

GRAINE 計画:2018年豪州気球実験における コンバーター解析報告

○中村悠哉¹、GRAINE collaboration²

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

1 はじめに

ガンマ線は複雑な星間磁場の影響を受けず地球に到来するため宇宙の高エネルギー現象の起源を探る上で非常に重要なプローブとなる。2008年に打ち上げられフェルミガンマ線宇宙望遠鏡によってそれまでの10倍以上にもなる5000個以上のガンマ線天体が検出され、ガンマ線天文学は飛躍的に進歩した。そのような大統計観測が実現した一方で、他波長に比べて分解能が桁違いに低いことや、宇宙線加速機構の理解に重要な偏光観測ができていないことなど課題も多く残っており、観測データの質的な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)はサブミクロンの高い空間分解能を持ち、3次元的に荷電粒子の通過位置を記録することができる飛跡検出器である。エマルジョンフィルムを用いることでガンマ線の電子対生成反応点直下で精密に電子対の角度を測定することができる。そのため多重電磁散乱の影響を抑えることができ、ガンマ線(10 MeV-100 GeV)に対する角度分解能はFermi-LATと比べ一桁近く改善され、電子対放出面の方位角の測定も可能となりガンマ線の偏光情報も得ることができる。

我々は原子核乾板からなる大面積($\sim 10\text{m}^2$)、広角(天頂角: $0^\circ \sim > 45^\circ$)の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ことでガンマ線天体の精密観測を目指すGRAINE計画を推進している[1]。これまでに2011年大樹町、2015年、2018年オーストラリア・アリススプリングスで気球実験により原理実証、性能実証を行ってきた[2][3][4]。2018年実験(GRAINE2018)では高輝度ガンマ線天体(Velaパルサー)を1度以内の角度分解能($\geq 100\text{MeV}$)で検出することによる望遠鏡の総合性能実証を目的とした。本講演では電子対生成反応からガンマ線の角度やエネルギーを決定するコンバーター部に関して、2018年気球実験で得られたフライトデータの性能評価について報告する。

2 GRAINE2018年気球実験

2018年4月26日、オーストラリア・アリススプリングスにて口径面積 $\sim 0.4\text{m}^2$ の望遠鏡を用いた気球フライトを実施した。総飛翔時間は17時間21分、水平浮遊時間は14時間44分と、目標天体であるVelaパルサーの観測可能時間を全て確保するフライトを実現することができた。翌日の早朝には検出器を回収、現像拠点であるシドニー大学まで輸送し、12日間かけて実験に使用した489枚($\sim 44\text{m}^2$)のフィルム全ての現像処理を完了した。日本に持ち帰ってきたフィルムは名古屋大学で開発された超高速自動飛跡読み取り装置(HTS)を用いて、およそ4ヶ月かけて読み取りを完了した。フライトフィルムの荷電粒子に対する飛跡検出効率、飛跡接続精度ともに要求性能を満たすような値であることが確認された[5]。

3 コンバーターフライトデータ性能評価

3.1 検出器内部ガンマ線源を用いた評価

図1は検出器内部のガンマ線源を用いた角度分解能の評価手法の概念図である。観測中は一次宇宙線陽子なども検出器に入射しており、その一部はコンバーター内でハドロン反応を起こし多数の二次粒子を生成する。この際に生成される π^0 は寿命が非常に短く即座に2本のガンマ線に崩壊し、このガンマ線がコンバーター下流で電子対生成反応を起こすことがある。このような事象において、ハドロン反応と電子対生

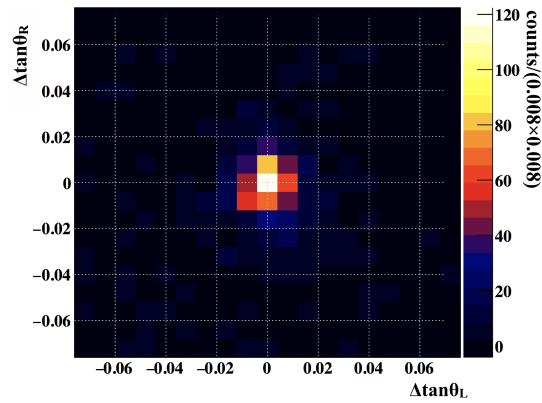
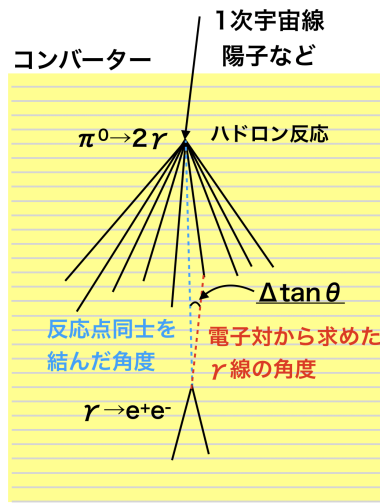


図 2: 100-300 MeV、 $0.15 \leq \tan\theta \leq 0.6$ での $\Delta \tan\theta$ の評価結果。

図 1: ハドロン反応起因のガンマ線を用いた角度分解能評価の概念図。

成の反応点同士を結んだ角度と電子対から求めたガンマ線の角度の角度差 ($\Delta \tan\theta$) を評価することで検出したガンマ線の角度分解能を評価することができる。

図 2 は 100-300 MeV、 $0.15 \leq \tan\theta \leq 0.6$ 、Vela 観測時間中のガンマ線を用いた時の $\Delta \tan\theta$ の二次元分布である。フィルム深さ方向を z 軸、z 軸に直行し反応点同士を結んだベクトルの進行方向を R 軸、z 軸、R 軸と直行する方向を L 軸と定義している。 $\Delta \tan\theta_{R,L} = 0$ を中心としたピークが検出されており、ガンマ線によってハドロン反応点をイメージングすることができている。さらに、 $-0.025 \leq \Delta \tan\theta_{L,R} \leq 0.025$ で R,L 軸にプロジェクションしてガウスフィットして広がり进行评估し、反応点同士を結んだ角度の不定性を差し引くことでガンマ線の角度分解能を求める [6]。 $\tan\theta \leq 1.0$ の範囲を 3 領域に分けて 100-300 MeV のガンマ線で評価した結果が図 3 である。上空での観測時間中のガンマ線が要求性能である 1 度以内の角度分解能を広い角度範囲で満たしていることが確認された。

Vela パルサー検出には 100-300 MeV が主要なエネルギー帯となるが、将来実験を見据えてより高エネルギー側の評価も行った。 $0 \leq \tan\theta \leq 0.15$ の領域で角度分解能のエネルギー依存性を評価した結果が図 4 である。それぞれ 100-300, 300-500, 500-700 MeV 領域で評価しており、エネルギーが高くなるにつれて電子の多重電磁散乱の影響が小さくなるため角度分解能が良くなっていく傾向が見られる。シミュレーションにより求めた角度分解能 (図中、黒実線) と比較しても同程度の値となっており、実際のフライトデータが期待される性能を発揮していることが確認された。

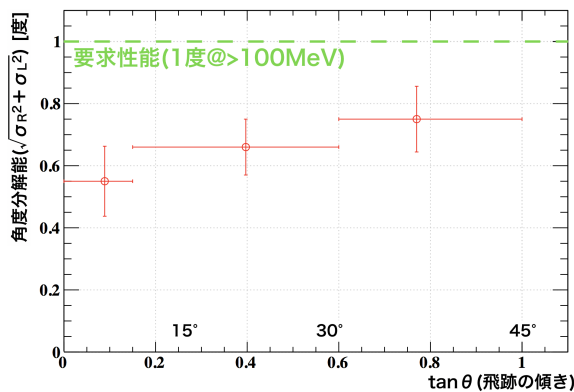


図 3: 100-300 MeV のガンマ線角度分解能評価結果。

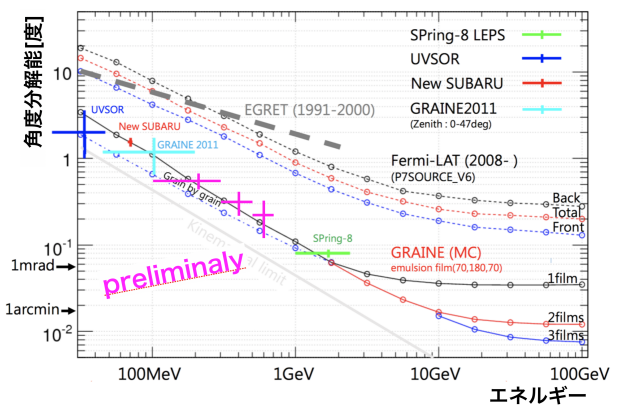


図 4: 角度分解能のエネルギー依存性の評価結果とシミュレーションとの比較。黒実線がシミュレーションから期待される角度分解能、マゼンダが今回の評価結果。

π^0 が崩壊して生成した 2 本のガンマ線が共にコンバーター内で電子対生成を起こすことがある。この 2 本のガンマ線のエネルギーと角度から不変質量を算出すると π^0 の不変質量である 135 MeV になることが期待されるため検出したガンマ線のエネルギー決定精度を評価することができる。角度分解能評価の際に求めた $\Delta \tan \theta$ で 3σ 以内のものをハドロン反応由来のガンマ線として、一つのハドロン反応に対して 2 本以上ガンマ線が付随したイベントに関して不変質量を計算した。3 本以上のガンマ線が付随しているイベントに関しては全ての組み合わせで計算した。その結果が図 5 である。バックグラウンド分布は付随した 2 本のガンマ線のエネルギーをシャッフルして不変質量を算出することをイベント毎に 10 回繰り返し、260 MeV 以上のビンで規格化して作成した。部分的なデータのみを用いた解析となり今後 2 倍近く統計が増える見込みだが、今回の評価で期待される 135 MeV 付近に優位な信号が見られる結果となった。

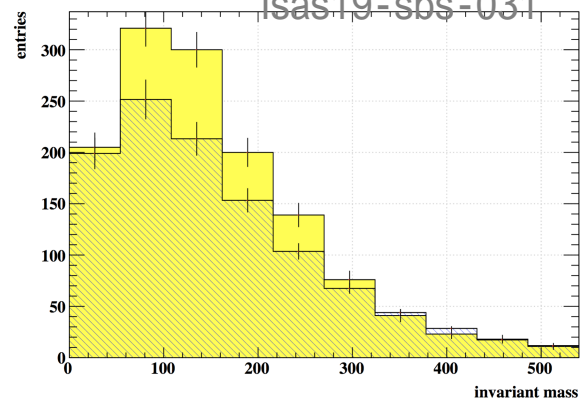


図 5: ハドロン反応由来の 2 本のガンマ線で算出した不変質量分布。青斜線はバックグラウンド分布。(ガンマ線 100 MeV 以上)

3.2 検出器外部ガンマ線源を用いた評価

エマルジョンガンマ線望遠鏡を搭載した与圧容器ゴンドラと科学観測用大気球は放球プレートと呼ばれる金属板(アルミニウム ~4.6kg、ステンレス ~6.2kg)を介して繋がっており、この放球プレートは上空での観測中も常に検出器の約 4m 上方に存在している。このプレートに一次宇宙線陽子などが入射すると前節同様に π_0 起因のガンマ線を生成するため、検出器外部のガンマ線源として観測時間中の検出器感度や結像性能を確認することができる。期待される放球プレート方向を 0 とし、検出されたガンマ線の角度ずれ分布を半径 10mrad の円でスムージングした結果が図 6 である。X,Y の二軸で像の広がり进行评估し二乗和平方根をとると 1.1 ± 0.1 度となり、外部のガンマ線源に対して 1 度程度の結像性能を有していることが確認された。この評価では放球プレート自身が大きさを持っているため、点光源を観測した際にはこれよりも良い結像性能が得られると期待される。また、角度ずれ 3.0 度以内をシグナル領域、3.0-6.0 度の円環内をバックグラウンド領域として定義し、検出された放球プレートからのガンマ線数を見積もると、 104 ± 21 イベントとなり、前回の気球実験 (GRAINE2015) における同様な観測からの予測数 (110 ± 7 イベント) とコンシステントな値となり、期待される感度を有していることも確認された [7]。

3.3 大気ガンマ線フラックス測定

GRAINE の宇宙ガンマ線観測における主なバックグラウンドは、一次宇宙線陽子などと観測高度より上空の希薄な大気との相互作用により生じる π_0 起因のガンマ線である。これらは大気ガンマ線と呼ばれ、GRAINE2018 のフライトデータから大気ガンマ線フラックスを測定した結果が図 7 である。用いたガンマ線データはエネルギー範囲が 100-1000 MeV、Vela パルサー観測時間中のイベントでこの間の残留大気はおおよそ 4 g/cm^2 である。また、前々節で述べた検出器内で発生するガンマ線の混じり込みを減らすために、コンバーターを構成する 100 フィルムのうち上流側の 3-10 枚目のフィルムで検出されたイベントのみを用いている。GRAINE2018 の目的である Vela パルサー検出には 100-300 MeV が主要なエネルギー帯となり GRAINE2015 でもこの帯域の大気ガンマ線フラックスを測定していたが、今回初めて将来実験で目指す GeV 帯域の観測に向けて 1970 年代の実験データしかなかった 1 GeV 付近までのバックグラウンドの実測を自分たちの検出器で行うことができた [8]。

4 まとめ

我々は気球搭載型エマルジョンガンマ線望遠鏡による宇宙ガンマ線精密観測実験 GRAINE を推進している。GRAINE では 2018 年 4 月に天体検出による望遠鏡総合性能実証を目的とした気球実験を実施した。本

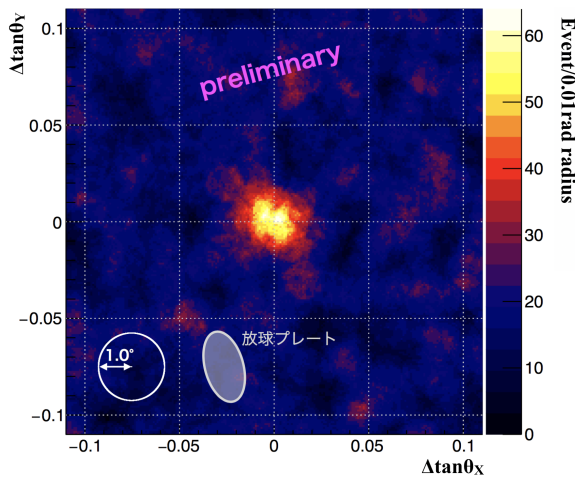


図 6: 検出されたガンマ線での放球プレートのイメージング結果。

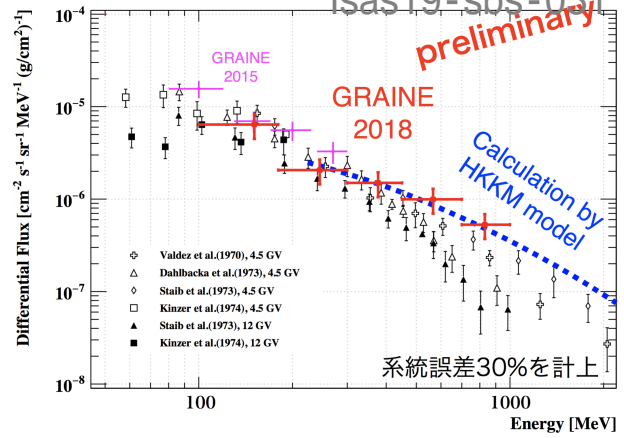


図 7: 大気ガンマ線フラックス実測結果。マゼンダ、赤十字が GRAINE2015,2018、白や黒の点が 1970 年代の気球実験、青点線は大気ニュートリノフラックス計算で用いられる HKKM モデルを元にした予想。

実験で得られたフライトデータに関して、コンバーター部で検出されたガンマ線の性能評価を行った。検出器内部のガンマ線源を用いた評価では Vela パルサー観測時間中、100-300 MeV のガンマ線で目標である 1 度以内の角度分解能を達成していることを確認するとともに、将来実験で重要な高エネルギー領域でもシミュレーションから期待される性能と同等な角度分解能がフライトデータでも出ていることを実証した。検出器外部のガンマ線源の評価では放球プレート自身が大きさを持つものの期待される 1 度程度の結像性能で放球プレートをイメージングすることができ、感度にも異常がないことが確かめられた。また、今回初めて GRAINE の観測で主要なバックグラウンドとなる大気ガンマ線のフラックス実測を 1 GeV までの広いエネルギー領域で行った。

参考文献

- [1] 青木茂樹 他,2004-2011, 2013,2016 年度大気球シンポジウム報告., 高橋寛 他,2007-2009,2014-2016 年度大気球シンポジウム報告. 等
- [2] H.Rokujo, et al., NIMA 701 (2013) 127-132., S.Takahashi, et al., PTEP. (2015): 043H01.
- [3] K.Ozaki, et al., JINST (2015): P12018., S.Takahashi, et al. PTEP. (2016): 073F01.
- [4] S.Takahashi et al., PoS ICRC2019, 607 (2019).
- [5] 中村悠哉 他, 2018 年度大気球シンポジウム報告.
- [6] Y.Nakamura et al., PoS KMI2019, 039 (2019).
- [7] 小宮山将広 他, 2019 年度日本物理学会秋季大会報告.
- [8] 六條宏紀 他, 2019 年度日本物理学会秋季大会報告.