

GRAINE 計画：多段シフターのフライトデータ解析報告 1

神戸大, 愛教大, ISAS/JAXA, 岡山理科大, 名大

○松田菖汰, 青木茂樹, 高橋寛, 烏野絢花, 中村崇文, 中村元哉, 他 GRAINE collaboration

1. はじめに

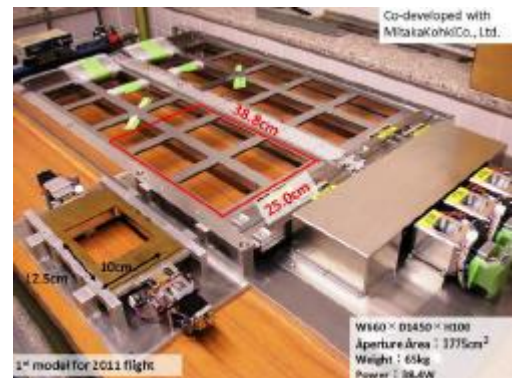
宇宙ガンマ線の観測は宇宙空間の高エネルギー現象の理解に重要である。Fermi 衛星の LAT 検出器は 8 年で 5000 を超えるガンマ線天体を発見し、数十 MeV~数百 GeV の宇宙ガンマ線観測を大きく発展させた。しかしその一方で角度分解能の不足により未同定天体が約 30%存在することや、偏光に対して感度を持たないことから、次世代のガンマ線望遠鏡による宇宙ガンマ線観測が求められている。

2. GRAINE 計画

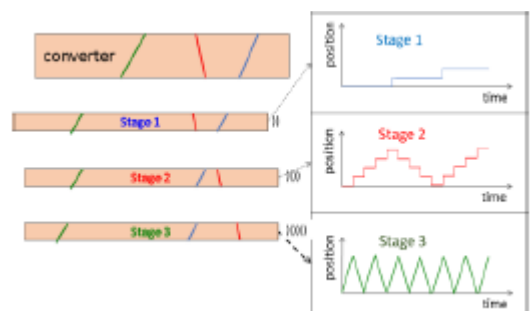
GRAINE 計画とは気球搭載型エマルジョン望遠鏡による宇宙ガンマ線精密観測計画のことである。エマルジョン望遠鏡は、荷電粒子の通過した跡を $1\mu\text{m}$ 以下の精度で記録するエマルジョンフィルムから構成されている。エマルジョン望遠鏡に入射したガンマ線の対生成によって生じた電子対の飛跡から入射ガンマ線の到来方向を決定することができる。エマルジョンフィルムは高分解能かつ低物質質量であることから、対生成反応を精密に測定することができるため、GRAINE 計画ではガンマ線に対して高角度分解能観測や偏光観測が可能となっている。

3. 多段シフター

エマルジョンフィルムは積分型検出器であり、時間情報を持たない。しかし気球に搭載したエマルジョン望遠鏡の姿勢は時々刻々と変化するため、宇宙ガンマ線の到来時刻を決定し、望遠鏡の時刻ごとの姿勢情報と紐付ける必要がある。このため、エマルジョン望遠鏡のタイムスタンプ機構として多段シフターを開発した (Fig.1)。エマルジョンフィルムを搭載した各段を独立した周期で駆動させ、時刻に固有のステージ位置関係を作り出すことで、各ステージに記録された飛跡を再構成する際の位置ずれ量から荷電粒子貫通時のステージ位置関係を再構成し、貫通した飛跡に時刻情報を付与することができる。(Fig.2)



[Fig 1] 奥側：多段シフター3780cm²モデル
手前側：多段シフター125cm²モデル



[Fig. 2] 多段シフター概念図

4. GRAINE2018 年豪州気球実験

GRAINE 計画は地上実験、望遠鏡原理実証を目的とした 2011 年気球実験を経て望遠鏡性能実証を目的とした 2015 年気球実験を行った。そこでは有効面積やフライト時間の拡大、海外実験スキームの確立や検出器外ガンマ線源のイメージングなど、GRAINE 計画は大きな進歩を遂げた。そして 2018 年気球実験では Vela-Pulsar 結像による望遠鏡の総合性能実証を目的とした豪州気球実験を行った。

5. 多段シフターフライトフィルム解析

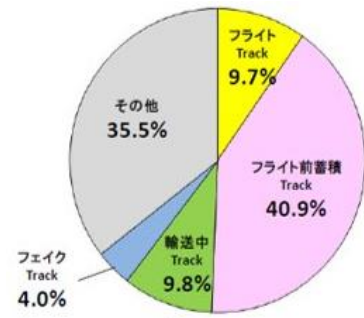
5.1. 初期結果

2018年4月26日気球実験が実施され、高度35~38km、レベルフライト14.7時間を達成し、フィルムの回収においても速やかな回収を行うことができた。またその後のフィルム現像処理、膨潤処理、表面銀取り、飛跡データのスキャンなど問題なく、均質かつ高クオリティで行なった。フィルムの飛跡検出効率は96%と高レベルであることや、検出トラック内訳の分析を行い(Fig.3)、非フライト時蓄積トラックの除去を行うことでフィルムのトラック密度を1/1.8にすることができた。フィルム間の飛跡再構成時チャンスコインシデンス数はトラック密度の二乗に比例するため、フライトトラックのチャンスコインシデンス数を1/3.3に抑え、SNを向上した飛跡繋ぎを実現した。

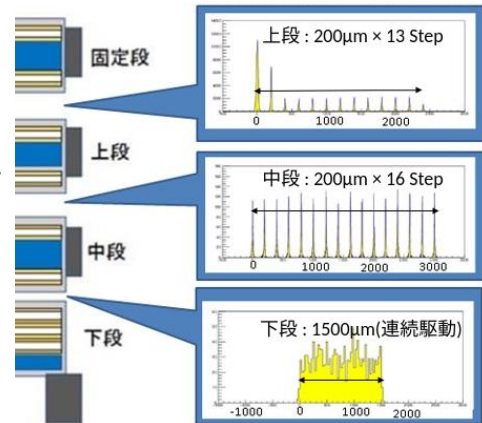
また飛跡読み取り面積により1枚のフィルムを12分割して飛跡データをスキャンするが、その1エリアにおいて各段間の飛跡を再構成した際、運用オペレーションに対応した繋ぎ位置ずれ分布が得られ、問題なくステージが駆動していることを実証した(Fig.4)。また1エリアにおいて高いタイムスタンプ信頼性でつなぐことのできる初期のタイムスタンプ処理を確立することができた。高度の上昇に伴った飛跡数の増大やシャワー極大で最大をとっていること、そして水平浮遊時のカウンtrateの安定や、高多重度イベントによるスパイク構造が確認できる(Fig.5)。

5.2. 処理の改良

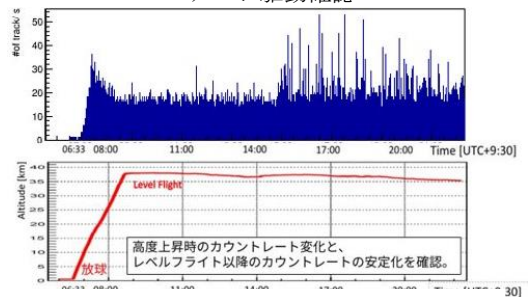
1エリアにおいてタイムスタンプ処理を確立した後、4つの連続するエリアを合体して1つのエリアとして処理することにより、解析単位あたりの統計数の増加(角度・時間ごとに3倍)、解析単位数の低減(12→3)、エリアまたぎトラックの扱いが容易となることや、エリア間境界連結処理の低減(17→2)など様々な改良を行うことができた(Fig.6)。さらに初期タイムスタンプ処理手順の見直しを行い、クオリティを落とさず不要な処理を極力省略することによって初期タイムスタンプ処理時間と比較し1/3.4まで短縮することができた。これに加えて飛跡接続windowの改善を行った。結像目標がガンマ線のエネルギー



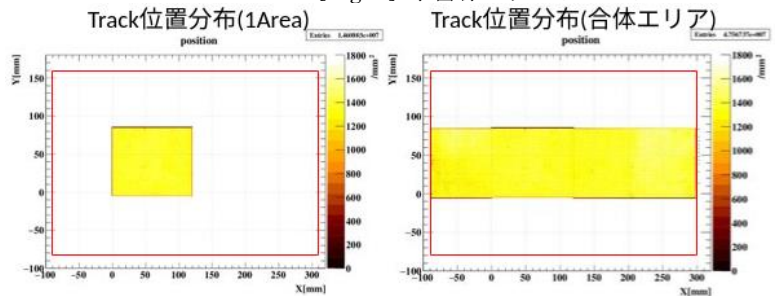
1.2×10⁶ tracks/area
[Fig. 3] 検出トラック数内訳



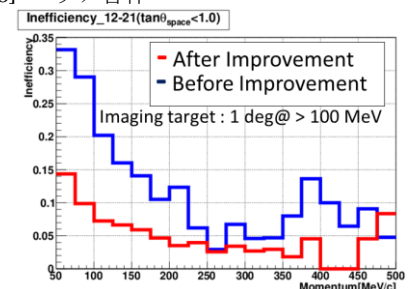
[Fig. 4] 飛跡最構成時位置ずれ分布によるステージ駆動確認



[Fig. 5] 宇宙線カウンtrate



[Fig. 6] エリア合体

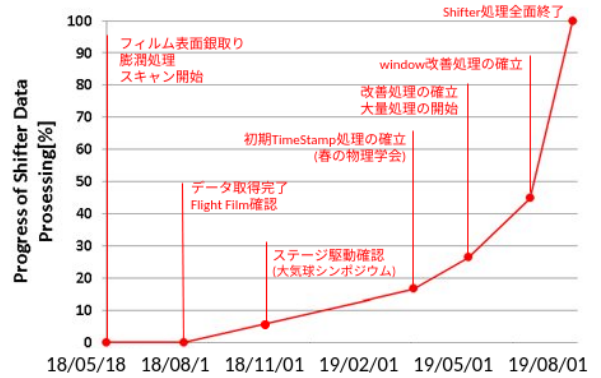


[Fig. 7] 固定段-上段繋ぎ Inefficiency

ーにして 100MeV 以上であるため、重要となる低運動量(電子・陽電子の運動量として 50MeV/c 付近)において信頼性は 98%と高レベルで保ったまま接続 Efficiency を大幅に改善した(Fig.7)。

5.3. 多段シフターフィルム解析大量処理

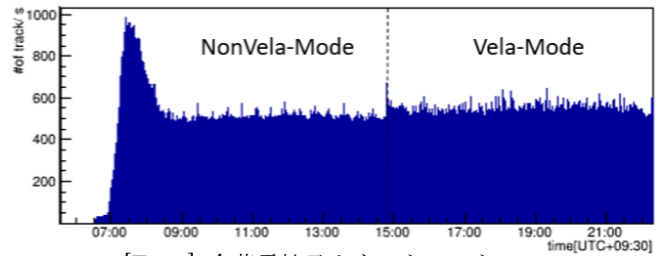
フィルムの現像後から駆動確認や、飛跡接続精度、Signal/Noise 比など詳細理解に努め初期タイムスタンプ処理確立した時点から多段シフターフィルムの大量解析フェーズへ移行した。さらに改良処理を確立したことで大量解析処理スピードを加速させ、多段シフター搭載フィルム全面に蓄積したトラックに精度 1 秒以下のタイムスタンプ処理を完了することができた(Fig.8, 9)。



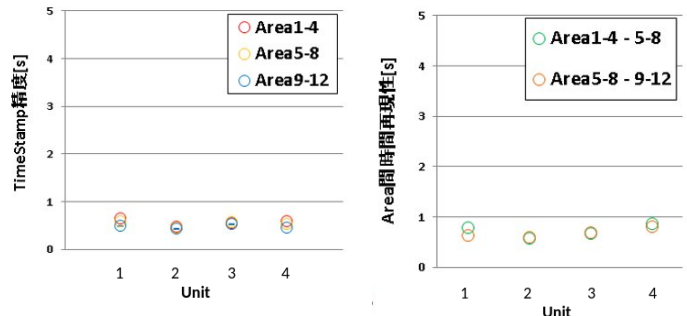
[Fig.8] 多段シフターフィルム解析進捗

5.4. タイムスタンプ精度評価

飛跡を上流側へ外挿し、一点収束する約 500 の高多重度イベントを探索し、イベント時間平均と各飛跡の時間差を求めその広がり(1σ)を評価することで、全ユニット・エリアにおいて 1 秒以下のタイムスタンプ精度が実現できていることを確認した(Fig.9 左)。またコンバータの情報を用いたガンマ線時刻付与事象のうちエリア間のオーバーラップ領域を用いて、独立に処理している合体エリアごとの時間差を評価する。その結果エリア間時間再現性についても全ユニット・エリアにおいて 1 秒以下であることを確認した(Fig.9 右)。



[Fig.9] 全荷電粒子カウントレート

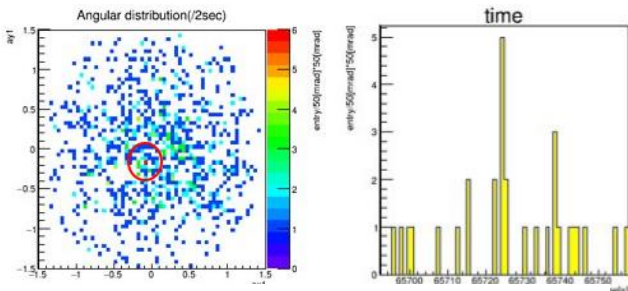


[Fig.9] 左：タイムスタンプ精度

右：エリア間時間再現性

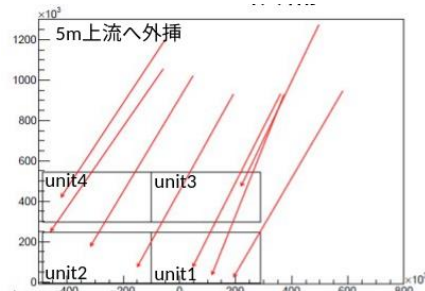
6. 検出器外イベントの探索

飛跡の位置・角度情報だけでなく多段シフターによって付与した時間情報を使用することでコンバータよりもさらに上で発生したイベントの探索も可能となる。(Fig.10)検出器全体に降り注ぐイベントを発見すればエマルジョン望遠鏡全体にわたる較正線源としてや宇宙ガンマ線のバックグラウンド事象の除去としての活用が期待でき、現在そのようなイベントが得られつつある。(Fig.11)



[Fig.10] 左：角度分布

右：時間分布



[Fig.11] イベント候補

7. まとめ

次世代型宇宙ガンマ線望遠鏡であるエマルジョン望遠鏡の総合性能実証を目的とした 2018 年気球実験を行った。フライトは無事成功し、その後の現像、膨潤、スキャンについても全フィルム同等かつ高クオリティで行った。またその後飛跡データを用いたフィルムのクオリティチェックや、多段シフターの駆動評価を行い問題のないことを確認した。さらに 1 エリアにおいて初期タイムスタンプ処理を確立したのちにエリア合体、処理手順の見直しや接続 window の拡張などの改善処理を確立したのちに処理を加速させることで全多段シフターフィルムに対して時間情報の付与を行うことができた。さらに高多重度イベントを用いた時間情報付与精度評価では 1 秒以下の精度達成を確認しており、エリア間のオーバーラップ領域の時刻付与ガンマ線イベントを用いたエリア間時間再現性評価でも 1 秒以下の精度の達成を確認した。さらに検出器外発生イベントが得られつつあり、エマルジョン望遠鏡の較正線源等として活用していく。

8. 参考文献

GRAINE collaboration(エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ)2004-2018年度大気球シンポジウム報告

- S.Aoki et al., Adv. Sp. Res. Vol. 37 (COSPAR 2004 Proceedings) pp.2120-2124.
- S.Takahashi et al., Nucl. Instr. And Meth. A 620(2010) 192-195.
- H.Rokujo et al., Nucl. Instr. And Meth. A 701(2013) 127-132.
- S.Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 043H01.
- K.Ozaki et al., JINST 10 P12018(2015).
- S.Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 073F01.
- K.Ozaki et al., Nucl. Instr. And Meth. A833(2016)165.
- 高橋覚、青木茂樹、日本物理学会誌72巻10号(2017)734-742.
- S.Takahashi, S.Aoki et al., Adv. Sp. Res.(2017)10.1016/j.asr.2017.08.029