

GRAINE2018：コンバーターフィルム性能評価

○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

ガンマ線は複雑な星間磁場の影響を受けず地球に到来するため宇宙の高エネルギー現象の起源を探る上で非常に重要なプローブとなる。2008年に打ち上げられフェルミガンマ線宇宙望遠鏡によってそれまでの10倍以上にもなる5000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。そのような大統計観測が実現した一方で、他波長に比べて分解能が桁違いに低いことや、宇宙線加速機構の理解に重要な偏光観測ができていないことなど課題も多く残っており、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、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で精密に電子対の角度を測定することができる。そのため多重電磁散乱の影響を抑えることができ、ガンマ線(10 MeV-100 GeV)に対する角度分解能はFermi-LATと比べ桁近く改善され、電子対放出面の方位角の測定も可能となりガンマ線の偏光情報も得ることができる。

我々はエマルジョンフィルムからなる大面積(~10 m²)、広角(天頂角:0°~ > 45°)の望遠鏡を気球に搭載し、数日~1週間程度のフライトを繰り返す行いでガンマ線天体の精密観測を目指すGRAINE計画を推進している[1]。これまでに2011年大樹町、2015年オーストラリア・アリススプリングスで気球実験を行ってきた[2][3]。そして今年、2018年春に再びアリススプリングスでの気球実験(GRAINE2018)を実施した。本実験ではガンマ線天体(velaパルサー)を100 MeV帯域で優位に検出することによる望遠鏡の総合性能実証を目的としている。本講演では電子対の角度から検出器に到来したガンマ線の角度を決定するコンバーター部(エマルジョンフィルム100枚積層)の性能評価、解析状況について報告する。

2 GRAINE2018年気球実験

2.1 エマルジョンフィルム準備、コンバーター製作

GRAINE2018に向けて2017年4月からフィルムの性能試験を繰り返す行い、2015年実験に用いたフィルムと比べて潜像退行特性に優れたフィルムに改良した[4]。確定したデザインを元にフライト用フィルムの量産を8月から開始し、4ヶ月かけて611枚(~58 m²)を製造した。

エマルジョンフィルムは積算型の飛跡検出器なので製造後の保管期間にも飛跡が蓄積してしまう。これに関しては、コンバーターを製作する直前に100枚のフィルムを暗室テントに入れて、テント内の湿度を95%以上にする事で蓄積された飛跡を消去する「リフレッシュ」という処理を施している。リフレッシュ後に再び湿度を下げ乾燥させてから100枚のフィルムを積層して真空パックすることでコンバーターが完成する。このリフレッシュからコンバーター製作までの一連の作業を2015年実験ではオーストラリア現地で実施していた。この際にスケジュールに余裕がなかったこともあり、リフレッシュ後の乾燥が不十分

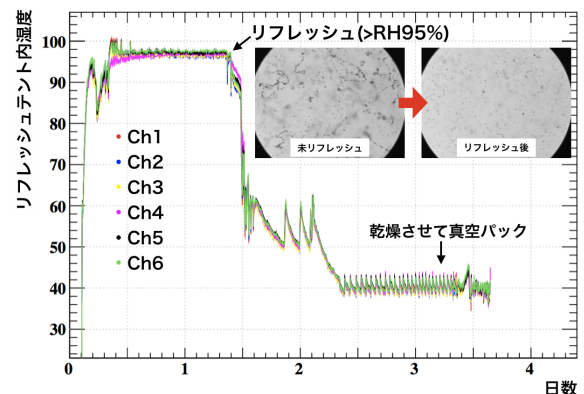


図1: リフレッシュ処理時のテント内湿度。相対湿度95%以上にして蓄積飛跡を消去した後、湿度を下げ乾燥させてからフィルム100枚を積層して真空パックする。

であったことが原因で一部フィルム (全体の ~5.7%) が部分的に解析不可能となっていました。これらがある 1 ユニットのシフターと接続する下流側 29 枚に集中してしまったことで有効面積にして 25%もの損失につながった。そこで GRAINE2018 ではフィルムの長期的安定性試験を十分行い、これらの作業を事前に日本で実施可能なことを確かめ、余裕を持って作業に臨んだ。また乾燥湿度の安定化や十分な時間が確保できるような運用プロファイルを新たに確立し、慎重に作業を行いコンバーター 4 ユニットの製作を行なった。完成したコンバーターは空輸便で放球基地のあるオーストラリア・アリススプリングスへと輸出した。

2.2 コンバーター実装、フライト、現像

アリススプリングスでコンバーターを受け取り真空パックの健全性確認を行なったのちに与圧容器 Gondola への実装を行なった。エマルジョンフィルムは高温環境下で徐々にノイズ成分が増加していく性質があるため、与圧容器を密閉したあとは簡易テントに Gondola を格納し、スポットクーラーでテント内に冷気を送り込むことでフィルムを低温に保っていた。実際にフィルムを実装してからフライトを実施するまでの期間は約 1.5 ヶ月と非常に長くなったが、その間フィルム周りの温度は 20 度を下回っていた。

気象条件の整った 4/26 早朝にフライトを実施した。気球はアリススプリングスで打ち上げられた後、東向きの風に乗って約 900km 移動し回収班が待機するロングリーチ近くで Gondola を切り離れた。総飛行時間は 17 時間 21 分、水平浮遊時間は 14 時間 44 分となり、目標天体である vela パルサーの観測可能時間を確保するフライトを実現することができた。翌日の早朝には検出器の回収に向かい、今回の実験から新たにヘリコプターを導入したこともあり迅速な回収に成功した。

回収したフィルムは陸路でロングリーチから現像拠点であるシドニー大学まで輸送した。12 日間かけて実験に使用した 489 枚 (~44m²) のフィルム全ての現像処理を完了した。この際、前回実験であったようなリフレッシュ処理時の乾燥不良による解析不能なフィルムは 1 枚もなかった。こうしてフライトは成功し、1 枚のみ現像エラーはあったがほぼ全てのフィルムを健全な状態で日本に持ち帰ることができた。

3 コンバーターフィルム解析

フィルムに記録された飛跡のデータ取得は名古屋大学で開発した超高速自動飛跡読取装置 (HTS) を用いる [5]。データ取得に当たっては以下の手順で処理を進めていく。

1. 表面銀取り

現像後のフィルム表面には飛跡と無関係な銀が薄く析出するのでこれをアルコールで綺麗に拭き取る。

2. 膨潤

現像処理によって乳剤層の厚みは元々より薄くなる。これをグリセリン溶液を用いることで読み取りに適した厚みにまで膨らませる。

3. 読み取り

HTS によって乳剤層を 16 層の断層画像で撮影する。直線上に並ぶ銀粒子を飛跡として認識し、16 層の内のヒットレイヤー数 (パルスハイト=ph) が閾値を超えたものを出力する。

3.1 膨潤厚みの検討

膨潤処理で膨らませる乳剤厚みによって読み取る断層画像の間隔が変わり、顕微鏡の被写界深度との兼ね合いで出力される飛跡の S/N 比が変化する。そこでまず、フライトフィルムに近い環境で保管していたフィルムを使って膨潤で膨らませる乳剤層の厚みを変える試験を行った。その結果が図 2 である。膨潤後厚みに対するノイズトラック数とシグナル ph の相関を見ると、ノイズトラックは厚みが薄くなると急激に増加する傾向があることがわかる。一方でシグナル ph は僅かではあるが厚みが厚くなるほど低下していく傾向があることがわかる。この試験結果を踏まえてシグナル ph の低下を抑えるためになるべく薄く、かつノイズトラックが急激に増加しない 59 μm ~65 μm を膨潤の目標厚みとした。

実際のフライトフィルムでまず 25 枚を膨潤した結果が図 3 で、連続的に膨潤処理を行っても乳剤層を目標厚み範囲内に仕上げる事ができていることが確認された。

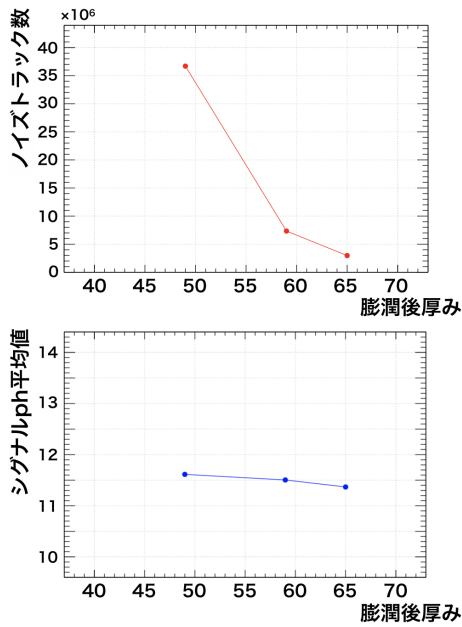


図 2: 膨潤後の乳剤厚みに対するノイズトラック数 (上)、シグナル ph 平均値 (下)

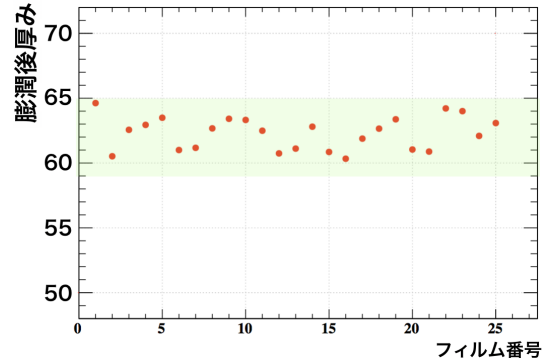


図 3: 連続膨潤処理したフライトフィルムの乳剤厚み。目標厚み範囲内に上げることができている。

3.2 フィルム全面読み取り、性能評価

膨潤が完了したフィルムから順次読み取りを進めていく。1枚のフィルムは 25 cm×37.8 cm となっており、HTS の可動領域の関係上 9つの area(9 cm×13 cm) に分割して読み取る。読み取ったフィルムの性能評価の項目は大きく分けて①フィルム毎の飛跡検出効率、②フィルム間の飛跡接続精度の 2つがある。

3.2.1 飛跡検出効率

飛跡検出効率はコンバーター 100 枚の中から連続した 3 枚のフィルムを使い、上下 2 枚をトリガーフィルム、間 1 枚を評価フィルムとして求める。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} とした時、 $N_{\text{detect}}/N_{\text{trigger}}$ で定義している。

図 4 はある 1 枚のフィルムの 1area で評価した飛跡検出効率の角度依存性である。目標飛跡検出効率は 95%以上としており、非常に広い角度範囲で高い検出効率が出ていることがわかる。このように 1 枚ずつの飛跡検出効率を連続的に評価した結果が図 5 である。 $\tan\theta \leq 1.0$ での平均飛跡検出効率は今回評価した 60 枚ほぼ全てのフィルムで 95%以上を達成することができている。

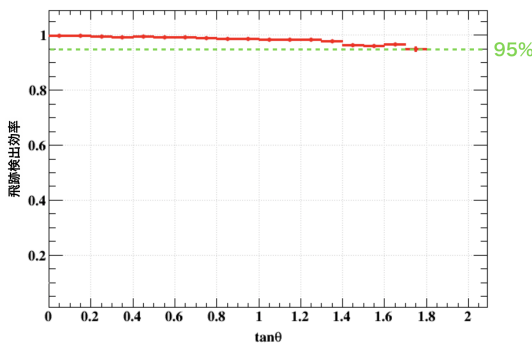


図 4: ある 1 枚のフィルムの 1area で評価した飛跡検出効率の角度依存性。

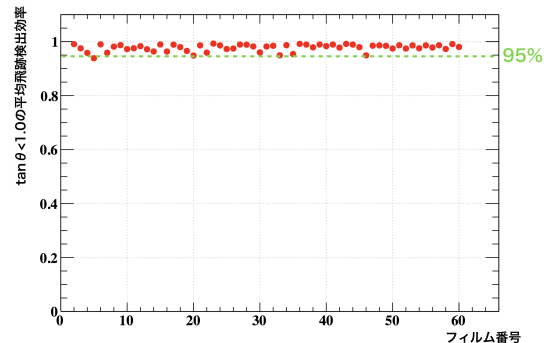


図 5: フィルム毎の飛跡検出効率。ほぼ全てのフィルムで目標飛跡検出効率を上回っている。

3.2.2 飛跡接続精度

飛跡接続精度は6枚のフィルムを貫通した飛跡集団を使って、3枚目と4枚目の飛跡の角度差($\theta_1 - \theta_2$)のばらつき(1σ)で定義している。この時、1,2枚目と5,6枚目の角度差が小さいことを要求することで多重電磁散乱の影響が大きい低運動量飛跡は除去している。隣接するフィルム毎に評価した結果が図6である。角度毎に異なるが隣接するフィルムで飛跡を数mrad~10mrad程度と非常に高い精度で接続できていることがわかる。またこの評価では飛跡2本の角度差を用いているので、1本の精度はこれの $1/\sqrt{2}$ となり今回の実験で目指す角度精度(100 MeV: $1^\circ = 17\text{mrad}$)よりも十分小さいこともわかる。さらに、この高い精度がどのフィルムでも均質に出ており、安定したデータ取得ができていたことが確認された。

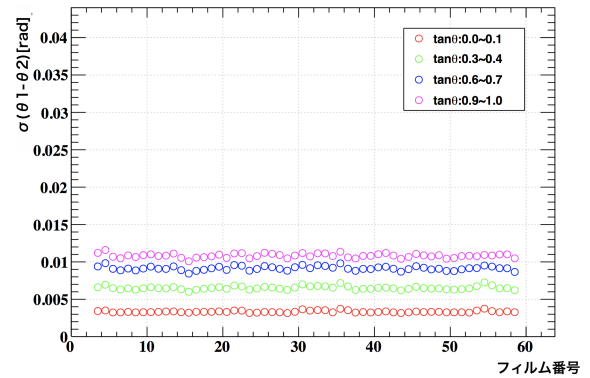


図 6: 隣接フィルム毎の飛跡接続精度。

3.3 解析進行状況

コンバーターフィルムは表面銀取りと膨潤処理は全て完了しており、読み取りを継続している。2018年10月末の段階では全体の3分の2程度が完了、12月中に全て完了する予定となっている。

4 まとめ

我々は気球搭載型エマルジョンガンマ線望遠鏡による宇宙ガンマ線精密観測実験 GARINE を推進している。GRAINE では2018年4月に天体検出による望遠鏡総合性能実証を目的とした気球実験を実施した。本実験に向けてエマルジョンフィルムの性能改善、大量製造を2017年から続けてきた。本番フライトでは目標天体の観測可能時間を確保でき、迅速な回収も実現することができた。また、前回実験で発生したりフレッシュ処理時の乾燥不足によるエラーフィルムの対策を施した結果、今回は1枚も発生しなかった。日本に持ち帰ったフィルムのデータ取得、解析を進めており、今回解析した60枚のフィルムではほぼ全てが飛跡検出効率95%以上を達成、飛跡接続精度も数mrad~10mrad程度となっており、高性能かつ安定的なデータ取得ができていたことが確認された。現在もフィルム全面読み取りを継続中で、全体の3分の2程度が終了している。12月中には全フィルムの読み取りが完了する予定である。

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] 中村悠哉 他, 2017 年度大気球シンポジウム報告.
- [5] M.Yoshimoto, et al., PTEP. (2017): 103H01