

# 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, 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, 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 125cm<sup>2</sup>、総飛行時間 4.3 時間)、2015 年気球実験(豪州、口径面積 3780cm<sup>2</sup>、総飛行時間 14.4 時間)、2018 年気球実験(豪州、口径面積 3780cm<sup>2</sup>、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 2.5m<sup>2</sup>、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、2021 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 600m<sup>2</sup>であり、2022 年度から製造を開始する。

そのエマルションフィルムを気球実験に通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)。特に条件出しの厳しいタイムスタンパーフィルムについては、長期特性試験[リフレッシュ処理(25°C, 95%RH, 24 時間)、調湿(30, 40,

50%RH)、保管温度(20, 30°C)、保管期間(0, 1, 2, 4, 6 ヶ月)、および潜像退行試験[調湿(30, 40, 50%RH)、保管温度 40°C、保管時間(0, 12, 24, 48, 84 時間)]、それぞれについてまずは小片サンプル(2~3cm 角)を仕込んだ。潜像退行特性については、気球実験後の回収期限を決め、回収計画を大きく左右する。2018年気球実験では、タイムスタンパーフィルム(臭化銀結晶体積充填率 45%、乳剤厚 50  $\mu\text{m}$ 、調湿 30~35%RH)の潜像退行許容値が回収期限を決めており、要求回収期限は 3 日であった。現在試験は途上だが現状で得られている結果において、2018年気球実験と同じ条件で線引きすれば、要求回収期限は 2 日もしくはそれより短くなるが(塗布装置のための添加剤による希釈等)、乳剤厚を 50 $\mu\text{m}$  から 70  $\mu\text{m}$  にすることで物質量はやや増えるが、飛跡信号量(銀粒子数)のマージンを確保でき、要求回収期限を 1 週間以上にできる可能性を見出しつつある。本結果を固め、最終的には自動飛跡読取装置にかけて判断する。また結晶体積充填率を下げたり、厚みを減らしたりするなどして、飛跡信号量は確保しつつ、物質量をどこまで下げられるか最適化を図っていく。タイムスタンパーフィルムの物質量の低減は数百 MeV 以下のガンマ線の有効面積に効く。そして最終的には本番と同じサイズやパック条件での試験をおこなう。

また 2018年気球実験のタイムスタンパーフィルム試験の際に、潜像退行を抑えようと調湿度を下げすぎると長期保管時にノイズ(fog)増加が問題となってしまい、その条件出しに非常に骨を折った。近年の西尾らの研究によって、ノイズ増加は主に包装材に起因していることが突き止められ、包装材の選定によってノイズ増加を劇的に抑えられることが示された。次期気球実験では 2018年気球実験での苦労や経験を基にタイムスタンパーフィルムに最適な包装材を選定し、長期安定性(飛跡感度、ノイズ)を追求していく。

また 2018年気球実験のタイムスタンパーフィルム試験での飛跡感度/信号強度(grain density)の評価において、自作の $\beta$ 線分光器を導入し  $^{90}\text{Sr}$  線源(最大 2.3MeV)を用いて最小電離粒子(1.5 – 2.7MeV/c)を照射し評価した。 $\beta$ 線分光器の導入は、サンプルの製作から評価までを簡便・迅速にし、試行錯誤しながら多くのサンプルを迅速に製作・評価することを可能にし、困難な条件出しをなんとか乗り越えることができた。ただし現行の $\beta$ 線分光器による照射は、フィルムのエッジ部のみの照射であったり、最大同時に 3 枚程度までの照射であったりなどの制約もあり、まだまだ改良の余地がある。もう一方で、 $\beta$ 線分光器と同時に検討したトリウム系列  $^{208}\text{Tl}$  崩壊ガンマ線(2.6MeV)のコンプトン散乱電子(最大 2.4MeV)を使えないかの検討も進めており、トリウム含有タングステン棒(溶接用電極、SMILE 実験グループを参考)の検討を進めている。タングステン棒は比較的入手が容易であり、安価で、取り扱いが容易である。比較的容易に小片フィルムサンプル全面(数 cm 角)への一様な照射や、最大数十枚程度の同時照射がリーズナブルに行えそうな見通しが得られつつある。

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]の立ち上げを進めている。特にタイムスタンパーフィルムにおいては特大の真空包装機(1.25m 長)で極上の真空包装に仕上げる。

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5m<sup>2</sup>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。ローラー駆動型多段シフターがようやく日の目を見る時が近づいてきている。本番に向けていいものに仕上げていきたいと考えている。

表：多段シフターの比較

	2018年型	新型 フライト モデル
大きさ [m <sup>2</sup> ]	1.5 x 0.7	2.0 x 1.5
開口面積A [m <sup>2</sup> ]	0.38	1.25
段数 (w/o 固定段)	3	4
段間ギャップ [mm] <small>(内は最終段間)</small>	1 (0.5)	0.5
重量 [kg]	65	80
重量 w/1.25m <sup>2</sup> A [kg]	214	80
消費電力 [W]	25	20
消費電力 w/1.25m <sup>2</sup> A [W]	82	20

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。今後は環境試験をおこない、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・GPSPPS 関連、ハウスキーピング関連、電源回路関連等を含め)の全構築を目指す。気球実験系統についても拡張や改良を行っている[テレメトリ関連(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(ADC保護として温度計を5V駆動&OPアンプ導入、他)、他]。

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ており、2018年気球実験与圧容器ゴンドラと同等の性能が得られつつある。

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。

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(~2500m<sup>2</sup>/年相当)。現在コミッション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。

またエマルジョンフィルムの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、科学観測の成就を目指す。

### 参考文献

- GRAINE collaboration (エマルジョンガンマ線望遠鏡グループ), 2004–2021 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](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. (submitted).