

長時間気球を用いた MeV ガンマ線探査実験：SMILE-3

高田淳史, 谷森達, 池田智法, 吉川慶, 阿部光, 荻尾真吾, 津田雅弥, 吉田有良,
竹村泰斗, 中村優太, 小野坂健, 齋藤要, 窪秀利 (京都大), 水村好貴 (JAXA),
黒澤俊介 (東北大), 身内賢太郎 (神戸大), 澤野達哉 (金沢大), 濱口健二 (メリーランド大)

1 SMILE-2+ で得られた知見

数百 keV から数十 MeV にかけての MeV ガンマ線領域は、放射性同位体や励起原子核からの核ガンマ線が観測可能な唯一の領域であるため、超新星爆発や中性子星合体に伴う元素合成や銀河内の物質拡散を直接的に解明できるとして古くから期待されてきた。一方で、MeV ガンマ線は波長が短くかつ透過力が強い為、X 線や可視光のような鏡やレンズを用いた集光法を使うことが困難な上、コンプトン散乱が優位である為、検出器やコリメータにおいてエネルギーを中途半端に落としてしまい、到来方向・エネルギーとも観測が難しい。従って、1990 年代に観測を行った COMPTEL/*CGRO* では 0.75–30 MeV において全天で約 30 個の定常天体 [1]、SPI/*INTEGRAL* では 0.6 MeV 以上でわずかに 4 天体の検出 [2] に限られているのが現状である。

事象毎の到来方向・エネルギーの特定が難しい為、COMPTEL や SPI といった、これまでの MeV ガンマ線望遠鏡は、コンプトン法や符号化マスク法という統計的推論に基づく観測方法を取ってきたが、雑音事象の少ない地上較正実験では良い結果が得られても、大量の雑音事象にまみれる宇宙環境下での観測では事象毎の信号/雑音検定がほとんど出来ず、SN 比の悪い状態でデータ空間に情報を積分せざるを得ない為、高い検出感度が実現できない。従って MeV ガンマ線天文学を進展させる為には、強力な信号/雑音検定を事象事に行い、かつ到来方向・エネルギーを一意に決定する様な望遠鏡が不可欠となる。一般に、事象毎の信号/雑音検定には、測定には使用されない余剰パラメータが必須である。実際、COMPTEL は余剰パラメータとして time of flight や pulse shape discrimination を持っていた為 [3]、完全ではなかったものの、事象毎の信号/雑音検定を実現したことから 30 定常天体の検出に至り、余剰パラメータを持たない SPI は検出に苦労している [4]。

我々は、事象毎の信号/雑音検定とエネルギー・到来方向の決定を同時に実現する望遠鏡を作るべく、コンプトン散乱で生じる反跳電子の飛跡画像を詳細に捕らえ、そこから得られる反跳方向・電子の飛程・散乱方向と反跳方向のなす角等の情報を積極的に利用するというアプローチをとり、電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (electron-tracking Compton camera: ETCC) を開発してきた [5]。図 1 に示される ETCC は、コンプトン散乱体としてのガス飛跡検出器と、吸収体としての位置検出型シンチレーション検出器から成る。2018 年にオーストラリアから放球された SMILE-2+ では、体積 $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の Ar 2 気圧のガスを用いる事で、0.3

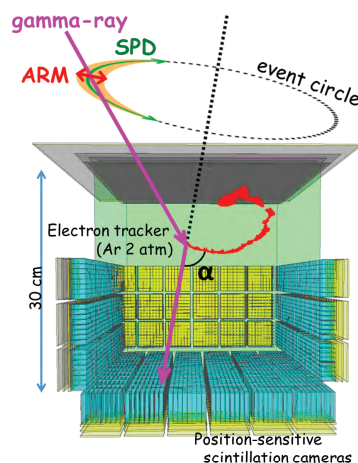


図 1 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡の概念図

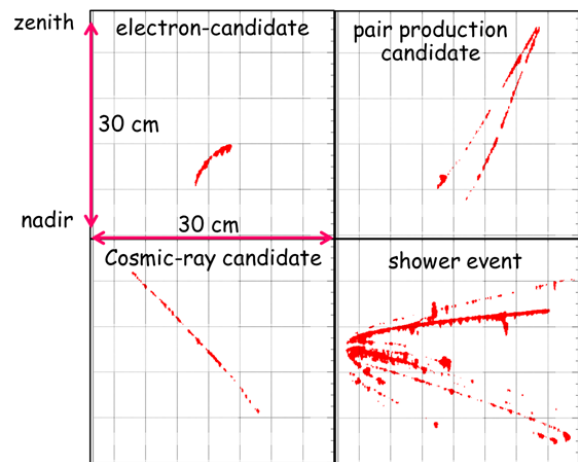


図 2 SMILE-2+ 飛翔中に得られた荷電粒子飛跡の例

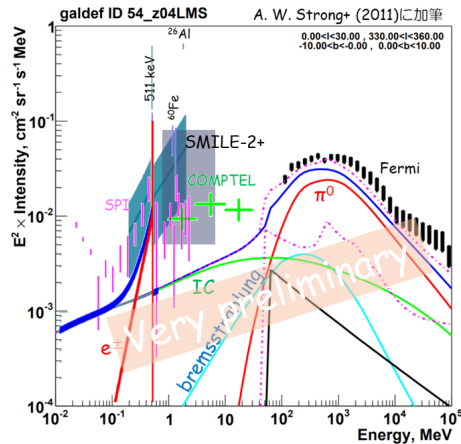


図3 銀河中心領域のガンマ線スペクトル

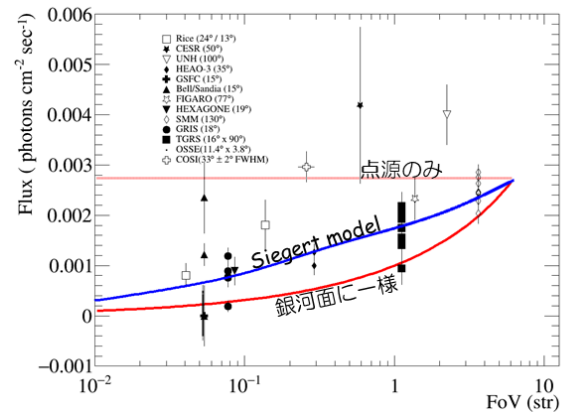


図4 銀河中心領域の電子陽電子対消滅線の観測

MeV のガンマ線に対して $\sim 1 \text{ cm}^2$ の有効面積を維持しつつ、図2のような詳細な荷電粒子の飛跡画像の取得を可能とした。この「飛跡画像」そのものから、各事象が宇宙線やそれに伴うシャワーのような雑音事象なのか、ガンマ線事象の候補となり得る事象なのか、が容易に判別可能な上、荷電粒子の飛程と損失エネルギーの関係から粒子識別が、散乱方向と反跳方向とのなす角からコンプトン散乱運動学テストが可能となる。従って、コンプトン散乱事象以外の雑音を事象事に判別、強力に除去でき、雑音量を極限まで減らす事に成功した。加えてコンプトン反跳電子の方向を取得している為、事象毎にコンプトン散乱を再現でき、入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を事象毎に再構成可能となり、光学原理に基づいた point spread function を定義、天文学には必須なイメージング分光を実現した。これらの事から、SMILE-2+ は最も単純な光度曲線から銀河中心領域からのガンマ線信号を検出するに至り、地上校正実験から予想される検出感度と実現された検出感度がほぼ一致する事となった。広視野 MeV ガンマ線望遠鏡において、このような観測が実現したのは SMILE-2+ が世界で初めての事である。

2 SMILE-3 計画

SMILE-I (2006) 及び SMILE-2+ (2018) の2回の実証実験が成功したことにより、ETCC が MeV ガンマ線天文学を開拓する唯一の切り札である事が示された。この為、次のステップとして長時間気球実験を用いた科学観測 SMILE-3 を計画している。現在運用されている長時間気球実験としては、ISAS/JAXA の豪州気球 (半日～1日)、NASA の南極周回気球 (2週間～1ヵ月)、南半球中緯度スーパープレッシャー気球 (≤ 1 ヶ月)、Ft. Sumner 気球実験 (半日～1日) などがある。Ft. Sumner 以外は南半球での観測となることから、銀河中心領域・系外拡散ガンマ線・電子陽電子対消滅線・電波銀河 Cen A などが観測対象となる。Ft. Sumner では、かに星雲や Cyg X-1 が観測対象であり、SMILE-3 では長時間気球実験を複数回行うことで、様々な天体を観測する予定である。ここでは、主な2つの観測対象について紹介する。ここに挙げたもの以外でも、系外拡散ガンマ線の起源解明 [6, 7, 8] や、かに星雲における粒子加速領域の特定 [9, 10, 11] などを SMILE-3 実験により進めていく。

2.1 銀河中心領域

SMILE-2+ は、光度曲線から銀河中心領域からの放射を有為に検出している。sub-MeV から MeV にかけての領域では、SPI や COMPTEL も観測しており、銀河中心領域において非常に硬いスペクトルを検出している。一方で、MeV ガンマ線帯域の銀河中心領域のスペクトルは、電子宇宙線と星の光 (可視・赤外) との逆コンプトン散乱が予想されているのみであり、観測量の $1/10 \sim 1/5$ しか説明出来ていない (図3)。MeV ガン

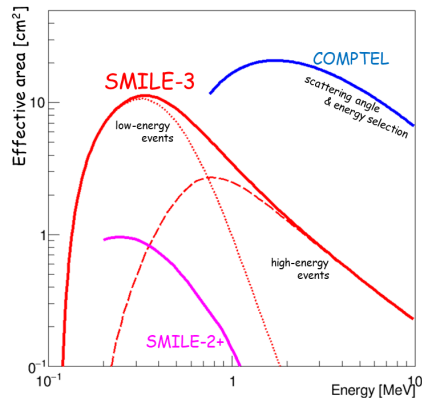


図5 期待される SMILE-3 の有効面積

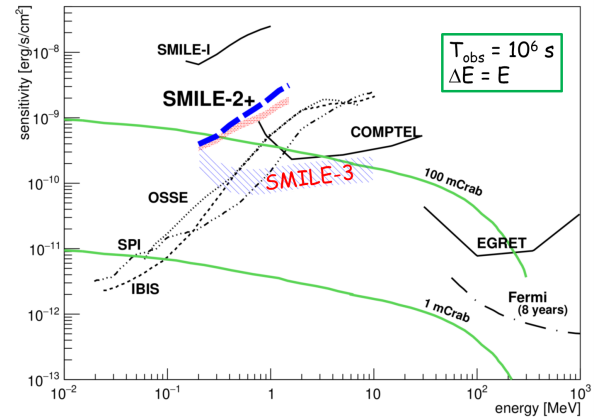


図6 予想検出感度

マ線の観測は空間分解能の低い観測しか行われていない為、分解されていない天体の集合である可能性は否定されていない。しかし、仮にかに星雲並の光度を持つ天体が銀河中心付近に複数あることが要因であるとする、 $O(100)$ 個の天体が必要となる。さらに、X 線帯域は星の集合で説明されている為、X 線では暗く MeV ガンマ線で明るい様な天体で無ければならなくなるが、現在の処このような天体は知られていない。また、宇宙線が分子雲中の原子核を励起し、その脱励起線の重ね合わせという可能性もあるが、太陽以外から脱励起線が観測された例は無く、自明ではない。さらに、天体以外の候補として 10^{15} g 程度の質量の原始ブラックホール [12] や軽い暗黒物質の対消滅 [6] も挙げられている。SMILE-3 の観測では、MeV ガンマ線帯域での詳細なスペクトルと空間分布を得て、銀河中心領域の放射の起源に迫る。

2.2 電子陽電子対消滅線

OSSE や SPI の観測から、銀河中心領域から観測されている電子陽電子対消滅線は、束縛状態であるポジトロニウムの生成を介しての対消滅がほとんどであるとされ [13, 14]、また、その空間的広がり銀緯方向にも数十度程度の大きな広がり示唆されているが [14]、その空間分布は他のどの波長とも似通っていない。図 4 は、過去の観測の視野の大きさと、銀河中心方向で観測された対消滅線のフラックスをまとめたものであるが、ここでも正の相関が見られ (相関係数 ~ 0.7)、対消滅線が空間的に広がっている事を支持している。さらに近年行われた気球実験である、COSI [15, 16] や SMILE-2+ の観測結果も大きな空間的広がりを示唆している。一方で、対消滅線の強度を説明できる陽電子起源は見つかっておらず、未知のままとなっている。この電子陽電子対消滅線の探索は、前述の銀河中心領域ガンマ線放射とも関連性が深く、例えば、仮に前述の銀河中心領域の MeV ガンマ線放射に暗黒物質の対消滅の寄与があるならば、これに伴う電子陽電子対消滅線も期待される [6] など、両者の空間分布を同時に議論することで、より強い制限を得る事が可能となる。

3 SMILE-3 ETCC

これらの科学観測を行うべく、我々は SMILE-3 用の検出器として、3 気圧の CF_4 ガスを用いた $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の飛跡検出器と SMILE-2+ と同等の阻止能のシンチレーション検出器を組み合わせた ETCC を開発する。この ETCC で期待される有効面積は図 5 のようになり、0.3 MeV で $\sim 10 \text{ cm}^2$ を達成可能である。シンチレーション検出器については、光読み出しに SiPM を採用する。これは、GSO シンチレータの発光波長における光子検出効率が、従来用いていたマルチアノード PMT の 2 倍程高く、エネルギー分解能の向上が見込める為である。また SMILE-2+ のシミュレーションから、ETCC の空間分解能が反跳電子の方向精度で大きく律速されている事が判明した為、飛跡検出器の読み出し電極の構造の改良を進めている。SMILE-2+ の飛跡検出器は、省電力化の為に回路数を削減し、0.8 mm ピッチの直交型ストリップ電極により、2 方向ヘブロジェク

ションした飛跡画像が取得できたが、SMILE-3 では、120 度で交差する 3 方向ヘストリップ電極を 0.48 mm 間隔で配置し、3 つのプロジェクション画像を取得する。また、機械学習を用いた電子飛跡解析法により、より正確な反跳方向の導出を行う。この SMILE-3 ETCC の理想的な検出感度は図 6 の様に COMPTEL のそれを超える事が期待される。既に長時間気球実験に向け、米国 NASA の balloon program office との協議が始まっており、米国との共同研究の体制も構築しつつある。この SMILE-3 実験で、20 年停滞している MeV ガンマ線天文学を大きく進めていく。

参考文献

- [1] V. Schönfelder+, A&ASS, 143 (2000), 145-179.
- [2] L. Bouchet+, ApJ, 679 (2008), 1315.
- [3] V. Schönfelder+, ApJS, 86 (1993), 657-692.
- [4] R. Diehl+, Science, 345 (2014), 1162-1165.
- [5] T. Tanimori+, New Astron. Rev., 48 (2004), 263.
- [6] K. Ahn & E. Komatsu, Physical Review D, 72 (2005), 061302(R).
- [7] Y. Inoue+, ApJ, 880 (2019), 40.
- [8] M. Ajello+, ApJ, 699 (2009), 603-625.
- [9] F. A. Aharonian & A. M. Atoyan, astro-ph/9803091 (1998).
- [10] M. Lyutikov+, MNRAS, 489 (2019), 2403-2416.
- [11] D. Khangulyan+, MNRAS, 491 (2020), 3217-3224.
- [12] B. J. Carr+, Physics Review D, 81 (2010), 104019.
- [13] W. R. Purcell+, ApJ, 491 (1997), 725-748.
- [14] T. Siegert+, A&A, 586 (2016), A84.
- [15] C. A. Kierans+, ApJ, 895 (2020), 44.
- [16] T. Siegert+, ApJ, 897 (2020), 45.