

GRAINE 計画：次期気球実験に向けて

神戸大学, 愛知教育大学 A, 岡山理科大学 B, 岐阜大学 C, 名古屋大学 D

○高橋 覚, 青木 茂樹, 東 崇史, 岡本 一紘, 小田 美由紀, 加藤 拓海, 鳥野 絢花, 呉坪 健司, 鈴木 州, 長原 翔伍, 中村 崇文, 中村 元哉, 松田 菖汰, 丸嶋 利嗣, 山下 真優, 米野 翔真, 児玉 康一 A, 伊代野 淳 B, 仲澤 和馬 C, 吉本 雅浩 C, 臼田 育矢 D, 駒谷 良輔 D, 小松 雅宏 D, 小宮山 将広 D, 佐藤 修 D, 志水 凱 D, 菅波 亜門 D, 杉村 昂 D, 鳥井 茉有 D, 長縄 直崇 D, 中野 敏行 D, 中野 昇 D, 中村 友亮 D, 中村 光廣 D, 中村 悠哉 D, 西尾 晃 D, 林 熙崇 D, 南 英幸 D, 森下 美沙希 D, 森島 邦博 D, 山本 紗矢 D, 六條 宏紀 D

1. はじめに

宇宙ガンマ線観測は、宇宙線物理学、高エネルギー天体物理学、宇宙論、基礎物理学と多岐にわたる波及効果をもたらす。また近年のニュートリノや重力波も併せたマルチメッセンジャー天文学において、ガンマ線は決定的に重要なメッセンジャーを担う。高エネルギーガンマ線が引き起こす電子対生成反応をエマルシ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。我々はエマルションフィルムから成るガンマ線望遠鏡を開発し、長時間気球飛行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(大樹航空宇宙実験場、口径面積 125cm²、総飛行時間 4.3 時間)、2015 年気球実験(豪州、口径面積 3780cm²、総飛行時間 14.4 時間)、2018 年気球実験(豪州、口径面積 3780cm²、総飛行時間 17.4 時間)によって、エマルション望遠鏡気球飛行による宇宙ガンマ線観測の実現可能性を拓いてきた。2018 年気球実験では世界最高解像度での Vela パルサーの結像を達成し、世界最高角度分解能を実現するエマルションガンマ線望遠鏡を確立した。これらの経験・実績を基に、今後は口径面積・飛行時間の拡大を図り、科学観測の開始を目指す。コロナウイルス感染症の影響により再々延期となったが、2023 年には次期気球実験(豪州、口径面積 2.5m²、総飛行時間 15 時間以上、2 回)を予定している。次期気球実験では世界最大口径面積となるガンマ線望遠鏡の実現を目指すとともに、Vela パルサーの更なる観測、銀河中心領域の観測、トランジェント天体の観測、その他のガンマ線天体の観測を目指す。科学観測気球実験および次期気球実験については「GRAINE collaboration、2022 年度大気球シンポジウム集録」も併せて参照されたい。

2. 次期気球実験に向けて

現在、次期気球実験に向けて様々な開発・改良・準備を進めている。

エマルションフィルム

エマルションフィルムの製造については、名古屋大学の乳剤製造装置や原子核乾板塗布装置を用いておこなう。次期気球実験で必要となるエマルションフィルムの総面積は約 600m²である。2021 年 10 月にはコンバーターリハーサルを乗鞍で行った。2022 年 5 月から本番エマルションフィルムの量産を開始している。これまでにのべ 1240kg の乳剤製造、550m²の乳剤塗布を達成している(10 月 22 日報告時点)。本番エマルションフィルムの製造については 11 月中もしくは 12 月初旬には完了する見込みである。

そのエマルションフィルムを気球実験に投入しても問題ないか調べるための長期特性試験や潜像退行試験をコンバーターフィルム、タイムスタンパーフィルムそれぞれについて進めている(それぞれのフィルムの特性や求められる性能そしてパック条件など大きく異なる)。これまでに小片で基礎的な R&D をおこなってきた。現在は自動飛跡読取装置にかけての総合評価や、本番と同じサイズやパック条件での試験を進めている。

また本番エマルジョンフィルムの実験前処理環境[暗室、リフレッシュ処理(25°C, 95%RH, 24h)、調湿処理(30~50%RH)、真空パック処理]の立ち上げや試験をコンバーターフィルム(@岐阜大)、タイムスタンパーフィルム(@神戸大)それぞれで進めている。実験前処理はコンバーターフィルムについては11月から、タイムスタンパーフィルムについては12月から開始し、1月中旬に仕上げ、発送する。総じてコンバーターフィルムは大量処理が必須であり、タイムスタンパーフィルムは品質管理が決定的に重要となる。それぞれの運搬方法や現地での真空パック漏れがないことを確認する方法についても確立しつつある。

タイムスタンパー

タイムスタンパーである多段シフターについては、「大面積で軽量」、「長時間/高時間分解能」、「低エネルギー閾値」を実現するローラー駆動型多段シフターをこれまで開発してきた。2014年8月から三鷹光器社と共同開発を開始し、単段試作機、多段試作機、フライトモデル初号機、フライトモデル2~4号機と開発を進めてきた。現在、次期気球実験で必要となる総開口面積5m²をカバーする4台を揃えた。また多段シフターの肝となるエマルジョンフィルムパックの開発[CFRP背板、大判真空パック、包装材の改良、摩擦低減(PTFE)、ローラー巻付部(フィクセロン®+SUS箔)]も併せて進めてきた。また、初号機のエマルジョンフィルム飛跡を使った動作実証、初号機の環境試験、2号機以降の立ち上げやそれに伴い明らかとなった不具合対策(テンションローラーバネ機構にニードルベアリング(低温低压仕様グリスに置き換えて)を導入)、2号機以降の環境試験をおこなってきた。特に環境試験については大気球実験室の恒温恒圧槽や南信州・飯田産業センターの試験槽を使い、のべ50日におよぶ入念な環境試験により、低温低压での動作を実証し、気球実験本番への実現可能性を切り拓いた。以下に環境試験の中で見出した主な創意工夫および対処対策を列挙する。動作試験で必要となるロータリーエンコーダー(非フライト品)の断熱処理(ナイロン六角スペーサー固定、板バネ継手、発泡ポリエチレンで覆う)、エンコーダーをヒーター・パワーコントローラー・温度監視で手動温度制御、PTFEシートをフィルムパックに10μm厚両面テープで固定、エンコーダーの側面だけでなく軸近くの温度も監視、エンコーダーの温度制御をサーモスタットを導入し冷えすぎないように/熱くなりすぎないように制御、エンコーダーの入念な断熱処理、フィルムパック両側に5mmずつ縮みしろを設ける、CFRP背板の角を丸め低温低压後の真空パック漏れを防止、フィルムパックを張った状態でキャスター移動などで固定段が動かないようにする、原点センサ電源供給を24V→12V 3端子レギュレータ(3TR)からDC/DC変換器に変更(元々は変換効率向上狙い、もう一方で駆動安定化(特に酷使3TRで1号機4番ローラーで見られた駆動ずれを無くす))、フィルムパックのローラー巻き付け部をSUS箔30cm幅から50cm幅にする(フィルムパックの端のほうまで拘束、常圧に戻した時に四隅に発生するしわを緩和)、等々、多岐にわたる。ここでは割愛するがこれらの創意工夫や対処対策に至るまでには様々な試行錯誤が伴っていることを申し添えたい。

表：環境試験の概要

大気球実験室 恒温恒圧槽	3月前半 (11日)	ローラー駆動型多段シフター初環境試験 ◇ 1号機、ダミーフィルムパック
南信州・飯田 産業センター 試験槽	5月下旬 ~6月上旬 (16日)	エマルジョンフィルム部分搭載試験および2号機試験 ◇ 1号機、ダミーフィルムパック ◇ 1号機、小判エマルジョンフィルム部分搭載パック ◇ 2号機、ダミーフィルムパック
南信州・飯田 産業センター 試験槽	7月下旬 ~8月上旬 (14日)	3、4号機試験および1号機最終確認 ◇ 3号機、ダミーフィルムパック ◇ 4号機、ダミーフィルムパック ◇ 1号機、ダミーフィルムパック

南信州・飯田 産業センター 試験槽	10月下旬 ~11月上旬 (9日)	最終総合試験 ◇ 3号機、ダミーフィルムパック ◇ 3号機、エマルジョンフィルムパック(メカニカルサンプル) ◇ 3号機、エマルジョンフィルムパック(全体の1/4を飛跡解析用)
-------------------------	-------------------------	---

姿勢モニターおよび気球実験系統

姿勢モニターであるスターカメラについては、カメラとコントローラ/レコーダを刷新し、高感度・低温堅牢・低消費電力(全77W→49W)を実現する。新スターカメラでの感度実測を星空撮影によって行っており、2018年気球実験スターカメラに対して同等以上の感度を確認した。また長時間運転試験をおこない40時間以上の安定動作を確認した。また大気球実験室恒温恒圧槽(2月6日~11日)にて、-40℃・5hPaでの40時間を超える長時間安定動作、-34℃での電源再投入が可能であることを実証した。またエマルジョンガンマ線望遠鏡気球実験系統(テレメトリ関連、コマンド・GPS-PPS関連、ハウスキーピング関連、電源回路関連等を含め)の全構築を進めてきた。気球実験系統についても拡張や改良を行ってきた[電池を与圧容器内に配置、入念な断熱処理。ハウスキーピング関連 A/D 変換器を導入。電源電圧監視。セット・リセットが効かなくなることがあるリレー接点回路を廃止、スイッチ接点に単純化。接点サージ対策。電源制御回路 GND 切り分け。電源制御トランジスタの耐圧を高めた。テレメトリ集約器 GND 切り分け。テレメトリ集約器の確実性と拡張性を高めるためにプライオリティエンコーダを導入、多段シフター1台→2台対応、他。ハウスキーピング関連の A/D 変換器の保護として温度計を5V駆動&OPアンプ導入、他。等々]。姿勢モニターを含むエマルジョンガンマ線望遠鏡気球実験系統の総合環境試験を11月に大気球実験室恒温恒圧槽で予定している。

与圧容器ゴンドラ

与圧容器ゴンドラについては、大型・軽量・低物質量を実現する膜材与圧容器ゴンドラ(差圧0.3気圧)を開発している。2018年気球実験の与圧容器ゴンドラから拡張した実機を製作した。また自立・移動のためのトラスを切り離した。リークテストを進め、2018年気球実験与圧容器ゴンドラと同等の性能を達成した。また-60℃の環境試験を達成した。そして2機目の製作、各種試験や確認が完了した。

ゴンドラ実装

ゴンドラへの全実装を進めている(エマルジョンフィルム系以外)。またすべてを接続しての連動試験を進めている。その中で、電源投入時の起動確認、コマンド操作・テレメトリ監視、動作・健全性確認、長時間運転試験、電池試験をstep-by-stepに繰り返し繰り返し行っている。また大気球実験室側の機器とのかみ合わせ試験や電磁ノイズ試験をおこなった(10月6、7日)。事前の準備も相まってかみ合わせ試験はすこぶる順調に完了した。電磁ノイズ試験については一部対応が必要となったが(特にハウスキーピング系 A/D 変換器)、機器を置き換えることなどで手持ちの簡易スペアレベルでは対処した。11月6~14日に大気球実験室の恒温恒圧槽で予定している姿勢モニターを含むエマルジョンガンマ線望遠鏡気球実験系統の総合環境試験の際に、大気球実験室側と電磁ノイズの確認を予定している。ゴンドラへの全実装については、1機目については10月25日までに概ね仕上げ、最終確認に入っている。2機目にも着手しており、11月末までに仕上げることを目指している。最終確認後、2機を12月に発送することを目指す(第一便(船便))。エマルジョンフィルムについては1月中旬に実験前処理を完了させ発送する(第二便(空輸))。2月半ば頃にメンバー現地入り、3月半ばまでに飛翔準備を完了させ、3月下旬以降の飛翔機会を狙う。

現像

気球実験後のエマルジョンフィルムの現像は岐阜大の大規模現像設備を利用する。次期気球実験で取り扱うエマルジョンフィルムの枚数は4500枚相当(4000+500)となり、15ハンガーで~120cycle(90+30)を1~2ヶ月程度でおこなう。2021年10月の乗鞍でのコンバーターリハーサルの際に現像テストをおこなった。

高速自動飛跡読取装置

エマルジョンフィルムの飛跡読み出しは名古屋大で開発が進んでいる次世代の飛跡読取装置 HTS2 を使う。HTS2 は現行機 HTS1 の読み出し速度の5倍を狙う(~2500m²/年相当)。現在コミッショニングが始まっている。また高い飛跡認識効率を実現するための飛跡の高コントラスト化の研究(現像、画像処理)も進んでいる。

精密測定系

エマルジョンフィルムの原理限界に迫る精密測定の開発も進んでいる。現像銀粒子が持つ原理的な位置分解能は~50nm であり、原理限界に迫る測定を狙う。実際に2018年気球実験フライトデータ(ハドロン反応ガンマ線事象)でそのような精密測定が実現可能であることを実証している。

3. 最後に

現在、次期気球実験に向けて様々な開発・改良・準備を鋭意進めており、なんとか無事に本番実験を成し遂げ、GRAINE 計画はいよいよ科学観測へ入っていく。そして口径面積・飛翔時間の拡大を図っていき、科学観測の結実を狙う。

参考文献

GRAINE collaboration (エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ), 2004–2022 年度大気球シンポジウム集録.

S. Aoki et al., Adv. Sp. Res. 37 (2006) 2120.

S. Takahashi et al., Nucl. Instr. And Meth. A 620 (2010) 192.

H. Rokujo et al., Nucl. Instr. And Meth. A 701 (2013) 127.

S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2015) 043H01.

K. Ozaki et al., JINST 10 (2015) P12018.

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.

S. Takahashi, S. Aoki et al., Adv. Sp. Res. 62 (2018) 2945.

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) 877.

H. Rokujo et al., JINST 14 (2019) P09009.

中野昇、六條宏紀、日本写真学会誌 84 (2021) 204.

S. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (submitted).

Y. Nakamura et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2021) 123H02.

M. Oda et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (accepted).