

電子飛跡測定型広視野コンプトンカメラによる sub-MeV および MeV ガンマ線観測計画 (SMILE 実験)

京都大学大学院理学研究科 谷森 達, 窪 秀利, 身内 賢太朗, 株木 重人,
高田 淳史, 岡田 葉子, 西村 広展, 服部 香里, 上野 一樹

Observation for the celestial sub-MeV and MeV gamma rays by Electron Tracking Compton Camera

By

Toru Tanimori, Hidetoshi Kubo, Kentaro Miuchi, Shigeto Kabuki, Atsushi Takada,
Yoko Okada, Hironobu Nishimura, Kaori Hattori, Kazuki Ueno

Abstract: We developed the Electron Tracking Compton Camera (ETCC) with reconstructing the 3-D tracks of the recoil electron in Compton process for both sub-MeV and MeV gamma rays. By measuring both the directions and energies of a scattered gamma ray and a recoil electron, the direction of the incident gamma ray is determined for each individual photon. Also, a residual measured angle between the recoil electron and scattered gamma ray is powerful for the kinematical background-rejection. In order to test the performance of the ETCC for the observation of celestial sub-MeV gamma rays by the balloon-borne experiment, we have constructed the ETCC consisting of the 10 cm cubic Time Projection Chamber (μ -TPC) for 3-D electron tracking and the $6 \times 6 \times 13$ mm³ GSO crystal pixel arrays surrounding the μ -TPC for detecting scattered gamma rays, and also made the balloon-borne instrument to operate the ETCC. This instrument was launched on 1st September, 2006 from Sanriku Balloon Center, and flown during 7 hours. We obtained about 4 hours observation time at the altitude of 32~35 km.

Keywords ; MeV Gamma-ray Astronomy, Compton Gamma-ray Camera, Micro pixel Gas Chamber

概 要

我々は天文学のなかで最も未開拓な Sub-MeV, MeV ガンマ線の全天探査を行うために、電子飛跡検出型コンプトンガンマ線カメラ (ETCC) を開発した。この装置は従来のコンプトンカメラでは困難であった散乱電子の方向を測定し、入射ガンマ線の方向を決定できるばかりでなく、散乱電子と反跳ガンマ線の散乱角を用いた運動学的検証により高い雑音除去能力を持ち、高感度が期待できる。今回は宇宙観測の実証のために、宇宙環境下での動作試験、および宇宙拡散ガンマ線、大気2次ガンマ線の検出を目的として、10cm角 ETCC を製作、それを気球実験装置として組み上げ、気球用 Sub-MeV ガンマ線観測装置 SMILE を完成させた。2006年9月1日、三陸大気球観測所より放球され、7時間の飛行の後、無事に回収された。観測高度32~35kmで約4時間の観測に成功した。

1. 目的

近年、GeV および TeV ガンマ線天文学は飛躍的な進歩を遂げ、10mCrab 以下または同等の感度が後数年で達成されようとしている。しかし、1~30MeV の領域は COMPTEL による観測のみで他領域より 1桁以上感度が悪い。Sub-MeV 領域 (0.1~1 MeV) では全天探査そのものが行われていない。この領域は多くの天体からの放射が期待されながら、定常放射天体は未だ30個程度しか発見されていない。これは sub-MeV、MeV 領域に有効な測定手段が開発されていないためであり、宇宙物理では数少ない未開拓領域である。しかし、このエネルギー領域は、星の元素合成、ブラックホール、AGN の放射過程、初期銀河分布など宇宙物理から宇宙論にまたがる重要な問題が多い領域であり、GeV 領域で検出されている、約270個以上の多くの天体からの放射が期待される。高感度 sub-MeV および MeV ガンマ線観測を実現するには、大立体角で且つガンマ線の方向が数度の精度で測定可能で且つ雑音除去能力の高いイメージング装置による全天探査が必要である。我々は、以下に述べるような0.1~20MeV ガンマ線のコンプトン散乱による散乱電子の飛跡を3次元測定できる広視野コンプトン型ガンマ線カメラ (Electron Tracking Compton Camera : ETCC) を開発し、将来的には衛星に搭載し0.1~20MeV 領域で COMPTEL の10分の1 (10mCrab) の感度で全天探査を行いたいと考えている。本実験は、この装置のプロトタイプを用いて、6時間程度の気球観測を行い、宇宙拡散ガンマ線の測定と宇宙線の装置への影響測定および装置の性能評価を行うとともに、現在開発中の中規模装置 (現プロトタイプの50倍以上の有効面積を持つ装置) を用いた長時間気球観測による sub-MeV、MeV ガンマ線観測の計画立案の基礎データ取得を目指す。実験名は、Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment の頭文字を取り、SMILE とする。

2. 測定の具体的な方法

現在、我々は上で述べたように宇宙 sub-MeV および MeV ガンマ線探査用広視野ガンマ線カメラを開発している。CGRO 衛星 COMPTEL 検出器のような従来のコンプトン検出器 (図1左) は、入射ガンマ線がコンプトン散乱を起こした場所と反跳電子のエネルギー、散乱ガンマ線の方向とエネルギーしか測定しないために、入射ガンマ線の方向が円錐上にしか求まらない。そのため、宇宙線が検出器と衝突して作るバックグラウンドの除去が難しく、結果的に、打上げ前に予想された感度よりも1桁悪い感度しか達成できないことが打上げ後に判明した。我々は、図1右に示すような、コンプトン散乱による反跳電子の飛跡を3次元測定し、この情報を加えることで、入射ガンマ線の到来方向を1イベント毎に決定できる検出器の開発に成功した。この検出器はバックグラウンド除去能力が高いために、従来よりも高感度を達成できる。平成17年度夏までに、検出器に入射したガンマ線がコンプトン散乱した際の反跳電子の3次元方向とエネルギーを測定する10cm角 Time Projection Chamber (TPC) および散乱ガンマ線の位置とエネルギーを測定するシンチレータ・ピクセルアレイを組み合わせたガンマ線カメラを開発した (図2-4)。平成17年度後半には、10cm角サイズから、気球による天体ガンマ線検出を目指す30cm角ガンマ線カメラの最初の試作を開始したが、30cm角カメラは、TPC を取り囲むシンチレータのピクセル数が大幅に増え、回路が大規模になる。さらにこのガンマ線検出器の手法自体が全く新しい手法であ

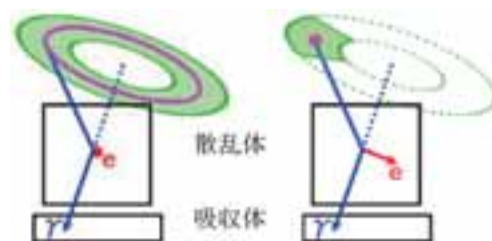


図1 (左) 従来型、(右) 我々の検出器

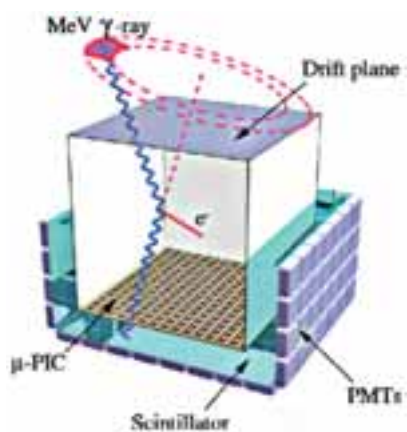


図2 MeVガンマ線カメラ構成

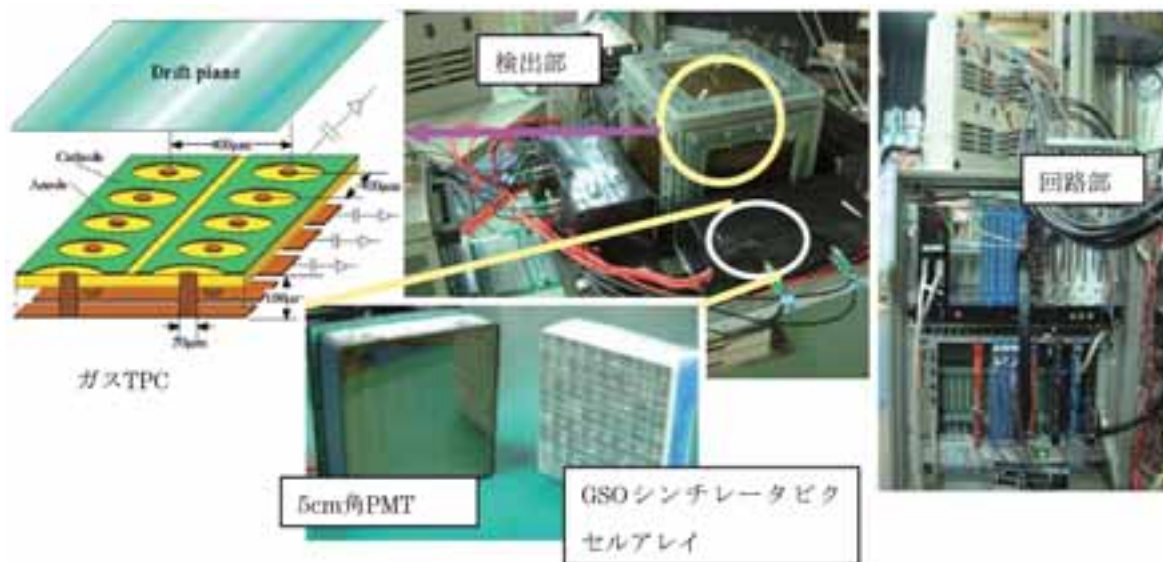


図3 開発したガンマ線カメラ ETCC

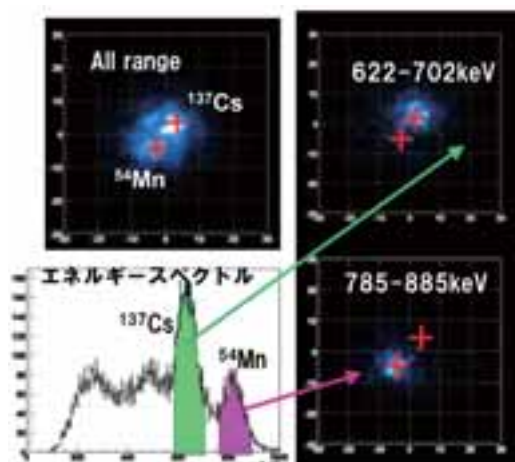


図4 検出器から40cm離れた位置に、二つの線源 Cs137 (662keV), Mn54(835 keV) を12cm離して置いた時の再構成画像とエネルギースペクトル。

り、30cm角カメラによる気球実験を行う前に、装置への宇宙線や装置の放射化などの環境雑音の測定と宇宙拡散ガンマ線の測定、同時に装置の気球環境下での動作特性を調べる必要があると判断した。そのため、運転中の小型10cm角カメラをベースにした小型ガンマ線カメラを用いた気球実験を平成18年度に行い、宇宙線および宇宙拡散・大気ガンマ線の角度依存性および気球環境下での装置の動作特性測定を行うことにした。シミュレーションでは、高度35km、6時間の観測で、宇宙拡散・大気ガンマ線は、0.1~1.0MeVにおいて、約200フォトン検出が予想された。

気球搭載機器は、図5に示すように、10cm角TPCおよびそれを取り囲む33個の5cm角マルチアノードPMTとGSOシンチレータ・6mm角ピクセルアレイからなるガンマ線カメラおよび宇宙線 veto用プラスチックシンチレータ、これらの装置の信号処理回路、データ処理記録装置を1.0×1.0×1.4m³のアルミ製圧力容器に入れ、内部を1気圧に保つ。TPCのガスは封じ込めで使用する。図6に示すように、電池・電源供給システムを圧力容器の外に置き、ゴンドラの大きさは、1.45×1.2×1.55m³、総重量は398kgである。この測定は宇宙線雑音の評価が主な目的なので、検出器は固定とし、姿勢制御は必要なく、モニター精度は数度でよい。

この装置で最も問題となったのは、電源供給システムによる発熱量(130W)である。最初のシステムでは、昼間の観測で太陽からの輻射が常にあった場合、許容範囲以上の110度という温度上昇が予想されたため、夜間の観測を想定していた。しかし、気球グループの助言により、放熱の改良を図7に示すように新たな銅板の放熱板を追加し、さらに、太陽輻射熱の吸収を減ずるため、放熱板を白く塗装する改良を行い、予想最高温度を60度まで下げることが成功し、昼間の観測を可能にした。図8に平成18年7月に宇宙科学研究本部で行った最終環境試験の結果を示す。10時間以上動作可能な範囲に収めることが可能となり、昼の観測が可能と判断した。

3. 観測

平成18年8月25日に装置を三陸大気球観測所に移動し、再組み立てを行い、数度の噛み合わせ試験を順調に行った。予定より一日早い9月1日朝6時11分に、図9にあるように放球を行った。気球はB100を使用し、総重量816.4kg(気球263.0kg、ゴンドラ397.6kg、荷姿25.8kg、バラスト130kg)、総浮力888.2kgであり、到達予

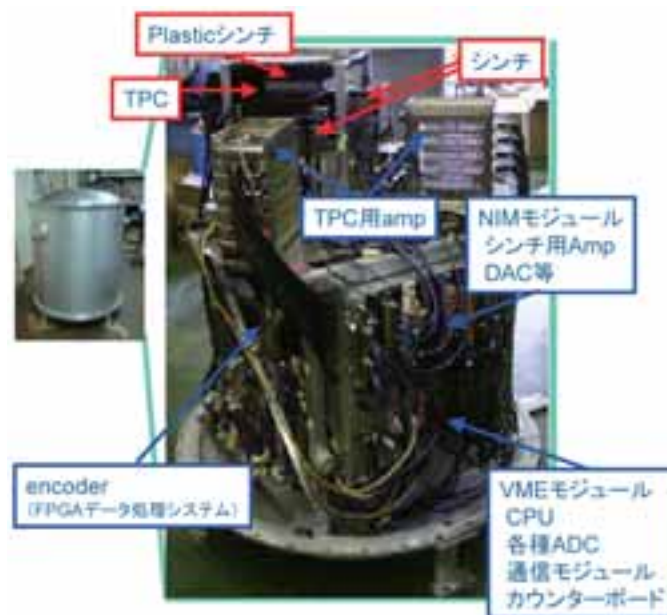


図5 圧力容器内部の観測装置

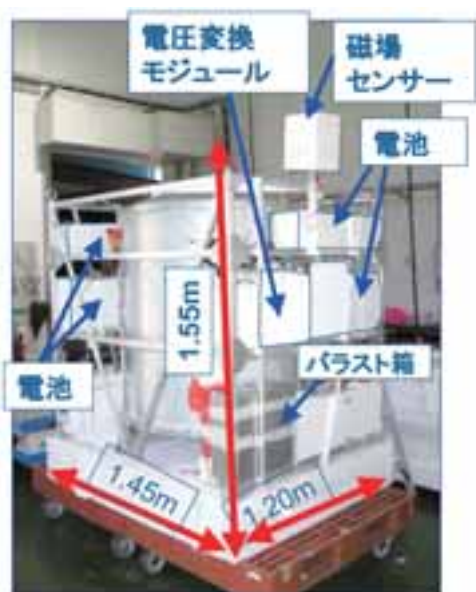


図6 ゴンドラに取り付けられた装置。



図7 放熱フィンと追加した銅放熱板。最後は、白色塗装した。

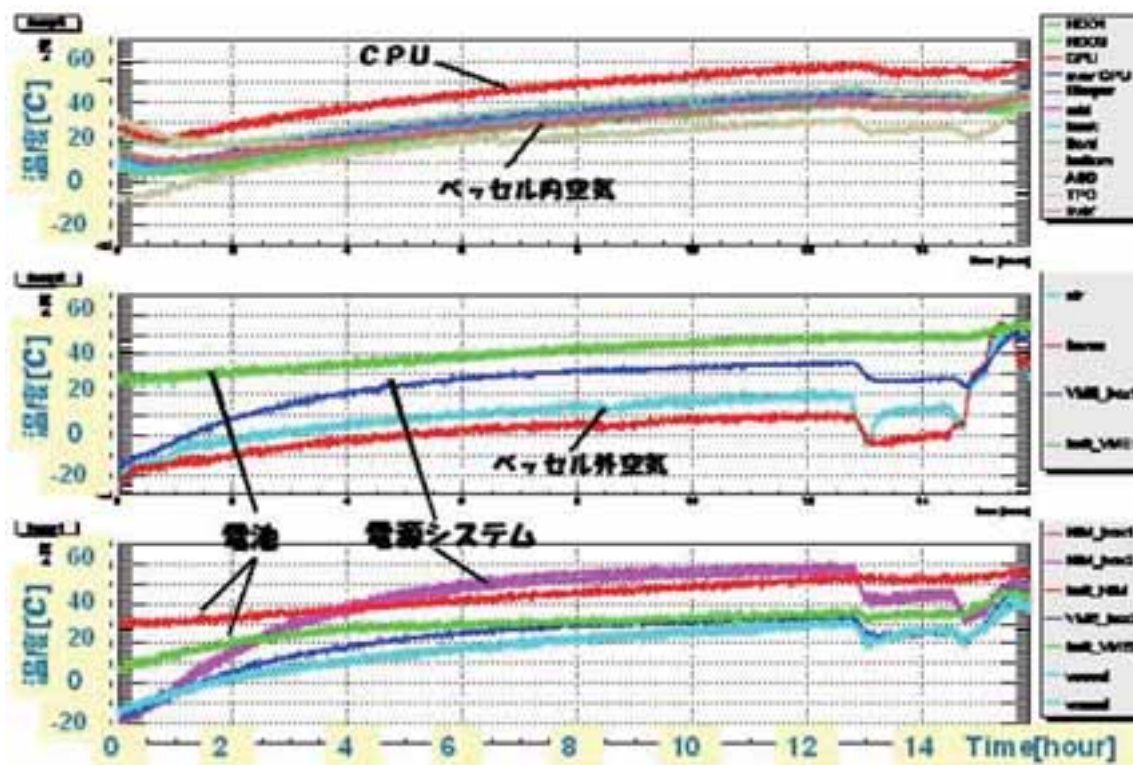


図8 宇宙科学研究本部で行われた最終環境試験の結果。大きい温度上昇が予想される電源供給システムも60度以下に抑えることが出来た。

想高度は34.7kmであった。図10に高度の時間変化を示す。予定通り2時間半後に高度35.0kmに達し、13時までの4時間近く、高度32km以上での観測に成功した。放球から着水までの間、全観測システムはほぼ順調に作動した。飛行経路は、折り返し後、一旦南西に向かったが高度を数百メートル下げることによって北西に進路が変更され、13時45分頃に、観測所の東の大槌沖合30kmに着水し(図11)、14時半には船での回収に成功した。電源部への浸水は一部あったが(防水されていないので当然であるが)、圧力容器内への浸水はまったく無かった。また



図9 放球直後の様子

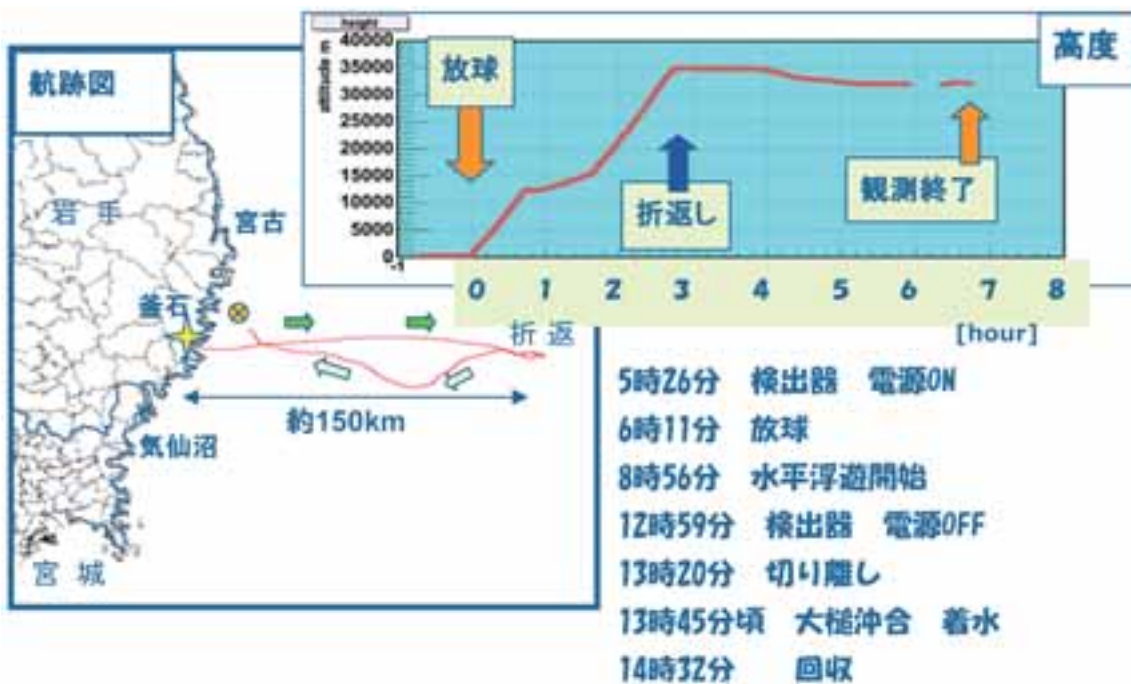


図10 航跡図

容器の破壊も全くなかった。容器内のデータディスクに異常無くデータが書かれていることを回収当日に確認し、検出器全てを京大に持ち帰り、再動作させることに成功した。また京大でのデータの詳細なチェックでも、データは完全な形で取得出来たことがわかった。

実験は、VETO カウンターを動作させ、TPC およびシンチレータの同時ヒットを要求したガンマ線トリガーモードで約3時間観測し（観測高度に上がるまでの2時間半もこのモードでデータ取得が出来ている）、その後、主に荷電粒子を観測するため、TPCのヒットのみを要求するTPCトリガーモードによる観測を終了直前の30分間行い、予定通りのデータを取得した。また高度、温度、気圧、磁場、GPS などモニター系も順調に動作



図11 着水前後の様子

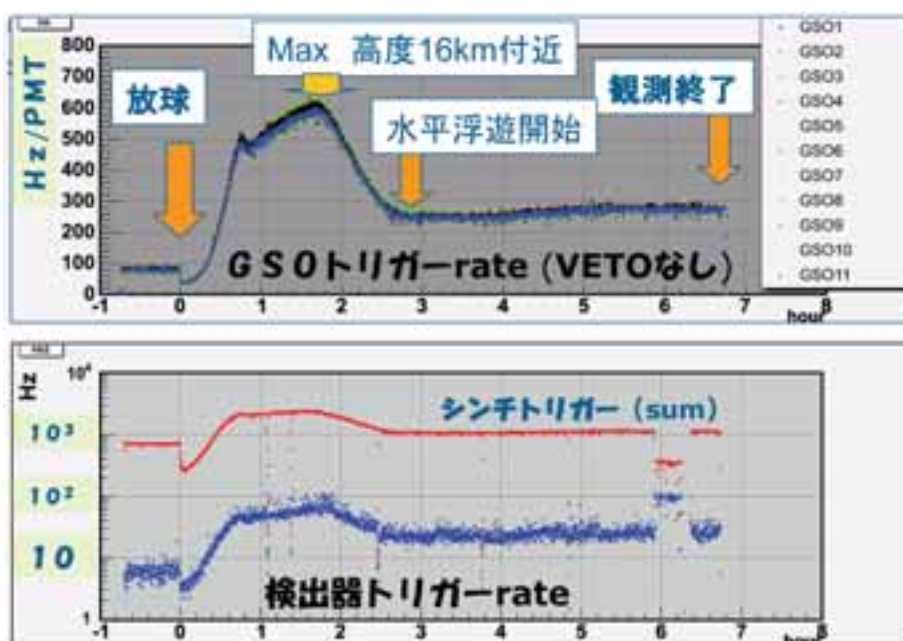


図12 GSO シンチレータのヒット数（上図および下図赤色），およびTPCとの同時ヒット数（下図青色）の時間変化

した。飛行中は、トリガーによるイベント発生毎に1kBのデータと毎秒GPSをトリガーとしてモニター情報（1kB）と測定器情報（毎秒のトリガー・カウンター数；512byte）が地上に送信され、それを用いてオンラインで宇宙線フラックスに敏感なGSOシンチレータのトリガー数（図12）、上記環境モニターを常時チェックし、時には各PMTのスペクトル、TPCのヒット数分布など装置基本性能を示すデータを確認し、飛行中は装置が安定して動作していることを確認した。最も温度上昇が懸念された電源システムの温度は、図13に示すように、放熱板や直射日光遮断用ひさしなどの対策によって緩やかな上昇に抑えることが出来た。

4. 解析結果

データ解析の結果、 μ -TPC およびGSOシンチレータともに飛行中の動作状況に異常が無い事が確認できた。図14に示すように、一次宇宙線がGSOと反応してシャワーをTPC内に飛ばしている事象が再構成できており、TPCでの宇宙線飛跡の再構成も問題ない。また図15に、水平飛行中に観測・再構成された事象のエネルギー

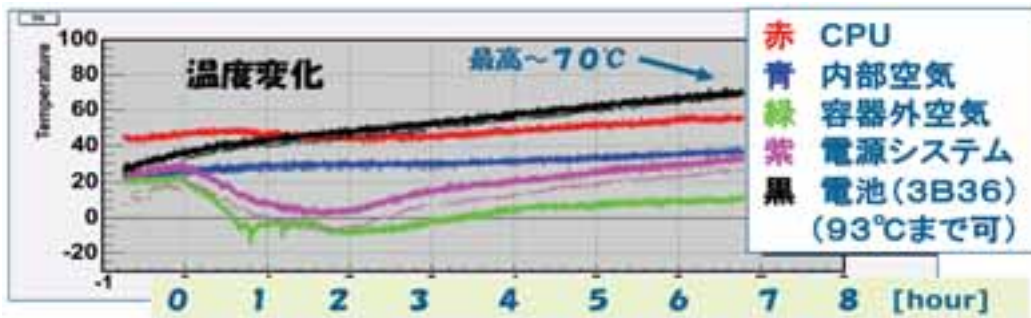


図 13 観測装置および外気の温度変化

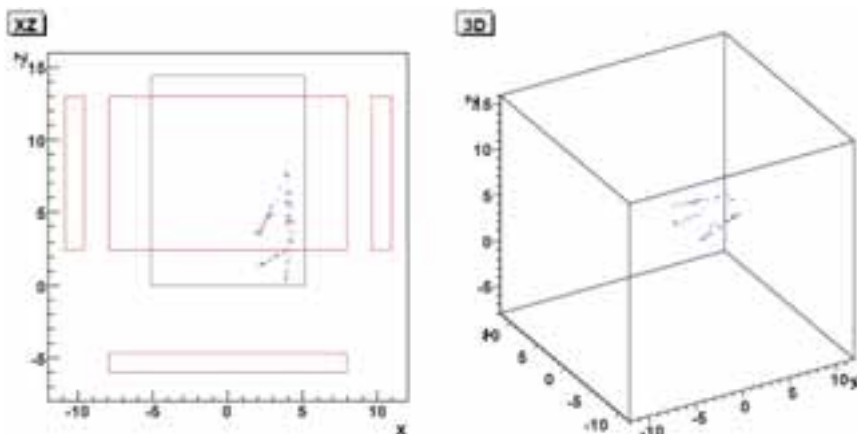


図 14 荷電粒子トリガーモードで得られた飛跡の例。一次宇宙線が GSO と反応したシャワーが検出されている。

スペクトルを示す。3時間の水平飛行の間で、約200個の事象が再構成されており、シミュレーションから予想された光子数とほぼ一致する。さらに、一次宇宙線とアルミニウム耐圧容器とが相互作用することから生じる、511keVの電子陽電子対消滅線も確認することができる

図16に今回の結果で得られたガンマ線フラックスの天頂角依存性を示す。この図中の実線は、大気の厚みが7.0g/cm²のところにおける300keVのガンマ線フラックスのモデルである。このモデルと比較して、今回の結果

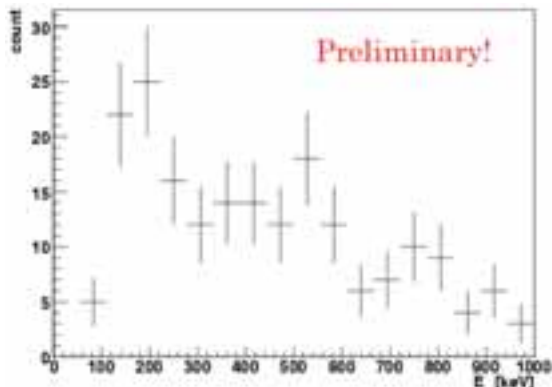


図 15 TPC と GSO シンチレータの信号を簡単に合わせて得られた、ガンマ線と思われる事象のエネルギースペクトル。

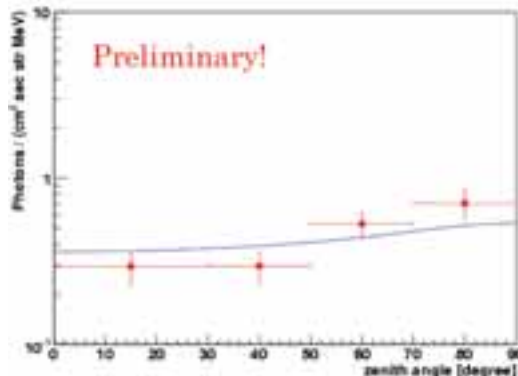


図 16 再構成されたガンマ線フラックスの天頂角依存性 (赤) と既存のモデル (青線) との比較

は誤差の範囲で矛盾がないと言える。我々の検出器が姿勢制御をせずに観測していたことを踏まえると、この結果は上空において広い視野を実現していたことを示している。また、大気の厚みに対する再構成事象レートを図17に示す。この図から、大気の厚みが減少するに従い、再構成事象のレートが減少し、大気の薄いところではその減少の割合が減っている様子が見て取れる。

このことから、大気の厚みと共に増加する大気由来のガンマ線成分（赤点線）と、大気によって減衰される宇宙拡散成分（青点線）の2成分に分けることができ、それぞれのレートから大気ガンマ線・宇宙拡散ガンマ線の微分フラックスを得ることができた。宇宙拡散ガンマ線の微分フラックスを図18に、大気ガンマ線のフラックスを図19に示す。それぞれの図において、赤色で示されるのが今回の観測結果になる。これらから、過去に行われた気球実験や既存のモデルと比較して、今回の我々の結果は矛盾がない。従って、今回の観測の目的である宇宙拡散・大気ガンマ線の観測は達成する事ができた。

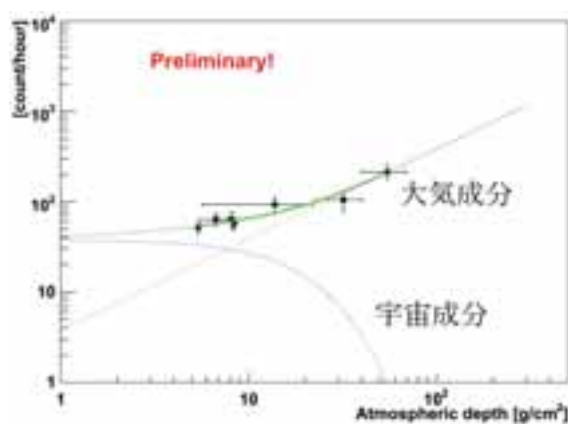


図 17 大気の厚みに対するガンマ線再構成事象のレートの変化

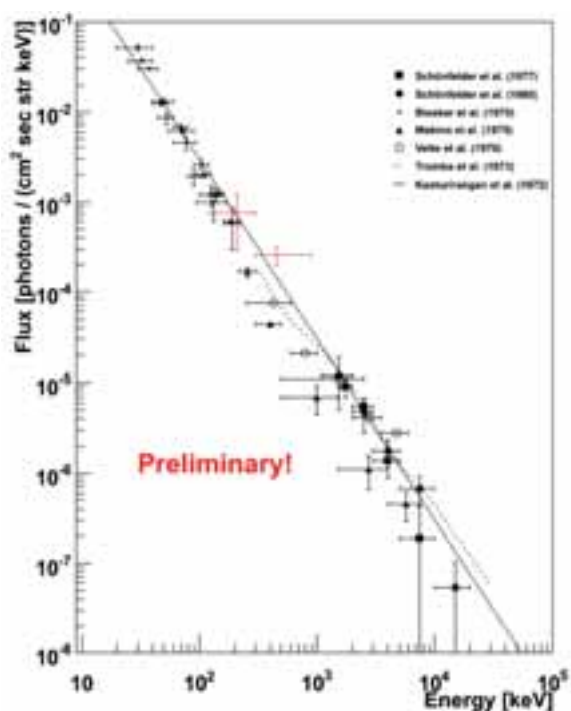


図 18 宇宙拡散ガンマ線微分フラックス (赤が今回の結果)

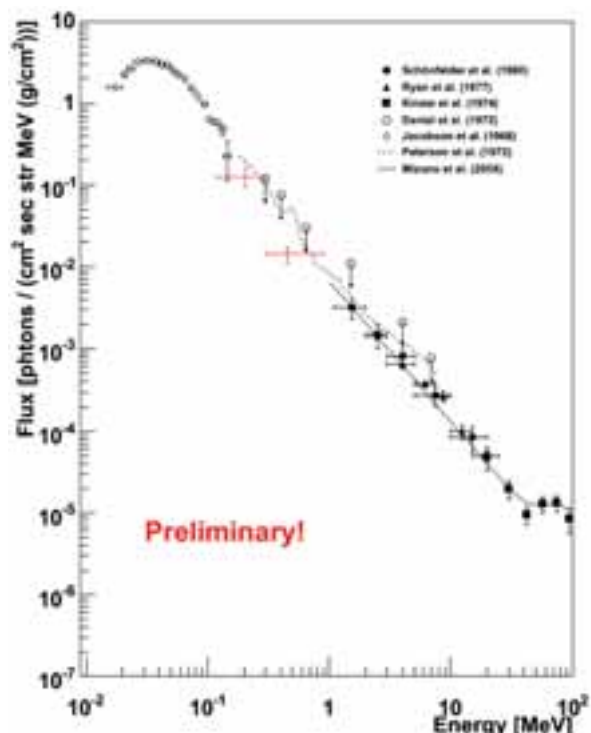


図 19 大気ガンマ線微分フラックス (赤が今回の結果)

5. 今後の展開

今回の観測で、この小型10cm角カメラによる宇宙線環境下での動作試験に必要なデータは予定通り取得することが出来た。今後は、かに星雲や Cyg X-1 など軟ガンマ線領域で強いガンマ線天体の観測が可能な30-40cm角大型カメラを用いた観測に移行する。現在、30cm角カメラは、GSO シンチレータ $6 \times 6 \times 13\text{mm}^3$ ピクセルアレイと30cm角 TPC を組み合わせ、地上で動作試験を開始したところである。20-21年度には産業総合研究所の逆コンプトンガンマ線ビームラインを用いて1-20MeVでの性能評価試験を行う。また KEK と共同で μ -TPC用 LSI アンプ・ディスクリ (8 ch) を開発中であり、20年度中に最終製品が完成予定である。さらにシンチレータ読出しの MAPMT 用省電力回路を開発中であり、1年程度で気球用の省電力・軽量型30cm角カメラを開発し、2-3年後に国内での1日程度の気球観測を目指したい。6時間の観測で、かに星雲や Cyg X-1 からの約100keV以上のガンマ線を 7σ 程度の有意度で観測が行えると予想している。さらに宇宙科学研究本部気球グループが開発している長時間気球により南半球で10日間 (観測時間200時間程度) の観測を行い、銀河面の広い領域の観測を行っていく。

謝 辞

まず、この我々の最初の気球実験を認めて頂いた宇宙科学研究本部、実際に気球実験遂行のために強力にサポートして頂いた気球グループに感謝します。また三陸大気球観測所の皆様にも多大な支援を頂いたことを感謝します。この計画は、文部科学省 科学研究費補助金 特定領域研究「ブラックホール天文学」により行われました。同時に京都大学21世紀 COE「物理の多様性と普遍性の探求拠点」からも支援を受けています。