

GRAINE 計画：2018 年豪州気球実験

神戸大学	○高橋寛, 青木茂樹, 尾崎圭太, 小田美由紀, 呉坪健司, 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, 鳥井茉有, 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、長時間気球飛翔繰り返しによる宇宙ガンマ線精密観測を目指し、これを GRAINE 計画と名付け推し進めている。

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、総飛翔時間 4.3 時間)、2015 年気球実験(口径面積 3780cm²、総飛翔時間 14.4 時間)によって、エマルジョン望遠鏡気球飛翔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 パルサー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、未達成となっている。

2018 年豪州気球実験では、実験規模(口径面積や飛翔時間)は大きく変更せず、部分的な不具合を対策し、有効面積や有効時間の拡大、バックグラウンドの低減を図り、Vela パルサーからのガンマ線を有意に検出し、エマルジョンガンマ線望遠鏡の総合的な性能実証を目指す。

2. 2018 年気球実験

これまでに様々な開発や改良そして準備を日本でおこなってきた。ここでは特に時刻付与機構多段シフターおよび姿勢監視スターカメラを中心に簡潔に紹介する。各コンポーネント(ガンマ線コンバーター、時刻付与機構多段シフター、姿勢監視スターカメラ、与圧容器ゴンドラなど)の詳細については、「GRAINE collaboration、2017・2018 年度大気球シンポジウム集録」も併せて参照してほしい。

時刻付与機構多段シフターについて、2015 年気球実験では、エマルジョンフィルムパックの部分的な搭載不良のためステージ駆動の抵抗増大によって、中段左側ステージの送り動作不具合が発生した。不具合の割合は 12 分の 1(3 段×左右ステージ×送り帰り)と限定的だったが、多段シフターにおいては全段の飛跡情報を使うので、有効面積×有効時間にして 4 分の 1(25%)程度損失した。また、適切でない駆動パラメータのため、タイムスタンプを一意に決めることが困難となり、ワーストケースでバックグラウンドが 2 倍となった。2018 年気球実験では、動作不具合についてフィルム搭載方法を見直す。また、フィルム搭載後に目視による動作確認を徹底する。加えてマイクロメータによるステージ駆動実測によるより精密で厳密な動作確認をおこなう。適切でない駆動パラメータについては、駆動パラメータを見直す。そしてそれぞれについて要素試験を積み重ね、最終的には総合的な動作性能試験をおこなう。

フィルム搭載方法の見直しに併せ、様々な開発や改良そして準備をおこなってきた。ステージ開口面積を 2500cm² から 4000cm² に広げ、CFRP 背板とパックしたエマルジョンフィルムをはめ込むことにより、再現性良く確実なフィルムパックの実装が可能となる。併せて、ステージ間ギャップの制御および低減が図れ、シグナル/ノイズ比の向上(~2 倍)につながる。また、ステージ開口面積の拡大によって、物質量が低減され、有効面積の拡大(~20%@100MeV)につながる。また、背板パックの導入によって、平面性の向上が図れる。また、固定段の追加によって、多段シフターへのインターフェイスとなり、ギャップの制御および低減が図れ、シグナル/ノイズ比の向上(~2 倍)につながる。また、駆動方向の遊び抑制や、ステージ継手の遊び抑制をすることによって、駆動精度の向上が図れる。また、下段原点センサ羽の部材見直しによって、原点出し再現性の温度変化特性の向上(~2 倍)が図れる。

駆動パラメータの見直しについては、加速器ニュートリノ実験 J-PARC T60 (2014 – 2015)での多段シフターの駆動パラメータを基に、2015 年気球実験のフライトデータで調整した。

CFRP 背板パックはこれまでに実績がなく、エマルジョンフィルムに対する安全性を実証する必要がある。また 2015 年気球実験では、エマルジョンフィルムの実験前処理[初期化(感度付与、安定化)、乾燥(潜像退行抑制)、パック(エマルジョンフィルムの位置関係を保持、遮光、防湿)]において、乾燥処理不良が一部(5.9%(509 枚中、~30 枚))に発生し、それがコンバーター1 ユニットの downstream(多段シフターとの接続部)に集中していたため、そのユニット全体が解析困難となった(25%(4 ユニット中、1 ユニット)損失)。また、多段シフターにおいては、全段のエマルジョンフィルムにおいて高いクォリティーが求められるので、エマルジョンフィルムについて高いクォリティーコントロールが重要となる。それらを踏まえ 2018 年気球実験では、エマルジョンフィルムの実験前処理を十分な準備をおこないやすい日本でおこなう。そのため、パック後から現像まで最長 3 ヶ月程度(2015 年気球実験では 1.5 ヶ月程度)の長期安定性を実現する必要がある。はじめに小片のエマルジョンフィルムと CFRP による様々な試験により、CFRP の安全性や CFRP 背板パックの長期安定性に対する感触をつかんでいった。同時にベータ線分光器を自作し最小電離粒子相当の照射によるフィルム感度評価の簡便化を図っていった。そして最終的には、本番と同じ大きさのエマルジョンフィルムに対して、様々な条件での実験前処理をおこない[初期化(相対湿度 90、95、98%)、乾燥(30、35、40%)]、本番と同じエマルジョンフィルム CFRP 背板パックで様々な保管条件[期間(1、2、3、4 ヶ月)、温度(20、30°C)]において、長期安定性(感度、ランダムノイズ)を潜像退行特性と併せて調べ、CFRP 背板パックが実現可能であること、長期安定性が実現可能であること、また潜像退行特性から気球飛行終了後 3 日以内の回収が求められること、そしてそれらを実現する実験前処理条件を見出した。それらの条件をもとに、2017 年 10・11 月に製造した本番エマルジョンフィルムの実験前処理を 2018 年 1・2 月におこなった。その際、詳細な温湿度モニタリングや処理フィルムのサンプリングによってクォリティーコントロールを徹底し、実験前処理を完了させた。そして、輸送や保管時に蓄積する飛跡が識別可能な梱包をし、2018 年 2 月 15 日に現地アリススプリングスに向け発送した(第三便、空輸)。

2015 年気球実験で回収した多段シフター(加速器ニュートリノ実験 J-PARC T60 extension(2016 年)後回収)を三鷹光器社との共同開発によって開口面積を広げるなど前述の改良をおこなった。また、エマルジョンフィルム CFRP 背板パッキングについて、特にパック耳のとり回しなど試行錯誤を繰り返しながらのべ 100 回近くにおよぶ試作を繰り返し、良質な CFRP 背板パッキングを確立させていった。また、エマルジョンフィルム CFRP 背板パックの多段シフターステージへの実装についても試行錯誤を繰り返し、再現性良く確実に良質な実装を確立させていった。そして改良した多段シフターに対して、常温常圧下における機械的な動作性能試験、エマルジョンフィルム一部搭載動作性能試験、本番環境(与圧容器内：-40°C、200hPa)を想定した機械的な動作性能試験、エマルジョンフィルム一部搭載動作性能試験、エマルジョンフィルム全搭載総合環境動作性能試験をやり遂げ、改良した多段シフターにおいて、

再現性良く確実に良質なエマルジョンフィルム搭載を実現し、前述の大幅な性能改善が実現可能であることを見出した。

2015年気球実験の姿勢監視スターカメラでは、3台中1台はディスク(Solid State Drive: SSD)不具合による途中停止、もう1台はタイマーシャットダウン誤設定による途中停止、残りの1台は最後まで動作したが、視野内輝度の飽和時間が他の2台に比べ長く、姿勢決定できる時間が制限され、有効時間を44%損失した。2018年気球実験では、前者2台の不具合に対してシステムの堅牢化、後者1台の不具合に対して搭載位置・方法の見直しを図った。

システムの堅牢化について、高い信頼性で安定して動作し、問題が発生しても復旧可能な堅牢なシステムを構築した。具体的には、コマンドによるリモートでの電源接続・切断を可能にし、システムとストレージディスクを分離、さほど容量を必要としないシステムディスク(Compact Flash)にはより信頼性の高いSingle-Level-Cell型を採用、ストレージディスク(SSD)は冗長化し、コマンドによるリモートでの切り替えを可能にした。

搭載位置・方法の見直しについて、迷光よけフードの開口部周りに光の散乱体となるものがないように、またフード-カメラ間の軸合わせ等、再現性良く、ずれにくい搭載ができるように、スターカメラのゴンドラへの搭載位置・方法を見直した。2011年気球実験のスターカメラと同等の搭載となり、2011年気球実験ではフード長・径の設計が適切でなく、フードの先端が視野の一部にかかり、視野の~30%の領域が白とびして欠損していたが、日中において74%の姿勢決定率を1台のスターカメラで達成した。2018年気球実験では3台のスターカメラを方位角90度ごとに配置するので、相補的な姿勢監視による高い姿勢決定率が日中においても期待できる。

2015年気球実験回収後のスターカメラの動作性能確認の後、堅牢化システムを構築していき、長時間運転試験を繰り返した。また本番低温低圧環境を想定した長時間運転試験をおこない、高い信頼性で安定動作し、問題が発生しても復旧可能な堅牢なシステム構築を達成した。また多段シフターやJAXA機器(一部模擬装置)との連動試験や長時間運転試験、ゴンドラへの実装、そしてJAXA機器とのかみ合わせや電磁ノイズ試験をクリアしていった。また、各機器の確実な動作を保証するために、のべ111項目におよぶ確認事項、所要時間45分となる各機器の動作健全性の確認体制を構築していった。2017年12月に日本での最終調整、仕上げ、スターカメラのテスト観測、荷造りを完了させ、2018年1月5日に現地アリススプリングスに向けて発送した(第一便、船便)。

気球実験後のエマルジョンフィルムの現像処理は、シドニー大学グループ(A. Bakich氏, K. Varvell氏, D. Beech氏, N. Ioannidis氏, 他)の協力を得て、自分たちの手でおこなう。現像処理用資材、テスト現像用エマルジョンフィルム、現像用薬品(一部)をシドニー大学に向けて2月3日と5日に発送(第二便、空輸)後、2月19日からシドニー大学入りし、現像処理準備をおこなった。3月1日から気球放球基地があるアリススプリングスで気球実験最終準備をおこない、3月終盤には予定通り準備を完了させた。そして高層風予測が飛翔条件を満たすのを待った。二度、飛翔条件を満たす高層風予測となり放球準備をしたが、地上風が放球条件を満たさないなど放球を見送った。4月26日には、高層風予測・地上風共に条件を満たし、現地時間午前6:33(UTC+9.5)に気球放球に成功した。放球した気球は上昇し続け約2時間後に高度38kmに到達し、およそ東向きの風に乗り水平浮遊を開始した。Velaパルサーがエマルジョン望遠鏡の視野を横切る時間帯(15-22時)を完全にカバーするように飛翔した後、22:19にエマルジョン望遠鏡を停止させた。着地点を注意深く予測した上で23:17に気球を切り離し、パラシュートで緩降下させ、23:54にアリススプリングス東およそ900km、ロングリーチ南西250kmの地点に着地した。総飛翔時間17時間21分、高度35-38kmの水平浮遊14時間44分、そしてVelaパルサーが望遠鏡の視野を横切る時間帯を完全にカバーする気球飛翔に成功した。また、望遠鏡の各コンポー

ネット(時刻付与機構多段シフター、姿勢監視スターカメラ、与圧容器など)について、飛翔中、安定した運用を達成し、総じて飛翔中のエマルジョン望遠鏡の安定動作を達成した。また、翌日にはパイロード(エマルジョンフィルムやデータストレージディスクを含む)の回収に成功し、翌々日には回収したエマルジョンフィルムを現像処理のためシドニー大学に向けて発送した。29日にシドニー大学にて到着したエマルジョンフィルムを冷蔵保管し、現像最終準備、一部の飛翔エマルジョンフィルムの試験現像をおこない、顕微鏡観察により飛跡の見え味に問題がないことを確認した。その後5月2日から13日にかけて、のべ489枚、総面積43.8m²の全てのエマルジョンフィルムの現像処理を無事に完了した。現像後のエマルジョンフィルムの目視観察や部分的な顕微鏡観察により、高く品質管理されたエマルジョンフィルムに仕上がっていることを確認した。現在日本に持ち帰って飛翔データ解析を進めている。2015年気球実験における不具合の改善について、飛翔データでの実証も進めていくが、現時点において有効面積・有効時間の拡大およびバックグラウンドの低減について、計5.3倍の改善達成の感触を得ている。

3. さいごに

今後フライトデータ解析を進め、Vela パルサーを検出し、望遠鏡の総合的な性能実証を目指す。その後、口径面積・飛翔時間の拡大を図り、2021年から科学観測の開始を目指す。

謝辞

電源制御回路基板等の製作にあたり、神戸大学工学部集積回路情報研究室および技術室電気系技術分野グループ松本香氏らの協力を得ました。スターカメラのゴンドラへの取り付けにあたり、神戸大学大学院工学研究科工作技術センター義澤康男氏らの協力を得ました。スターカメラフードのバッフル実装にあたり、名古屋大学理学部 F 研林熙崇氏らの協力を得ました。その他にも様々な方面から協力を得ました。この場を借りて感謝します。

参考文献

- GRAINE collaboration (エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ), 2004–2018 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