

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^A, 東大 Kavli IPMU^B, 名大理学研究科^C, ISAS/JAXA^D

中澤知洋^{AC}, 武田伸一郎^B, 大熊佳吾^C, 大宮悠希^C, 安藤美唯^C, 大口真奈里^C, 田中敦也^C,
渡辺 伸^D, 高橋忠幸^B

1 : 研究目的

MeV帯域は宇宙観測において大きな感度改善が待たれているフロンティアの一つである。宇宙には数千万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、相対論的な高エネルギーの非熱的粒子が満ちていることも知られている。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。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帯域より5桁も感度が劣る。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 のASTRO-MEV衛星 [1]や NASA のAMEGO衛星[2]などが提案されるなど、MeV宇宙観測の革新へむけた世界的な動きが活発化している。しかしこれらの計画はGeV帯域に匹敵する感度を目指して検出器が大型・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。角分解能の量子論的な制限から、SCTでは散乱体にSiを用いることが有利である。優れたエネルギー分解能を持ち、~60 keV という低いエネルギー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SiベースのSCTの低エネ



ルギー側感度に着目して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が、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(耐圧容器込み 60 kg)を開発し、大気球高度で低バックグラウンドを実証し、残留成分の起源を同定してさらなる改良につなげる。

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。

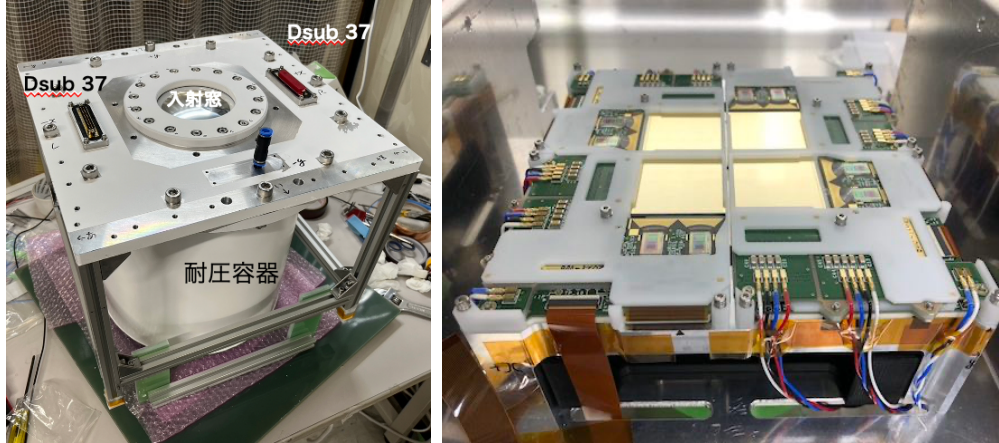
3：観測装置概要

miniSGD は ASTRO-H/SGD のコンセプトに基づいているが、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 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。ただし、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おり、本研究の 2 mm 厚 CdTe-DSD は素子の接合・固定方法も改良したもので、FORCE 衛星の BBM を兼ねている。miniSGD をコンプトンカメラとして動作させ解析するのと

並行して、光電吸収イベントも取得してそのモードでのデータ解析も行う。

4：開発の進捗



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

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。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んでいる。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。

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]。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た。安全審査もこれまで大きな指摘はなく、miniSGD 単体としてはほぼフライトレディーになったと言える。本来は、2023 年 1 月まで性能評価実験を進めて、その後空輸で豪州入りし、2023 年 4-5 月の放球に備える予定であった。しかし、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、性能実証や改良実験など、善後策の検討を始めたところである。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。また低いバックグラウンド性能を地上実験で検証する方法を探る。

5 : 将来の展開

MeV 宇宙観測においては、NASA の COSI-SMEX 衛星が 2021 年 11 月に採択され、2025 年以降の打ち上げが決まった。角分解能の劣化を受け入れて、散乱体に Si ではなく Ge 半導体を用いることで、核ガンマ線輝線の観測に強みを持つ 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 の実験結果を活かして 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」としての気球 SGD 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(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。

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。

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)
- [10] ``Polarimetric performance of Si/CdTe semiconductor Compton camera'', S. Takeda, et al (含む中澤), *NIM-A*, 622, 619--627 (2010)
- [11] ``Balloon-borne narrow field of view semiconductor Compton telescope concept: miniSGD'', K. Nakazawa, S. Takeda et al. *Proc. 12181, Space Telescopes and Instrumentation 2022: Ultraviolet to Gamma Ray*; 1218172 (2022) (<https://doi.org/10.1117/12.2628199>)