

GRAINE 2011 年度気球実験:多段シフターの解析現状

神戸大学: 六條宏紀, 青木茂樹, 尾崎圭太, 釜田啓樹, 鈴木州, 高橋覚, 中川諒, 原俊雄
水谷早希
愛知教育大: 児玉康一
ISAS/JAXA: 斎藤芳隆, 田村啓輔, 吉田哲也
宇都宮大: 佐藤禎宏, 手塚郁夫
岡山理科大: 伊代野淳
名古屋大: 石黒勝己, 北川暢子, 駒谷良輔, 小松雅宏, さこ隆志, 佐藤修, 鈴木和也, 中竜大,
中塚祐司, 中野敏行, 長縄直崇, 中村光廣, 丹羽公雄, 濱田要, 宮西基明, 森島邦博,
吉田純也

1 エマルション望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 GRAINE

2008年に打ち上げられたフェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡衛星(以下、フェルミ衛星)の観測により、数十 MeV~数百 GeV 領域のガンマ線観測は大きく前進した。それと同時に、このエネルギー領域の観測における次なる課題も浮き上がりつつある。その一部に、1. 全体の検出数の約 3 割を占める未同定天体の謎、2. 宇宙線加速候補とされる超新星残骸の空間構造の解明、3. 200MeV 以下の詳細なスペクトラムの測定、などあげられる。

GRAINE¹は、最新の原子核乾板と全自動高速読取装置によって実現されるエマルション望遠鏡を気球に搭載して観測を行い、ガンマ線天体を精密観測する計画である。原子核乾板が有する高い空間分解能を活かした観測により、上記にあげた課題に押し迫れる。加えてエマルション望遠鏡はガンマ線の直線偏光に対する感度を有しており、このエネルギー領域では未開拓である天体からの偏光の検出を目指す。

2 タイムスタンプ部『多段シフター』

エマルション望遠鏡を載せた気球の姿勢および天球の座標は、時々刻々と変化する(平均回転角速度は 1.6 mrad/s[1])。よって、イベント発生時の望遠鏡の姿勢を精度良く知り、天球座標上でのガンマ線到来方向を決定するためには、原子核乾板内に記録された個々のガンマ線イベント(電子陽電子対の飛跡)に秒以下の時刻を与える事が不可欠である。

エマルション望遠鏡のタイムスタンプ部には、多段シフターという新しいテクニックを用いる[2]。複数のエマルションフィルムをそれぞれ異なる周期でスライドさせながら観測を行い、後の解析で飛跡の位置ずれを検出することで、飛跡に時間情報を与える事が可能である。

図 1 は、上記の原理を気球環境下で実現する小型のフライトモデル 1 号機である[3]。3 段のステージに $12.5 \times 10 \text{cm}^2$ のエマルションフィルムをマウントでき、それぞれがステッピングモーターで $1 \mu\text{m}$ の位置再現性で制御出来る。本システムにより検出器全体はデッドタイムフリー、軽量、コンパクトである原子核乾板の特性を十分に活かしたものになり、さらに低消費電力、高電圧不要なことから気球実験にも適している。

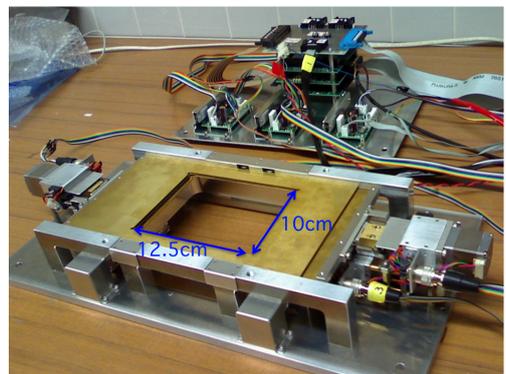


図 1: 多段シフター 1 号機

重量 5kg。消費電力 max20W。制御系は pc104 規格のコントロールポート、CPU ポートを使用。

¹Gamma Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion

3 2011年度気球フライト

3.1 検出器セットアップ

2011年度北海道大樹町にてエマルジョン望遠鏡1号機を気球に搭載し、装置の動作検証を目的としたテクニカルフライトを行った[4]。図2に検出器のセットアップを示す。対生成反応した電子陽電子の飛跡からガンマ線の角度決定をするコンバーター部の下流に、多段シフターを設置した。1段目、2段目のステージにはそれぞれ2枚ずつ、3段目のステージには3枚のエマルジョンフィルムをマウントした。さらに、3段目については、検出効率の改善を図った現在開発中の新型原子核乳剤フィルムもマウントしている。

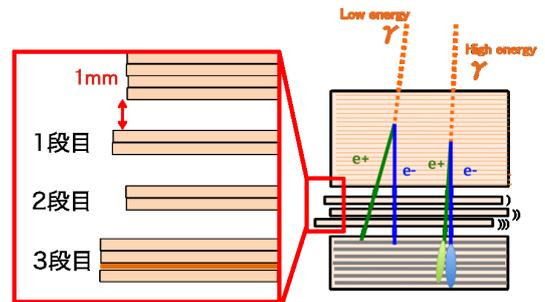


図 2: 多段シフターのセットアップ

エマルジョン望遠鏡は検出器の上流から、コンバーター部、タイムスタンプ部(多段シフター)、カロリメータ部から構成される。

3.2 多段シフターの制御

図3に本フライトでの高度変化と1段目ステージの動きについて示す。ブーメラン高度突入直後、再上昇時、気球切り離し直前にコマンドを送信し、1段目ステージ位置を変化させた。また、高度20kmに到達した時点で多段シフターの各ステージを連続的に動かし、秒以下の時間情報を与えられるように制御した。この連続シフト時の1,2,3段目のステージの動きを図4に示す。

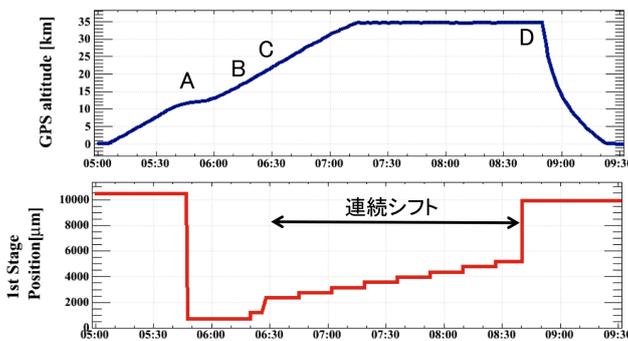


図 3: 高度と1段目ステージの動き

A. ブーメラン高度突入、B. 再上昇時、C. 連続シフト開始、D. 気球切り離し直前。それぞれのタイミングに合わせてステージを制御した。

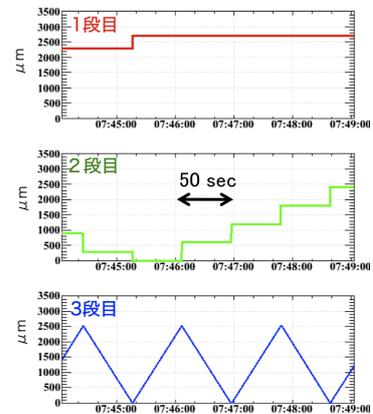


図 4: 連続シフト時の各ステージの動き

1段目ステージは1000秒毎、2段目は50秒毎にステップ式にシフトさせた。また3段目は、速度50 $\mu\text{m}/\text{sec}$ で動かし、片道50秒を往復でシフトさせた。

4 多段シフターのフライトデータ解析

4.1 自動スキャンによるデータ取得と飛跡再構成

回収後の原子核乾板を現像し、高速自動飛跡読取装置を用いて乾板に記録された飛跡情報(入射位置、角度、飛跡の濃さ)のデータを取得した。今回の初期解析では、多段シフターにマウントしたフィルムのうち1,2,3段目の各1枚について解析を行った。異なるフィルム間での飛跡再構成はトラックの角度、位置の一致を取って行い、コンバーター最下流のフィルムから1段目 2段目 3段目のフィルムへと順に飛跡を繋いだ。1本の飛跡につき3回のつながりがなされ、それぞれで検出される飛跡間のずれ量からそのイベント入射時のフィルムの相対位置関係を再構築し、時刻情報を付与した。

4.2 フライト時の宇宙線トラックレート

原子核乾板は、現像処理を行うまでに貫通する全ての荷電粒子の飛跡を記録するため、ガンマ線由来以外の飛跡の情報も得られる。

1 段階目を図 3 のように動かしたことによって、それぞれの高度ごとに入射した飛跡群を選別した。図 5 に高度別に得た飛跡数から算出した宇宙線相対強度 (地上で測定した強度で規格化) を示す。高度 20km 付近に見られる pfozter maximum を再現する結果を得た。

次に連続シフト時の 1 段階目、2 段階目の 2 つの位置ずれ情報の組み合わせから得た 50 秒毎の宇宙線トラックレートを図 6 に示す。高度変化と相関してトラックレートも変化しており、残留大気量によって宇宙線 2 次粒子の生成数が変化しているのが見える。

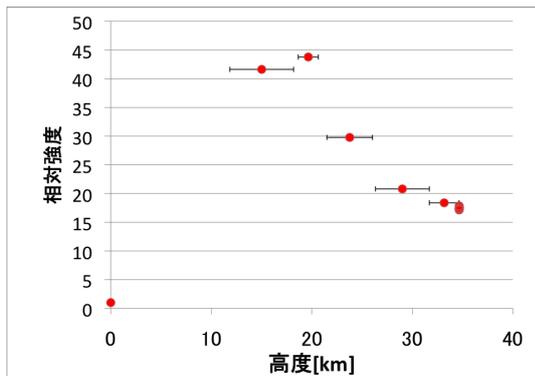


図 5: 高度別宇宙線相対強度

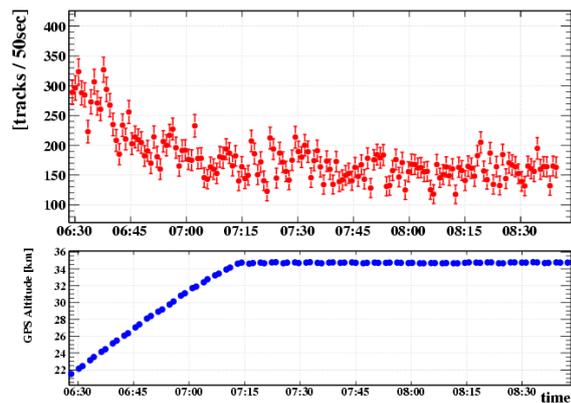


図 6: トラックレート (/50sec) と高度

さらに 3 段階目の位置ずれ情報を加え、レベル高度での 1 秒ごとのトラックレートを示したのが図 7 である。宇宙線がランダムに入射する中に時々、レートが大きくはねあがる bin が見られる。図 8 は、この時刻の bin に入射した飛跡群を選択し、各飛跡が持つ 3 次元ベクトルをコンバーター上流方向へ外挿したものである。伸ばしたベクトルの上端は 2.6 cm のあたりで一点に収束し、この点でハドロン反応が発生したことを示している。多段シフターの解析からこのような多重発生イベントを検出することに成功し、上空で入射した飛跡に対して正しく時刻情報を与えられていることを示せた。

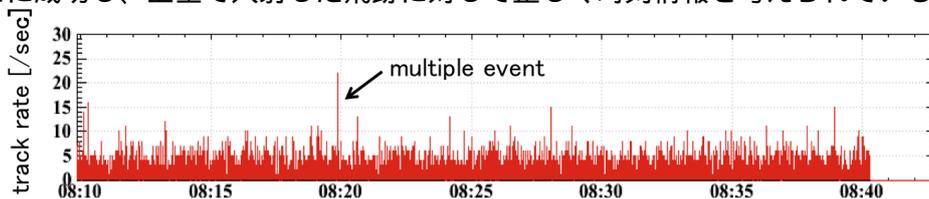


図 7: レベル高度での 8:10~8:40 におけるトラックレート (/sec)

4.3 時間分解能

多段シフターによって与える時間分解能は、シフター 2 段階目と 3 段階目に置けるつなぎの位置精度 σ_{dx} と、3 段階目を動かした速さ v によって決まる。上空で捉えた多重発生イベントのトラック群を使って得られた σ_{dx} は標準偏差で $13.1\mu\text{m}$ であった。本実験に置ける多段シフターの時間分解能は、 $13.1[\mu\text{m}] \div 50[\mu\text{m}/\text{sec}] = 0.3[\text{sec}]$ が期待される。また、この値はガンマ線を mrad オーダーで天球上にマップするために必要な時間分解能を満たしている。

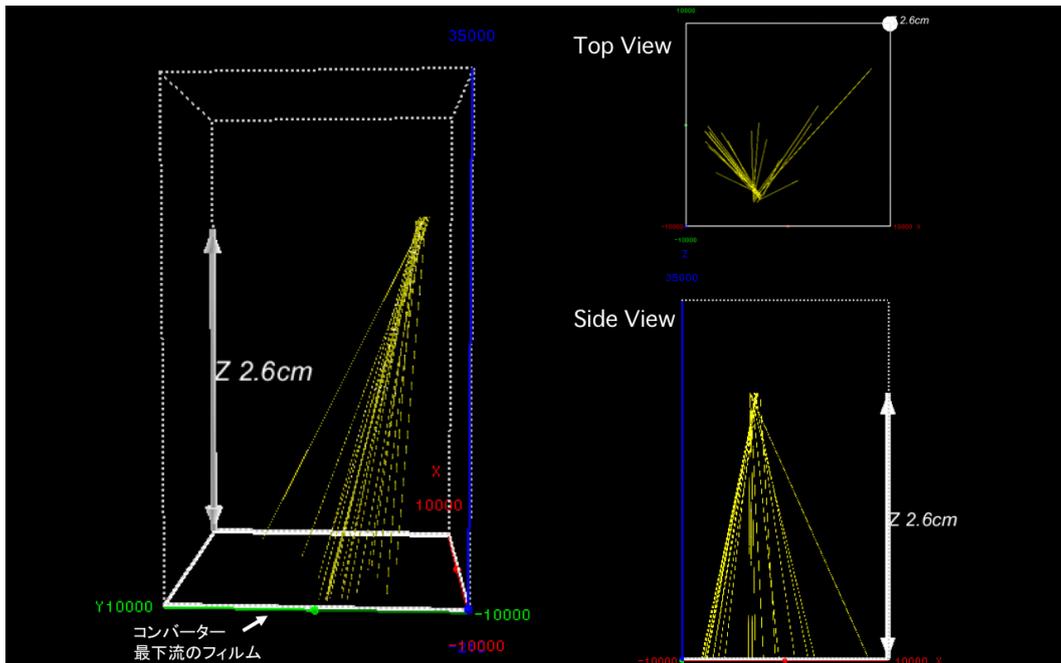


図 8: 多段シフターが捉えた多重発生イベント

4.4 ガンマ線イベントへの時刻付与

コンバータ内部で発生した電子陽電子対を多段シフターへつなぎ、ガンマ線イベントに時刻情報を付与した。図 9 で 2 本の並走する電子と陽電子の飛跡が多段シフターも捉えられている。多段シフターでタイムスタンプした飛跡群の中には、このような同時刻に 2 本が接近して並走するイベントも多数見られており、多段シフターからの解析でガンマ線イベント候補をタグし、下流から追上げる形で反応点を探索出来る可能性も開けた。

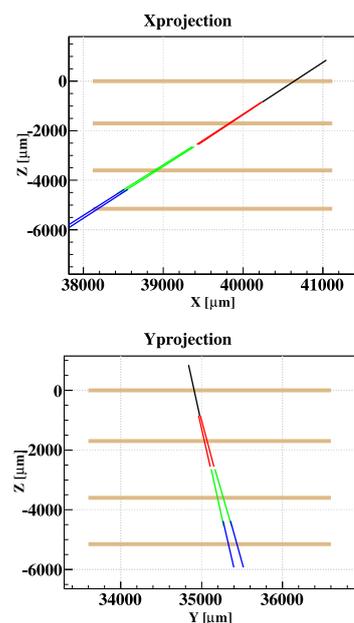


図 9: 多段シフターによる電子陽電子の飛跡

コンバータ最下流フィルム (黒)、多段シフター 1 段目 (赤)、2 段目 (青)、3 段目 (緑) で捉えた飛跡を X(上), Y(下) projection で表示。

5 まとめ

GRAINE2011 年度のフライトにおいて、多段シフター 1 号機は正常に動作し、上空において記録された荷電粒子飛跡に対し、時刻情報を与えることができた。今後、解析対象とする角度範囲を広げ ($\tan \theta \leq 0.6 \sim 1.0$)、大気ガンマ線フラックスの導出を行う。

参考文献

- [1] 尾崎圭太 他, 2011 年度大気球シンポジウム報告
- [2] S. Takahashi et al., 2010, NIM A, 620, 192
- [3] 六條宏紀 他, 2011 年度大気球シンポジウム報告
- [4] 青木茂樹 他, 2011 年度大気球シンポジウム報告