

GRAINE 2018: フライトデータ解析報告

神戸大学	○高橋寛, 青木茂樹, 尾崎圭太, 小田美由紀, 烏野絢花, 吳坪健司, 佐藤良紀, 柴山恵美, 鈴木州, 立石友里恵, 中村崇文, 中村元哉, 原俊雄, 松田菖汰, 松本稔樹, 松本明佳, 丸嶋利嗣, 水谷深志, 藪美智, 山田恭平, 山本知己
愛知教育大学	児玉 康一
ISAS/JAXA	池田忠作, 濱田 要
岡山理科大学	伊代野淳, 松川秋音, 山本紗矢
名古屋大学	大塚直登, 岡田晟那, 河原宏晃, 駒谷良輔, 小松雅宏, 小宮山将広, 佐藤修, 杉村昂, 鳥井茉莉, 長縄直崇, 中野敏行, 中野昇, 中村光廣, 中村悠哉, 西尾晃, 丹羽公雄, 宮西基明, 森下美沙希, 森島邦博, 吉本雅浩, 六條宏紀

1. はじめに

宇宙高エネルギーガンマ線は宇宙における極限的な現象に対して直接的な知見をもたらす。ガンマ線が引き起こす電子対生成反応をエマルジョンフィルムで捉えることで、ガンマ線に対して優れた角度分解能およびガンマ線偏光に対する感度が実現できる。我々はエマルジョンフィルムから成るガンマ線望遠鏡を開発し、長時間気球フライト繰り返しによる宇宙ガンマ線精密観測を目指す(GRAINE 計画)。

これまでに地上における様々な研究開発やテスト実験、2011年気球実験(口径面積 125cm²、総フライト時間 4.3 時間)、2015年気球実験(口径面積 3780cm²、総フライト時間 14.4 時間)によって、エマルジョン望遠鏡気球フライトによる宇宙ガンマ線観測の実現可能性を拓いてきた。一方で 2015年気球実験の目標に挙げていた Vela パルスからのガンマ線を有意に検出することに関しては、望遠鏡の部分的な不具合があり、有効面積や有効時間そしてバックグラウンドによって制限され未達成となった。

2018年気球実験では、実験規模(口径面積やフライト時間)は 2015年気球実験と同規模で、望遠鏡の部分的な不具合を大幅に改善(有効面積・有効時間の拡大およびバックグラウンドの低減に関して計 5 倍の改善に相当(ガンマ線源検出感度にして $\sqrt{5}$ 倍))し、Vela パルスからのガンマ線を有意に検出し、望遠鏡の総合的な性能実証(目標結像性能 1 度(>100MeV))を目指す。そのために様々な開発/改良/準備をこれまでにこなし、2018年気球実験を無事に成し遂げた。エマルジョンフィルムの現像までをオーストラリア国内(シドニー大学で自分たちの手で)で無事に完了させ、現像後のエマルジョンフィルムやデータストレージディスクを日本に持ち帰り、フライトデータ解析を進めている。2018年気球実験に向けた開発/改良/準備、気球実験、フライトデータ解析については「GRAINE collaboration、2017–2019 年度大気球シンポジウム集録」も併せて参照されたい。

2. 2018年気球実験フライトデータ解析

エマルジョンフィルム積層ガンマ線コンバーターについて、エマルジョンフィルムの飛跡読み出し(HTS [Yoshimoto et al., PTEP (2018) 103H01])については半年程度で完了させ、ガンマ線事象選出処理が問題なく進んでいる。また選出したガンマ線事象を使い、コンバーター内ハドロン反応事象からのガンマ線や検出器上方にある放球プレートからのガンマ線(姿勢情報も使用)がよく確認できている。

タイムスタンプである多段シフターについては、エマルジョン飛跡に付与した時間情報から、気球の高度上昇に伴い飛跡の到来頻度の極大を確認し、水平浮遊に入ってから頻度が一定になることを確認した。また頻度分布において時折現れるスパイク構造を取り出し飛跡ベクトルをマッピングすると、一点収束を示すような典型的なハドロン反応事象が捉えられる。これらのハドロン反応事象を使い時間分解能を評価でき、2018年気球実験における目標結像性能 1 度(時間分解能 3 秒相当(2018年気球実験平均姿勢変化 0.3 度/秒から))に対して十分良い時間分解能サブ秒を達成した。

姿勢モニターであるスターカメラについては、方位角 90 度ごとにずらした 3 台のスターカメラによる相補的な姿勢監視が実現しており、姿勢決定率 98.9%、姿勢決定精度 0.02 度を Vela パルス観測時間帯について達成した。また決定した望遠鏡の向きは GPS データ(緯度・経度・時刻に基づく天頂方向)と consistent であること、Vela パルスを狙い通りカバーできていることを確認した。また 2018年気球実験において全天カバー率

51%以上を達成した。24 時間以上のフライトであれば、銀河中心領域が望遠鏡の視野中心あたりを横切り、全天カバー率 65%以上の観測が実現可能である。

また各コンポーネントを統合するデータ処理(Vela パルサー観測時間帯)について、多段シフタースターカメラ間の時刻同期については多段シフター駆動に同期した LED パルス光をスターカメラで撮影しており、それを使い現状で 60 ミリ秒と十分良い精度で両者の間の時刻同期がとれている。多段シフターで時刻付与したエマルジョン飛跡に対して姿勢情報から到来方向を決定し、高い到来方向決定率 99.0%を達成していることをエマルジョン飛跡ベースでも確認した。またコンバーターで捉えたガンマ線事象に対しても時刻付与をおこなった。電子対飛跡 2 本それぞれに対して独立に時刻付与しており、2 本間で付与時刻を比較することによって、時刻付与信頼性 99.9%や、目標結像性能 1 度に対して十分良い時間分解能 0.55 秒(到来方向決定精度にして 0.17 度(2018 年気球実験平均姿勢変化 0.3 度/秒から))を達成していることをガンマ線事象に対して実証した。またガンマ線事象時刻付与データを基にフィードバックをおこないながら多段シフター飛跡再構成やコンバーター多段シフター間接続などのデータ処理の磨き上げをおこなってきた。そして時刻付与したガンマ線事象に対して、姿勢情報から到来方向決定をおこない、到来方向決定率 99.1%をガンマ線事象ベースにおいて達成した。

データ処理の進捗状況について図 1 に示す。2019 年春頃までに姿勢モニターやコンバーターについては大体のデータ処理を完了させた。タイムスタンプのデータ処理については 17%、統合データ処理については着手し始めたような状況であった。そこから様々な努力をおこない、タイムスタンプデータ処理を飛躍的に進め、統合データ処理をそれに追従するように進めてきた。現時点において、まだまだ改善の余地はあるが、一通りのデータ処理をやりきった。

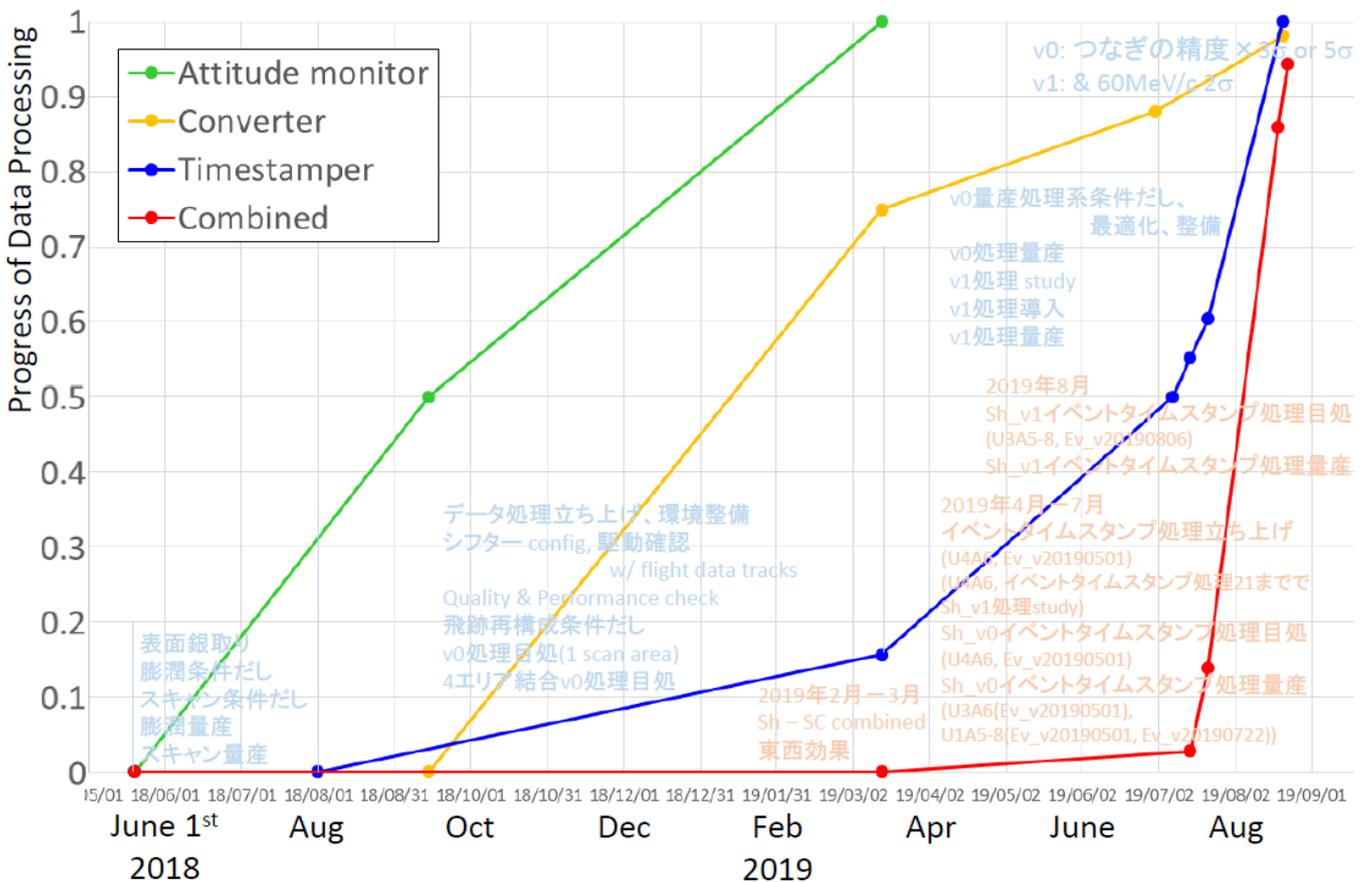


図 1: データ処理の進捗状況

到来方向を決定したエマルジョン飛跡について、地平座標での到来方向分布を見ることで東西効果を検出した。飛跡1本1本の到来方向を決め、東西効果を検出したのは GRAINE にとって初めてのことである。時刻付与や到来方向決定の正しさをエマルジョン飛跡ベースで実証した。現在シミュレーションとの比較や詳細な理解を進めている。また東西効果の到来方向分布パターン(現時点では方位角分布における位相や振幅)を基にしたサブ度精度に迫る望遠鏡の性能評価が可能となってきている。

また到来方向を決定したガンマ線事象についても、地平座標における到来方向分布を見ることで東西効果を検出した(図2)。我々が捉えているガンマ線事象は二次成分が主要なので、一次成分と同様の東西効果を検出することによって、ガンマ線においても到来方向決定の正しさを実証した。またガンマ線東西効果を検出したのは GRAINE にとって初めてのことである。現在シミュレーションとの比較や詳細な理解を進めている。

到来方向決定の正しさを確認した上で、Vela パルサー周辺におけるガンマ線到来方向分布(>80MeV)を見た(図3)。Vela パルサーの位置に associate して 5.2σ の excess を検出した。またその像広がり半径1度程度が得られている。現状まだ改善の余地があり、efficiency 向上を図り統計を増やすこと(20-40%向上見込み)や、検出器内発生ガンマ線事象(ハドロン反応起因、電子起因)等を識別し背景事象を減らす(30-40%低減見込み)などの努力を進めている。また Vela パルサーの位置から若干オフセットが見えており、それについても理解を進める。また今回の観測規模ではそれほど精度は出ないが、フラックスを導出しこれまでの測定との consistency を示していければと考えている。

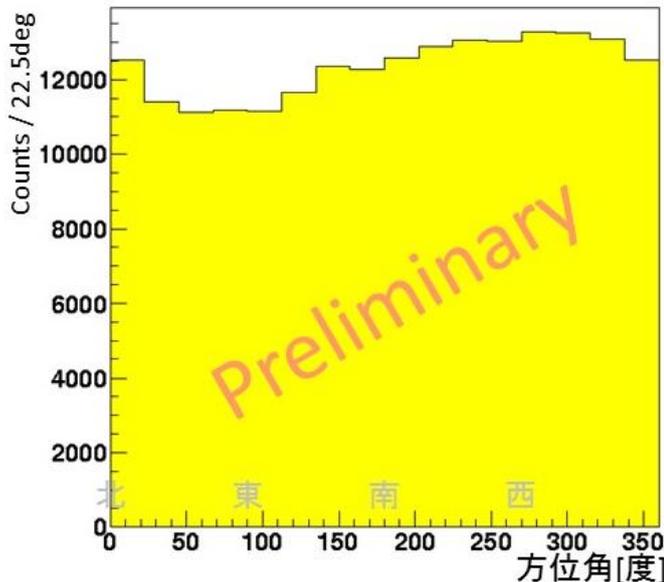


図 2: ガンマ線到来方位角分布(地平座標、天頂角 <math><45^\circ</math>、>80MeV)

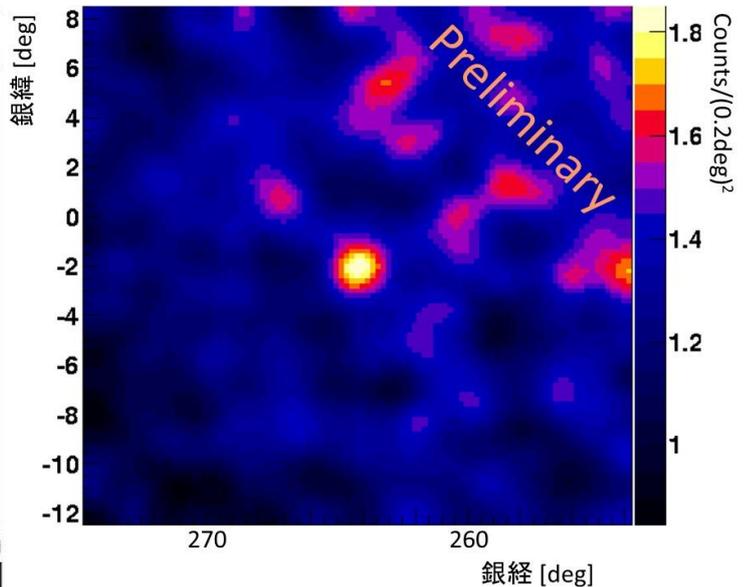


図 3: Vela パルサー周辺におけるガンマ線到来方向分布(銀河座標、>80MeV、平滑化あり、露出補正やバックグラウンド差し引きなし)

2018年気球実験における最低成功基準「同じ検出器面積による2015年観測での設計値と同等以上の性能を発揮していることを検証すること」については、大幅改善に加え大幅な改良も達成し、大いに達成できた。高度成功基準「ガンマ線源 Vela pulsar を有意に検出すること」については、既に示したように達成が見込めてきた。そして Vela パルサーが見えてきたことによって、最高度成功基準「Vela pulsar を精密撮像すること」について、達成に手がかかってきた。

世界最高解像度での Vela パルサーの撮像が実現しつつあり、世界最高解像度を実現するエマルジョンガンマ線望遠鏡が確立する。原子核乾板の歴史は古くベクレルによる放射能の発見(1896年)や α 線を1本1本の飛跡として認めた[S. Kinoshita and H. Ikeuti, Philos. Mag. 29 (1915) 420 など]ころまでさかのぼることができる。その長い歴史の中でもエマルジョン飛跡によって天体を撮像するのはこれが初めてのことになるのではないかと思う(1960年代や1970年代の気球実験も含め調べた範囲では天体撮像結果を見つけるには至っていない)。またその他にも大気ガンマ線物理を展開し始めており、具体的にはフラックスや東西効果を実測している。例えば大気ニュートリノフラックス計算シミュレーションとの比較により、ニュートリノ物理への貢献可能性も検討している。大気ガンマ線直接観測は気球実験において大きな強みがある。またその他にも検出器全

体に降り注ぐような検出器外事象(ハドロンシャワー等)の探索を進めており、検出器全体にわたる新たな較正用線源としての可能性や荷電粒子との同期によって大気ガンマ線を識別できる可能性が出てきている。

3. まとめと展望

我々は2018年気球実験を無事に成し遂げ、Vela パルサーに associate して 5.2σ の excess を検出し、像広がり半径1度程度を得ている($>80\text{MeV}$)。これらを基に今後は口径面積・観測時間の拡大を図り科学観測の開始を目指す。現在そのための開発も進めており、エマルジョンフィルム量産体制づくり、大口径面積・長時間・高時間分解能を実現する時刻付与機構多段シフターの開発、大型軽量与圧容器ゴンドラの開発、さらに高速なエマルジョン飛跡読取装置の開発などが進行中であり、「GRAINE collaboration、2019年度大気球シンポジウム集録」も併せて参照されたい。例えば多段シフターの開発については、従来のステージ駆動型からローラー駆動型にすることによって、機械的に簡素となり、大幅な軽量化が図れ、大口径面積を実現できる。併せて段間距離(飛跡外挿距離)を詰められ且つ段数を増やすことができ、長時間・高時間分解能が実現できる。従来の多段シフター開発と同様に三鷹光器社との共同開発によって、ローラー駆動型多段シフターの単段試作機(2014年10月-)や固定段+5段試作機(2018年8月-、図4)をそれぞれ試作してきた。そして丸棒ローラーから中空ローラーにするなど様々な改善や改良、そして駆動機構の見直しも含め単段/各段それぞれや複数段を連動させて様々な動作・性能試験を繰り返し、おぼろげだったローラー駆動型多段シフターの挙動がつかめてきており、要求駆動精度(繰り返し再現性 $\sim\mu\text{m}$ 以下)が得られてきている。また現状で従来型に比べ、口径面積あたりの重量にして半分となる大幅な軽量化を達成しており、大口径面積実現の見通しが立ってきた。今後はエマルジョンフィルムを搭載したり、低温低圧環境試験などの動作・性能試験を進めていく。またさらに軽量化や省スペース化も図っていき、フライトモデルを製作し、気球実験に臨む。

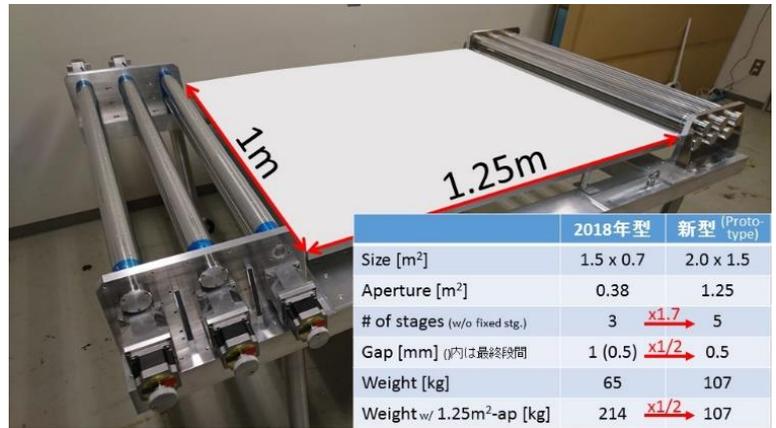


図4: ローラー駆動型多段シフター試作機(固定段+5段)

参考文献

- GRAINE collaboration (エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ), 2004-2019年度大気球シンポジウム集録.
 S. Aoki et al., Adv. Sp. Res. Vol.37 (COSPAR 2004 Proceedings) pp.2120-2124.
 S. Takahashi et al., Nucl. Instr. And Meth. A 620 (2010) 192-195.
 H. Rokujo et al., Nucl. Instr. And Meth. A 701 (2013) 127-132.
 S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 043H01.
 K. Ozaki et al., JINST 10 P12018 (2015).
 S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 073F01.
 K. Ozaki et al., Nucl. Instr. And Meth. A 833 (2016) 165.
 高橋覚、青木茂樹、日本物理学会誌 72 巻 10 号(2017) 734 - 742.
 S. Takahashi, S. Aoki et al., Adv. Sp. Res. 62 (2018) 2945 - 2953.
 K. Yamada et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2017) 063H02.
 H. Rokujo, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2018) 063H01.
http://www.kobe-u.ac.jp/research_at_kobe/NEWS/news/2018_07_17_02.html
 青木茂樹、高橋覚、六條宏紀、他、RADIOISOTOPES 68 (2019).
 H. Rokujo et al., JINST 14 (2019) P09009.