

GRAINE 計画：2011 年度気球実験報告

神戸大学	○高橋 覚, 青木 茂樹, 尾崎 圭太, 釜田 啓樹, 柴山 恵美, 鈴木 州, 田輪 周一, 中川 諒, 原 俊雄, 水谷 早希, 水谷 深志
愛知教育大学	児玉 康一
ISAS/JAXA	斎藤 芳隆, 田村 啓輔, 濱田 要, 吉田 哲也
宇都宮大学	佐藤 禎宏, 手塚 郁夫
岡山理科大学	伊代野 淳
名古屋大学	石黒 勝己, 河原宏晃, 北川 暢子, 駒谷 良輔, 小松 雅宏, さこ 隆志, 佐藤 修, 鈴木 和也, 中 竜大, 中塚 祐司, 長縄 直崇, 中野 敏行, 中村 光廣, 丹羽 公雄, 宮西 基明, 森島 邦博, 吉田 純也, 吉本 雅浩, 六條宏紀

1. はじめに

近年の宇宙観測では、電波から超高エネルギーガンマ線にいたるまで、多波長にわたる観測が進展している。その中で高エネルギーガンマ線の観測は、宇宙における高エネルギー現象に対して直接的な知見をもたらす。最近のフェルミ望遠鏡の観測により、この高エネルギー帯域におけるガンマ線の観測は大きく進展している。その一方で、未同定天体の解明や、更なる高解像度での観測、及び偏光観測など新たな課題も浮かび上がりつつある。

2. GRAINE 計画

エマルションフィルムは、少ない物質質量($\sim 10^{-3}X_0$)で、高い空間分解能($< 1\mu\text{m}$)をもつ、強力な飛跡検出器である。エマルションフィルムで、ガンマ線による電子対生成の始まりを捉えることで、ガンマ線に対して優れた角度分解能、及び直線偏光に対する感度を持つことが期待できる。

我々は、エマルションフィルムから成る大口径面積(10m^2)のガンマ線望遠鏡を開発し、長時間気球フライト(~ 7 日間)を繰り返し、宇宙ガンマ線の観測を目指す。この計画を GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion) 計画と呼ぶ。

エマルションガンマ線望遠鏡は、コンバーター、タイムスタンプ、カロリメーター、そして姿勢モニターから成る。エマルションフィルムを積層したコンバーターで電子対の始まりを捉え、捉えた事象に対して、タイムスタンプでタイムスタンプを押し、その時刻情報を基に姿勢モニターの情報と併せることで、ガンマ線の天球に対する到来方向を決定する。

はじめに、口径 $1/10\text{m}$ で 3 時間程度のフライトをおこない、各構成要素の動作・性能試験、及びそれらの連動試験、またバックグラウンドとなる大気ガンマ線の実測をおこなう。次に、口径 $1/2\text{m}$ で 1 日程度のフライトをおこない、既知の明るいガンマ線天体の観測による、オーバーオールでの性能実証をおこなうと共に、最高解像度での観測の開始を目指す。そして、観測面積、フライト時間の拡大を図り、フェルミ望遠鏡と同程度の exposure を目指し、科学観測を開始する。

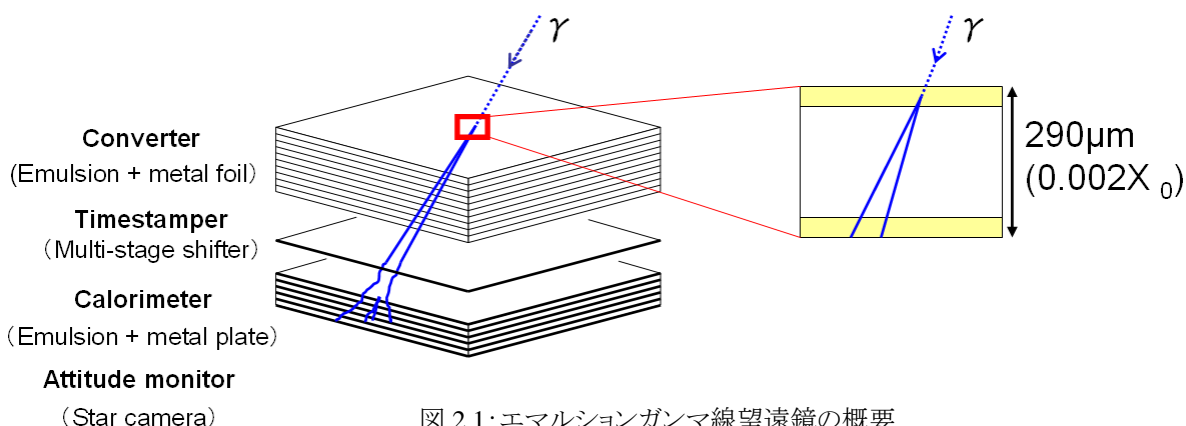


図 2.1: エマルションガンマ線望遠鏡の概要

3. 2011 年度気球実験

2011 年 6 月 8 日に、大樹航空宇宙実験場(北海道)において、JAXA 大気球実験をおこない、口径面積 $12.5\text{cm} \times 10\text{cm}$ で、フライト時間 4.3 時間(そのうち高度 35km の水平浮遊 1.6 時間)のフライトに成功した。この実験では、はじめのステップとなる各構成要素の動作・性能試験、及びそれらの連動試験、またバックグラウンドとなる大気ガンマ線の実測を目的とする。

4. フライトデータ解析

フライトデータ解析では、バックグラウンド飛跡が蓄積している中から、電子対のトポロジーを要求することで、ガンマ線事象が捉えられることを実証し、エマルジョンフィルム全面(12.5cm×10cm)にわたり、エネルギーで低いほうで 50MeV まで、入射角(各投影角)で±45 度までのガンマ線事象を、信頼性 97%で系統的に検出した。また、タイムスタンプである多段シフターは、気球フライト環境下において動作することを確認し、エマルジョンの飛跡にサブ秒のタイムスタンプを押した。

捉えたガンマ線事象に対して、±1 秒のタイムウィンドウを開き、一点収束を要求することで、ハドロン interaction が捉えられ、ハドロンに誘起されたガンマ線が識別できる(図 4.1)。また、±1 秒のタイムウィンドウを開き、位置と角度の一致をとることで、電子候補が捉えられ、電子に誘起されたガンマ線が識別できる(図 4.2)。これらの検出器内で発生しているガンマ線を識別することで、バックグラウンドが抑えられるだけでなく、ガンマ線の到来方向、時刻、エネルギー、偏光、検出効率などの校正用線源として利用できる。実際に、ハドロン誘起事象の一点収束性を利用し、また電子誘起事象の平行性を利用することで、ガンマ線の角度分解能を評価した(図 4.3)。そして、実際のフライトデータにおいて、高い角度分解能が得られていることを示した。また、ハドロン誘起事象について、ハドロン飛跡集団で時刻重心をとり、ガンマ線事象のタイムスタンプと比較することで、ガンマ線のタイムスタンプ精度を評価した。そして現状で、タイムスタンプ精度として 0.21 秒を得、ガンマ線の天球上へのポインティングに必要な秒以下の時間分解能が得られていることを示した。

エマルジョンは全ての荷電粒子の飛跡を記録する。本解析において、再構成した事象や飛跡の情報(時刻、位置、角度など)を使い、オフラインでトリガーがかけられる手法(オフライントリガー手法)を創出した。また、実際のフライトデータを使ったガンマ線の評価・校正手法を創出した。

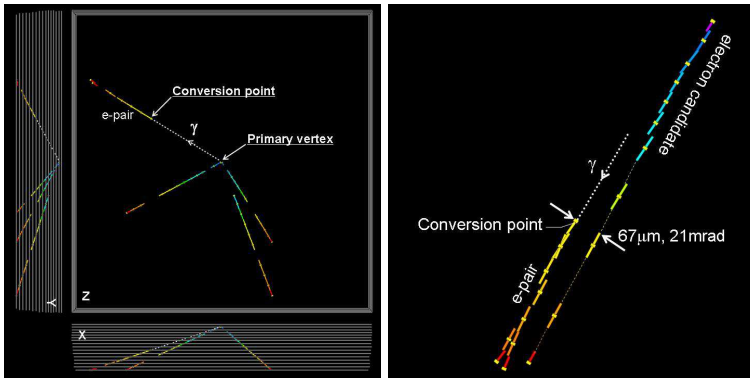


図 4.1: ハドロン誘起ガンマ線事象の 1 例(コンバーター領域) 1.2cm×1.2cm×16films)。
図 4.2: 電子誘起ガンマ線事象の 1 例。 67μm, 21mrad

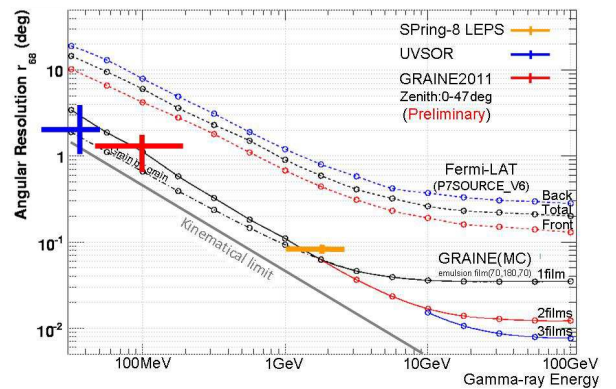


図 4.3: エネルギーごとの角度分解能をフェルミ望遠鏡と比較。誤差棒付きの点は実験データを表す。実線はエマルジョン望遠鏡の場合のシミュレーション、破線はフェルミ望遠鏡の打ち上げ後の角度分解能をそれぞれ表す。

識別した検出器内で発生しているガンマ線を除き、大気ガンマ線フラックスの導出を進めている(図 4.4)。現状で、導出したガンマ線フラックスは、過去の測定との一致が見られている。

また、姿勢モニターであるスターカメラは、日中において動作することを確認し、仰角と方位角について十分なモニター精度が得られることを確認した。そして、ゴンドラの回転速度 <0.15deg/sec(95%含有)と、実際のフライトデータで確認したガンマ線事象のタイムスタンプ精度 0.21 秒を併せることで、姿勢決定精度 <0.03deg が得られることを実証した。

ガンマ線事象を捉え、タイムスタンプを押し、姿勢情報を併せることで、ガンマ線の天球に対する到来方向を決定する一連の流れを確立し、GRAINE におけるファーストライトに成功した。

5. 次期気球実験に向けて

最後に、次期気球実験について述べ、締めくくる。次に、アリススプリングス(豪)での、JAXA 国際大気球実験に向けて、現在準備を進めている。次期気球実験では、口径面積 20 倍(2500cm²)で、1 日程度のフライトをおこない、高エネルギーガンマ線帯域で一番明るい Vela の観測による、オーバーオールでの性能実証を目指すとともに、最高解像度でのガンマ線天体の観測を開始する。

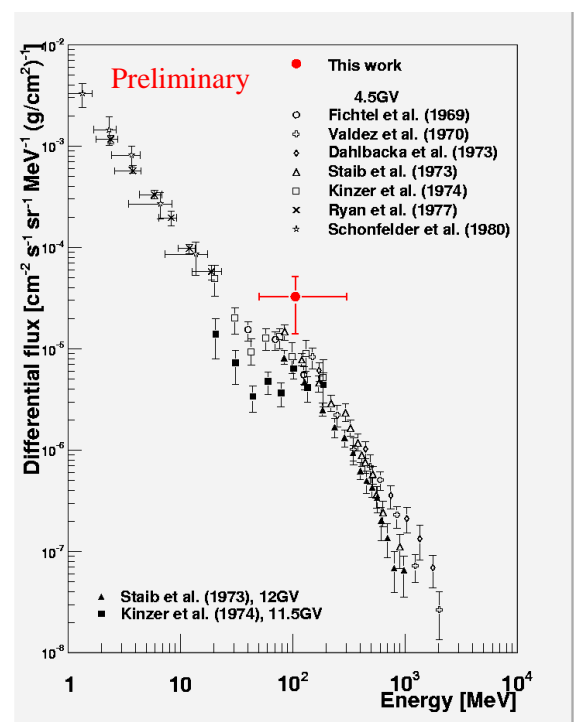


図 4.4: 大気ガンマ線フラックス。

アリススプリングスにおける Vela の南中時刻は、11 月 15 日の場合、現地時間で早朝 5 時となる。天頂角 45 度領域(エマルジョン望遠鏡の視野に相当)における、Vela の天頂角の時間推移を図 5.1 に示す。Vela の天頂角の時間推移を考慮し、天頂角 45 度領域に入り始めてから、出て行くまで観測した場合における検出有意度を図 5.2 に示す(>100MeV、口径面積 12.5cm×10cm×20 ユニット、5g/cm²)。6.5 時間の観測により、4.7σ の検出有意度となる。また、エネルギー下限値を上げていけば、角度分解能は反比例して向上するので、シグナル/ノイズ比は二乗に比例して向上し、検出有意度は比例して向上するので、5σ 以上での検出は可能である。また、5g/cm² より高い気球高度が実現すれば、宇宙ガンマ線の大気による吸収が減り、かつ大気ガンマ線バックグラウンドが減少するので、さらにシグナル/ノイズ比、および検出有意度は向上する。

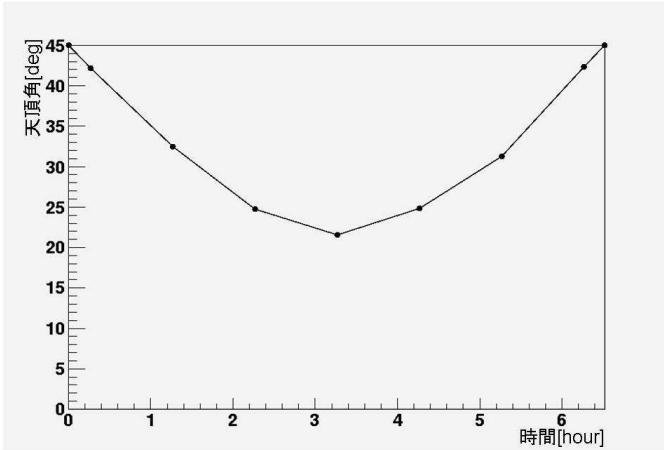


図 5.1: Vela の天頂角の時間推移。横軸は、天頂角 45 度領域に入り始めを 0 とし、そこからの経過時間を表す。

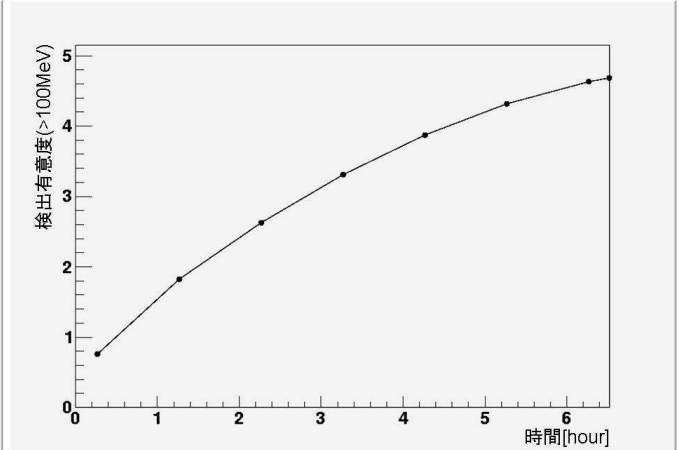


図 5.2: 観測時間に対する Vela の検出有意度(>100MeV、口径面積 12.5cm×10cm×20 ユニット、5g/cm²)。横軸は、天頂角 45 度領域に入り始めを 0 とし、そこからの観測時間を表す。

ここで、エマルジョンガンマ線望遠鏡の性能を飛躍的に改良するアイデアについて紹介する。コンバーターにおいて飛跡検出部でもある乳剤層をガンマ線の主標的とし、電子対生成点の直下において銀粒子ごとの精密測定をおこなうことで、多重電磁散乱をより抑えた測定が実現する(特に GeV 以下において有効)。それによって、角度分解能が向上し、それに伴い点源検出感度、解像度、シグナル/ノイズ比が向上する。また、シグナル/ノイズ比の向上と併せ、電子対の方位角のぼやけが小さくなることにより、ガンマ線偏光に対する感度も向上する。さらに、これまで多重電磁散乱で埋もれていた、電子対生成時の反跳運動量が見えてくるので、反跳運動量も組み合わせた偏光分析が可能となり、偏光感度のさらなる向上が期待できる。また、電子対生成点が乳剤層中であることから、反跳電子を伴う電子を標的とした電子対生成事象(電子標的事象)に対する識別効率が向上する。電子標的事象は、事象頻度は低い、運動学的に完全に再構成できるので、角度分解能、偏光感度の改善に寄与する事象と成り得る。

次期気球実験では、乳剤層をガンマ線の主標的とするために、コンバーターをエマルジョンフィルムのみの積層構造にする。これはまた、温度・湿度に対する伸縮が同じものだけの積層構造になるので、フィルム間のズレにも強くなる。エマルジョンフィルムは、2011 年度気球実験で一部に導入した高感度原子核乳剤(高銀化された乳剤)フィルムに全面的に置き換え、片層乳剤厚を 44μm から 70μm にすることで、2011 年度気球実験ではフィルム間に挟んでいた銅箔 50μm のコンバージョン効率が補え、かつ厚みの増加もほぼない(実際はベース厚が 205μm から 180μm になる予定なのでトータルの厚みはやや薄くなる)。このようなセットアップの場合における角度分解能についてはシミュレーションで確認が成されている(図 4.3、点鎖線)。

多重電磁散乱をより抑えた測定をするうえで、輻射長がより長い低銀量の乳剤がより良い。低銀量にし、コンバージョン長が長くなった分を、乳剤厚を厚くすることで補った場合、トータルの厚みが増えるので、横抜けによる損失率は増大する。しかし、横抜けによる損失率は、エマルジョンフィルムのユニット面積を大きくすることで、抑えられる。今後は、エマルジョンフィルムのユニット面積の最大化を図り、次期気球実験や加速器ガンマ線ビーム照射試験をおこない、それらをもとに、結晶サイズ、銀量、乳剤厚、ベース厚、フィルム枚数などの最適化を図っていく。

タイムスタンプである多段シフターの次期フライトモデル(図 5.3、右)では、12.5cm×10cm サイズにくりぬいたステージ板(SUS)の上に、一回り大きいエマルジョンフィルムを貼り付ける。ステージ板を貫通する領域は、エネルギー閾値は上がるが、トータルでの有効面積は増える。また、平面性の向上が期待できる。また、取り扱うユニット数を減らせる。このとき、フィルム間距離(飛跡の外挿距離に相当)は 1.5mm となる(図 5.4、左)。最終段である 3 段目のステージ板は、設計段階では 2mm 厚としたが、これを 1mm 厚にすることで、2-3 段間にスペースがつかれ、2 段目のステージ板の下側にもフィルムを貼り付けることで、2-3 段間のフィルム間距離を 3 分の 1 の 0.5mm にすることができる(図 5.4、右)。特に連続稼働させる 3 段目については、時間分解能はフィルム間距離に比例する。

また、段間の飛跡再構成の際に発生するチャンスコインシデンス率は、フィルム間距離の二乗に比例する。この改良によって、時間分解能で3倍の向上、蓄積時間で9倍の長時間化が実現する。

2011年度気球実験では、最終段を連続稼動にするアイディアに基づき時間分解能を追及し、稼動速度 50 $\mu\text{m}/\text{sec}$ で時間分解能 60msec(垂直入射)を実現した。このときのフィルム間距離は 1mm であった。次期気球実験におけるオペレーションの詳細については今後詰めていくが、最終段を 2011年度気球実験と同じ 50 $\mu\text{m}/\text{sec}$ の速度で動かせば、30msec の時間分解能が可能であり、より速い速度で動かせば、ミリ秒オーダーの時間分解能も十分射程圏内となる。

Vela 放射は 89msec 周期のパルス放射が支配的であり、そのパルス成分の時間分解が可能となる。オフパルス成分を除けば、Vela 放射に対する検出有意度やシグナル/ノイズ比が高められる。パルス成分を抽出すれば、パルス成分の詳細な解析が実現する。将来的にはパルス位相ごとの偏光測定も拓けてくる。次期気球実験ではパルス成分の時間分解を目指す。

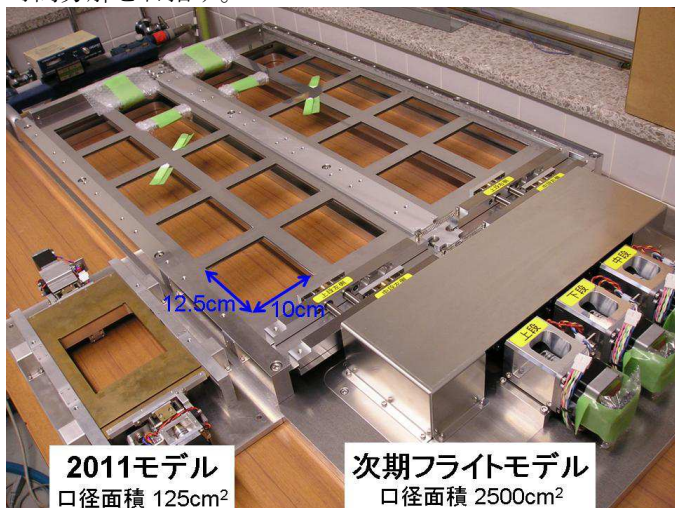


図 5.3: 多段シフターフライトモデル

改良前		改良後	
エマルジョンフィルム	フィルム間距離 1.5mm	エマルジョンフィルム	フィルム間距離 0.5mm
2段目ステージ板		2段目ステージ板	
エマルジョンフィルム	エマルジョンフィルム		
3段目ステージ板	エマルジョンフィルム		
		3段目ステージ板	
改良前	改良後	前後比	(前後比) ²
1.5mm	0.5mm	1/3	1/9

図 5.4: 改良前後におけるフィルム間距離

エマルジョンフィルムは、2011年度気球実験の際に一部に導入した、新型原子核乳剤フィルムに全面的に置き換える。それによって、飛跡検出効率やシグナル/ノイズ比が向上し、解析作業の効率化や処理負荷の低減が図れる。また、バックグラウンド飛跡の除去能力が~1000倍向上、ガンマ線事象の検出効率が~2倍向上、そしてより低いエネルギー閾値(~25MeV)を実現する。前述したように、コンバーターについては、高銀量のエマルジョンフィルムに、タイムスタンパーやカロリメーターについては、低銀量のエマルジョンフィルムに全面的に置き換える。

また、2011年度気球実験では、一部のエマルジョンフィルム間においてズレが見られた。次期気球実験では、与圧容器を導入し、フィルムスタックを真空パックする。真空パックにより、堅牢なスタックが実現するので、フィルム間のズレを抑制し、密着性や平面性の向上にもつながる。また、密閉パックにより、外気と遮断できるので、フィルムを低湿度でパックすることにより、実験後の回収までにうけるフェーディングの抑制にもつながる。また、真空パックは遮光や防水も兼ねるので、露光や水没によるダメージを防ぎ、エマルジョンフィルムの確実な回収が見込める。現在、望遠鏡の視野範囲の物質量を極力抑えるために、ATIC グループによる化学繊維とプラスチックフィルムから成る球殻状の与圧容器を踏襲し、製作を進めている。

姿勢モニターであるスターカメラは、フードの見直し、より高感度な CCD カメラの採用、多方向(3方向を予定)にすることで、ほぼ 100%の姿勢決定率、及び姿勢決定精度(特に視線方向回りの回転)の向上を目指す。

これまでに述べた改良点は、2011年度気球実験の経験や実績を基に見出した。これも 2011年度気球実験の成果である。

気球実験後のエマルジョンフィルムの現像については、オーストラリア国内での現像を目指す。昨年度の2月末~3月初めにかけて、放球地であるアリススプリングスの視察の際に、シドニー大学に立ち寄り、シドニー大学での現像の可能性について交渉をおこなってきた。そして現在は、シドニー大学での現像に向けて、前向きに検討を進めており、現像場所や廃液処理などの具体的な手配を進めている。オーストラリア国内での現像については、目処がついた。

参考文献

青木茂樹 他, 2004~2012 年度大気球シンポジウム報告.
 S. Aoki et al., Advances in Space Research Vol.37(COSPAR 2004 Proceedings) pp.2120-2124.
 高橋寛 他, 2007~2009, 2011,2012 年度大気球シンポジウム報告.
 S. Takahashi et al., Nucl. Instr. And Meth. A, 620 (2010) 192-195.
 六條宏紀 他, 2010, 2011, 2013 年度大気球シンポジウム報告.
 尾崎圭太 他, 2011,2012 年度大気球シンポジウム報告.
 H. Rokujo et al., Nucl. Instr. And Meth. A, 701 (2013) 127-132.