

# MeV ガンマ線天体探査気球実験計画 SMILE-3

高田淳史, 谷森達, 水村好貴, 竹村泰斗, 吉川慶, 中村優太, 阿部光, 古村翔太郎, 岸本哲朗,  
谷口幹幸, 小野坂健, 齋藤要, 窪秀利 (京大), 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), 荘司泰弘 (大阪大)

## 1 MeV ガンマ線天文学の現状と SMILE-2+

数百 keV から百 MeV にかけての MeV ガンマ線帯域は、原子核の脱励起線が直接観測できる唯一の帯域であり、超新星爆発や中性子星合体に伴う元素合成の現場の直接観測や、銀河系内における物質拡散の様子などが解明できると期待されてきた。一方で MeV ガンマ線天体観測は、1990 年代 CGRO に搭載された COMPTEL が 30 個程度の定常天体を発見 [1] して以降大きな進展はなく、2003 年から観測を続けている INTEGRAL も 600 keV 以上では 4 つの定常天体の検出に留まっている [2]。

この現状を打開するべく、我々はガンマ線の到来方向を光子毎に一意に決定する、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 [3]。ETCC(図 1) は、入射ガンマ線をコンプトン散乱させ、その反跳電子の飛跡とエネルギーを得るガス飛跡検出器と、散乱ガンマ線を吸収しそのエネルギーと吸収点を得る位置感度型シンチレーションカメラで構成される。さらに、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、コンプトン散乱を起こしたガンマ線事象である事を強く主張できる。この ETCC はコンプトン散乱を利用してガンマ線をとらえる点は COMPTEL と同様であるが、COMPTEL では測定不可能であった反跳電子飛跡の測定がガンマ線の画像化や雑音除去に大きく影響している。

我々は、この ETCC による天体観測能力を実証すべく、2006 年の気球実験 (SMILE-I 実験) [4] や陽子ビームによる放射場下でのガンマ線源観測 [5]、福島放射線環境測定 [6] などで証明し報告してきた。さらに、2018 年に ISAS/JAXA の気球を用いてオーストラリア アリススプリングスから放球された SMILE-2+ では、26 時間程の水平浮遊により、銀河中心領域を含む南天について掃天観測を実施、想定した検出感度のおおよその実現と、銀河中心領域からのガンマ線放射の有意な検出に成功した。特に銀河中心領域からのガンマ線放射は、再構成ガンマ線線事象のイベントレートにおいても、銀河中心領域の仰角変化に伴う

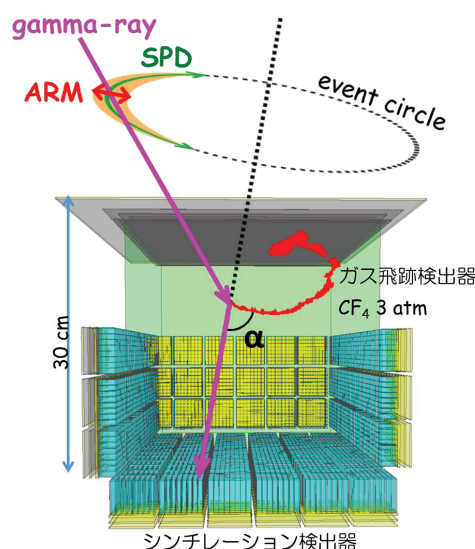


図 1: 電子飛跡検出型コンプトンカメラ概念図

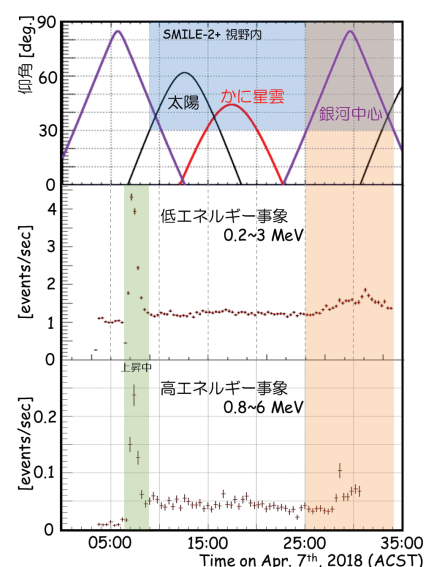


図 2: SMILE-2+によるガンマ線事象レートの時間変化と天体の仰角

gas	Ne [個/分子]	$\rho$ [mg/cm <sup>3</sup> /atm]	$X_0$ [m atm]	w [eV]	dE/dx [keV/cm/atm]
Ar	18	1.784	109.6	26	2.44
CF <sub>4</sub>	42	3.884	87.52	54	7
ILC gas	19.04	1.865	109.5	26.34	2.65
Ne-Ar-CF <sub>4</sub>	22.824	2.096	154.9	41.72	3.74

図 3: 飛跡検出器のガス候補についての電子数・密度・放射長・w 値・荷電粒子のエネルギー損失率

超過の時間変化が顕著に見られており (図 2)、SMILE-2+が従来にない程の低雑音観測を実現したことは疑いが無い。SMILE-I および SMILE-2+の結果は、ETCC が次期 MeV ガンマ線天体観測に求められる広視野・広帯域・低雑音の観測を実現していることを示している。

## 2 SMILE-3 計画に向けた ETCC の開発

SMILE-I および SMILE-2+の観測結果から、地上較正試験からの予想検出感度がおおよそ実現可能であることが見えてきた。この為、次期計画 SMILE-3 での長時間気球実験を用いた科学観測を目標に、ETCC の改良を進めている。ここでは、現在 SMILE-3 に向けた各要素の改良について紹介する。

### 2.1 ガス飛跡検出器

ETCC の有効面積と空間分解能は、ガス飛跡検出器にどのようなガスを使用するかに依存する。ガス飛跡検出器のガスはコンプトン散乱の散乱体である為、体積当たりの電子数が多い事が有効面積拡大につながる一方で、原子番号の増加は光電吸収の確率を大幅に増加させるため、SN 比を悪化してしまう。また、電子の反跳方向はガスの多重散乱によって情報を失っていくため、空間分解能の向上にはその影響が少ないガスの選択も必要となる。図 3 は、SMILE-3 ETCC の飛跡検出器のガスとして候補に挙がっているものの電子数・密度・放射長・w 値・荷電粒子のエネルギー損失率である。この表からコンプトン散乱優位なガスは CF<sub>4</sub> であることが見て取れ、SMILE-2+で使用した ILC ガス (Ar:CF<sub>4</sub>:iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 95 : 3 : 2) よりも 2 倍強コンプトン散乱を起こしやすい。一方で、放射長が短い為、多重散乱は ILC ガスよりも受けやすい。また、CF<sub>4</sub> ガスのような分子ガスは、一般にガス増幅を起こしにくく、ガス検出器として使用するには扱いにくいという側面がある。このため、これまでの SMILE 実験では主たるガスとしては使用してこなかった。しかしながら、CF<sub>4</sub> ガスは荷電粒子のエネルギー損失率の大きいガスでもある為、単位長さあたりの電離電子の数 (= エネルギー損失率/w 値) は、これらのガスの中で最も多い。従って、荷電粒子の飛跡を得るのに最低限必要なガス利得は、ILC ガスが  $1.8 \times 10^4$  1/atm であるのに対して、CF<sub>4</sub> は  $1.4 \times 10^4$  1/atm と数割少なく済む。これによりガス圧を 3 気圧まで上げる事で、7000 以上のガス利得が得られれば安定的に荷電粒子の飛跡が取得できることが期待できる。3 気圧の CF<sub>4</sub> ガスで 30 cm<sup>3</sup> のガス飛跡検出器を構築し、これを用いて ETCC を開発すると、0.5 MeV で最大 10 cm<sup>2</sup> の有効面積を確保する事が可能となる。

ETCC の空間分解能を向上するには、反跳電子飛跡の高精細化が欠かせない。しかし、図 4 左に示す様に現状の直交ストリップ電極型は、飛跡の再構成精度は不完全である。これを完全に解くには、各交点事に読み出す事が最も確実ではあるが、回路数が膨大になってしまう為に気球や衛星に搭載する検出器には非現実的である。この為、飛跡検出器の信号を 3 方向から読み出すような電極構造 (図 4 右) の開発を進めている。この電極構造はガス検出器用シミュレータ Garfield++[7] を用いた検証から、従来型電極と同等以上のガス利得が得られ、且つ 3 つの電極から同程度の大きさの信号が得られると予想されている。現在 5 cm 角程度の試作を進めており、実証できれば SMILE-3 に向けて大型化を進める予定である。ガス飛跡検出器の 3 軸読み出しが実現すれば、電子の反跳方向は多重散乱程度になると期待され、ETCC としての空間分解能は、0.5 MeV で 9°、1 MeV で 5 程度が期待される。

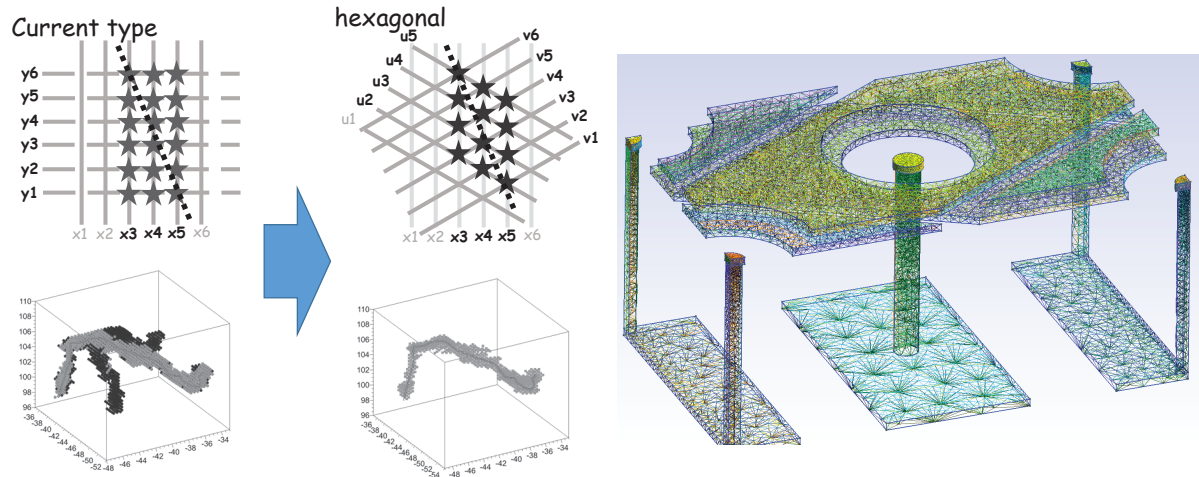


図 4: (左) 飛跡検出器の読み出し方法の違いと (右) 3 軸読み出し電極構造図

		g/cm <sup>3</sup>	Photon/MeV	nsec		% @ 662 keV	
		密度	光量	減衰時間	Zeff	分解能	潮解性
NaI (TI)		3.67	45,000	60	49.9	5.6	有
GSO	Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce	6.71	12,500	56,600	57.2	7.0	
HR-GAGG	Gd <sub>3</sub> (Al, Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce	6.3	~50,000	138,649	53.6	3.7~5	
LaBr <sub>3</sub> :Ce		5.1	~70,000	~30	45.4	2.0~3.2	有
BGO	Bi <sub>3</sub> Ge <sub>4</sub> O <sub>12</sub>	7.13	~7,500	100,300	72.0	9	
PWO	PbWO <sub>4</sub>	8.2	~300	2.5, 11, 98	73.8		

図 5: シンチレータ候補についての密度・光量・減衰時間・有効原子番号・典型的なエネルギー分解能

## 2.2 シンチレーションカメラ

図 5 はシンチレーションカメラとして候補に挙がっているシンチレータの密度・光量・減衰時間・有効原子番号・典型的なエネルギー分解能である。SMILE-I 及び SMILE-2+ では GSO シンチレータを使用してきたが、図 5 での比較から分かるように、GSO シンチレータは阻止能・時間分解能・エネルギー分解能の面でバランスの取れたシンチレータと言える。一方で、GSO シンチレータの光読み出しには PMT を使用してきたが、GSO シンチレータの発光波長は 430  $\mu\text{m}$  と PMT の量子効率のピークの波長 ( $\sim 350 \mu\text{m}$ ) よりも長く、MPPC の光子検出効率の方が PMT の量子効率よりも 2 倍程良い。この為、光読み出しを MPPC へ変更する事でエネルギー分解能を 1.4 倍向上することが期待できる。事実、試作機を用いた試験では、PMT による光読み出しでは 662 keV で 11% であったエネルギー分解能を MPPC で 7.8% まで向上することに成功している。また、ETCC の測定エネルギー帯域はシンチレーションカメラの読み出し回路のダイナミックレンジが律速している為、シンチレーションカメラの読み出し回路を低利得と高利得な回路の 2 つで読み出す設計を進めている。これにより、ETCC のエネルギー帯域は 0.2-15 MeV 程度を見込んでいる。

## 2.3 データ収集システム

SMILE-I および SMILE-2+ では、シンチレーションカメラでデータ収集を開始し、ガス飛跡検出器の信号の有無を確認の上、データを回収する、という方式を取っていた。この方法では、シンチレーションカメラの信号が来る度、不感時間が生じてしまう。実際、SMILE-2+ の水平浮遊での不感時間は、飛翔時間の内 18% を占めており、不感時間の削減は正味の観測時間の確保に大きな意味を持つ。SMILE-3 のデータ収集システムでは、シンチレーションカメラとガス飛跡検出器の信号が、既定の時間幅内に両方とも発生しない限りデータ収集を止めないような設計としており、小型の ETCC を用いた試験では、SMILE-2+ のデータ

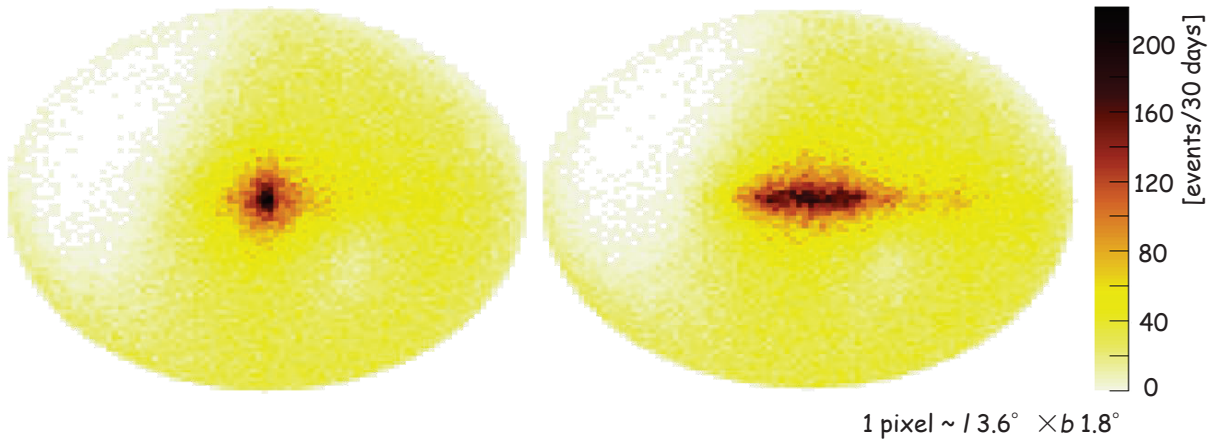


図 6: SMILE-3 が南半球で高度 40 km を 30 日間飛翔した際に取得できる 0.5 MeV (0.46-0.56 MeV) での計数率マップ

収集システムの不感時間の 1/5 程度に抑える事が出来ていた。従って、SMILE-3 の不感時間は数%にまで削減できると予想される。

### 3 長時間気球実験で拓く MeV ガンマ線天文学

上記のような改良を加えた SMILE-3 ETCC は、SMILE-2+の検出感度を 5 倍程向上させることが予想される。この SMILE-3 を南半球で高度 40 km に 30 日間飛翔させた場合、図 6 のような計数率マップが得られる。左右 2 つの図の違いは、電子陽電子対消滅線の空間分布が、SPI/INTEGRAL が予想するように銀河中心付近に丸く集まっているのか、天体由来として銀河面に広く分布しているのかの違いである。SMILE-3 の観測はこの 2 つの違いを明確に分離することが可能である上、0.2-15 MeV に渡ってこのような空間分布が得られることから、銀緯・銀緯の違いによるスペクトルの変化も観測できる。この為、銀河系内拡散ガンマ線の起源の特定や、電子陽電子対消滅線の起源解明に迫ることが可能となるほか、 $^{26}\text{Al}$  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、相対論的電子振込み現象の観測が実現できる。豪州での 1 日飛翔を用いた場合は、細かなスペクトルの違いまでには至らないが、電子陽電子対消滅線の広がりが銀河中心付近に集中するか、銀河面に広く分布するかの違いは測定可能である。さらに北半球での気球観測が実施できれば、かに星雲や Cyg X-1 の偏光観測も可能となり、SMILE-3 により 20 年間停滞していた MeV ガンマ線天文学を大きく前進する。

### 参考文献

- [1] V. Schönfelder+, A&ASS, Vol. 143 (2000), 145-179.
- [2] L. Bouchet+, ApJ, 679 (2008), 1315.
- [3] T. Tanimori+, New Astron. Rev., 48 (2004), 263.
- [4] A. Takada+, ApJ., 733 (2011), 13.
- [5] T. Tanimori+, ApJ., 810 (2015), 28.
- [6] D. Tomono+, Scientific Reports, 7 (2017), 41972.
- [7] <http://garfieldpp.web.cern.ch/garfieldpp/>