

# 狭視野の半導体コンプトンカメラによる sub-MeV 大気球実験

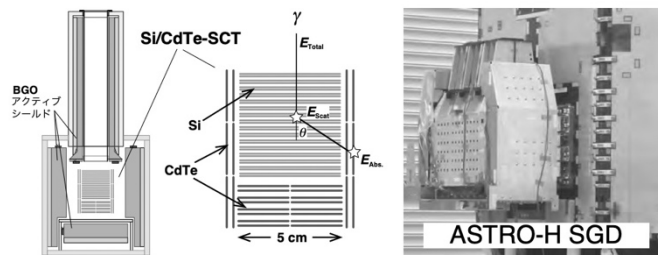
名大 KMI<sup>A</sup>, 東大 Kavli IPMU<sup>B</sup>, 名大理学研究科<sup>C</sup>, ISAS/JAXA<sup>D</sup>  
 中澤知洋<sup>AC</sup>, 武田伸一郎<sup>B</sup>, 辻 結菜<sup>C</sup>, 大熊佳吾<sup>C</sup>, 安藤美唯<sup>C</sup>, 渡辺 伸<sup>D</sup>, 高橋忠幸<sup>B</sup>

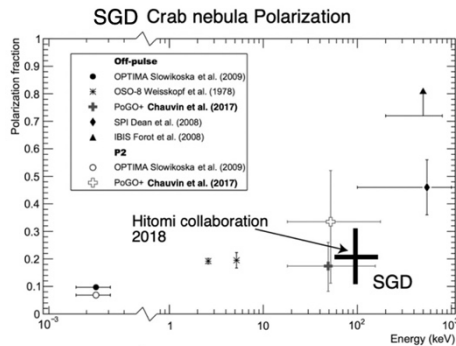
## 1：研究目的

宇宙には数千万度から1億度の高温天体が多数存在し、keV帯域のX線で明るく輝く。一方で、GeVやTeVガンマ線、PeVニュートリノ観測により、宇宙には相対論的な高エネルギーの非熱的粒子も満ちていることが知られている。しかし宇宙の非熱的エネルギーの総量を支配する、MeVエネルギーの粒子の分布はまだわかっていない。keVやGeVの光子は、光電吸収と電子陽電子対生成により光子の全エネルギーが電子に移動するため検出しやすいのに対し、MeV帯域で卓越するコンプトン散乱では、反跳電子と散乱光子の両方を捉えないと入射光子の方向や全エネルギーが測定できない。宇宙線陽子に励起された原子核反応によるバックグラウンド信号も強い。このためMeV帯域は、隣接するGeV帯域より2桁、keV帯域との比較では5桁も感度が劣る、多波長宇宙観測の大きな穴である。熱的から非熱的世界への粒子注入がおき、重元素生成に起因する核ガンマ線を直接探査できる重要な帯域でもあるにも関わらず、MeV観測が足りないゆえに多くの謎が残されている。

MeV観測の革新のために、ESA Voyage2050 ASTROMEV衛星 [1]や US Decadal Survey Astro2020 AMEGO衛星[2]などが提案されている。しかしいずれもFermi GeV衛星に匹敵する感度を目指しているため、検出器が大型・高コストになる一方で、技術実証が不足し今なお予算の獲得に至らない。小規模でも迅速にMeV宇宙観測を実現して「実績」を得て、本格観測へつなげるステップが重要であると我々は考える。

次世代MeV観測技術の一つが、半導体コンプトン望遠鏡(Semiconductor Compton Telescope : SCT)である。エネルギーと位置分解能に優れ、コンプトン運動学を解く能力が高く、高密度実装により大有効面積を得られ、偏光検出も得意である。量子論的な角分解能の限界の観点から、SCTでは散乱体にSiを用いることが有利であり、上記2計画もこれを採用している。ガス検出器ベースのコンプトン望遠鏡と比較して、特に 100 keV以下まで観測できるのも、SiベースのSCTの特徴である。その最先端にいるのが、SiとCdTe半導体を組み合わせた我々独自の「Si/CdTe-SCT」 [3-6]である。ASTRO-H衛星の軟ガンマ線検出器(Soft Gamma-ray Detector: SGD)に採用され、2016年に軌道上で実証された世界唯一のSCT技術となった ([6,7])。SGDはコンプトン再構成





の角分解能が量子力学的な限界による低くなる

100-300 keV、すなわちsub-MeV帯域に重点を置き、広視野を捨て、「すざく」衛星で成功した「アクティブシールドで視野を絞るバックグラウンド除去」と組み合わせた「狭視野SCT」という新概念を導入した。シールドによりsub-MeVで顕著な宇宙X線背景放射や大気ガンマ線を除去し、コンプトン運動学で放射化成分も効率よく除去する二重のバックグラウンド除去により高感度を得て、5 ksという短時間の観測で「かに星雲」からの偏光観測にも成功した[7]。しかし衛星が失われたため観測は継続できなかった。

本研究では、狭視野Si/CdTe-SCTを用いた将来の本格MeV観測の早期実現を目標に、大気球での性能を実証する。大気球高度では軌道上のように大量の高エネルギー陽子にさらされず、感度制約要因の一つである検出器の放射化がほぼ起きない一方で、大気による吸収や大気ガンマ線が邪魔である。これら2つの障害は水平線に近いほど悪化するため、視野を絞って大仰角を選択的に観測することが有効である。すなわち、狭視野SCTを、大気球用にアレンジするのが良い。気球高度での性能を実証し、最終的には「長期気球搭載の狭視野Si/CdTe-SCTによる高感度MeV宇宙観測」への道を拓く。

## 2：研究計画

本研究では我々は3つのステップで研究開発を進めることを考えている。

**Step-1**：重量 25 kg 程度の気球用 miniSGD を開発し、総重量 60 kg 程度のシステムとし、大気球高度で数時間以上動作させ、その低バックグラウンドを実証する。残るバックグラウンドの起源を同定し、さらなる検出器の最適化を図る。

**Step-2**：重量 150 kg 程度の気球用 SGD-light を開発し、高度~40 km で数日/高度 32-34 km での数週間の観測で、太陽フレアやパルサー星雲などの偏光分光観測を実施する。

**Step-3**：重量 300 kg 程度の気球用 SGD-full による準定常的な sub-MeV 観測を実施し、その成果を衛星などの大型プロジェクトへつなげる。

である。今回提案するのは、Step-1 である。

## 3：観測装置概要

本研究は ASTRO-H SGD のコンセプトをベースに、小型でも先端の結果を得るために、Si と CdTe 半導体素子を、位置分解能 3.2 mm のパッド素子から、250 μm 分解能の両面ストリップ素子に変更した。有効面積では SGD に大きく劣るものの、それ以外の全ての面において最高性能の Si/CdTe-SCT とし、アクティブシールドと組み合わせ、コンパクトな狭視野 SCT を実現する。本提案の最大のポイントは気球高度での運用である。Step-1 では検出器が小さく、バックグラウンド低減の概念実証が主目的であるが、可能な限り、天体

観測も狙う。2022-25年ごろは太陽活動期であり、確率は低いものの太陽フレア観測も期待できる。明るいものであれば、偏光の観測も期待できる。

狭視野アクティブシールドは、ASTRO-H 硬 X 線イメージャ(Hard X-ray Imager: HXI)でも採用され、光電吸収動作モードで、5-80 keV 帯域で世界最良の低バックグラウンドを達成した[8-9]。また、CdTe-DSD 技術は将来衛星 FORCE において、硬 X 線イメージャへの採用が検討されている。本研究では、miniSGD をコンプトンカメラとして動作させつつ、同時に光電吸収イベントも取得し後で解析することで、FORCE などの硬 X 線帯域の将来計画でも応用できるデータを得る。

#### 4：開発の進捗

主検出部は HXI で用いた Si と CdTe の両面ストリップ検出器の改良版を用いている。特に CdTe を 0.75 mm から 2 mm 厚に増やすことで、sub-MeV での検出効率を向上させる。アクティブシールド技術では、結晶シンチレータを読み出す光センサーを APD から MPPC に変更し性能向上を図った。検出器視野は気球環境で最適な 10–30 度に緩和し、仰角を固定しつつ可能な限り日照中はゴンドラごと太陽を一定角度で追跡することで、簡素な構造で太陽観測を実現する。



開発中の miniSGD。全体構造(左、耐圧容器はまだ)と、CdTe 半導体面(右)。

2020 年度後半から半導体検出器を調達し、6 デバイスについて基礎的な動作試験を終了し、気球用のデータ処理系も立ち上げた。シールド部も全ての BGO 結晶を入手し、MPPC 読み出し試験を終了している。回路系は雷ガンマ線観測用の既存回路を改造した。気球システムとのインタフェースの試験も進めている。コンパクトな検出器構造も開発して組み上げ中であり、耐圧容器の設計と、課題である入射窓のフルスケールの BBM 耐圧・耐久試験も終了している。このように全系噛み合わせの直前まで到達している。

今後は、電池を用いた電源系を確立しつつ、地上でのキャリブレーション実験を進める。具体的には SPring-8 での sub-MeV 偏光観測実証実験、実験室での低バックグラウンド実証試験、そして、コンプトンカメラとしての撮像性能の実証を行う。特に、2 mm と厚くなった CdTe 検出器内部での z 方向位置を、複数ストリップの信号情報から計測する

「depth sensing」技術を東大 KavliIPMU と協力して確立し、これを用いたコンプトン再構成の精度を検証する。2022 年の秋には全系を検証し、豪州へ発送する。4 月ごろの Fujin2 の相乗りで飛揚する予定である。

## 5：将来の展開

MeV 観測の大規模な将来計画としては、既出の ASTROMEV/eASTROGAM と AMEGO があり、前者は中澤らが、後者は SGD の PI であった田島らが参加している。これらとは独立に、二回りほど小さい COSI-SMEX 衛星が存在し、中澤と高橋が参加してきた。このように日本は MeV の先端観測研究に一定の貢献をしつづけている。COSI 計画は 2021 年 11 月に採択され、2025 年の打ち上げが決まった。角分解能の劣化を受け入れてラインガンマ線に特化した Ge-Ge 半導体コンプトン望遠鏡を採用しており、100 keV～数 MeV で主に銀河系内のガンマ線輝線のサイエンスを狙っている。我々は miniSGD の飛揚実績を活かして SCT データ解析で一步前進し COSI での日本のプレゼンスを増したい。また、COSI の苦手とする 100-500 keV の連続成分観測を担うツールとして、「気球搭載狭視野 Si/CdTe-SCT」としての SGD-lite/full の開発研究を推進する。

大気球による MeV 観測では、広視野の電子トラック型のガスベースのコンプトン望遠鏡である SMILE シリーズが京大のグループ(谷森、高田ら)を中心に進められており、150 keV 以上の帯域で成果を上げつつある。他にも液体アルゴンを用いた GRAMS 計画(小高ら)なども検討されている。Si/CdTe 狭視野 SCT である本計画は、狙う帯域も 100 keV 中心で、既知の天体の偏光分光観測を得意とするなどと、相補的なコンセプトであり、MeV の革新へ向けてこれらの性能実証が重要である。

### Reference

- [1] “The e-ASTROGAM mission. Exploring the extreme Universe with gamma rays in the MeV – GeV range”, A. De Angelis, et al. (含む中澤), *Experimental Ast.*, 44(1), pp.25--82, 2017
- [2] “All-sky Medium Energy Gamma-ray Observatory: Exploring the Extreme Multimessenger Universe”, Julie E. McEnery et al. <https://arxiv.org/abs/1907.07558>
- [3] “Application of CdTe for the NeXT mission” T. Takahashi et al. *NIM-A* 541 (2005) 332-341
- [4] “A Si/CdTe semiconductor Compton camera”, S. Watanabe et al. (含む中澤) *IEEE TNS* 52, 2045–2051 (2005).
- [5] “Concept of a small satellite for sub-MeV and MeV all sky survey: the CAST mission”, K. Nakazawa, T. Takahashi, et al, *Proc. SPIE*, 8443, id. 84430E 12pp. (2012)
- [6] “Design and performance of Soft Gamma-ray Detector onboard the Hitomi (ASTRO-H) satellite”, H. Tajima, S. Watanabe, et al (含む中澤), *JATIS* 4(2), 021411 (2018)
- [7] “Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with the Hitomi Soft Gamma-ray Detector”, Hitomi Collaboration (Watanabe et al.), *PASJ*, (2018) 70 (6), 113
- [8] “Hard x-ray imager onboard Hitomi (ASTRO-H)”, K. Nakazawa et al. *JATIS*, 4 (2018)
- [9] “In-orbit performance and calibration of the Hard X-ray Imager onboard Hitomi (ASTRO-H)”, K. Hagino et al. *JATIS*, 4 (2018)
- [8] “Polarimetric performance of Si/CdTe semiconductor Compton camera”, S. Takeda, et al (含む中澤), *NIM-A*, 622, 619--627 (2010)