



撮影: JAXA 梯友哉

宇宙ガンマ線観測の 100 倍高解像度化を狙う エマルション望遠鏡の性能検証を実施

—気球実験が成功、データ解析へ—

神戸大学大学院人間発達環境学研究科・青木茂樹教授、高橋覚特命助教、名古屋大学大学院理学研究科・六條宏紀研究員らの研究グループは、世界最高角度分解能、世界初偏光感度、世界最大口径面積を有するエマルション望遠鏡による宇宙高エネルギーガンマ線^(※1)精密観測実験 GRAINE 計画(代表: 青木茂樹)を進める中で、望遠鏡の総合的な性能実証を目指した 2018 年オーストラリア気球実験^(※2)を成し遂げました。

本実験の達成について、7月17日(火)に、国際宇宙科学会議 COSPAR(アメリカカリフォルニア州パサデナで7月14日から22日まで開催)においてに発表します。

これまでの経緯

宇宙高エネルギーガンマ線観測^(※3)は、宇宙における高エネルギー現象を解明するうえで非常に重要です。現在、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡^(※4)をはじめとする最新鋭の望遠鏡によって、宇宙高エネルギーガンマ線観測は大きく進展しています。一方で、その観測の困難さゆえ、他波長での観測に比べ角度分解能が桁違いに劣るなど、この帯域における観測は不十分であり、宇宙高エネルギーガンマ線観測を新たな段階へ進めていくうえで、観測の質的な改善が重要となっています。

高エネルギーガンマ線の痕跡を世界最高精度で記録できるのが、エマルションフィルム^(※5)です。このエマルションフィルムに、自動でフィルムの大面積を解析する技術と、本来、時間情報

を持たないエマルジョンフィルムに時間情報を付与する技術、これらを併せることで世界最高角度分解能、世界初偏光感度、そして、世界最大口径面積を有するガンマ線望遠鏡が実現可能となりました。我々は、エマルジョンガンマ線望遠鏡（図 1）を開発し、長時間気球飛翔を繰り返すことで宇宙高エネルギーガンマ線精密観測を目指し、GRAINE 計画^(※6)と名づけ推し進めています。

これまでも地上での様々な研究開発や、2011 年気球実験^(※7)、2015 年気球実験^(※8)を積み重ね、エマルジョン望遠鏡による気球飛翔での宇宙高エネルギーガンマ線観測の実現可能性を拓いてきました。

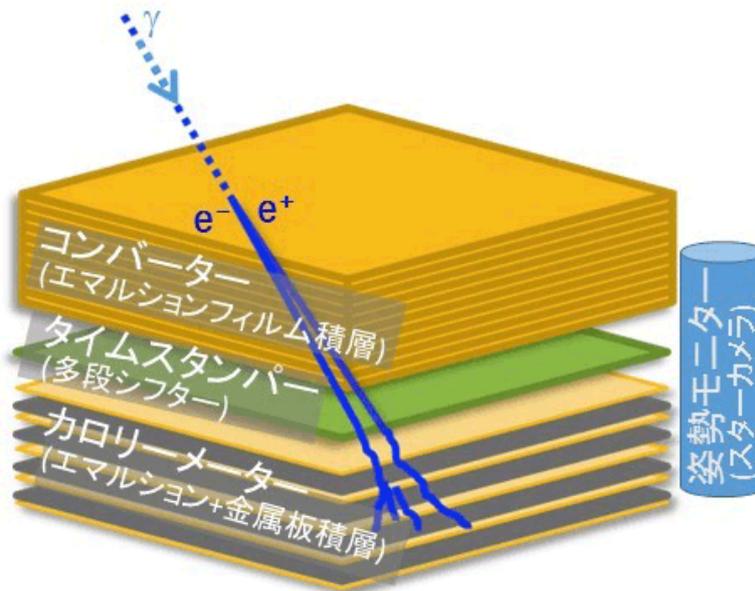


図 1: エマルジョンガンマ線望遠鏡の概念図。エマルジョンフィルムを積層したコンバーター、時刻付与機構多段シフター、姿勢監視スターカメラから構成。コンバーターでガンマ線電子対生成反応を捉え、時刻付与機構で時刻情報を付与し、姿勢監視データと併せることで天球上の到来方向が決定できる。

今回の実験の詳細内容

エマルジョン望遠鏡の総合的な性能実証を目指し、全天で最も明るいガンマ線源で南天に位置する帆座パルサーを観測するため、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) が提供する気球飛翔機会を利用した 2018 年 4 月のオーストラリア気球実験を実施しました。

実験に向け、エマルジョンフィルム、時刻付与機構多段シフター^(※9)、姿勢監視スターカメラ、与圧容器ゴンドラ^(※10)などについて様々な改良や準備を行いました。2 月にはエマルジョンフィルムの現像処理を行うシドニー大学で現像処理準備、3 月には気球放球基地があるアリスプリングスで気球実験最終準備（図 2、3）を予定どおり完了させ、高層風予測が飛翔条件を満たすのを待ちました。二度、飛翔条件を満たす高層風予測となり放球準備をしましたが、地上風が放球条件を満たさないなどの事情から放球を見送りました。4 月 26 日には、高層風予測・地上風共に条件を満たしたため、現地時間午前 6:33 (UTC+9.5) に気球放球に成功しました（図 4、5）。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、水平浮遊を開始しました (図 6)。帆座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 時 – 22 時) を十分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ました。着地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、気球は 23:54 にアリスプリングス東およそ 900km、ロングリーチ南西 250km の地点に着地しました。総飛翔時間 17 時間 21 分、うち高度 36 – 38km 水平浮遊 15 時間近くと、これまでのエマルジョン望遠鏡気球実験で最長の気球飛翔を達成するとともに、その間、エマルジョン望遠鏡の安定した運用を続けました。翌 4 月 27 日に、エマルジョン望遠鏡 (その中でも特にエマルジョンフィルムやデータストレージディスク) を無事に回収し、4 月 28 日にエマルジョンフィルムを陸路の冷蔵輸送でシドニー大学へ輸送しました。4 月 29 日にシドニー大学にて、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行い、光学顕微鏡での観察により、飛跡の写り具合に問題がないことを確認しました (図 7、8)。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^(※1) を無事に完了しました。こうしてエマルジョン望遠鏡 2018 年オーストラリア気球実験を成し遂げました。

今後の展開

現在、飛翔データ解析を進めており、帆座パルサーを検出し、望遠鏡の総合的な性能実証を目指しています。その後、大口径面積エマルジョンガンマ線望遠鏡による長時間気球飛翔を繰り返し、科学観測の開始を目指します。

謝辞

エマルジョン望遠鏡 2018 年オーストラリア気球実験の達成にあたり関係各方面の方々の協力に感謝します。

- ・ 本実験は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(ISAS/JAXA)が提供する気球飛翔機会を利用したものです。
- ・ 本研究開発は日本学術振興会科学研究費助成事業基盤研究(S)「気球搭載型エマルジョン望遠鏡による宇宙ガンマ線未解決課題の解明 (代表: 青木茂樹、課題番号: 17H06132)」等の助成のもとで行われたものです。

用語解説

※1 高エネルギーガンマ線

- 極めて高いエネルギーを持つ光子。ここでは主にサブ GeV – GeV 帯域を指す(GeV は 10 億電子ボルト)。高エネルギーガンマ線の波長は原子核サイズ以下となり、可視光や X 線のように鏡など光学系での集光や結像が原理的に難しくなる。高エネルギーガンマ線と物質との相互作用は電子対生成反応が支配的となり、電子対を捉えることで親であるガンマ線の情報(到来時刻、到来方向、エネルギー、偏光)を測定できる。従って電子対を捉える能力がガンマ線観測能力に直結する。

※2 オーストラリア気球実験

- ▶ JAXA がオーストラリア連邦科学産業研究機構 CSIRO と取り決めに交わし提供している気球飛行機会を利用。ニューサウスウェールズ大学が管理しているアリススプリングス気球放球基地を使用した。

※3 ガンマ線天文学、宇宙高エネルギーガンマ線観測

- ▶ 1952 年に早川幸男やその他の研究者によって提唱された。宇宙線（宇宙を飛び交う高エネルギー粒子）が星間ガスと衝突して生成される湯川中間子の崩壊からのガンマ線放射などが予言された。現在は宇宙高エネルギーガンマ線観測を通して、宇宙線物理学、高エネルギー天体物理学、宇宙論、基礎物理学の理解へと波及している。

※4 フェルミガンマ線宇宙望遠鏡(LAT 検出器)

- ▶ 2008 年に NASA が打ち上げたシリコン飛跡検出器から構成されるガンマ線望遠鏡。12ヶ国、90 機関、400 人以上の研究者から構成される国際共同研究であり、日本からも広島大学、東京工業大学、早稲田大学、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構、東京大学、東京大学宇宙線研究所、茨城大学、名古屋大学、京都大学、青山学院大学、立教大学、山形大学、理研、金沢大学、甲南大学の研究者が参加している。これまでに 3000 以上ものガンマ線源を発見するなどガンマ線天文学の発展に大きく寄与している。

※5 エマルションフィルム(原子核乾板)

- ▶ 荷電粒子の飛跡を捉えることに特化させた特殊な写真フィルム。荷電粒子の軌跡を三次元的に $\sim 1\mu\text{m}$ 以下の空間分解能で記録できる。ガンマ線電子対生成反応を最も緻密に捉えられ、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して感度を持たせることが実現できる。併せて大面積化も実現可能。

※6 GRAINE 計画(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)

- ▶ 世界最高角度分解能(1GeV で 0.1 度)、世界初偏光感度、世界最大口径面積($\sim 10\text{m}^2$)を有するエマルション望遠鏡(10MeV – 100GeV)による宇宙高エネルギーガンマ線精密観測実験計画。愛知教育大学、ISAS/JAXA、岡山理科大学、神戸大学、名古屋大学の研究者から構成される共同研究。青木茂樹(神戸大学)が代表を務める。

※7 2011 年気球実験

- ▶ 北海道大樹町にある JAXA 大樹航空宇宙実験場で実施。口径面積 125cm^2 、総飛行時間 4.3 時間(うち高度 34.7km 水平浮遊 1.6 時間)。エマルションガンマ線望遠鏡の初めての気球実験を達成。

※8 2015 年気球実験

- ▶ オーストラリア気球実験。口径面積 3780cm^2 、総飛行時間 14.4 時間(うち高度 36.0–37.4km 水平浮遊 11.5 時間)。2015 年気球実験は JAXA 大気球実験室現体制において初めてとなるオーストラリア気球実験であったが、JAXA 大気球実験室の成功および GRAINE グループも先行実験としての役割を果たした。

※9 時刻付与機構多段シフター

- ▶ そのままでは時間分解能を持たないエマルションフィルムを用いて、個々の飛跡の通過時刻情報を得るため、望遠鏡下流部分に配置するフィルムを複数段の精密ステージによりアナロ

グ時計の時針・分針・秒針のように独立な周期で往復させる。解析で飛跡を再構成する際にシフター各段での位置ズレ量の組み合わせから通過時刻情報を得る。

※10 与圧容器ゴンドラ

- ▶ コンバーター内やシフター各段内で積層されるフィルムはラミネート紙で真空パックすることにより観測中のフィルム相互の位置関係を保持する。観測高度では外気はほぼ真空に近い状態（約 1000 分の 5 気圧）となってしまうが、これに対して観測器全体を気密容器に入れて必要最小限の圧力を保つことにより、真空パックによる圧力を保持する。

※11 エマルジョンフィルムの現像処理

- ▶ エマルジョンフィルムに記録された飛跡潜像を顕像化するための化学的な実験最終処理。2018 年気球実験では 2015 年気球実験の際と同様にシドニー大学メンバーの協力を得てシドニー大学で GRAINE メンバーが実施。

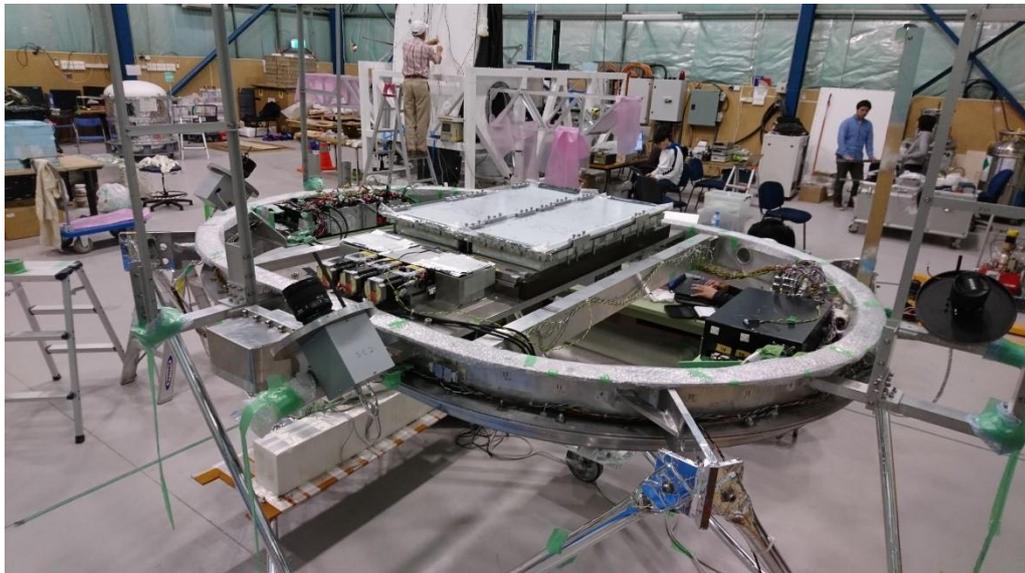


図 2: 気球実験最終準備時の様子。与圧容器リング内側(短手方向 1.5m)に多段シフターを搭載し、その上にエマルジョンフィルムパックを搭載している。エマルジョンフィルムは 1 ユニットあたりの大きさが 37.8cm×25cm、厚み方向に 113 枚積んでいる。それらを 4 ユニット並べ、口径面積 3780cm²を実現している。与圧容器リング外側には 3 方位を向いたスターカメラのレンズ(黒)が見える。



図 3: 気球実験最終準備完了時の様子。与圧容器シェルを閉じた状態。スターカメラの迷光よけフード(銀色の筒)が3方位それぞれ見える。



図 4: 気球放球直前の様子。撮影: JAXA 梯友哉



図 5: 気球放球時の様子。4月26日現地時間6:33(UTC+9.5)。気球の頭部から尾部(発光部の直上)まで130m。上空での気球の満膨張時の体積は30万 m^3 。その下にパラシュート、つり紐を介してエマルジョン望遠鏡(下側の発光部)が吊り下がっている。



図 6: 気球の航跡を表す。左側の星印が放球地点、右側の星印が着地地点を表す(その間およそ900km)。



図 7: 現像後の飛翔エマルジョンフィルム。

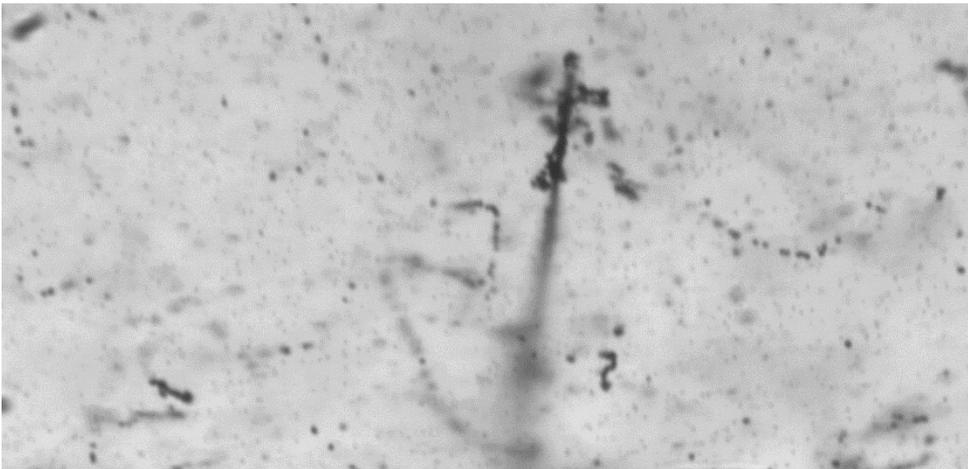


図 8: 現像後の飛翔エマルジョンフィルムの顕微鏡画像。画像の横幅はおよそ 0.1mm に対応。飛翔エマルジョンフィルムに特徴的な重粒子飛跡(まっすぐで濃い飛跡)が見られる。