

# SMILE-2+実験実施報告

高田淳史, 谷森達, 水村好貴, 竹村泰斗, 吉川慶, 中村優太, 小野坂健, 齊藤要, 阿部光,  
古村翔太郎, 岸本哲朗, 谷口幹幸, 窪秀利 (京大), 黒澤俊介 (東北大/山形大),  
身内賢太郎 (神戸大), 澤野達哉 (金沢大), 濱口健二 (GSFC), 小財正義 (ISAS/JAXA)

## 1 MeV ガンマ線天文学の現状と SMILE-2+ 気球実験の目的

数百 keV から百 MeV の MeV ガンマ線領域では、原子核の脱励起に伴うガンマ線放射による核ガンマ線の観測が期待されており、元素合成のプロセスや合成された元素の拡散の様子が解明できると期待されている。また、この領域では宇宙の透明度が非常に高い為、深い観測で最遠方の天体現象を観測できるとも期待されている。一方 MeV ガンマ線領域の観測は、2000 年で観測を終了した COMPTEL [1] 以降ほとんど進んでいない。この観測が進んでいない現状は、MeV ガンマ線の観測手法が確立していないことが原因である。従来用いられてきた符号化マスク法やコンプトン法では、光子毎の到来方向情報が不完全である為、統計的手法によりガンマ線源を推定するが、対象天体以外からの混入を免れない上、検出器周りの不感領域と宇宙線との相互作用から生じるガンマ線が雑音となるため、大量の雑音に観測対象の信号が埋もれ、検出感度を上げることができない。MeV ガンマ線天文学を開拓するには、可視光や X 線・GeV ガンマ線で行われるのと同様に光子毎に到来方向を決定し、観測領域の雑音を減らす事以外には有り得ない。この為、我々はガス飛跡検出器を用いてコンプトン散乱の反跳電子飛跡を測定し、周囲を取り囲むシンチレーション検出器で散乱ガンマ線を捉える、電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC, 図 1) を 2000 年から開発してきた [2]。この ETCC では、反跳電子の運動量と散乱ガンマ線の運動量を 1 事象毎に測定するため、運動量ベクトルの足し算という簡単な方法で入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を一意に特定する。さらに、散乱方向と反跳方向のなす角を利用したコンプトン運動学テストや飛跡検出器内のエネルギー損失率を用いた粒子識別によって、コンプトン散乱事象以外の中性子や偶然同時計数などの雑音事象を強力に除去できる。この ETCC による高感度な MeV ガンマ線観測の実証と科学観測の実現を目的に気球実験 Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments: SMILE を段階的に進めている。第一段階として、2006 年に 10 cm 角の小さな飛跡検出器を用いた ETCC を気球に搭載し、気球高度における動作確認と宇宙拡散・大気ガンマ線の観測を行い、気球高度での雑音除去とガンマ線観測に成功した (SMILE-I) [3]。

第二段階として、天体観測に必要なイメージング能力を実証し、ガンマ線撮像分光による天体観測を実現するべく、既知の明るい天体を観測し、地上校正試験で予想される検出感度が達成できるかを実証する実験 (SMILE-2+) を計画し、宇宙科学研究所の 2018 年 4 月期の豪州気球実験として採択された。この実験では、オーストラリアのアリススプリングから放球を行い、上空 39km 付近にて約 1 日の ETCC でのガンマ線観測を行い、銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線及びかに星雲を検出することを目標としている。電子陽電子対消滅線は、宇宙線と筐体との相互作用から多量に生成される上、放射領域そのものが大きな広がりを持っているとされる [4] 為、視野外の雑音ガンマ線との切り分けが困難な検出器では定量的な観測が難しい。一方、かに星雲は ETCC では点源として見える明るい天体である一方、南半球からの観測では高度が 50 度までしか上らない為、大気による強い減衰と大量の大気ガンマ線に観測を遮られることになる。これらの観測が、地上校正実験から予想される検出感度で実施できれば、ETCC の天体観測能力を証明できる事となる。

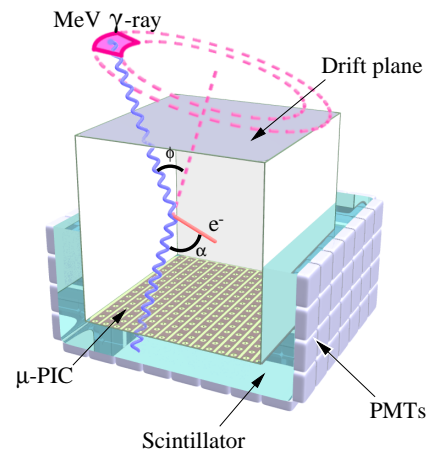


図 1: 電子飛跡検出型コンプトンカメラ

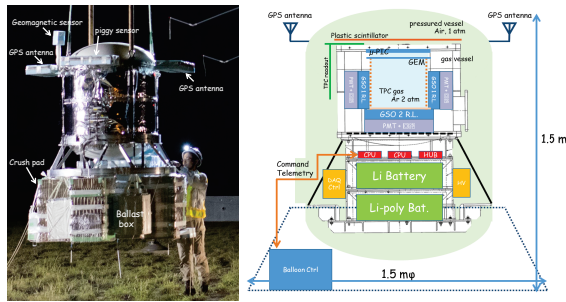


図 2: SMILE-2+ゴンドラ

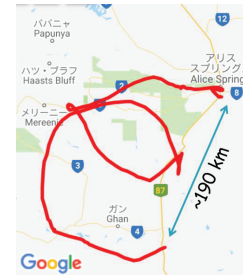


図 3: SMILE-2+の航跡図

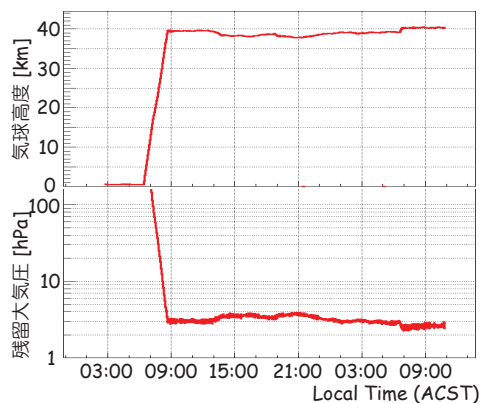


図 4: 気球高度と残留大気圧

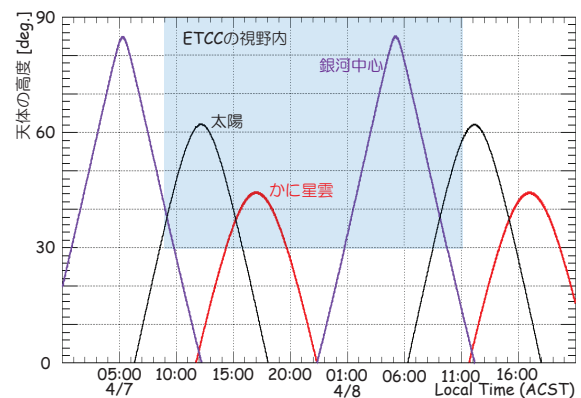


図 5: 各天体の高度の時間変化

## 2 SMILE-2+実験

図 2 に SMILE-2+ のゴンドラの概要を示す。観測器システムの上半分は ETCC の検出部となっており、アルミと SUS で作成した圧力容器内部にガス飛跡検出器の読み出し及び電場形成ケージを設置し、電場形成ケージの周囲に位置感度型 GSO シンチレーション検出器を配置し、ETCC を構成している。圧力容器内部は Ar ガスを絶対圧で 2 気圧封入した。システム下部の中心には、リチウム一次電池とリチウムポリマー電池を設置し、その周囲に ETCC の読み出し回路及びデータ収集 CPU、高圧電源はシステム下部に設置し、この観測器システム全体は高圧電源の取り扱いを容易にするため、与圧容器に封入した。与圧容器は保温の為、表面積の半分ほどに Multi-Layered Insulator (MLI) を巻き付けた。SMILE-2+実験の目的は天体観測であり、ゴンドラの姿勢情報も重要となるため、観測器システムには、GPS コンパス・磁場センサ・傾斜計を設置、1 度程度の精度での姿勢モニタを目指した。一方で冗長性の為、小型姿勢センサ [5] を完全に独立なシステムとして与圧容器外部に設置している。システム全体の消費電力は約 220 W、重量は気球制御システムを含めて 511 kg であった。観測器システムの制御はシリアル通信を通して行い、コマンド送信と気圧・温度・電圧・トリガーレートのモニタはアリススプリングスの受信卓及びロングリーチの受信局で、それぞれ行えるよう機器と人員の配置を行った。

SMILE-2+を搭載した気球は4月7日の現地時間6:24に放球され、8:45頃に高度39.6 kmに達し水平浮遊へ入り、夜間も38.5 km以上の高度を保ったまま飛翔を続け、翌日4月8日の11:07に気球から切り離された。観測器システムは安全の為、切り離し前の10:50までにすべての電源をOFFにした。図3にSMILE-2+の航跡図を示す。この図から気球はターンアラウンド気球として実施されており、アリススプリング近傍を漂っていたことが分かる。ゴンドラは4月9日にデータ・観測機器とも完全な形で回収された。回収されたデータから得られた気球高度と残留大気圧の時間変化を図4に示す。水平浮遊をしていた約26時間の間、残留大気圧は2.4–3.8 g/cm<sup>2</sup>となっており、MeVガンマ線観測には十分な高度が保たれていたことが分かる。図5に示す各天体の高度と比較すると、SMILE-2+の観測対象であった銀河中心領域

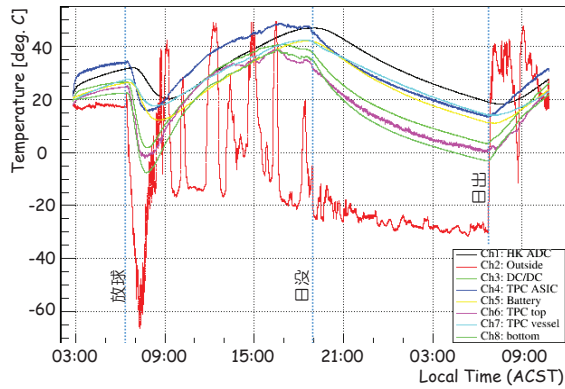


図 6: 飛行中のシステム各所の温度

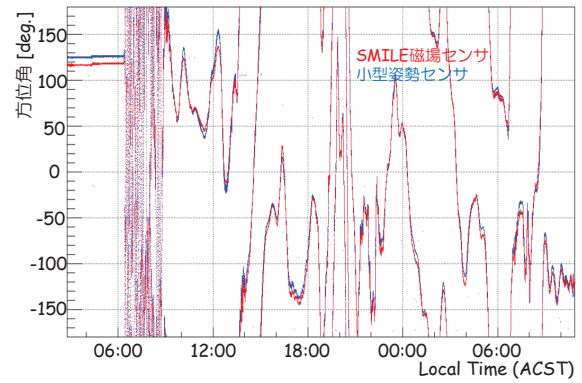


図 7: ギンドラ方位角の時間変化

t

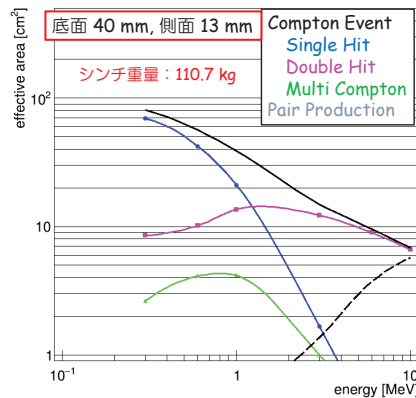


図 8:  $(50 \text{ cm})^3$  ETCC で期待される有効面積。検出器のガスは  $\text{CF}_4$  の 3 気圧、底面のシンチレータは 3 放射長分、側面は 1 放射長分の GSO シンチレータを配置したと仮定し、飛跡検出器とシンチレータの両方にエネルギー損失があった事象のみを考慮。

は約 8 時間、かに星雲は約 5 時間に渡って ETCC の視野内に収まっており、実験条件が完全に満たされた。図 6 は、実験中のシステム各所の温度である。外気温は上昇中に  $-60^\circ\text{C}$  と最も低くなったが、水平浮遊に入ってから安定して  $-25^\circ\text{C}$  程であった。これに対して、与圧容器内の雰囲気温度は、日照のある昼間で  $20\text{--}45^\circ\text{C}$ 、夜間で最も冷えたところで  $-5^\circ\text{C}$ 、高温になりやすい IC でも  $50^\circ\text{C}$  以下を保つ一方で、電池付近の温度は容量を大きく下げる要因になる  $0^\circ\text{C}$  以下にはならず、各コンポーネントの動作温度範囲が満たされた。一方で、姿勢センサについては、いくつか問題が発生した。GPS コンパスは、事前の地上試験では方位角測定に時間を要していたものの、動作は確認していた。しかし、上空では GPS としての機能は問題なく動作したものの、方位角測定は完全に停止してしまった。また、磁場センサは温度によるものと思われる出力の変化が見られた。図 7 は磁場センサの出力変化を補正した上で求めたギンドラの磁北からの方位角と、独立システムである小型姿勢センサから得た真北からの方位角を重ねて表示したものである。2 つの方位角時間変化を比較から、完全一致はしていないものの、大体の一致が見られる。この為、今後の天体解析においては、小型姿勢センサの情報を主に使用する予定である。

### 3 長時間気球実験で拓く MeV ガンマ線天文学

現在、回収されたデータは地上校正実験のデータ [6] と比較しつつ解析を進めており、並行して回路応答も含めたフルシミュレータを作成しての応答関数の導出や気球高度の放射線環境下での雑音量推測を進めている。詳細解析は、これらの結果が出そろってからの事になるが、ガンマ線事象レートの高度依存性や、観測対象の銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線やかに星雲の信号は、その兆候が確認できつつある [7]。従って、SMILE-2+ で予定していた天体観測実証実験は問題なく実証できると確信しており、次期気球実験では実際の科学観測を狙っていく。

今回の SMILE-2+ ETCC はガス飛跡検出器の容器が与圧容器に封入された二重構造となっているが、この構造は天体からのガンマ線を減衰させてしまう上に、全体重量も大きくしてしまう。この為、飛跡検出器容器を外気に露出させ、検出ガスを 3 気圧まで上げることを予定している。また、分子あたりの電子数が多い  $\text{CF}_4$  ガスを検出器ガスに使用することを進めており、これらが実現すれば、 $\sim 10 \text{ cm}^2$  の有効面積が実現可能になり、今回のような 1 日豪州気球実験を行えば、銀河系内拡散ガンマ線のスペクトルや電子陽電子対消滅線の銀河面分布の観測が行え、圧力气球を用いた南半球中緯度長時間気球に搭載すれば、 $^{26}\text{Al}$  などの核ガンマ線銀河面分布観測やガンマ線バーストの偏光観測、相対論的電子振り込み現象の観測が実現できる。また、Fort Sumner などの北半球での観測ができれば、数百 keV でのかに星雲や Cyg X-1 の偏光観測が可能になる。さらに、半導体光センサを用いたシンチレーション検出器によるエネルギー分解能の向上・ガス飛跡検出器の電極構造改良による電子飛跡の高精度化・飛跡検出器の大体積化、などの改良も開発中であるが、これらの改良が導入できれば、図 8 に示されるように、 $50 \text{ cm}^2$  を超えるような有効面積も実現できる。この  $(50 \text{ cm})^3$  ETCC であれば、数時間の観測で COMPTEL の観測感度に到達する為、1 日豪州気球実験でも 20 年間停滞している MeV ガンマ線天文学を大きく進展することになる。今後段階的に検出器をアップデートしながら、SMILE-3 として科学観測を行っていく。

## 参考文献

- [1] V. Schönfelder+, A&ASS, Vol. 143 (2000), 145-179.
- [2] T. Tanimori+, New Astron. Rev., 48 (2004), 263.
- [3] A. Takada+, ApJ., 733 (2011), 13.
- [4] T. Siegert+, A&A, Vol. 586 (2016), A84.
- [5] 莊司泰弘, 飯嶋一征, 大気球シンポジウム, isas17-sbs-007.
- [6] 竹村泰斗, 他, 大気球シンポジウム, isas18-sbs-020.
- [7] 中村優太, 他, 大気球シンポジウム, isas18-sbs-021.