

GRAINE 2015 年豪州気球実験 データ解析報告 2

○尾崎 圭太 (神戸大)、GRAINE collaboration

愛知教育大, ISAS/JAXA, 宇都宮大, 岡山理科大, 神戸大, 名古屋大

1. はじめに

宇宙ガンマ線の観測は宇宙空間における高エネルギー物理現象を調べる上で重要である。数十 MeV から数百 GeV 帯の宇宙ガンマ線観測は、2008 年に打ち上げられた Fermi 衛星によって大きく進展している。Fermi-LAT は 4 年間の観測で 3000 を超えるガンマ線天体を発見した。一方で、超新星残骸における粒子加速現場の詳細観測、パルサーにおける放射機構の解明・放射モデルの選別を今後進めていくには、高い角度分解能を有し偏光感度を持つ次世代のガンマ線望遠鏡による観測が必要である。

我々は、原子核乾板 (エマルジョンフィルム) からなる望遠鏡を気球に搭載し、大気トップで宇宙ガンマ線を観測する GRAINE 計画を推進している[1]。エマルジョンフィルムは低物質質量 ($\sim 10^{-3} X_0$) かつ高分解能 ($\sim 0.1 \mu\text{m}$) が特徴の三次元飛跡検出器であり、 $\gamma \rightarrow e^+e^-$ 反応を精密に測定することで、ガンマ線に対して優れた角度分解能及び偏光に対する感度を持つ。エマルジョン望遠鏡は、エマルジョンフィルムを積層したコンバーター部、タイムスタンプ部、エマルジョンフィルムと金属板の積層構造からなるカロリメーター部で構成される。

ここでは、エマルジョン望遠鏡のタイムスタンプ部である多段シフターの 2015 年豪州気球実験フライトデータ解析について報告する。

2. タイムスタンプ部 「多段シフター」

エマルジョン望遠鏡のタイムスタンプ部には、多段シフター (図 1) と呼ぶ新しい手法を用いる[2]。複数のエマルジョンフィルムをマウントしたステージを、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、入射時刻情報を再構成する。

ガンマ線事象の入射時刻情報と姿勢モニターによる姿勢情報を組み合わせることで、ガンマ線の到来方向を天球に再構成する。GRAINE では姿勢制御系は採用していないことから、気球高度におけるゴンドラの回転速度と時間分解能との積により天球に対する望遠鏡の姿勢決定精度が決まる。

ゴンドラの回転速度は平均的には 2-3 mrad/sec と実測しており[3]、エマルジョン望遠鏡の精度 ($\sim 1 \text{ mrad}@1-2 \text{ GeV}$) から要求される時間分解能は 0.4 秒以下である。



図 1. (左) 多段シフター1号機、口径面積 125 cm^2 , 2011 年気球実験で使用
(右) 多段シフター2号機、口径面積 3780 cm^2 , 2015 年気球実験で使用

3. GRAINE 2015 年豪州気球実験

我々にとって2回目となる気球実験を2015年5月にオーストラリア、アリススプリングスにてJAXA 海外気球実験として実施した。口径面積 3780 cm^2 のエマルジョン望遠鏡を搭載し、11.5 時間のレベルフライトに成功した。本実験では、GeV ガンマ線天体の中で最も明るい Vela パルサーの検出及び角度分解能の実証が目的である。

3.1 検出器の構造

図2に2015年豪州気球実験で用いたエマルジョン望遠鏡の構造を示す。コンバーター部はエマルジョンフィルム100枚からなり、厚みは32mmで全放射長は $0.53 X_0$ である。タイムスタンプ部は計3段のステージがあり、上流側の1段目に3枚、2段目に2枚、3段目に3枚のフィルムを用いた。カロリメーター部はフィルム16枚とステンレス板15枚の積層構造からなり、厚みは19.3mmで全放射長は $0.90 X_0$ である。また、望遠鏡の天球に対する姿勢をモニターするため、デイトイムスターカメラを3台搭載した。

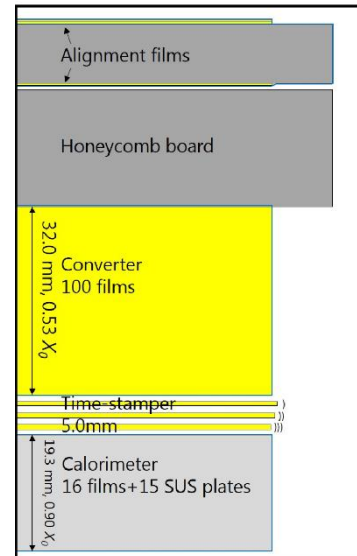


図2. エマルジョン望遠鏡の構造 (side-view)

3.2 多段シフターの制御

図3に本フライトにおける1段目ステージの動きを示す。放球後に1段目ステージ位置を変化させた。また、Vela パルサーが望遠鏡の観測視野内に入る時間帯 (Vela 観測モード) では18.8分ごとにステージを $310 \mu\text{m}$ 駆動させた。2段目、3段目ステージについても連続的に駆動させ、各ステージが独立な位置関係を持つように制御した。

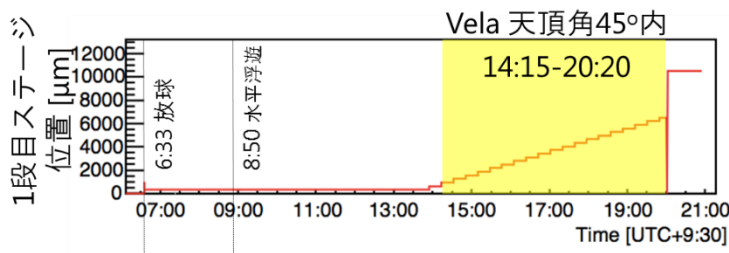


図3. 多段シフター1段目ステージの動き。Vela パルサー観測中において、2段目は9秒ごとに $80 \mu\text{m}$ 駆動させ、3段目は $500 \mu\text{m}/\text{sec}$ の速さで連続駆動させた。

4. 多段シフターのフライトデータ解析

4.1 飛跡データの取得

回収後のエマルジョンフィルムは現像し、名古屋大学の超高速飛跡読み取り装置 HTS[4] を用いてフィルムに記録された飛跡データ (位置、角度、飛跡の濃さ) を取得した。異なるフィルム間での飛跡の再構成は角度、位置の一致を取って行い、コンバーター最下流フィルムから1段目→2段目→3段目のフィルムに飛跡を再構成した。段間で検出される飛跡の位置ずれ量から、入射時における段間フィルムの相対位置関係を再構成し、時刻情報を付与した。

4.2 宇宙線カウントレートの解析

コンバーター最下流の飛跡を1段階目に繋ぐことで得られる飛跡の位置ずれ dx 分布及び本フライトにおける気球高度の時間変化を図3に示す。放球から Vela パルサー観測前の7.2時間の飛跡集団と、Vela 観測中の1スポット18.8分の飛跡集団(計20スポット)に時間分解した。

さらに2段階目、3段階目フィルムへと飛跡を繋いでいくことで、より細かな時間情報を付与することができる。3段階の位置ずれ情報を用い、打ち上げからレベルフライト中における2秒ごとの宇宙線カウントレートを得た結果が図4である。気球高度の上昇に伴いカウントレートの増加が見られ、高度20 km付近で pftzer maximum を再現する結果が得られた。また、20 km以降は残留大気量に応じてカウントレートが徐々に減少していき、レベル高度(36 km)に到達するとカウントレートは安定した。

また、カウントレートにエクセスが見られる bin に入射した飛跡について、位置、角度情報を元に上流方向に外挿すると一点に収束する描像が得られた。カウントレートの解析により、コンバーター内で発生したハドロン反応に伴う粒子の多重発生イベントを検出することに成功した。

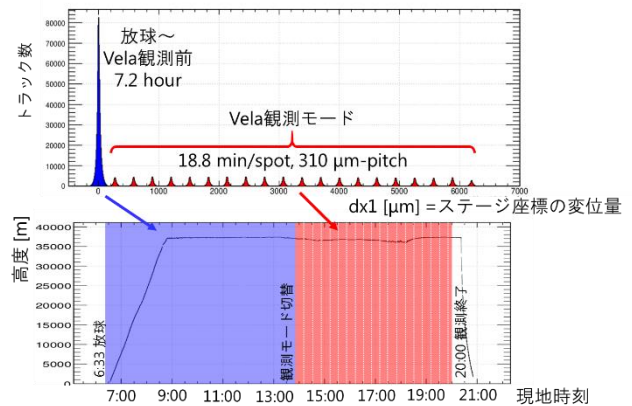


図3. 1段階目ステージの解析により得られる位置ずれ dx 分布及び気球高度の時間変化

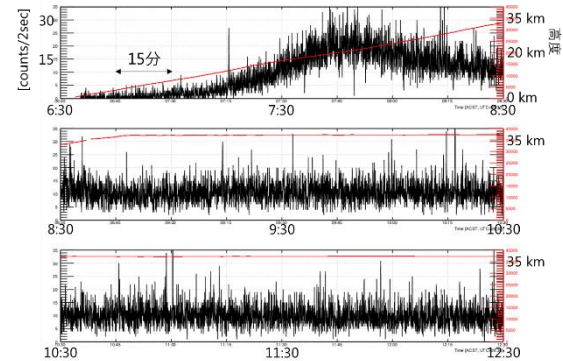


図4. 多段シフター3段階の解析により得られた宇宙線カウントレート

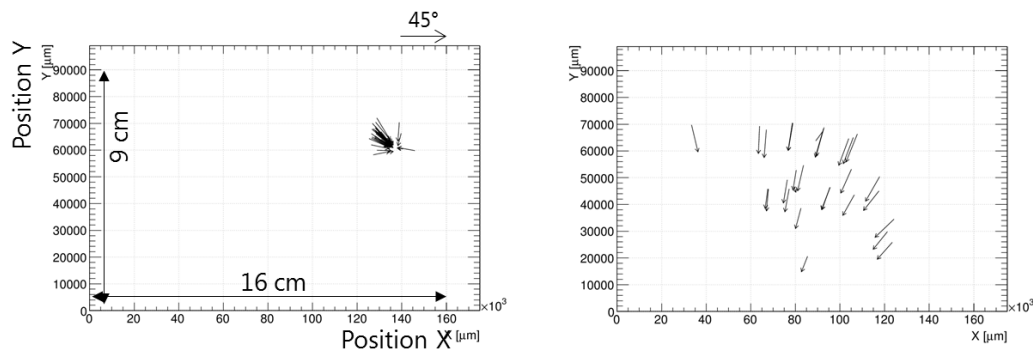


図5. カウントレートによりトリガーした多重発生イベントの例。シフター3段階目フィルムにおける飛跡の貫通位置から上流側にベクトルを外挿して表示している。

4.3 時間分解能の評価

多段シフターの時間分解能 σ_t は、飛跡のつなぎ精度 σ_{dx} と 3 段目のステージ駆動速度 v (500 $\mu\text{m}/\text{sec}$) から、 $\sigma_t = \sigma_{dx}/v$ により与えられる。同時性が保証されると共に複数の位置ずれ dx が得られる多重発生イベントを利用して、時間分解能を評価した。上空で捉えた多重発生イベントの位置ずれ dx 分布の幅、 $\sigma_{dx}=4.9 \mu\text{m}$ が得られた。これにより多段シフターの時間分解能は 0.0098 秒が期待される。これは 2011 年気球実験における多段シフター1号機の時間分解能の実績[5]を一桁更新する結果である。

4.4 ガンマ線イベントへのタイムスタンプ

コンバーター部で検出した $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 事象を多段シフターへつなぎ、ガンマ線イベントに対して系統的に時刻情報を付与した。レベルフライト中においてガンマ線イベントレートが安定していることを確認した。また、時刻情報を用いてガンマ線イベントの天頂角分布をフライト中と地上蓄積に分けてプロットした結果を図 6 に示す。気球高度でのガンマ線イベントは地上イベントと比べると入射角に依存しない天頂角分布を示すことが確認できる。

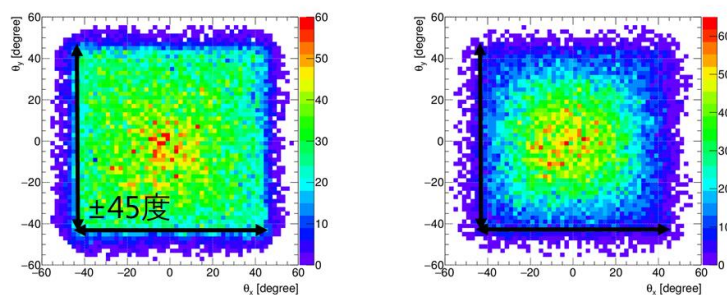


図 6. (左) 気球高度及び (右) 地上蓄積におけるガンマ線イベントの天頂角分布

5. まとめ

GRAINE 2015 年豪州気球実験における多段シフターのフライトデータ解析を進めた。3 段のステージを解析することで秒以下の系統的なタイムスタンプを実施した。また、本フライトでは多段シフターの時間分解能を追及しており、多重発生イベントを用いて時間分解能を評価した結果、0.01 秒を切る分解能を得た。現在 Vela パルサー領域の解析が進行中である。

参考文献

- [1] 青木 茂樹 他、2016 年度大気球シンポジウム、isas16-sbs-024
高橋 寛 他、2016 年度大気球シンポジウム、isas16-sbs-023
- [2] S. Takahashi et al., NIM A 620 (2010) 192
- [3] 尾崎 圭太 他、「GRAINE 2015 年豪州気球実験：姿勢モニターの解析」、2015 年度大気球シンポジウム、isas15-sbs-034
- [4] 吉本 雅浩 他、「GRAINE 2015 年豪州気球実験 超高速飛跡読取装置 HTS によるデータ取得」、2015 年度大気球シンポジウム、isas15-sbs-031
- [5] H. Rokujo et al., NIM A 701 (2013) 127-132