

# GRAINE2018 : $\gamma$ 線事象解析

○六條 宏紀<sup>1</sup> for GRAINE collaboration<sup>2</sup>

名古屋大<sup>1,2</sup>、愛知教育大<sup>2</sup>、ISAS/JAXA<sup>2</sup>、宇都宮大<sup>2</sup>、岡山理科大<sup>2</sup>、神戸大<sup>2</sup>

## 1. はじめに

宇宙磁場の影響を受けず空間を直進できる $\gamma$ 線を観測することで、我々は「宇宙で起こる高エネルギーな物理現象」を探ることができる。星間ガス/光子と宇宙線(陽子や電子)が激しく相互作用する現場で、宇宙 $\gamma$ 線は生成される。また、粒子・反粒子対消滅反応からの $\gamma$ 線は、質量に応じた特徴的なスペクトルを示し、宇宙暗黒物質をはじめ未知の素粒子の探査に用いられる。宇宙のはるか遠方で起こる大爆発「 $\gamma$ 線バースト」の観測は、その正体を暴くだけでなく、相対性理論の精密検証にも有効である。近年では重力波直接検出が大きな転機となり、多波長・多粒子での天体観測が新たな宇宙像を切り拓きつつある。宇宙 $\gamma$ 線が我々へと運んでくる知見は、宇宙線・天文学・素粒子物理学・基礎物理学など非常に多岐の分野に跨っている。

最新の(サブGeV~GeV帯) $\gamma$ 線観測器であるフェルミ衛星は打ち上げから10年全天観測を続け、かつてない高統計の $\gamma$ 線データを提供してきた。5000を超える $\gamma$ 線天体の検出、超新星残骸における宇宙線陽子加速の発見等、ブレイクスルーとなる様々な成果を上げた一方で、次なる課題も見え始めた。観測の足枷となっているのが、空間分解能(角度分解能)の不足である。構造が複雑な銀河面/中心の天体密集域や、広がった超新星残骸の理解にはより詳細なデータが必要であり、高解像観測が $\gamma$ 線天文学の次なるステップへの突破すべき課題となっている。

世界で複数のグループが角度分解能改善に着目したプロジェクトを提案する中、我々は、原子核乾板(エマルジョンフィルム)技術によって高角度分解能と大口径を両立する $\gamma$ 線望遠鏡の開発、及び気球による観測実験「GRAINE計画(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)」を先行して推進してきた。低通過物質質量( $\sim 10^{-3}X_0$ )かつサブミクロンの空間分解能を実現する原子核乾板は $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 反応点直下の飛跡を精密に測定することができる $\gamma$ 線の方向測定に最適の検出器であり、フェルミ衛星の角度分解能を約1桁改善した高解像精密観測を実現しうる。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。GRAINE計画は、 $\sim 10\text{m}^2$ 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]。

GRAINE計画はこれまで、ビーム試験や地上や山頂でのテスト観測を経て、3度の気球実験を実施してきた。最初の気球実験GRAINE2011(大樹航空宇宙実験場にて実施)では、小型望遠鏡(口径面積 $0.013\text{m}^2$ )による上空でのフィージビリティチェックを行った[2]。2度目の気球実験GRAINE2015では、大幅な望遠鏡の性能改善(原子核乾板自体の新規開発)・スケールアップ(口径面積30倍)を行う研究開発を経て、豪州アリススプリングス気球放球場にて放球を実施した[3]。 $0.4\text{m}^2$ 中型望遠鏡による上空での望遠鏡のイメージング性能、タイムスタンプ性能の実証等の検出器に関する様々な達成が得られたが[4]、一方でフライト時に部分的な不具合も発生し、高度成功基準に設定していた天体の初検出については、未達成となった。今回、3度目の気球実験となるGRAINE2018では、不具合の対策・改良を施し、再度 $\gamma$ 線天体の中で最も明るいVelaパルサーの検出し、エマルジョン望遠鏡の総合的なフライト性能の実証を行う。

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 $\gamma$ 線の電子対反応検出、角度決定を担う、コンバーター部の解析状況について報告する。

## 2. GRAINE 2018 豪州気球実験

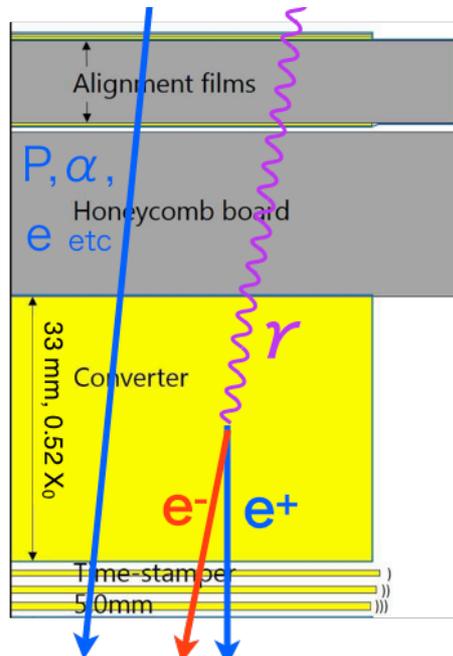
2017年度より搭載機器類の改良や環境試験、エマルジョンフィルムの製作を行い、年明けには全ての装置を放球地であるオーストラリア・アリススプリングスに向けて発送した。GRAINEチーム(8名)は、2018年3月1日にアリススプリングスへ現地入りし、観測器の組み上げ、動作試験、気球グループとの噛み合わせ試験を完了させ、ペイロードは3月30日までにフライトレディとなった。

4月26日、ようやく観測要求・放球条件を共に満たす気象予報がなされ、午前6時33分(現地時刻)に放球が実施された。約2時間後に気球は高度38kmに達し、水平飛行を開始した。エマルジョン望遠鏡、姿勢モニター、与圧容器ゴンドラは観測終了時刻午後10時19分まで安定した動作を続けた。本実験の観測目標天体であるVelaパルサーは午後3時から10時にかけて望遠鏡の視野内を横切り、予定していた気球フライト、観測に成功した。ペイロードは午後11時17分に切り離され、ロングリーチから南西250km地点にて着地した。

筆者はGRAINE2015に引き続きペイロードの回収に参加した。翌明朝、ロングリーチ空港にてヘリコプターに乗り込み、上空からの捜索を行った。数時間後、ヘリコプターはペイロードの目の前に着陸した。幸運なことにゴンドラは4つ足でしっかり自立して着地しており、破損箇所も少ない状態で発見された。回収スタッフの方々の強力なサポートのおかげで、極めて迅速に回収作業は進み、28日未明には全てのエマルジョンフィルムを小型冷蔵庫を搭載したトラックに積みこみ、シドニーへ向けて発送することができた。フィルムは29日午後にシドニー大学に到着し、5月13日までに現像作業が完了した[5]。

## 3. エマルジョンガンマ線望遠鏡 (GRAINE 2018 モデル)

図1にGRAINE 2018実験のペイロードの荷姿及び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原子核乾板(1枚の乾板は180 $\mu$ m厚ポリスチレンフィルムとその表裏に塗布された75 $\mu$ 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0.52 $X_0$ 。貫通するガンマ線の約33%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 cm  $\times$  25 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: (左上) GRAINE2018ペイロード、(左下)与圧容器ゴンドラ内のエマルジョン望遠鏡(口径面積0.4m<sup>2</sup>)、(右)望遠鏡の断面図。上流からアライメントフィルム、コンバーター、タイムスタンプから構成される。

#### 4. フライトデータの解析状況～ $\gamma$ 線事象選出～

回収、現像後のフィルムは、名古屋大学で稼働する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ている。GRAINE2018コンバーターフィルムのデータ取得状況及びブスキャンデータの性能については[5]を参照されたい。

クオリティチェックを経た一部のデータを用いて、 $\gamma$ 線反応選出のパイロット処理を行った。エマルジョンフィルムには、日本からオーストラリアへ出荷する直前から観測終了後に現像処理を終えるまでに乳剤層を通過した全ての荷電粒子飛跡が記録されており、HTSは角度範囲(フィルム面の法線方向を $\tan \theta = 0$ として)  $|\tan \theta_x| < 1.2, |\tan \theta_y| < 1.2$ で認識される全ての飛跡を読み出し、フィルム毎に $O(10^5)$ 本/cm<sup>2</sup>の飛跡データを出力する。 $\gamma$ 線反応の自動選出処理は前実験の解析において既に整備されている。13 cm  $\times$  9 cm  $\times$  8枚のデータ(コンバーター最下流から3枚目~10枚目のフィルム)を取り出し、フィルム間のアライメントを貫通飛跡を使って行った。上流の3枚をVetoとして用い、下流5枚で電子・陽電子飛跡を幾何学的な選出条件を掛け、事象を抽出した。7枚目のフィルムで電子対生成の反応点を検出した1943事象について、3次元描画した結果を図2に示す。5枚の連続するフィルムで読み出された飛跡を上流からそれぞれ黄、赤、マゼンタ、青、水色で表示している。下の図は、黄色の四角で示す範囲を拡大したもので、電子対生成反応の特徴である下流に向かって開く2本の松葉のようなトポロジーが確認できる。

選出した $\gamma$ 線事象について、エネルギー再構成を行なった。1事象につき2本の飛跡それぞれの運動量が、散乱角度の測定値、通過物質質量、多重電磁散乱の関係から導出できる。図3にコンバーターフィルムの下流から7枚目のフィルムで検出した $\gamma$ 線事象のエネルギー分布を示す。

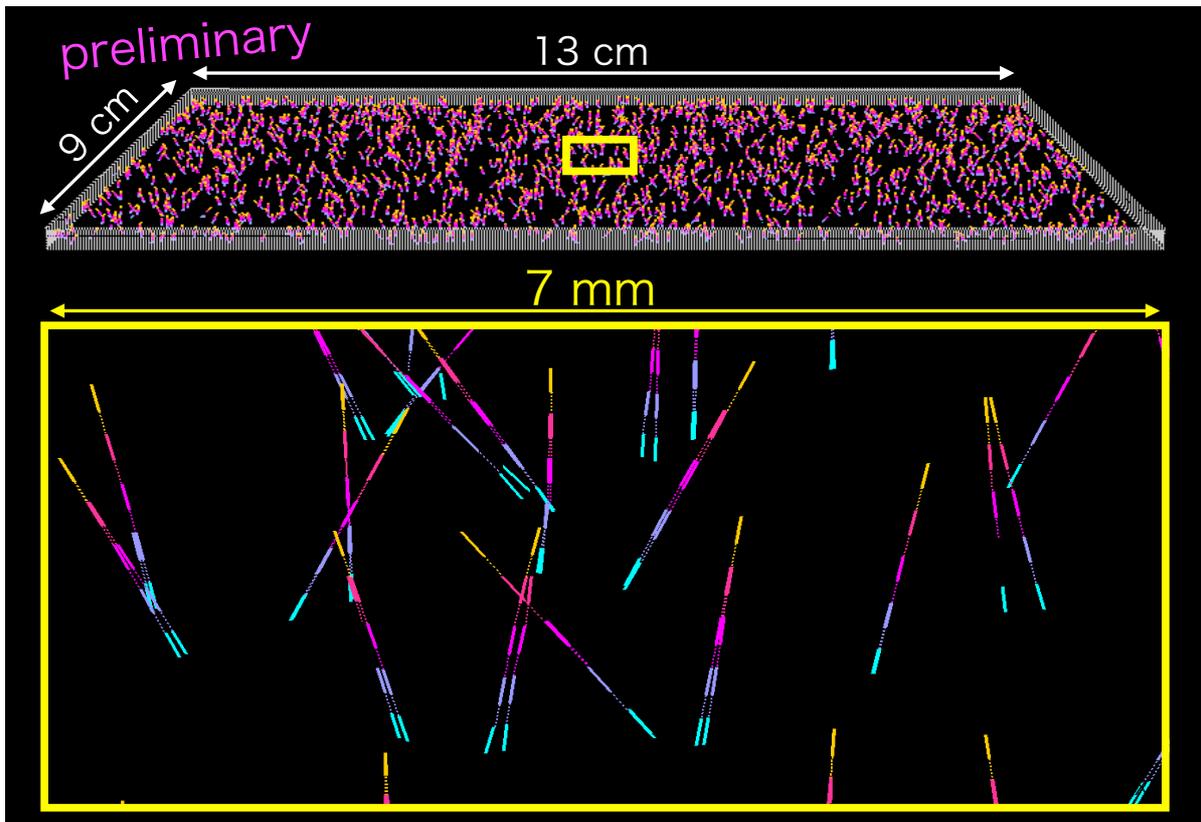


図2: GRAINE2018フライトフィルムの自動飛跡読取データから選び出した $\gamma$ 線事象( $\gamma \rightarrow e^+e^-$ )の3次元描画図。下の図は、黄色の四角で示す範囲を拡大したもので、電子対生成反応の特徴である下流に向かって開く2本の松葉のようなトポロジーが確認できる。

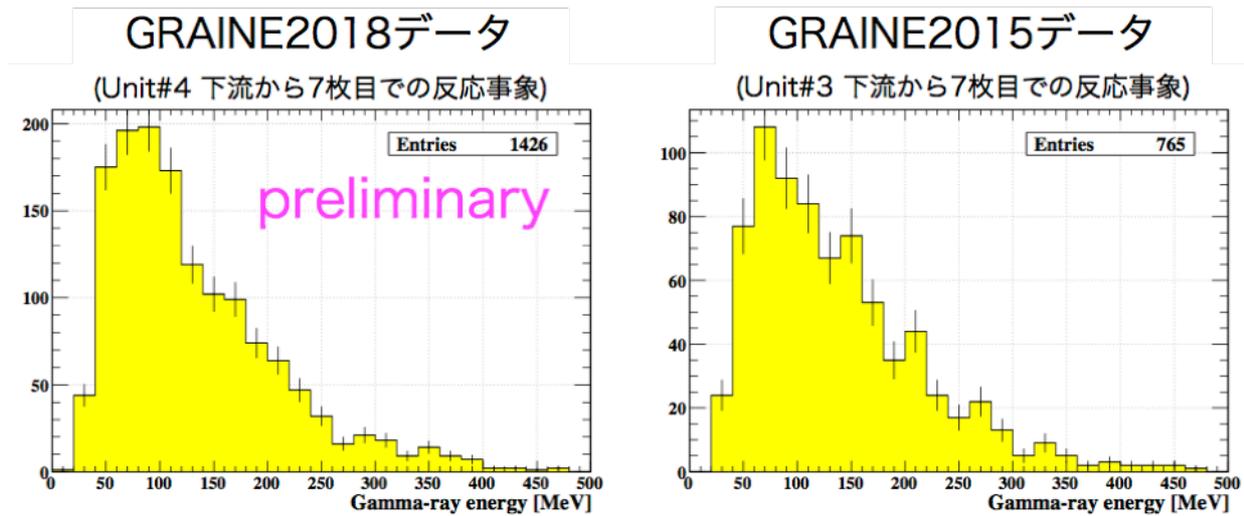


図3: コンバーターで選出した $\gamma$ 線事象のエネルギー測定結果。左はGRAINE2018データ、右はGRAINE2015データを示す。解析したフィルムはいずれも下流から7枚目の13 cm  $\times$  9 cmの領域。

GRAINE2018データ(図左)は、GRAINE2015データ(図右)と同様のエネルギー分布を示している。また両者は等しい処理面積での解析結果であるが、GRAINE2018データからはおよそ2倍の $\gamma$ 線事象が選出されていることがわかった。

GRAINE2018で得られたデータは、前回実験と同様の処理で系統的に $\gamma$ 線事象の選出が行えることが確かめられた。またコンバーターフィルムには、前回に比べおよそ2倍の事象が記録されていることが期待される。この増分については、主に地上待機時に蓄積した成分と予想しており、放球前の地上待機期間が約4倍程度長くなっていることが影響していると考えられる。今後、タイムスタンプ部との接続による事象入射時刻の決定や、選出効率の評価を進めていく。

## 5. まとめ

我々は気球搭載エマルジョン望遠鏡によるガンマ線天体精密観測計画GRAINEを推進している。2018年4月26日、3度目の気球実験となるGRAINE2018をオーストラリアにて実施した。今回の検出目標天体であるVelaパルサーを視野内に捉えるフライト、回収、現像を完遂し、予定していた観測に成功した。現在、回収したエマルジョンフィルムに記録された飛跡データの自動読取を進めている。サブサンプルデータによる電子対選出処理を試行し、GRAINE2018で得られた飛跡データを用いて系統的に $\gamma$ 線反応を選出できることが確認できた。今後、飛跡データの取得、事象選出、タイムスタンプ、望遠鏡姿勢決定を進め、エマルジョン望遠鏡の総合的な天体検出性能の評価を行うと共に、口径面積拡大を進め科学観測の開始を目指し開発を進めていく[8]。

## 参考文献

- [1] エマルジョンガンマ線望遠鏡(GRAINE)コラボレーション,2004-2017年度大気球シンポジウム報告., S.Takahashi, et al., ASR 62,10(2018): 2945-2953
- [2] H.Rokujo, et al., NIMA 701 (2013) 127-132., S.Takahashi, et al., PTEP. (2015): 043H01.
- [3] K.Ozaki, et al., JINST (2015): P12018., S.Takahashi, et al. PTEP. (2016): 073F01.
- [4] H,Rokujo et al., PTEP. (2018): 063H01., F.Mizutani et al., NIM A (submitted)
- [5] GRAINEコラボレーションによる2018年度大気球シンポジウム報告. isas18-sbs-010-015
- [6] M.Yoshimoto et al., PTEP. (2015): 103H01
- [7] 中村悠哉 他, 2018年度大気球シンポジウム報告. isas18-sbs-011
- [8] 青木茂樹 他, 2018年度大気球シンポジウム報告. isas18-sbs-016