

isas23-sbs-014 狭視野の半導体コンプトンカメラによる sub-MeV イメージャの大気球実験

○中澤知洋（名古屋大学），武田伸一郎（東京大学 Kavli IPMU/iMAGINE-X），大熊佳吾，大宮悠希，安藤美唯（名古屋大学），渡辺伸（JAXA 宇宙科学研究所），高橋忠幸（東京大学 Kavli IPMU），小林昌彦，石田直樹，大口真奈里，田中敦也，西村悠太（名古屋大学），大西光延，新井利彦（iMAGINE-X）

sub-MeV imaging observation using balloon-borne narrow field-of-view semiconductor Compton camera
 Kazuhiro Nakazawa (Nagoya-U), Shin'ichiro Takeda (U-Tokyo Kavli IPMU/ iMAGINE-X), Keigo Okuma, Yuki Omiya, Mii Ando (Nagoya-U), Shin Watanabe (JAXA/ISAS), Tadayuki Takahashi (U-Tokyo Kavli IPMU), Masahiko Kobayashi, Naoki Ishida, Manari Oguchi, Atsuya Tanaka, Yuta Nishimura (Nagoya-U), Mitsunobi Onishi, Toshihiko Arai (iMAGINE-X)

Key Words: MeV astronomy, Scientific Ballooning, Si/CdTe Compton Telescope

Abstract

miniSGD-I is a concept verification model of astro-physical MeV observation balloon. The concept is based on narrow field of view Si/CdTe semiconductor Compton telescope, which was first verified with the SGD system onboard the ASTRO-H satellite. miniSGD was developed aiming at FY2023 Australian ballooning campaign as a piggy-back mission, which was cancelled in late 2022. The system was almost fully ready for flight and further improvement is ongoing. Now the mission will have a coded-mask within the active-field.

1. 研究目的

MeV 帯域は、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あり、その高感度観測は高エネルギー宇宙物理の推進に欠かせないが、隣接する GeV 帯域より 2 桁、keV 帯域より 5 桁も感度が劣る「感度の谷」となっている。keV や GeV の光子は光電吸収や電子陽電子対生成により検出しやすいが、MeV 帯域で卓越するコンプトン散乱は、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ず検出が難しいこと、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 (BGD) 信号も強いためである。実際、これまでに全天で観測されている MeV 天体は 30 個程度にすぎない。これは宇宙が MeV 帯域で暗いからではなく、ひとえに高感度観測が難しいからである。

MeV 帯域は宇宙観測の最大のフロンティアであり、その高感度観測の実現は、極めて重要である。2027 年に打ち上げが決まった NASA の COSI 衛星は、2000 年に活動を停止した NASA のガンマ線天文衛星 CGRO 衛星の COMPTEL 検出器による MeV 全天観

測の感度を、1 桁改善すると期待されており、MeV 天文学の新たな発展の時代の狼煙をあげた。しかし、COSI は小型でその性能にはまだまだ改善の余地があるため、ESA の ASTRO-MEV 衛星 [1] や NASA の AMEGO 衛星 [2] などが提案されるなど、MeV 宇宙観

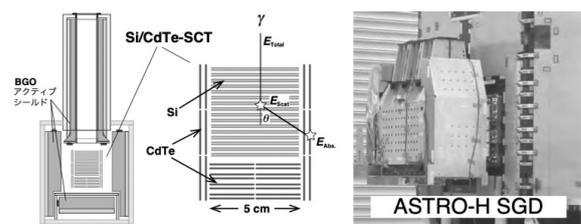


図 1 : ASTRO-H SGD 検出器

測の革新へむけた世界的な動きが活発化している。また、これと並行してさらに高感度の将来 MeV 宇宙観測技術の開発が世界中で進みつつある。

新型の 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。半導体は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。COSI も第 1 世代の SCT であり、Ge 半導体のアレイを使用して

いる。実は SCT の散乱体には Si が最適で、 ~ 60 keV という低いエネルギーまで観測できる。Si と CdTe 半導体を組み合わせた我々独自の「Si/CdTe-SCT」[3-6] は、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世界唯一の SCT 技術となった([6,7])。

SGD は 100 keV 前後の sub-MeV 帯域に着目し、量子力学的に角分解能が悪化するのに対応して広視野を捨て、「すぎく」衛星で成功した「アクティブシールドで視野を絞る BGD 除去」と組み合わせた「狭視野 SCT」という新概念を導入した。sub-MeV で顕著な宇宙 X 線背景放射や大気ガンマ線を狭視野シールドで除去し、コンプトン運動学で残る BGD 放射化成分も効率よく除去する二重の BGD 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。

2. 研究計画

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 ASTRO-H/SGD の感度制約要因の一つである検出器の放射化が起きない。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、すなわち、狭視野 SCT を、大気球用にアレンジするのが良い。この概念を気球高度で実証する必要がある。

2つめの狙いが角分解能の向上である。コンプトンカメラは最新の電子飛跡追尾型でも、量子力学的限界により角分解能が数度より良くなることはない。このままでは近い将来 MeV 宇宙観測の感度向上に伴い、点源が分解できずに大きな支障となる。そこで、miniSGD を発展させ、深いアクティブシールドを持つことを活かし、その中に符号化マスクを取り込んだ miniSGD-I にアップグレードする。

我々は3つのステップでの開発を考えている。

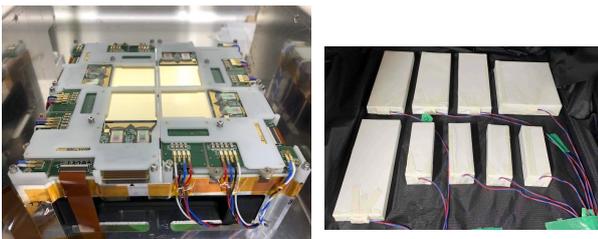


図3：開発中の miniSGD。CdTe 半導体面(左)と BGO アクティブシールドユニット(右)。

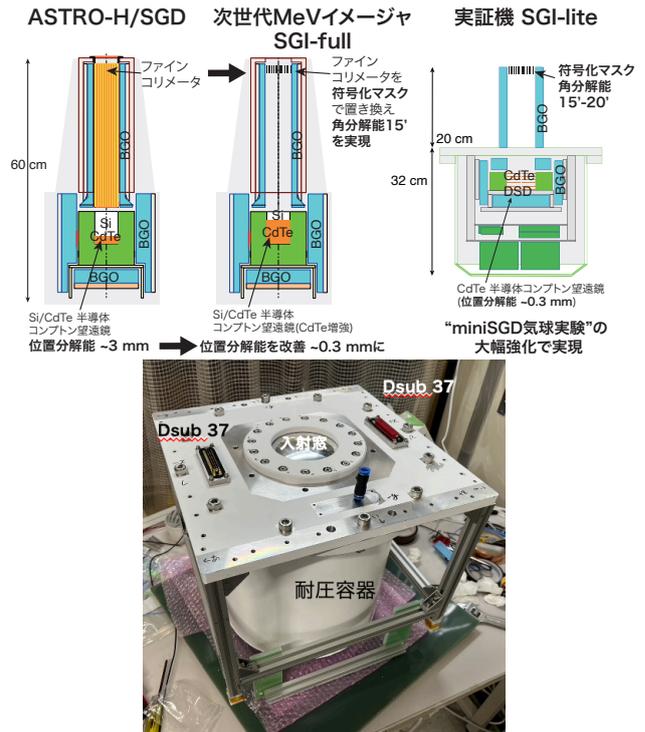


図2：miniSGD-I の概要。開発した miniSGD の外見。符号化マスクを追加した改造中である。

Step-1：狭視野 SCT として、最低限の機能を備えた本体重量 ~ 80 kg の miniSGD-I を開発し、大気球高度で数時間以上動作させ、その低 BGD を実証する。残る BGD の起源を同定し、さらなる検出器の最適化を図る。並行して地上実験で撮像機能を検証し、上空の BGD データと組み合わせて、装置の性能を検証する。

Step-2：重量 150 kg 程度の気球用 SGD-I ver1 を開発し、高度 36-40 km での数日間の観測、または高度 32-34 km での数週間の観測を通じて、太陽フレアやパルサー星雲などの偏光分光撮像観測を実施する。

Step-3：重量 300 kg 程度の気球用 SGD-I ver2 または、赤道軌道の衛星の実現を図る。

である。今回提案するのは、Step-1 である。

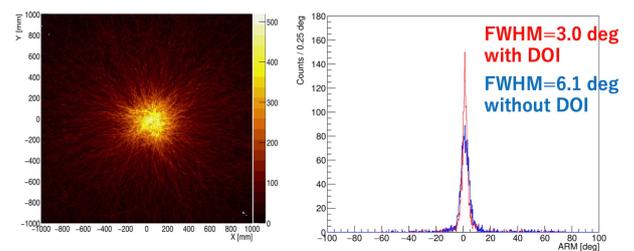


図4：相互作用深さ測定を用いて得られたコンプトンイメージ(左)と、Angular Resolution Measure の比較(中) [12]。

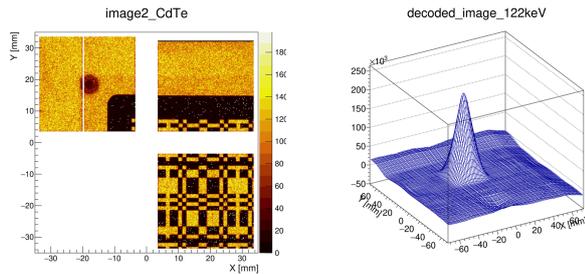


図 5：符号化マスクの試験として光電吸収イベントに適用した撮像結果。

3. 観測装置概要

miniSGD は小型でも先端の結果を得るために、Si と CdTe 半導体の両面ストリップ素子(Double-sided Strip Detector: DSD)を採用して、位置分解能を SGD の 3.2 mm から 250 μm へ改良した。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 を実現した。Step-1 で用いる miniSGD は小さく、BGD 低減の概念実証が主目的である。ただし、2026 年ごろは太陽活動期の末期であり、確率は低いものの太陽フレア観測も期待でき、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 BGD を達成した[8-9]。miniSGD-I はこのように将来衛星 JEDI の硬 X 線イメージャの BBM も兼ねている。

4. 開発の進捗

miniSGD の主検出部は予算の制約もあり DSSD 2 枚、CdTe-DSD 4 枚で構成する。CdTe は 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。しかしそのままでは、xy だけでなく、深さ方向 x の情報もないとコンプトン再構成時に角分解能が劣化する。そこで我々は 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 of interaction」推定技術を東大 KavliIPMU と協力して確立した。これにより CdTe DSD が 0.75 mm 厚であった時と同等の性能を、2 mm 厚のケースで得ることに成功した[12]。これは回路系などの枚数を増やさずに、有効検出効率を 2.7 倍に改善したことに相当し、今後の高感度化の重要な一歩となる。

アクティブシールドは、20-30 mm 厚の BGO 結晶シンチレータ 9 ユニットで半導体検出器を囲み、光センサーは MPPC として性能向上を図った。検出器視野

は気球環境で最適な 10-30 度に緩和する。この視野の中で符号化撮像ができる。

観測としては、仰角を固定しつつ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。今後の予算次第では、仰角制御を追加し、必要とあれば単独気球でのアジマス制御の導入も検討する。いずれも数度の精度でよい。一方で符号化マスクの性能を活かすには、指向方向検知は 3 分角レベルが必要であり、適切な太陽センサを追加する。

miniSGD システムについては、Fujin2 気球実験のピギーバックとして 2023 年春の豪州実験への参加が決まり、開発を進めてきた。2021 年度に半導体検出器、アクティブシールド、主要回路系を調達して試験し、組み上げ、検出器系を確立した。2022 年度には電池駆動を実証した。耐圧容器も完成させ、名大で低温真空環境試験も実施して性能が出ていることを確認した。その後は、検出器の性能をさらに高めるべく、アナログパラメータの調整や各チャンネルのエネルギー較正などのキャリブレーション実験を精力的に進めてきた。国際学会でも発表している[11, 12]。

2022 年 10 月には、Fujin2 ゴンドラおよび気球テレコマシステムとの全系の噛み合わせ試験も実施した。簡易的な EMC 測定も実施し、大きな問題がないことも確認し、miniSGD 単体としてはほぼフライトレディーになった。本来は、2023 年 4-5 月の放球に備える予定であったが、2022 年 11 月頭に Fujin2 が豪州フライトを断念することとなり、ピギーバックの miniSGD も同時に断念となった。

miniSGD の目的や意義は変わらないことから、将来のフライトを睨んだ準備を継続しつつ、その後、更なる性能実証や改良実験などを始めている。中でも深さ検出技術の改善を進めつつ、符号化マスクを追加した実証試験も進めている。現在まさに撮像データを取得中で、図 5 に示すように、すでに光電吸収での撮像は実現しておりこれをコンプトン再構成イベントに適用する。

5. 将来の展開

2027 年に打ち上げられる、NASA の SMEX 衛星 COSI は、27 年ぶりに MeV 全天観測を刷新する。これにより、再び MeV 宇宙物理学が大きく進展することは間違い無い。巨大なシンチレーション検出器ベースのコンプトン望遠鏡であった CGRO 衛星の COMPTEL 検出器を、はるかに小さな COSI で上回ることは、Ge 半導体コンプトン望遠鏡(SCT)という技術革新の成果で

ある。しかしながら、コンプトン望遠鏡の技術革新はいまも急速に進んでいる。

我々は miniSGD の実験結果を活かして SCT データ解析で一歩前進し 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い、かつ 10 分角の角分解能をもつ観測をできるツールとして、「気球搭載狭視野 Si/CdTe-SCT イメージャ」としての気球 SGD の開発研究を推進する。

大気球による MeV 観測では、地平線方向からの強い大気ガンマ線を除去できる能力が欠かせないため、狭視野のシステムとするか、広視野でも電子トラック型にしてこれを精度良く除去できることが重要である。既にガススペースの電子トラック型コンプトン望遠鏡である SMILE シリーズが京大のグループ(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、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。

これらの MeV 宇宙観測の推進にあたっては、気球を用いた実証観測が極めて重要である。また、最終ステップとして衛星に進むのか、それとも放射線環境がより穏やかな気球実験の長時間観測でこそないうる観測があるのか、近未来の気球の性能も見据えた上で、比較・検討が重要である。MeV に限らずガンマ線観測装置は重くなりがちであり、気球実験を難しくする一方で、人工衛星に 1t 級の観測装置を搭載することは非常にコストがかかるもので、衛星の方が容易とはとても言えない。気球実験にしても衛星実験にしても、どこまで軽くなれば、何が容易となるか、ならないか、広く議論をしつつ、研究を進めてゆくことが重要と考える。

miniSGD 関係者、および Fujin、ISAS 気球チームの皆様にご感謝申し上げます。本研究は科研費 20H00157 によって進められています。

参考文献

- 1) A. De Angelis, et al. (含む中澤): "The e-ASTROGAM mission. Exploring the extreme Universe with gamma rays in the MeV - GeV range", *Experimental Ast.*, 44(1), pp.25–82, 2017
- 2) Julie E. McEnery et al.: "All-sky Medium Energy

Gamma-ray Observatory: Exploring the Extreme Multimessenger Universe", <https://arxiv.org/abs/1907.07558>

- 3) T. Takahashi et al. : "Application of CdTe for the NeXT mission" *NIM-A* 541 (2005) 332–341
- 4) S. Watanabe et al. (含む中澤): "A Si/CdTe semiconductor Compton camera", *IEEE TNS* 52, 2045–2051 (2005).
- 5) K. Nakazawa, T. Takahashi, et al. : "Concept of a small satellite for sub-MeV and MeV all sky survey: the CAST mission", *Proc. SPIE*, 8443, id. 84430E 12pp. (2012)
- 6) H. Tajima, S. Watanabe, et al (含む中澤): "Design and performance of Soft Gamma-ray Detector onboard the Hitomi (ASTRO-H) satellite", *JATIS* 4(2), 021411 (2018)
- 7) Hitomi Collaboration (Watanabe et al.): "Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with the Hitomi Soft Gamma-ray Detector", *PASJ*, (2018) 70 (6), 113
- 8) K. Nakazawa et al.: "Hard x-ray imager onboard Hitomi (ASTRO-H)", *JATIS*, 4 (2018)
- 9) K. Hagino et al. : "In-orbit performance and calibration of the Hard X-ray Imager onboard Hitomi (ASTRO-H)", *JATIS*, 4 (2018)
- 10) S. Takeda, et al (含む中澤), : "Polarimetric performance of Si/CdTe semiconductor Compton camera", *NIM-A*, 622, 619–627 (2010)
- 11) K. Nakazawa, S. Takeda et al. : "Balloon-borne narrow field of view semiconductor Compton telescope concept: miniSGD", *Proc. 12181, Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*; 1218172 (2022) (<https://doi.org/10.1117/12.2628199>)
- 12) K. Okuma, K. Nakazawa, S. Takeda et al. "Development of miniSGD, a proof-of-concept balloon experiment for a narrow field of view Si/CdTe semiconductor Compton telescope", *ICRC2023*, <https://pos.sissa.it/444/899/pdf>