

GRAINE2018 : 多段シフターフライトデータ解析報告2

神戸大、愛教大、ISAS/JAXA、岡山理科大、名大

○中村 元哉、青木 茂樹、烏野 絢花、高橋 覚、中村 崇文、松田 菖汰、他GRAINE Collaboration

1、はじめに

宇宙ガンマ線観測は、宇宙線物理学、高エネルギー天文学などの観点から非常に重要であるが、その一方でその観測の技術的な困難さから、長らく発展が途上であった。そのような中、2008年に打ち上げられたFermi衛星のLAT検出器の観測によって、ガンマ線天文学は現在飛躍的な発展を遂げている。その一方で、新たな課題も浮かび上がってきており、そうした課題にアプローチしていく上では角度分解能向上や未達成の偏光観測の実現等、観測の質的改善を行う必要がある。

10MeV以上のガンマ線観測のためには、相互作用による対生成反応で生じた電子対の飛跡の精密観測が求められる。数ある飛跡検出器の中でも、低物質質量かつ高い空間分解能の3次元飛跡検出器であるエマルジョンフィルムは、先の電子対反応を精密に観測できるため、優れたガンマ線検出器となり得る。そこで我々はエマルジョンフィルムを検出器とした望遠鏡により、高角度分解能、偏光有感での宇宙ガンマ線直接観測を行うGRAINE計画を推進している。

これまでにGRAINEでは、望遠鏡原理実証、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行なっており、着実に計画を前進させてきた。そして2018年の春には、Vela pulsarからのガンマ線を有意に検出することによる望遠鏡総合性能実証を目的とした気球実験を成功させ、現在精力的に解析が行われている。

2、時刻付与機構 多段シフター

GRIANEの検出器であるエマルジョンフィルムは積分型の検出器であり、感度を有する時間全てに渡り、通過した荷電粒子飛跡を蓄積するため、飛跡到来時刻の情報を持たない。しかし、検出したガンマ線起因の電子対飛跡から、ガンマ線の天球に対する到来方向を決定するためには、飛跡に対して通過時刻を付与することが必要不可欠である。時間情報を持たないという課題を克服しエマルジョン望遠鏡を実現するべく、我々が独自に開発した時刻付与機構が多段シフターである(図1)。多段シフターは、複数段のエマルジョンフィルム搭載ステージを、アナログ時計の各々の針のようにそれぞれ独立の周期で駆動させることにより、各段のフィルムに対し、時刻と対応可能な位置関係を持たせる。通過飛跡を再構成する際に要した各ステージの位置ずれ量から、その飛跡に対し通過時刻を付与することができる。

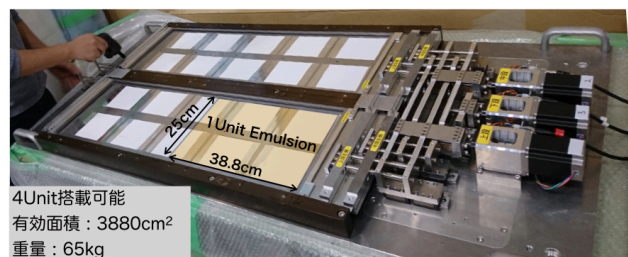
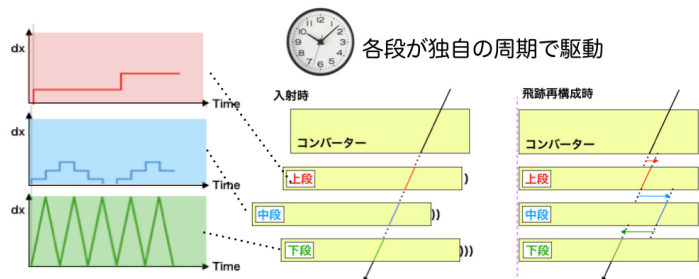


図1: 多段シフターコンセプト (上) および中口径フライトモデル (下)

3、2018年豪州気球実験 ～準備と実験での運用～

2015年に実施した実験において、多段シフターは中口径(0.4m²)望遠鏡用に開発したモデルを実験に投入したが、フライトにおいて主に2つの部分的不具合がみられた。

①部分的なエマルジョンパック搭載不良によって引き起こされたステージ抵抗増大による、ステージ動作不良(不具合のスケールにして1/12相当だが、解析を考慮すると、結果的に有効時間×有効面積にして25%のlossを招いた)

②不適切なステージ動作パラメータを使用したことにより、タイムスタンプの一意性が失われ、ワーストケースでバックグラウンドが2倍となった。

こうした課題を解決するべく、2018年実験に向け多段シフターの準備・改良を進めた。課題①に対しては、直接的原因となったステージ抵抗増大を抑制するべく、駆動ステージの開口面積を拡大(2500cm²→4000cm²)した上でフィルム実装方法を一新させることでステージ動作を担保し、さらにフィルム実装後に目視・マイクロメーターを用いた動作確認を徹底することで対処した。開口後の枠型ステージに、CFRP背板とパックしたエマルジョンをはめ込むというこの新たな実装方法により、より確実なフィルム実装が実現するだけでなく、段間のフィルムgapの抑制やエマルジョン平面性向上等、2015年実験時と比較し大幅な改善が見込まれた。一方課題②に対しては、直接的原因であったステージ位置関係の重複を無くすオペレーション(加速器ニュートリノ実験J-PARC T-60での使用実績に基づく)に変更し、2015年フライトデータをもとに調整した。

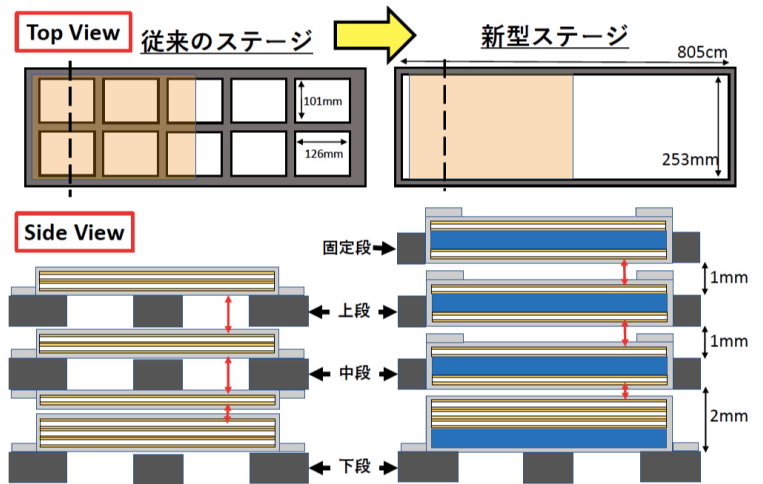


図2:ステージ形状改良とフィルム実装方法見直し

これらの改良を施した多段シフターの、様々な動作試験・環境試験を行い、EMCノイズ試験のクリアや、フィルム実装状態での低温低圧環境試験における長時間安定動作達成等を成し遂げ、万全の準備を整えたのち実験に臨んだ。オーストラリア現地入り後においても、フィルム実装前後や、噛み合わせ試験、リハーサル等において入念な動作試験を実施し(延べ20回以上に及んだ)、シフターの駆動に関して更に万全を期してきた。本番においては、シフターのオペレーション・状況監視の責任者として、PIリハーサル、Vela観測に際してのオペレーションモード切り替えや、気球切り離しの際のターミネーションを遂行し、無事に実験でのシフター運用を成功させた。

4、2018年豪州気球実験 ～フライトデータ解析～

4-1、フライトにおける駆動評価

まず、実験時におけるシフターの動作健全性に関する結果を図3に示す。実験時監視していたテレメトリ情報には、ステージの駆動や駆動再現性に関する情報を含ませており、それを基にフライト中のシフターの駆動再現性を評価した。14時半過ぎに、Vela観測のため駆動速度を上げるオペレーションモードの切り替えを行っている。この結果から、フライト中全時間にわたって駆動再現性1μm以下というステージ安定駆動を確認した。

実験後、回収したエマルジョンの現像やデータスキニングを順次行い、エマルジョンデータの解析を進めた。小面積において飛翔中照射宇宙線飛跡を再構成す

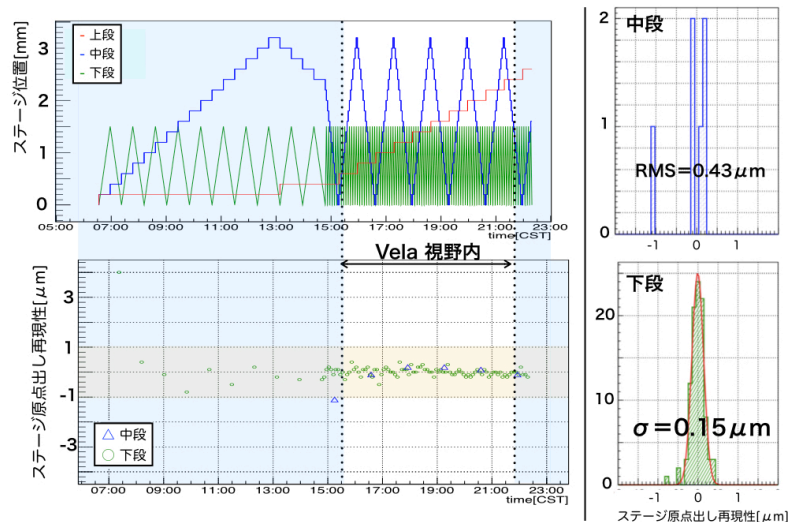


図3:フライト時のステージ駆動と、駆動再現性

る解析を行い、フライト中の全てのステージ位置関係に関して飛跡再構成に成功したことから、エマルジョン飛跡ベースでのフライト中ステージ正常動作を確認したこととなり、2015年実験時の不具合の完全克服

を達成した。またそれに合わせ段間gapの抑制、およびその一様性の大幅改善を達成できたことを確認した(2018年度大気球シンポジウム, IV-5, 『GRAINE2018:多段シフター報告』, 呉坪 参照)。

4-2、多段シフター全面積処理

タイムスタンプ処理の確立後、タイムスタンプ全面積処理に取り掛かった。その過程で、飛跡再構成処理の単位処理面積の拡大や、Velaの主要Signal領域である~100MeVのガンマ線に対するタイムスタンプEfficiencyの改善を行なった。飛跡再構成処理の単位面積を3倍に拡大することによって、必要な解析単位数を1/4に削減し、また処理単位当たりの飛跡統計数が増加したことで処理精度が向上した。加えて、処理の単純化により、処理速度を3.4倍と大幅に向上させた。また、初期のタイムスタンプでは飛跡再構成のEfficiencyに運動量依存性が確認されたため、Velaで主要な50~100MeV/cの飛跡のEfficiencyを重点的にリカバーする接続許容値を、従来の許容値に加える形で設けた。その結果、初期処理に対して先述の運動量における飛跡接続を、Inefficiencyにして半数程度まで改善することに成功した。

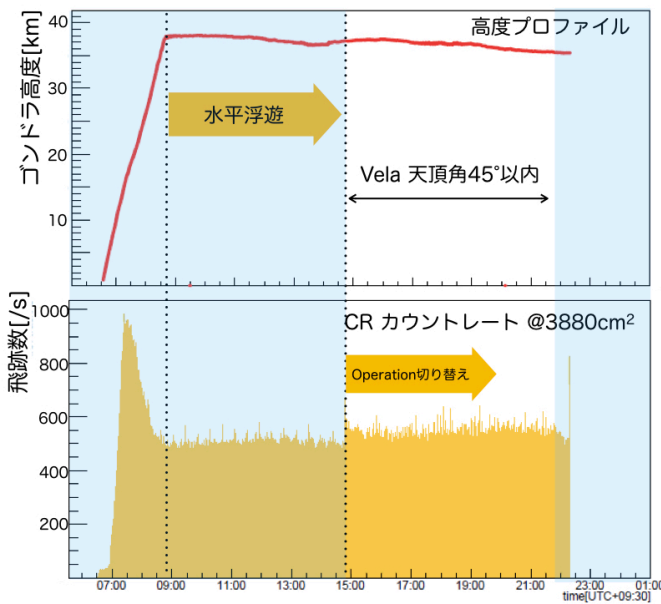


図4: 気球高度変化と宇宙線カウントレート

こうした改良を加えつつ当初より大幅に処理速度を向上させ(2018年大気球シンポジウム時比50倍)、2019年8月までに、~10⁷本の荷電粒子飛跡それぞれに対し飛跡再構成および到来時刻付与(~30000通り)を完了させた。図4はシフター全面積(3880cm²)のエマルジョン蓄積飛跡に対し時刻付与を行うことで得た、宇宙線カウントレートである。気球高度変化に応じた飛跡到来頻度の増減が見られ、水平浮遊以降は安定した飛跡到来頻度を保っていることが確認できている。本実験にて初めて、中口径多段シフターの全面積かつ全時間におけるタイムスタンプを達成することができた。

4-3、時間分解能評価

シフターフィルムの飛跡の位置・角度・時間情報を用いて飛跡を外挿すると、同一時間帯に複数飛跡が検出器上流で一点収束するハドロン反応を検出することができる。これらのハドロン反応を複数検出し、事象内時刻平均と、各飛跡の時刻差の分布の広がりを実験することで、シフターの時間分解能を評価した。2018年実験におけるVelaの結像目標、1deg : >100MeVから、時間分解能は~3秒以下が要請される。ハドロン反応飛跡を用いた各飛跡の同時性は1秒以内に収まっており、結像目標に対して十分良い時間分解能(sub秒)でのタイムスタンプを達成できていることを確認した(図5左)。

また、ガンマ線事象での時間分解能評価も行なった。コンバーターでpick upした電子対飛跡に対し、2本それぞれ独立にシフターでタイムスタンプを行い、2本間の時刻差を評価した。誤差の伝播を考慮し、e-pair飛跡の片方が持つ時間精度を評価したところ、0.65秒を得た。ガンマ線事象においても、先の荷電粒子での評価と同様sub秒程度の時間分解能を達成していることを確認した(図5右)。

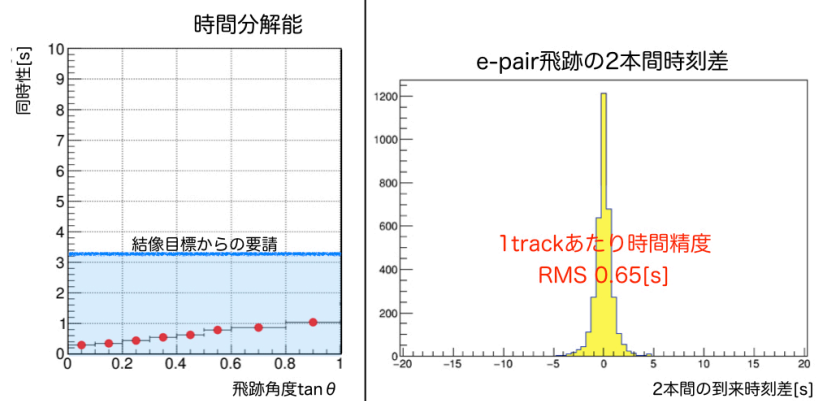


図5: ハドロン反応で評価した時間分解能(左)
e-pairで評価した時間分解能(右)

4-4、バックグラウンドガンマ線識別

現在、エマルションデータと時間情報を用いたバックグラウンドガンマ線の識別を進めている。e-pair飛跡の位置・角度・時間情報を用いると、検出器内でハドロン反応起因や高エネルギー電子の制動起因で放射

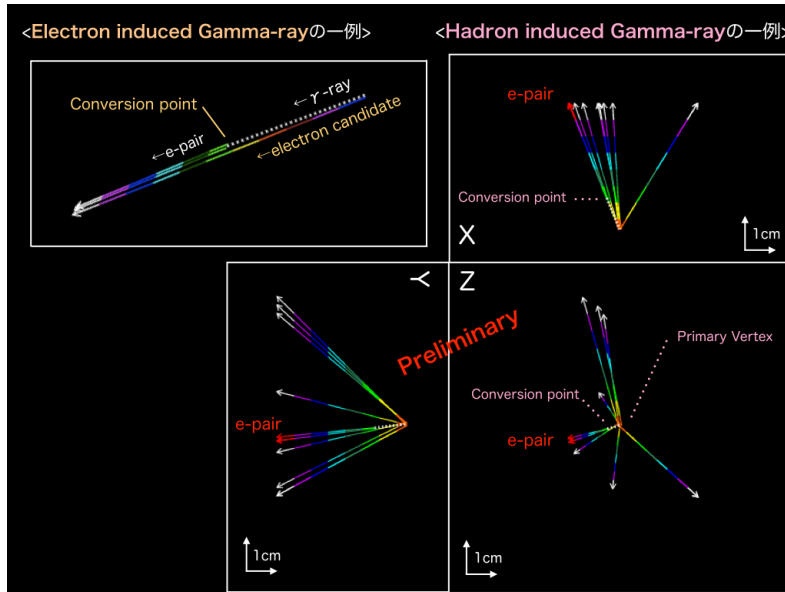


図6:時間情報を用いて識別されるバックグラウンドガンマ線の描像
Electron induced gamma-ray (左)とHadron induced gamma-ray (右)

されたガンマ線を識別することができる。以降それぞれを、Hadron induced gamma-ray、Electron induced gamma-rayと呼ぶことにする。前者は、ハドロン反応と同時刻であり、その反応点方向を向いていること、加えて反応点より下流でConversionしていることを要求して識別できる。一方後者は、電子飛跡と同時刻であり、微小な位置差・角度差をもっていることを要求して識別することができる。これらの検出器内ガンマ線は宇宙ガンマ線に対するバックグラウンドとなる。これらを識別できれば、バックグラウンドとして除去できるだけでなく、望遠鏡のキャリブレーションに活用できる期待がある。初期的解析として、時刻付与したガンマ線事象の一部を対象に、イベント毎に周辺時刻の荷電粒子を用いて、ガンマ線のバックグラウンドガンマ線の識別を行った。その結果、

識別を行った全ガンマ線のうち、32%をバックグラウンドガンマ線として除去できることを明らかにした（現在詳細確認中の事象も含めると~40%程度低減可能の期待がある）。このことから、現在より大幅なバックグラウンド低減を見込んでおり、今後識別処理を精力的に進めていく。

5、さいごに

GRAINEではタイムスタンプとして多段シフターという独自機構を用いており、2018年実験において、2015年実験時にみられた不具合への対処を行なった中口径モデルを実験に導入し、見事フライト中の安定動作を達成した。また、搭載したエマルションフィルムの解析によって、蓄積飛跡をフライト中全時間に渡り再構成できたことから、2015年実験でみられた不具合を完全に克服した。また、これまでにシフター全面積のタイムスタンプ処理を達成しており、2018年実験においてシフターは

- ・結像性能に比べ良い精度での時刻付与（時間分解能：~sub秒）
- ・初の中口径(0.4m²)での時刻付与完了を達成
- ・大幅に処理速度を向上した大面積処理の確立

等の成果を挙げた。現在時間情報を用いたバックグラウンドガンマ線識別を行っており、フライトデータにおいてバックグラウンド32%(~40%の期待あり)低減の見込みが得られつつある。

参考文献

GRAINE collaboration(エマルシ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