

# GRAINE 計画:次期気球実験に向けた 大面積エマルジョン望遠鏡の開発

○六條 宏紀, 白田 育矢, 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, 児玉 康一, 池田 忠作, 濱田 要, 伊代野 淳, 松川 秋音, 山本 紗矢, 仲澤 和馬, 吉本 雅浩, 青木 茂樹, 尾崎 圭太, 小田 美由紀, 加藤 拓海, 烏野 絢花, 呉坪 健司, 佐藤 良紀, 柴山 恵美, 鈴木 州, 高橋 覚, 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

名古屋大<sup>1,2</sup>、愛知教育大<sup>2</sup>、ISAS/JAXA<sup>2</sup>、宇都宮大<sup>2</sup>、岡山理科大<sup>2</sup>、神戸大<sup>2</sup>

## 1. はじめに

宇宙磁場の影響を受けず空間を直進できる $\gamma$ 線を観測することで、我々は「宇宙で起こる高エネルギーな物理現象」を探ることができる。星間ガス/光子と宇宙線(陽子や電子)が激しく相互作用する現場で、宇宙 $\gamma$ 線は生成される。また、粒子・反粒子対消滅反応からの $\gamma$ 線は、質量に応じた特徴的なスペクトルを示し、宇宙暗黒物質をはじめ未知の素粒子の探査に用いられる。活動銀河核や $\gamma$ 線バースト等の宇宙論的な距離を伝播する高エネルギー $\gamma$ 線を利用した新物理の探求を可能にする。近年では重力波直接検出が大きな転機となり、多波長・多粒子での天体観測が新たな宇宙像を切り拓きつつある。宇宙 $\gamma$ 線が我々へと運んでくる知見は、宇宙線・天文学・素粒子物理学・基礎物理学など非常に多岐の分野に跨っている。

最新の(サブGeV-GeV帯) $\gamma$ 線観測器であるフェルミ衛星は打ち上げから10年全天観測を続け、かつてない高統計の $\gamma$ 線データを提供してきた。5000を超える $\gamma$ 線天体の検出等、ブレイクスルーとなる様々な成果を上げた一方で、次なる課題も見え始めた。観測の足枷となっているのが、空間分解能(角度分解能)の不足である。構造が複雑な銀河面/中心の天体密集域や、広がった超新星残骸の理解にはより詳細なデータが必要であり、高解像観測が $\gamma$ 線天文学の次なるステップへの突破すべき課題となっている。

世界で複数のグループが角度分解能改善に着目したプロジェクトを提案する中、我々は、原子核乾板(エマルジョンフィルム)技術によって高角度分解能と大口径を両立する $\gamma$ 線望遠鏡の開発、及び気球による観測実験「GRAINE計画 (Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)」を先行して推進してきた。低通過物質質量( $\sim 10^{-3}X_0$ )かつサブミクロンの空間分解能を実現する原子核乾板は $\gamma \rightarrow e^+e^-$ 反応点直下の飛跡を精密に測定することができる $\gamma$ 線の方向測定に最適の検出器であり、フェルミ衛星の角度分解能を約1桁改善した高解像精密観測を実現し、加えてガンマ線の偏光に対する感度を持つ。GRAINE計画は、 $\sim 10\text{m}^2$ の大面積エマルジョン望遠鏡を気球に搭載し数日 $\sim$ 1週間程度のフライトを繰り返す事で、Fermi-LAT等の衛星年間観測規模に匹敵するexposureを獲得し、宇宙ガンマ線の精密観測を目指す[1]。

2018年気球実験(GRAINE2018)では我々の望遠鏡で初めてとなる天体検出に成功し、気球搭載原子核乾板によってGeV $\gamma$ 線天体を世界最高解像度で観測可能であることを実証した[2]。GRAINE計画は、これまでの性能実証からフェーズを移行し、科学観測開始に向けて気球実験・検出器拡張をさらに推し進める[3]。科学観測モデルの検出器開発は、既に様々な準備研究が進めてきており、それらの現状について報告する。

## 2. エマルションガンマ線望遠鏡(次期豪州実験モデル)

GRAINE次期豪州気球実験は、コロナ禍の影響による延期判断があり、2022年3-5月期を現在予定している。口径面積2.5平米のエマルション望遠鏡を搭載したペイロード(B300型気球使用, PI重量約700kg)2機2フライトによる観測実施を目指す。GRAINE2018(口径面積0.38平米望遠鏡)では光子統計の有利な0.1GeV帯域でのVelaパルサー検出にとどまったが、次期実験では口径面積は2機合わせて13倍となり、1GeV帯域での撮像も可能になる。

SMILE2+の気球フライトのようなターンアラウンド飛行による24時間を超える観測ができれば、銀河中心領域の明るい天体についても有意な検出が期待される。

図1にペイロード全体図を示す。大型化した風船式与圧容器ゴンドラ、3方向に設置するスターカメラ、エマルションガンマ線望遠鏡からなる。エマルション望遠鏡(図2)は、口径面積1.25平米を単位とするユニット化を行い、ペイロード1機に2ユニット搭載する。最上流のコンバーター部は、アルミハニカムに固定された100枚積層の原子核乾板であり、 $\gamma$ 線の電子対反応を検出し、到来方向とエネルギー測定を行う。多段シフター機構からなるタイムスタンプは、ローラー駆動式へ変更し軽量化・長時間化・高分解化の改良を行う(開発現状は[4]を参照されたい。)本稿では、原子核乾板量産開発、大型与圧容器ゴンドラ開発についてそれぞれ述べる。

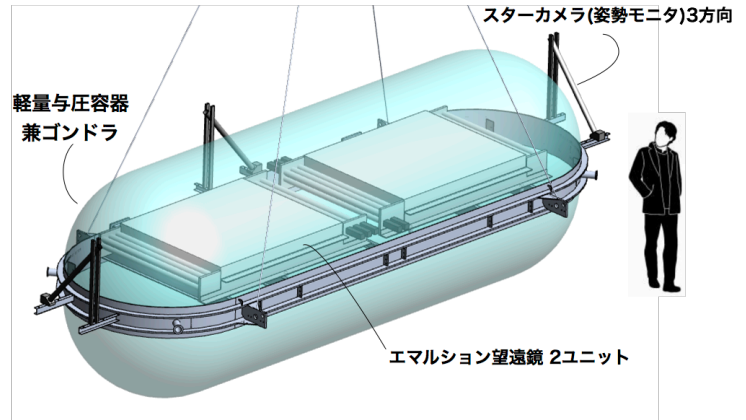


図1: GRAINE次期豪州実験ペイロード全体像

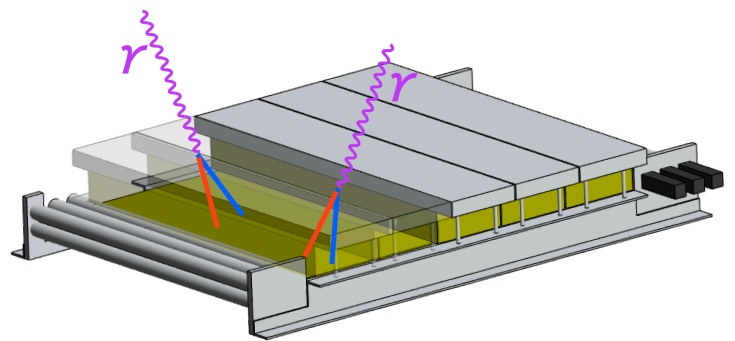


図2: 口径1.25平米エマルション望遠鏡(1ユニット) 黄色い部分は原子核乾板を表している。

## 3. 次期実験に向けた原子核乾板量産開発の現状

望遠鏡の主要部であるコンバーターの開発には、均質な性能の原子核乾板を大量に製造する必要がある。近年、原子核乾板の用途は、素粒子反応測定にとどまらず、 $\gamma$ 線、ミューオン、中性子等の高解像イメージング分野にも広がりを見せており、名古屋大学ではGRAINEをはじめとするこれらの研究のさらなる大規模化・活性化を実現するために、これまでの原子核乾板の供給能力を1桁スケールアップするインフラ設備のアップグレードを推し進めている。

2019年より量産型原子核乳剤製造装置(1回の運転で約10m<sup>2</sup>の乾板に相当する原子核乳剤が生産可能)の新設を開始した。設置工事は完了し、現在、実用化のための様々な試運転・調整が進行中である。図1は新装置で製造した臭化銀(AgBr)結晶の電子顕微鏡画像である。標準的な原子核乾板に

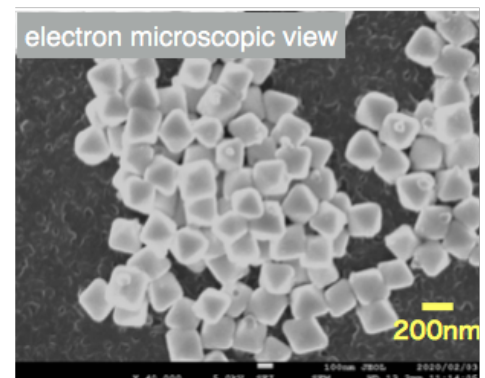


図3: 新設した量産型原子核乳剤製造装置で作られた臭化銀結晶の電子顕微鏡画像。それぞれの結晶が直径約200nmの半導体位置センサーとして機能し、原理的な分解能として~50nmに迫ることができる。

使用される直径約200nmの結晶の形成に成功している。図2は、脱塩、増感工程を経て得られた原子核乳剤を少量塗布し、約10MeVの電子ビームを照射したサンプルの光学顕微鏡画像である。最小電離粒子の飛跡がはっきりと観察でき、GRAINE実験に使用可能な粒子密度(46.2±3.0 grain/100μm)が得られていることを確認した。

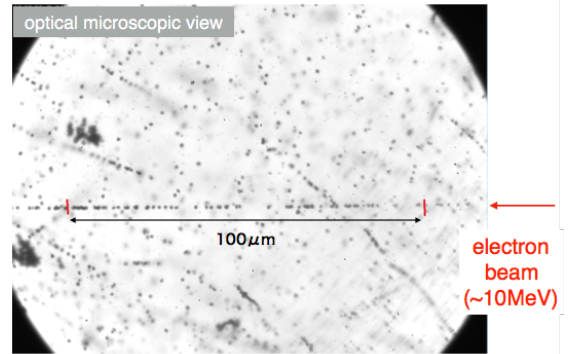


図4: 新設した量産型原子核乳剤製造装置で作られた乾板の顕微鏡画像。最小電離粒子(~10MeV電子線)のクリアな飛跡像が確認できる。

フィルム化の工程(溶解した原子核乳剤をプラスチックフィルムの両面に塗布し乾燥させる)は、これまでは1枚1枚手塗りで行ってきたが、ロール状に巻かれたフィルムを引き出し、オンラインでフィルム表面親水化(コロナ放電処理)→乳剤コーティング→乾燥を連続的に行い、末端でフィルムを巻き取る「ロールtoロール自動塗布」への置き換えを進めており、より均質・一様な原子核乾板の高効率な製造を行う。図3に名古屋大学で開発中のロールtoロール塗布装置の写真を示す。フィルムの巻出機、巻取機、張力調節機、コロナ処理機、下塗・上塗ゼラチン塗布用のローラーコーター、乳剤塗布用のナイフコーター、スリットノズルと熱風送風機からなる乾燥炉(現在構築中)などで構成される。これまで、本機を用いた要素実証試験を実施しており、飛跡検出に十分な厚み(最大80μm、標準偏差±1μm)の乳剤層をコーティングできることを確認した。また部分構築した乾燥システムにより乾燥速度の実測(予定していた30分以内での乾燥を確認)、塗布後のフィルムの巻取操作の確認などが完了している。現在、乾燥炉の構築を進めており、近く一連の連続塗布のセットアップが完成し、本機で作られたフィルムの性能評価を行なっていく。

これら新しいファシリティは、2021年より本格運用を開始し、実験への供給を予定している。GRAINE次期豪州実験に向けては2021年6月ごろから乳剤製造、フィルム製造を計画しており、総面積約550平米の原子核乾板を生産する。フライト後の解析を見越した自動飛跡読取装置の次世代機の開発も同時に進行しており、来年度から運用開始予定である。

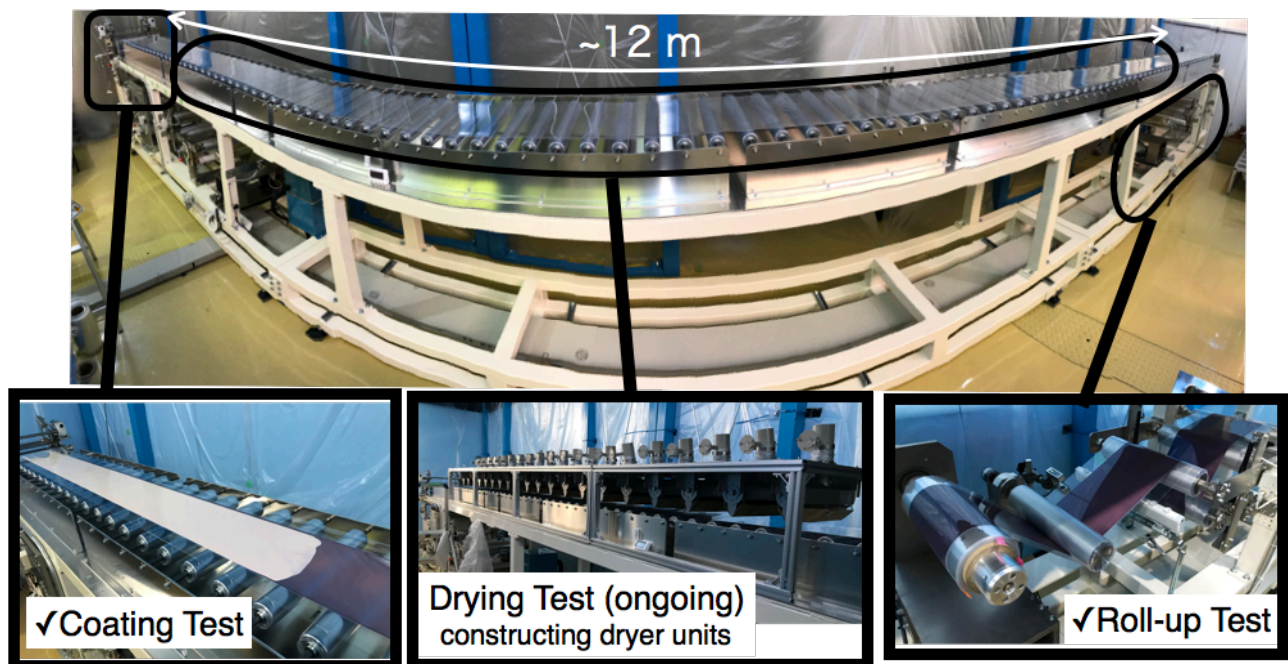


図5: 新たに開発・構築中の原子核乾板自動塗布装置(パノラマ撮影)。フィルムの巻き出し、乳剤の均質塗布、乾燥、巻き取りの一連操作(ロールtoロール塗布)を可能にする。

#### 4. 次期実験に向けた与圧容器ゴンドラの開発現状

GRAINE与圧容器ゴンドラは、気球高度において容器内の圧力を100hPa以上に保持し、真空パック(パック内圧力約5hPa)することによって剛性を持たせたコンバーターの形状を保ち、観測中の望遠鏡のアライメントや結像性能を維持する役割を果たす。GRAINE2015で初めて球形状の容器を導入し、GRAINE2018では拡張性を持たせた短シリンダー形状に改良し、それぞれフライト時に狙い通りの性能を発揮した[5]。

次期実験モデルは全長約5mのシリンダー形状となっている(図6)。アルミフレームの設計/強度検討(名古屋大学装置開発室)、シェルに使用する膜材料の新規開発(太陽工業株式会社)、トラス構造撤廃などの様々な工夫により[6]、望遠鏡口径面積あたりのゴンドラ重量は~80kg/m<sup>2</sup>となり、大幅な軽量化(GRAINE2018モデルに比べ75%削減)を実現した。

2020年より1機目の製作を開始した。常温環境での加圧試験を行ない、要求圧力を24時間以上保持する性能を確認している。今後、低温試験、検出器組み付け確認、2機目の製作を進めていく。

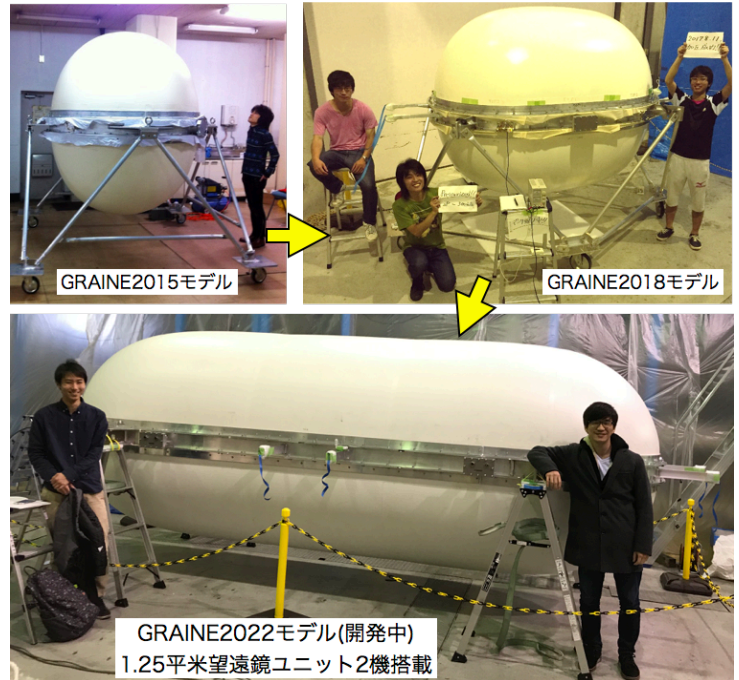


図6: 風船式与圧容器ゴンドラ。望遠鏡を搭載するアルミフレームと圧力を封じ込めるシェル(軽量膜材料により製作)等から構成される。球形状(2015年実験)、短シリンダー形状(2018年実験)の開発実績を経て、次期実験のための全長5mシリンダー形状モデルの開発が進んでいる。

#### 5. まとめ

気球搭載エマルジョン望遠鏡によるガンマ線天体精密観測計画GRAINEを推進している。2018年豪州実験においてVelaパルサー検出による望遠鏡性能実証を成し遂げた。これらは高性能な原子核乾板の自己供給体制、自動読取装置による大面積原子核乾板解析体制、原子核乾板飛跡への時間付与手法を独自に構築してきた結果であり、世界中でも我々にしか実現し得ない技術に基づいている。GRAINE計画の次のステップである大面積エマルジョン望遠鏡による科学観測を見越した準備研究が進んでおり、量産型乳剤製造装置やフィルム自動連続塗布装置からなる乾板供給設備の構築、飛跡読取装置のアップグレード、大型与圧容器ゴンドラの開発がなされている。2022年に予定している次期豪州気球実験では、2.5平米エマルジョン望遠鏡2機2フライトによる観測を目指す。

#### 参考文献

- [1] エマルジョンガンマ線望遠鏡(GRAINE)コラボレーション,2004-2020年度大気球シンポジウム報告., S.Takahashi, et al., ASR 62,10(2018): 2945-2953
- [2] 高橋覚 他, 2020年度大気球シンポジウム報告. isas20-sbs-002
- [3] 青木茂樹 他, 2020年度大気球シンポジウム報告. isas20-sbs-003
- [4] 小田美由紀 他, 2020年度大気球シンポジウム報告. isas20-sbs-005
- [5] H.Rokujo et al., JINST 14 (2019) P09009
- [6] 小宮山将広 他, 2019年度大気球シンポジウム報告. isas19-sbs-038