

GRAINE 2015 年豪州気球実験 データ解析報告 1

○六條 宏紀¹ for GRAINE collaboration²

名古屋大^{1,2}、愛知教育大²、ISAS/JAXA²、宇都宮大²、岡山理科大²、神戸大²

1. はじめに

ブラックホール、パルサー、超新星残骸などの高エネルギー天体のガンマ線での観測は、宇宙空間で起こる非熱的現象を理解するための有効な手段である。2008年に打ち上げられたフェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡は、これまでの検出天体数を1桁更新する3000個以上のガンマ線天体の発見や超新星残骸での宇宙線加速を明らかにするなどの目覚ましい成果をもたらし、ガンマ線天文学を新時代へと導いた。ガンマ線天文学を今後さらに前進させるためには、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、低物質量 ($\sim 10^{-3}X_0$)かつ、高分解能(サブミクロン)で荷電粒子の通過位置を測定出来る飛跡検出器である。 $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 反応点直下の飛跡を精密に測定することで、ガンマ線(数10 MeV–100 GeV)に対する角度分解能をFermi-LATよりも1桁近く改善出来る。加えて、電子・陽電子対の放出面のアジマス角を有意に測定する事が可能であり、ガンマ線の直線偏光に対する感度を持つ。エマルジョン望遠鏡は、コンバーター部(積層エマルジョンフィルム)、タイムスタンプ部(エマルジョン多段シフター機構)、カロリメーター部(エマルジョンと金属板の積層)から構成され、カウンター類を必要としないdead time free、dead space freeな検出器である。また原子核乾板は、その優れた分解能を保ったまま大面積化を実現できる唯一の検出器であり、重量も軽い。GRAINE計画(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)は、 $\sim 10\text{m}^2$ の大面積エマルジョン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事で、Fermi-LAT等の衛星年間観測規模に匹敵するexposureを獲得し、ガンマ線天体の精密観測を目指す[1]。

2015年5月、GRAINEの2回目の気球実験(GRAINE 2015)をオーストラリア・アリススプリングスにて実施した[2]。2011年大樹町での気球実験[3]に比べ、口径面積約30倍($125\text{cm}^2 \rightarrow 3780\text{cm}^2$)となる検出器を搭載し、レベルフライト時間約7倍(1.6時間 \rightarrow 11.5時間)となる観測に成功した。本実験の目的は、エマルジョン望遠鏡による初の天体検出(ターゲット: Vela パルサー)であり、検出器のオーバーオールな性能の実証を目指す。現在、回収したエマルジョンフィルムから取得した飛跡データの解析が進行中である。本講演ではコンバーター部の解析を中心に報告する。(タイムスタンプ部の解析の詳細については[4]を参照されたい。)

2. エマルジョンガンマ線望遠鏡 (GRAINE 2015 搭載モデル)

図1にGRAINE 2015実験に搭載したエマルジョン望遠鏡の構造を示す。

コンバーター部は、名古屋大学で製造した高感度原子核乾板(1枚の乾板は $180\mu\text{m}$ 厚ポリスチレンフィルムとその表裏に塗布された $70\mu\text{m}$ 厚の乳剤層から構成される)を100枚積層した構造をしている。厚み方向の放射長は $0.53X_0$ 。貫通するガンマ線の約34%が $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 反応を起こし、飛跡対が乳剤層中に記録される。原子核乾板のサイズは $37.8\text{cm} \times 25\text{cm}$ であり、ゴンドラには同構造のユニットを4つ並べて搭載した。各ユニットの最上流にはフラットなアルミハニカムパネルと一緒に真空パックした原子核乾板(アライメントフィルム)を設置しており、コンバーター部を構成する100枚のフィルムそれぞれの歪みを望遠鏡を貫通する高運動量飛跡を利用して補正する。

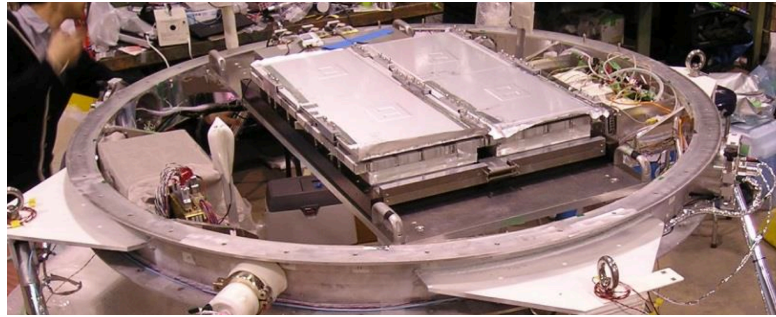
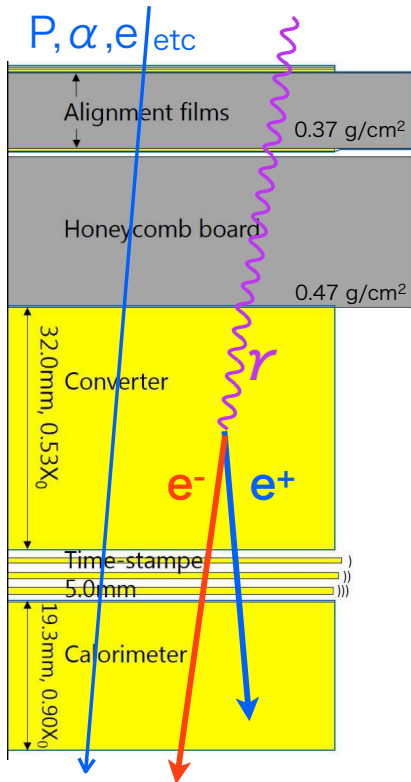


図1: (上) GRAINE2015実験に搭載したエマルジョンガンマ線望遠鏡。タイムスタンプ部の多段シフターステージの上に原子核乾板からなるチェンバーを4ユニット並べて設置している。
(左) エマルジョンガンマ線望遠鏡の断面図。検出器の上流から、アライメントフィルム、コンバーター部、タイムスタンプ部、カロリメーター部で構成されている。

3. コンバーター部フライトデータの解析状況

3.1 原子核乾板自動読取装置による飛跡データ取得

回収、現像後のフィルムは、名古屋大学で開発した超高速飛跡読取装置HTS[5]を用いて、記録された飛跡のデジタルデータ化を行った。HTSによる本格的な連続データ取得は、本実験が初めてであったが、主検出器であるコンバーター部とタイムスタンプ部を構成するフィルム約41平米の読取は順調に進行し、約3ヶ月で完了した(図2)。

3.2 ガンマ線事象の選び出し

取得した飛跡データを解析し、ガンマ線反応($\gamma \rightarrow e^+ + e^-$)の選出を行った。コンバーター部 13 cm × 8 cm × 100枚のデータについて選出処理を行った結果を図3に示す。1枚の原子核乾板には、 $\sim 3 \times 10^6$ 本飛跡が記録されている。(A) 隣接フィルム8枚の体積中を貫通する荷電粒子飛跡を除去した後、(B) 上流から4枚目のフィルムから始まり、8枚目まで貫通する飛跡のみを抽出する。さらに(C) 近傍に独立した飛跡が並走する特徴を要求することで、 $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 反応のコンバージョン点を選び出した。ここまでの処理で飛跡数は約2000分の1にまで濃縮される。さらに(D) 反応点からの電子・陽電子飛跡を下流へと順に追い下げ、最下流フィルムにまで到達したものがタイムスタンプ部へ接続可能となる有効イベントとなる。

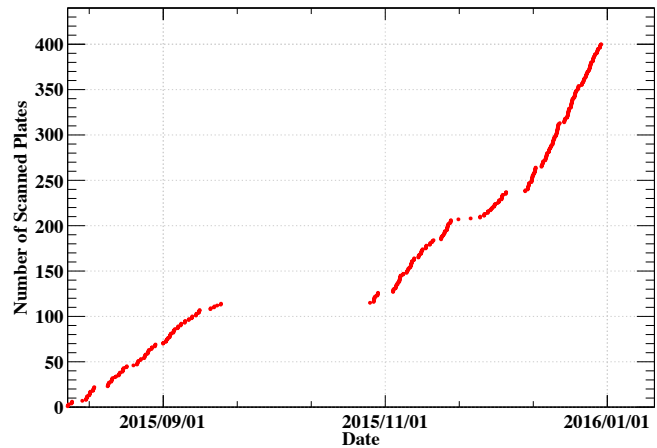


図2: 超高速自動飛跡読取装置HTSを用いたフライトフィルムのデータ取得実績。

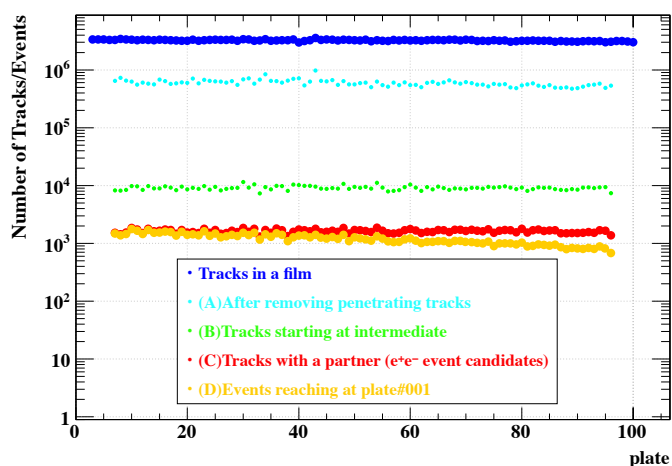


図3: コンバーター部でのガンマ線反応選出結果。13 cm × 8 cm × 100枚(全体の36分の1)、角度範囲はフィルムに法線に対して±45°以内のデータを表示。

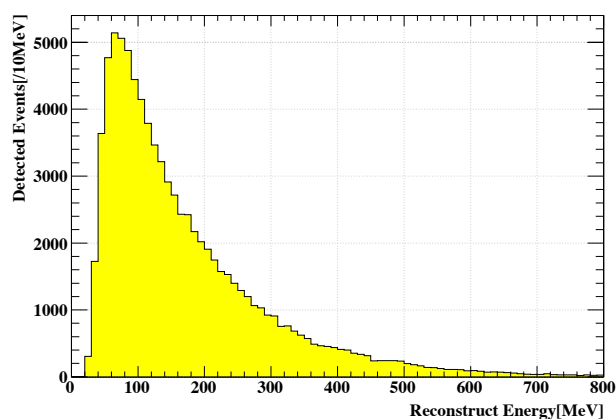


図4: コンバーター部で選出したガンマ線のエネルギー分布。(コンバーター部での多重電磁散乱法を用いた測定)

sub-GeV領域のガンマ線のエネルギーは、コンバーター部で測定することができる。複数のフィルムを貫通していく電子(陽電子)が受ける多重電磁散乱をフィルム間での角度ずれとして検出し、運動量へ変換する。図4に選出したガンマ線に対して測定したエネルギー分布を示す。

コンバーター部におけるガンマ線反応の選出処理、エネルギー再構成処理は、全体の75%が完了している。

3.3 データとシミュレーションの比較

モンテカルロデータ(geant4.10.01を使用)に対して、検出器の応答(フィルムあたりの飛跡自動読取効率、フィルム間飛跡接続精度)を反映させ、前述(3.2節)と同じ条件を満たす事象を選び出し、フライトデータとの比較を行った。 $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 反応における電子、陽電子がなす開き角、測定運動量、エネルギー比、不変質量の分布を図5に示す。シミュレーションの分布はデータをよく再現しており、選び出し、エネルギー測定処理が正常に行えていることを確認した。

モンテカルロシミュレーションから見積もられるコンバーター部での選び出し効率は100MeVのガンマ線に対して65%、

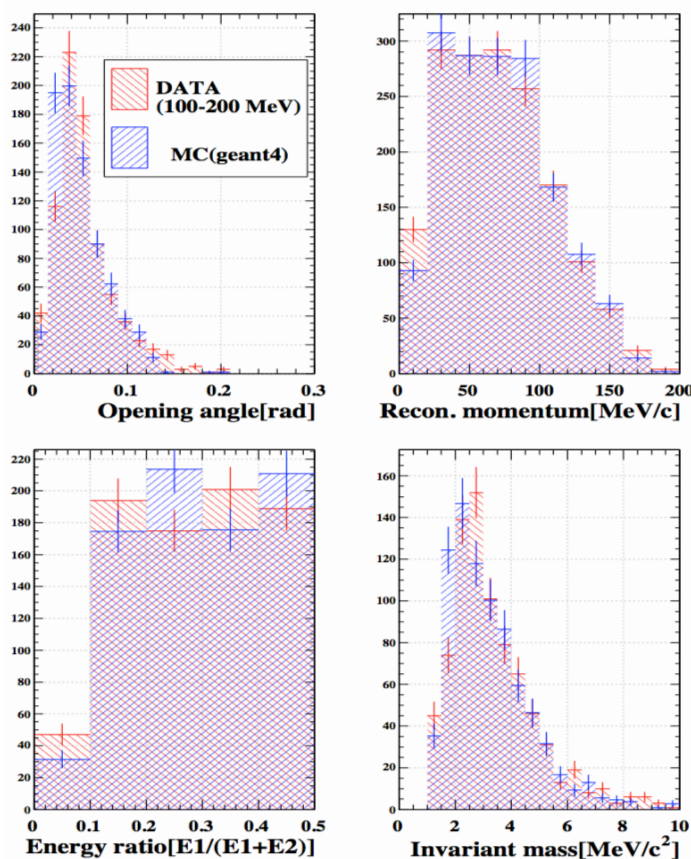


図5: 選び出したガンマ線反応によって得た運動力学的パラメータのシミュレーションとの比較。(左上)電子、陽電子がなす開き角分布。(右上)電子、陽電子の運動量分布。(左下)電子、陽電子のエネルギー比分布。(右下)不変質量分布。

200MeVのガンマ線に対して83%である。今後、エネルギーしきい値の改善や入射角度に対する応答についてより詳細な理解を進めていく。

3.4 気球高度でのバックグラウンド(大気ガンマ線)測定

コンバーター部で選び出したガンマ線反応を下流のタイムスタンプ部へと接続し入射時刻を決定した。現在、Velaパルサー観測時間帯(高度36–37.4 km)における大気ガンマ線フラックスの導出を進めている。図6に100MeV–200MeV領域での測定結果を示す。過去の測定と同程度の大気ガンマ線が得られている。今後、検出器応答の系統誤差の理解を進め、誤差10%以下の高精度な大気ガンマ線フラックスの導出を目指す。

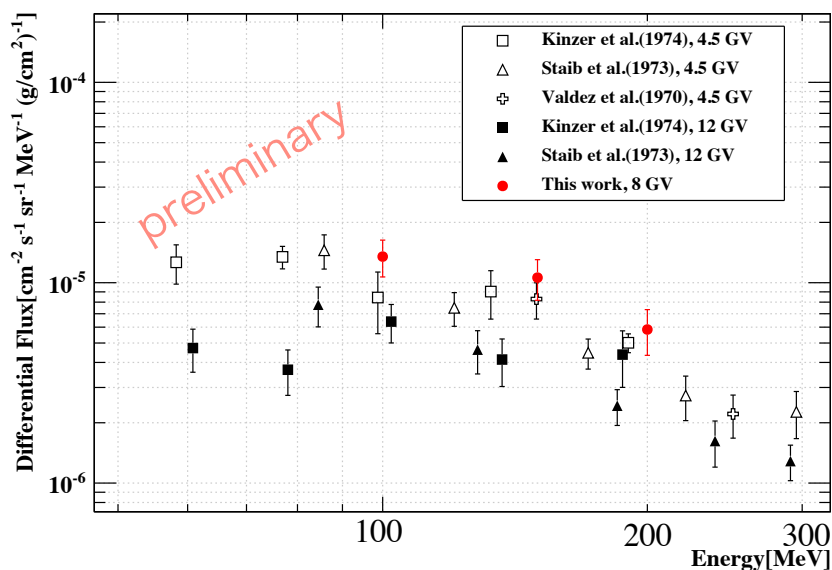


図6: Velaパルサー観測時間帯(高度36–37.4 km)における大気ガンマ線フラックスの測定結果。

4. まとめ

GRAINE 2015年豪州気球実験におけるフライトデータの解析を進めている。コンバーター部として搭載した原子核乾板に記録された飛跡のデジタルデータ化(自動飛跡読取)は完了し、ガンマ線反応の選び出し処理、エネルギー再構成処理の整備・条件だしを行った。現状で全体の75%のデータ処理が完了している。モンテカルロシミュレーションとの比較から検出器の応答の理解を進めており、また観測時のバックグラウンド(大気ガンマ線)の実測値は過去の測定と一致していることを確認した。現在、タイムスタンプおよび天球座標へのイベントマッピングを行い、Velaパルサー領域での解析・議論が進行中である。

参考文献

- [1] 青木茂樹 他, 2004-2011, 2013年度大気球シンポジウム報告., 高橋寛 他, 2007-2009, 2014-2015年度大気球シンポジウム報告. 等
- [2] K.Ozaki, et al., JINST (2015): P12018., S.Takahashi, et al. PTEP. (2016): 073F01.
- [3] H.Rokujo, et al., NIMA 701 (2013) 127-132., S.Takahashi, et al., PTEP. (2015): 043H01.
- [4] 尾崎圭太 他, Balloon Symposium: 2016.
- [5] 吉本雅浩 他, Balloon Symposium: 2015.