

GRAINE 2015 年豪州気球実験

エマルジョンチェンバーの製作・回収・データクオリティ

○六條 宏紀¹ for GRAINE collaboration²

名古屋大^{1,2}、愛知教育大²、ISAS/JAXA²、宇都宮大²、岡山理科大²、神戸大²

1. はじめに

ブラックホール、パルサー、超新星残骸などの高エネルギー天体のガンマ線での観測は、宇宙空間で起こる非熱的現象を理解するための有効な手段である。2008年に打ち上げられたフェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡は、これまでの検出天体数を1桁更新する3000個以上のガンマ線天体の発見や超新星残骸での宇宙線加速を明らかにするなどの目覚ましい成果をもたらし、ガンマ線天文学を新時代へと導いた。ガンマ線天文学を今後さらに前進させるために、観測データの質的改善が求められている。

原子核乾板(エマルジョンフィルム)は、低物質質量 ($\sim 10^{-3}X_0$)かつ、高分解能(サブミクロン)で荷電粒子の通過位置を測定出来る飛跡検出器である。 $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 反応点直下の飛跡を精密に測定することで、ガンマ線(数10 MeV–100 GeV)に対する角度分解能をFermi-LATよりも1桁近く改善出来る。加えて、e-pairのアジマス角を有意に測定する事が可能であり、ガンマ線の直線偏光に対する感度を持つ。エマルジョン望遠鏡は、コンバーター部(積層エマルジョンフィルム)、タイムスタンプ部(エマルジョン多段シフター機構)、カロリメーター部(エマルジョンと金属板の積層)から構成され、カウンター類を必要としないdead time free、dead space freeな検出器である。また原子核乾板は、その優れた分解能を保ったまま大面積化を実現できる唯一の検出器であり、重量も軽い。GRAINE計画(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)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~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、ガンマ線天体の精密観測を目指す[1]。

2015年5月、GRAINEの2回目の気球実験をオーストラリア・アリススプリングスにて実施した[2]。2011年大樹町での気球実験[3]に比べ、口径面積約30倍($125\text{cm}^2 \rightarrow 3780\text{cm}^2$)となる検出器を搭載し、レベルフライト時間約7倍(1.6時間 \rightarrow 11.5時間)となる観測に成功した。現在、回収したエマルジョンフィルムの自動飛跡読取装置によるデータ取得が進行しており、GeVガンマ線天体の中で最も明るいVelaパルサーをターゲットとした、統計的有意性 5σ 相当での検出、 $E_\gamma \sim 100\text{MeV}$ 領域での世界最高解像度でのイメージング、83ミリ秒周期のパルス分解等の解析を進めていく。

GRAINEの検出器の心臓部であるエマルジョンフィルム内の精細な3次元飛跡情報を良質な状態で観測後の解析に乗せるためには、フィルムを確実・迅速に回収し、低温状態を保ちながら現像ファシリティへと運搬することが重要な要素の一つであった。本講演では、実験前に実施したフィルム処理、および観測後の回収について述べる。

2. 2015年オーストラリア実験

図1に実験が実施された2015年3-6月にかけて検出器が移動した経路をまとめた。

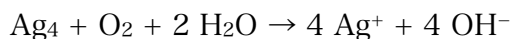
- ①3月12–17日 名古屋大にて製造した原子核乾板(約 50m^2)を航空便にて輸送。
- ②4月2–17日 GRAINEメンバー5名がシドニー大に滞在し、エマルジョンフィルムの調湿処理、スタッキング、パッキング作業を実施。

- ③4月27日-5月1日 陸路(主に鉄道)によりアリスプリングスへエマルジョンチェンバーを輸送。
 ④5月12日 6時33分(ACST)放球。
 ⑤5月13日 ペイロードを無事回収。エマルジョンチェンバーをロングリーチのホテルで冷蔵保管。
 ⑥5月18-20日 陸路(自動車)によりロングリーチからシドニー大学へエマルジョンチェンバーを輸送。経由する都市毎でドライアイス継ぎ足しながら運び、低温を維持。
 ⑦5月21日-6月1日 シドニー大学にて現像ファシリティを整備し、12日間で搭載した48m²のフィルムの現像を完了。
 ⑧6月5-6日 現像後の全てのエマルジョンフィルムを手で日本へ帰国。

以下で上記②⑤に関して詳しく述べる。

3. 豪州におけるエマルジョンチェンバーの製作

原子核乾板には、潜像退行(フェーディング)と呼ばれる飛跡が消えてしまう現象があり、以下の化学式で表す。



Ag₄(潜像核)が現像処理を経て析出する銀粒子の種である。この化学反応の進行を抑制するには、フィルムの周辺を低温、低湿度に維持することが有効である。

我々は、観測直前にフィルム中の水分調整を行うため、シドニー大学particle physics グループの協力を得て、ファシリティを学内に設置した。日本から輸出した全てのフィルム(約50m²)を暗室テント内で高湿度環境(95% relative humidity(R.H.),25°C)に24時間晒し、保管・輸送時に蓄積した飛跡の消去ならびに感度安定化のための処理を行った。続いてフィルムをドライイングキャビネットに移し、低湿度環境(20-30% R.H., 25°C)に慣らした後、エマルジョン望遠鏡の設計通りにフィルムをスタックし、湿度・光を遮断するラミネート袋で真空パックした。一度に処理出来る量は、25 cm × 37.8 cmのフィルム200枚(高湿)ないし100枚(低湿)であり、15日間で搭載する全てのチェンバーの製作を完了した[4]。

最終調節湿度が低い程フェーディング耐性は良くなるが、一方で膜質が悪化し、ひび割れの原因となる。20% R.H.の場合、40°Cの高温環境に48時間ないし72時間晒されたフィルムの自動飛跡認識効率は98%からそれぞれ90%、77%へと低下する。したがって観測後の回収が遅れ、昼間の高温に晒される状態が2日以上続くと、その後の解析に影響が及ぶことになる。

4. エマルジョンチェンバーの回収作業

筆者は福家氏(JAXA大気球実験室)、D.Sullivan氏(CSBF)、Paul氏(New South Wales大)らと共にペイロードの回収作業に参加した。ここではPIの視点から回収作業についてまとめる。図2-1はフライト前のペイロードの写真である。バラスト投下後の重量は、497 kgである。観測後のエマルジョンチェンバーを逸早く冷暗所へ運び、観測中にエマルジョンに記録された飛跡の退行を最小限に抑えることがPI側の要求である。落下地点到着後、現場でエマルジョンチェンバーを取り外し、クーラーボックスへ移し替え、回収基地であるロングリーチのホテルまでに運び帰ることを事前に想定し、車載可能な小型冷凍庫および冷媒(約6 kg)を調達した。

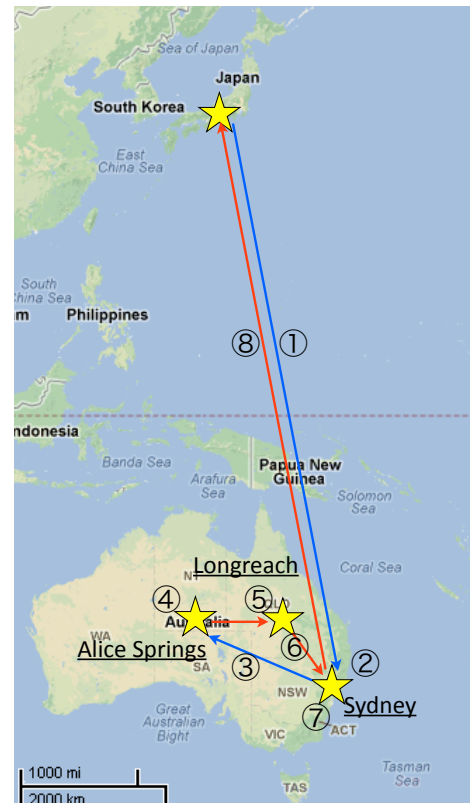


図1: 2015年豪州実験における検出器の経路(地図はgoogle mapより)

4.1 アリススプリングス放球基地からロングリーチ空港へ

6月12日6:33の放球から4時間半後、回収班はアリススプリング空港からセスナ機に搭乗し出発した。正午頃、NTとQLDの州境あたりで気球を追い越したことを機内から見届け、14時頃(以降時刻はAEST)回収拠点となるロングリーチ空港に到着した。Sullivan氏により予測落下地点のアクセス性、地形、周辺に空港等が無い事が検討された上、21:22にパイロードが切り離された。その後、ロングリーチから北約130 km地点に着地した事を確認した。

4.2 落下地点での作業

翌朝5時、クレーン付ビークル1台、荷車付きビークル1台で落下点へ向け出発した。GPS座標を頼りに8時頃には周辺10 km地点にまで到達したものの、個人の農地であるため交渉が必要であったり、地図に記載のない川(水たまり)に阻まれたりと、苦戦を強いられた。なんとかパイロードを発見する事ができたのは正午前であった。

図2-2のようにゴンドラ兼与圧容器は上下逆さまに接地していた。1本のトラスが大きく湾曲し(着地の衝撃を緩和するクッションとして機能したようである)、4つ足のうち1カ所で着地した様子であった。風船式与圧容器内の10 cm厚の断熱材(発泡スチロール)で囲まれたエマルジョンチェンバーには、落下による損傷は無かった。この時点でチェンバー周囲の温度は断熱材の効果もあり、17°C以下に保たれていたことが確認出来た。現場でのチェンバーの取り外しは行わず、周囲に冷媒を配置し、与圧容器ごとクレーン車でロングリーチ空港内の基地にまで持ち帰ることにした(図2-4)。電池の取り外し、パラシュートの回収、トラスの解体、荷台への積み込み等の作業は約2時間で完了し、ロングリーチ空港へ引き返した。

4.3 エマルジョンチェンバーの取り外し

17:30頃ロングリーチ空港へ帰還し、19時頃エマルジョンチェンバーの取り外し作業を行った。本実験から与圧容器を導入したことによってラミネート袋で真空パックしたままエマルジョンチェンバーを搭載することが可能になったため、作業を明室で行え、PI1名でも迅速に進めることができ、数時間後にはホテルの冷蔵庫への移し替えることができた。図3に打ち上げから回収までのエマルジョンチェンバー周辺の温度データを示す。

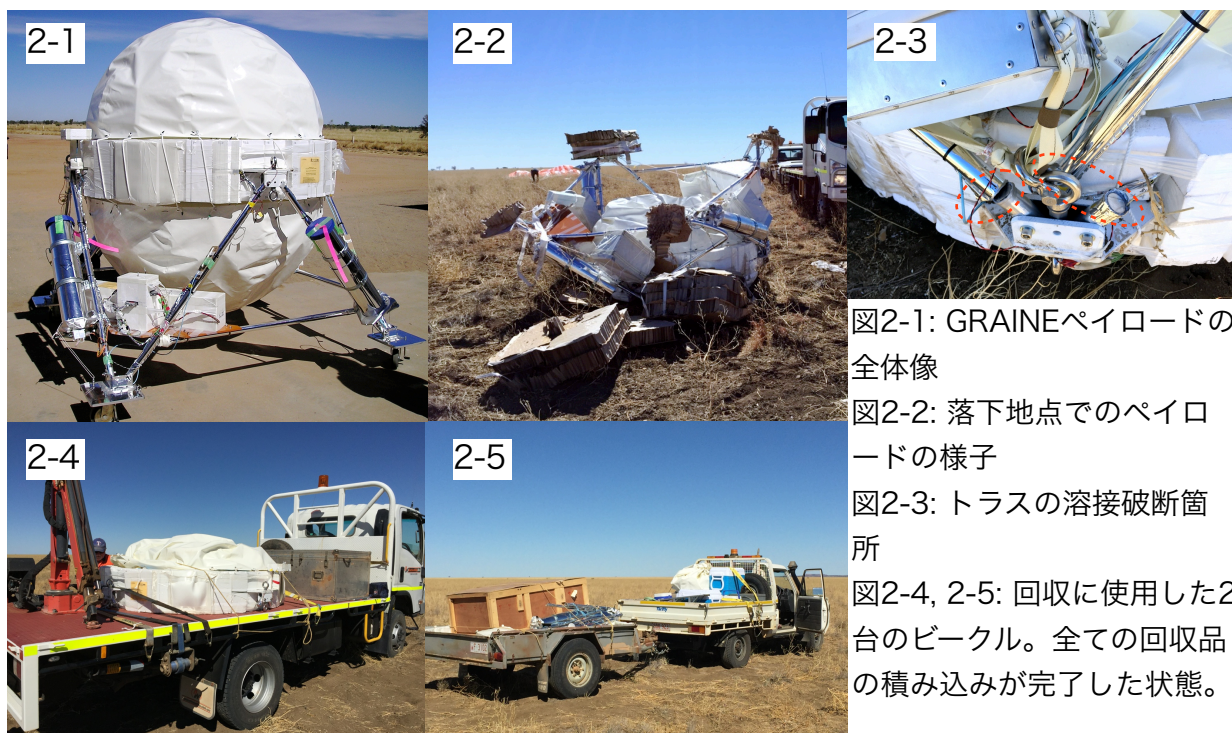


図2-1: GRAINEパイロードの全体像

図2-2: 落下地点でのパイロードの様子

図2-3: トラスの溶接破断箇所

図2-4, 2-5: 回収に使用した2台のビークル。全ての回収品の積み込みが完了した状態。

4.4 課題

GRAINEの次期フライトに向けた課題点をいくつか挙げておく。今回、回収拠点であるロングリーチから比較的近い場所にパイロードを落下させることが出来、また正確なGPS座標も得られたが、陸路でのアクセスにはかなり悪戦苦闘した。回収に迅速さが求められる場合、ヘリ等による空路からのアクセスが非常に有効だと思われる。搭載したクラッシュパッドは大部分が潰れておらず、70 cm四方の天板の剛性が不十分であった。図2-3に示すようにトラスの付け根部分の溶接箇所が落下の衝撃で破断していた。今後、溶接による接合が強えられる場合、その強度の見積もりをどのようにすべきか十分な検討が必要である。

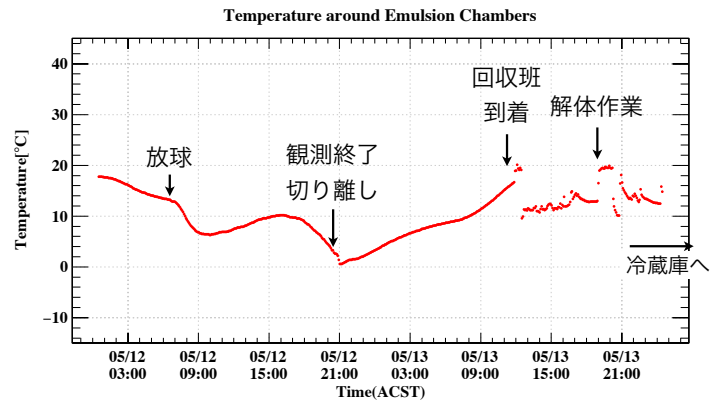


図3: エマルジョンチェンバー周辺の温度

5. フライトフィルムの性能

現像したエマルジョンフィルムを日本に持ち帰り、自動飛跡読取装置による飛跡データのパイロットスキャンを行った。飛跡認識効率の評価結果を図4に示す。最小電離粒子に対して期待通りの高い認識効率が確認できた。

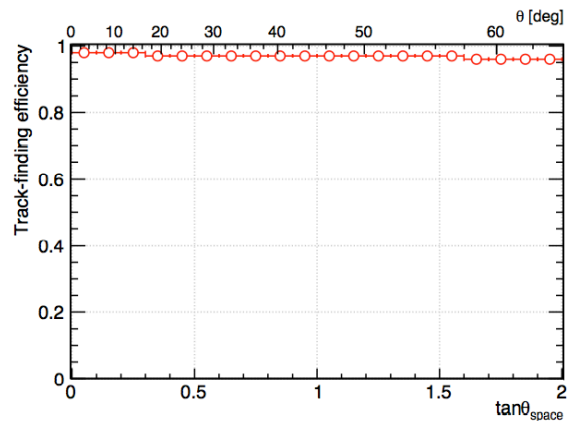


図4: フライトフィルムの自動飛跡読取装置による認識効率の入射角度依存性[4]

6. まとめ

GRAINE計画で初となる海外での気球フライトは無事成功した。搭載したエマルジョンフィルムを最善の状態で見測後の解析に乗せるため、シドニー大学に拠点を設け、フェーディング対策のための調湿、スタッキング、パッキング作業をフライト直前に実施した。加えて、大気球実験室、アリススプリングス放球基地スタッフらの協力により、パイロードの迅速な回収が実現され、観測後のエマルジョンチェンバーを低温状態に保ちつつ現像ファシリティへと運搬することが達成出来た。

現在、全搭載フィルムについて連続的なデータ取得、性能評価が進行中である、期待通りの高い飛跡認識効率が確認されている。詳しくは[5][6]を参照されたい。

- [1] 青木茂樹 他,2004-2011, 2013年度大気球シンポジウム報告., 高橋寛 他,2007-2009,2014年度大気球シンポジウム報告. 等
- [2] 高橋寛 他,2015年度大気球シンポジウム報告.
- [3] S.Takahashi et al. Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 043H01, H.Rokujo, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 701 (2013) 127.
- [4] K.Ozaki et al., JINST (in prep.)
- [5] 吉本雅浩 他,2015年度大気球シンポジウム報告.
- [6] 河原宏晃 他,2015年度大気球シンポジウム報告.