退行特性試験の結果。赤色のプロットが今回の試験結果。横軸は気温の日変動を考慮するとおよそ 2 倍で実際の回収までの日数に相当する。

高銀乳剤に比べ中銀乳剤は感度は低いが、図 3 を見ると今回の試験では高感度フィルムよりも初期の飛跡検出効率が高くなっていることがわかる。これは図 4 の写真のように高感度フィルムでは乳剤中の銀量が多く一部の銀が析出してしまい数%程度のデッドスペースを作っていたのに対して、今回用いたフィルムではそのようなデッドスペースがほとんどないことによると考えられる。

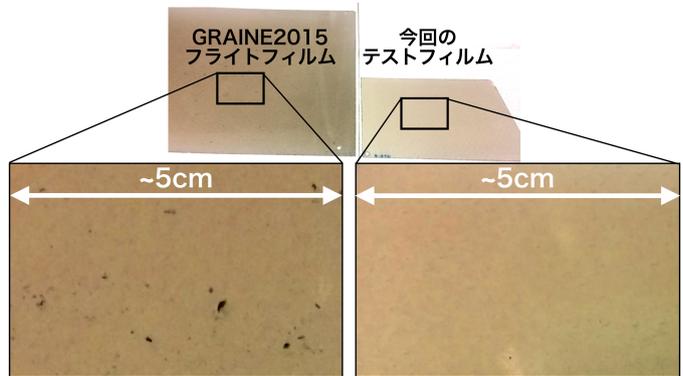


図 4: 左:2015 年フライトフィルム (高感度フィルム)。右:今回の試験フィルム

4 エマルジョンフィルム準備状況と今後のスケジュール

今回の試験結果を踏まえて図 5 のようにコンバータのデザインが確定した。潜像退行特性改善のため高銀乳剤から中銀乳剤へと変更した。乳剤としてのガンマ線の対生成確率が下がる分はフィルム 1 枚あたりの乳剤層を厚くすることによって補い、読み取るフィルム枚数を変えることなく同等の反応確率となっている。

実際に 8 月から名古屋大学でフィルムの量産を開始、予定通りに製造は進んでおり 11 月現在で必要な枚数のフィルムがほぼ全て完成した。11 月から 12 月にかけて本番で使用するものと同等のコンバータダミーチェンバーを製作し、マウント練習を行う。1 月より本番チェンバーの製作をし、2 月にオーストラリアへ発送する。フィルムの前処理および製作作業を GRAINE2015 ではオーストラリア(シドニー大学)で行ったが、

	GRAINE2015	GRAINE2018
AgBr体積充填率	銀:ゼラチン=55:45	銀:ゼラチン=45:55
パック湿度	20%	40%
潜像退行特性 ※日変動考慮	~3日	~6日
塗布厚み(片面)	70 μm	75 μm
フィルム枚数	100枚×4ユニット	100枚×4ユニット

図 5: GRAINE2018 でのコンバータフィルム変更点。使用する乳剤を変更したことでフィルムパック時の湿度、潜像退行特性ともに改善された。塗布厚みを厚くすることでガンマ線の反応確率は GRAINE2015 の時と同等である。

より時間的な余裕を持たせて処理不足のリスクを軽減するために GRAINE2018 では日本で行う予定である。チェンバーを空輸することによる飛跡蓄積量、フィルムの長期安定性についても試験、評価をしており、問題なく本番実験に臨める見込みである。

5 まとめ

GRAINE2018 に向けて潜像退行特性改善のために使用する乳剤を高銀乳剤から中銀乳剤へと変更した。これによって回収日数の猶予は2倍以上長くなりかつ、フィルムパック時の湿度もおよそ2倍程度高くなり割れの危険性も軽減された。このフィルムの製造も予定通り進められており必要枚数がほぼ完成した。今後はダミーチェンバーによる多段シフターへの導入、手順の確認を経て本番用チェンバーの製作に取り掛かる。

参考文献

- [1] 青木茂樹 他,2004-2011, 2013,2016 年度大気球シンポジウム報告., 高橋覚 他,2007-2009,2014-2016 年度大気球シンポジウム報告. 等
- [2] H.Rokujo, et al., NIMA 701 (2013) 127-132., S.Takahashi, et al., PTEP. (2015): 043H01.
- [3] K.Ozaki, et al., JINST (2015): P12018., S.Takahashi, et al. PTEP. (2016): 073F01.
- [4] 六條宏紀 2015 年度大気球シンポジウム報告.
- [5] M.Yoshimoto, et al., PTEP. (2017): 103H01