

# SMILE: 次世代型広視野 MeV ガンマ線望遠鏡を用いた 天体観測気球実験計画

高田淳史, 谷森達, 窪秀利, 水本哲矢, 水村好貴, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 竹村泰斗,  
中増勇真, 吉川慶, 中村優太, 谷口幹幸 (京大), 黒澤俊介 (東北大), 澤野達哉 (金沢大)

## 1 MeV ガンマ線天文学と電子飛跡検出型コンプトンカメラ

数百 keV から百 MeV の MeV ガンマ線と呼ばれる領域では、活動銀河核 (AGN) などでの粒子加速やブラックホールまわりの強重力場からの放射、宇宙初期からのガンマ線バースト (GRB)、ガンマ線パルサー、さらには太陽フレアなど様々な天体の観測が期待されている。特に MeV ガンマ線領域にのみ存在する、励起された原子核の脱励起に伴うガンマ線放射からは、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。一方でこのエネルギー領域の観測は遅れている。1990 年代 CGRO に搭載された COMPTEL により観測が始まり約 30 個の MeV 定常天体を発見したが [1]、2003 年以降コードマスクを用いた INTEGRAL による観測でも、600 keV 以上で 4 天体の観測に留まっており [2]、GeV 領域で 4 年で三千個の定常天体を観測した Fermi 衛星 [3] とは大きな隔たりがあり、今に至っても観測が進んでいないとは言えない。例えば、0.6 太陽質量もの  $^{56}\text{Ni}$  が作られるとされている Ia 型超新星爆発では、 $^{56}\text{Ni}$  や  $^{56}\text{Co}$  の崩壊に伴う核ガンマ線の観測が期待されるが、実際に核ガンマ線が観測された Ia 型超新星爆発は INTEGRAL による SN2014J の観測のみである [5, 6]。

この現状を打開するため、京大宇宙線ガンマ線グループはコンプトン散乱の電子飛跡が検出可能なガスを用いた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 [7]。ETCC は、ガンマ線をコンプトン散乱させるガス 3 次元粒子飛跡検出器 Time Projection Chamber (TPC) とそれを取り囲む位置感度型シンチレーション検出器から構成される。COMPTEL をはじめとする従来型コンプトンカメラでは取得できなかった反跳電子の方向を取得することで、ガンマ線光子 1 個毎に到来方向とエネルギーを運動量ベクトルの足し算という簡単な方法で一意的に特定可能となる。また、散乱方向と反跳方向の間の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、ガンマ線以外の雑音粒子やコンプトン散乱事象以外の雑音事象を高効率で除去できる。この高効率雑音除去能力は、2006 年の気球実験 (SMILE-I 実験) により気球高度でも実証されている [8]。さらに、システムへの宇宙線入射などで生じる検出器由来の雑音ガンマ線は、光子毎に到来方向が特定可能なことから、視野を制限することで除去可能となる。これら ETCC の特徴により、これまで実現できなかった高感度 MeV ガンマ線観測の実現が期待できることとなる。

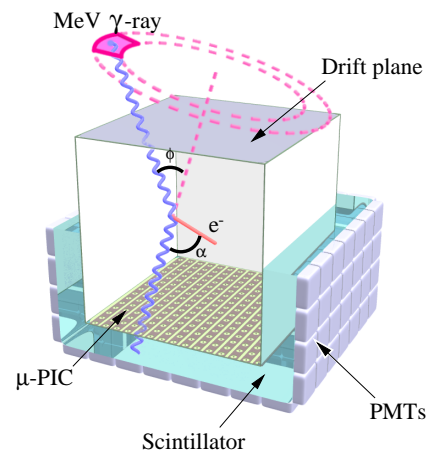


図 1: 電子飛跡検出型コンプトンカメラ

## 2 SMILE 気球実験計画の現状と検出器改良

我々は、この ETCC により高感度な MeV ガンマ線観測が可能となることを実証した上で、科学観測を行っていくという気球実験を行う計画 Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments: SMILE を段階的に進めている。初めのステップとして、2006 年に 10 cm 角の小さな TPC 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った (SMILE-I) [8]。この実験では、高度 32-35 km において 3 時間の水平浮遊が実現され、視野全体から 420 個のガンマ線事象が

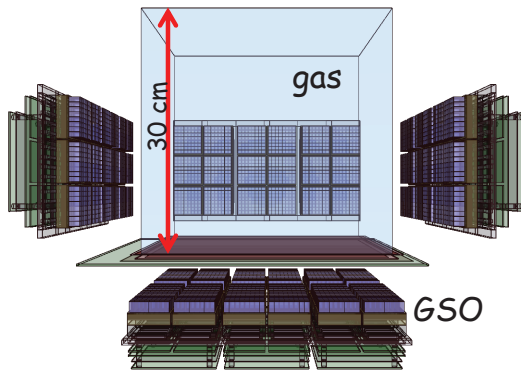


図 2: SMILE-II ETCC

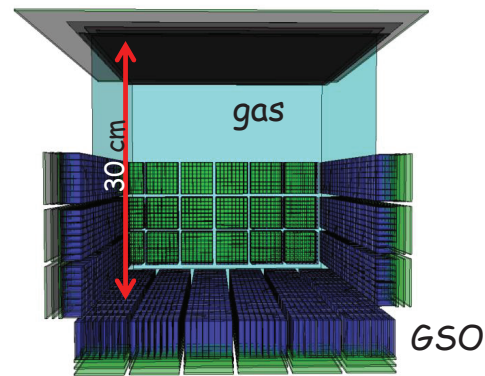


図 3: SMILE-2+/3 検出器

得られた。これに対して、Geant4 シミュレーションによる宇宙拡散・大気ガンマ線の観測期待事象数 400 個とほぼ一致する一方、陽子や電子・中性子といった雑音粒子の直接入射では 1.9% 程度、検出器由来のガンマ線では 19% しか説明できない。この SMILE-I 実験により、気球高度においてもガンマ線測定が安定に可能であること、ガンマ線以外の粒子に対して、ガス飛跡検出器による粒子識別が非常に有効であることが示された [8]。

第二のステップは、かに星雲や Cyg X-1・銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線等の明るい天体の観測によりガンマ線撮像分光試験を行う計画である。SMILE-I ではガンマ線イメージングの確認までは行っていないため、既知の明るさの天体を観測し、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ことが目的となる。この目的の為、かに星雲を高度 40 km において数時間の観測で  $3\sigma$  の有意度の検出を目標に、有効面積が 300 keV で  $\sim 1 \text{ cm}^2$ 、angular resolution measure (ARM) 分解能が  $\sim 5$  度 (FWHM) の SMILE-II ETCC (図 2) を開発してきた。SMILE-II ETCC は、Ar 1 気圧で 30 cm 立方のガス飛跡検出器と 1 放射長の GSO シンチレータを用いて構成し、これまでの地上試験において、目標の有効面積と ARM 分解能を達成した上、140 MeV の陽子を水ターゲットに照射して作り出したガンマ線と中性子が飛び交う場の中でのガンマ線検出や、環境放射線の 1/100 の強度の放射線源の検出にも成功している [9]。一方で、天体観測において重要となる point spread function (PSF) が ARM 分解能と一致しないことが判明した為 [9]、現在  $\sim 100$  度 (FWHM) の scatter plane deviation (SPD) 分解能を向上させ、PSF を  $\sim 5$  度にする必要に迫られている。

この SMILE-II ETCC で生じた問題点を解決する為、改良を施した検出器 SMILE-2+ (図 3) の開発を始めている。SMILE-II ETCC からの改良点は、大きく次の 2 つの点である。

- シンチレータの厚みを 2-3 放射長へ
- シンチレータをガス飛跡検出器のガス容器内部に設置

これまで散乱ガンマ線の吸収体として、1 放射長の GSO シンチレータを用いてきたが、この厚みでは 500 keV のガンマ線は 40% の確率で相互作用せず、ETCC の測定帯域の上限を与えていた。このシンチレータの厚みを 2-3 放射長へ拡張し、数 MeV のガンマ線に対する有効面積を確保する。また、30 cm 立方のガス飛跡検出器の阻止能では 150 keV 程度のコンプトン反跳電子までしか測定できなかったが、シンチレータをガス容器内部に設置しガス飛跡検出器の有感領域の極力そばに置くことで、飛跡検出器から飛び出した電子をシンチレータで測定できるため、200 keV 以上の反跳電子もコンプトン再構成に使用でき、高エネルギーガンマ線に対する検出効率を改善できる。さらに、SMILE-II ETCC の飛跡検出器で捉えていた反跳電子の平均的なエネルギーは  $\sim 50$  keV であり、1 cm の飛程で受ける多重散乱は  $\sim 100$  度であったが、シンチレータと合わせてエネルギーを測定することで平均的な反跳電子のエネルギーは  $\sim 200$  keV が期待でき、多重散乱を  $\sim 20$  度に抑えられると期待できる為、SPD 分解能の大きな向上から PSF を改善できる。

図 2 に SMILE-II ETCC と SMILE-2+ の有効面積を示す。点で示しているのは SMILE-II ETCC で実際に得られた実験値、各線は Geant4 によるシミュレーションである。SMILE-2+ では飛跡検出器のガ

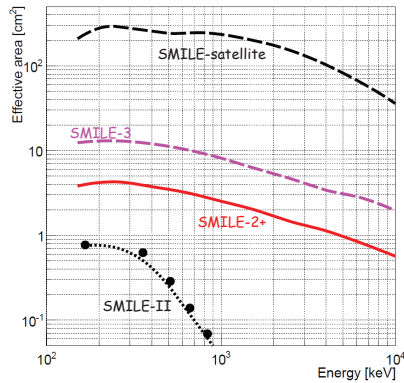


図 4: SMILE-II ETCC と SMILE-2+/3 の有効面積

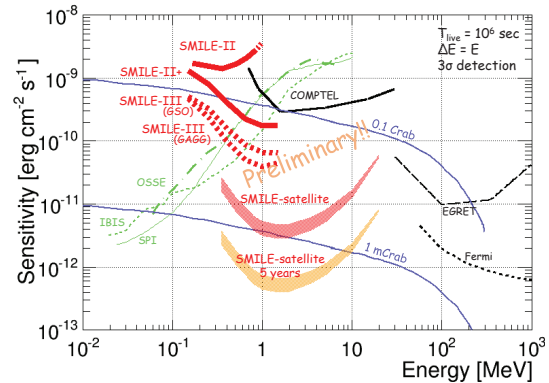


図 5: SMILE 実験の予想検出感度

スを Ar 2 気圧、SMILE-3 では CF<sub>4</sub> 3 気圧を仮定した。先に述べた改良により、数百 keV における有効面積が 4-5 倍になっただけでなく、5 MeV でも 1 cm<sup>2</sup> の有効面積が期待でき、測定エネルギー帯域が拡大していることがわかる。また、SMILE-2+と同じ構造のまま、ガスのみの変更で数百 keV での有効面積を 10 cm<sup>2</sup> に拡大可能となる。この有効面積と ~5 度の PSF が実現できると、図 5 に示されるような検出感度が実現できる。これより、SMILE-2+では 1 MeV で数時間で 5  $\sigma$  の有意度でかに星雲を検出できると期待でき、SMILE-3 では COMPTEL の 10 倍近く良い検出感度の実現が期待でき、長時間気球フライトにより科学観測が可能となってくる。

### 3 長時間気球実験で拓く MeV ガンマ線天文学

現在、我々は次期気球実験として、改良された SMILE-2+を用いた、オーストラリアでの 1 日気球で銀河中心からの電子陽電子対消滅線の観測やアメリカでのかに星雲/Cyg X-1 の観測により、我々の ETCC の MeV ガンマ線天体観測能力の実証を計画している。この実証実験後、スーパープレッシャー気球や極周回気球による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を SMILE-3 で行き、停滞している MeV ガンマ線観測を進めていく。既に南極周回気球では NASA が 50 日を超えるフライトを実現し、北極付近では ESRANGE が 2 週間の周回フライトに成功している。さらに南半球中緯度では NASA がスーパープレッシャー気球による 40 日以上 of 水平浮遊を成功させており、長時間気球実験による観測対象の自由度も大きくなっている。この SMILE-3 実験により MeV ガンマ線観測の重要度が高まれば、50 cm 角の CF<sub>4</sub> 3 気圧の飛跡検出器による ETCC 4 台を搭載した衛星実験により、数百 cm<sup>2</sup> の有効面積 (図 4) で 1 mCrab の検出感度 (図 5) を実現し、MeV ガンマ線天文学を切り拓く計画である。

### 参考文献

- [1] V. Schönfelder+, A&ASS Vol. 143 (2000), 145-179.
- [2] L. Bouchet+, ApJ, 679 (2008), 1315.
- [3] A. Abdo+, ApJS, 183 (2009), 46.
- [4] V. Schönfelder+, New Astron. Rev., 48 (2004), 193-198.
- [5] R. Diehl+, Science 345 (2014), 1162.
- [6] E. Churazov+, Nature 512 (2014), 406.
- [7] T. Tanimori+, New Astron. Rev., 48 (2004), 263.
- [8] A. Takada+, ApJ. 733 (2011), 13.
- [9] T. Tanimori+, ApJ 810 (2015), 28.