

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, 辻 結菜^C, 久富 章平^C, 渡辺 伸^D, 高橋 忠幸^B

1：研究目的

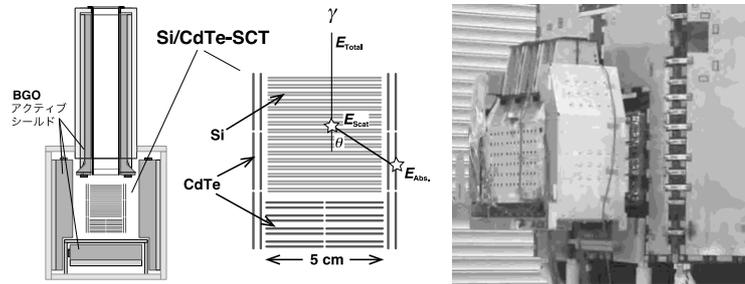
X線やガンマ線などの高エネルギー宇宙観測が大きく進展し、keV 帯域までは熱的な放射が卓越する一方で、GeVやTeVガンマ線、PeVニュートリノ観測により、宇宙に莫大な非熱的エネルギーが存在することも示され、その最高エネルギーと加速源の天体に迫っている。しかし宇宙の非熱的エネルギーの総量を支配するMeV粒子はまだよくわかっていない。光子を検出する際、keVやGeV帯域では、光電吸収や電子陽電子対生成により光子の全エネルギーが電子に移動するのに対し、MeV帯域で卓越するコンプトン散乱では、光子が反跳させた電子と散乱された光子の両方を捉えないと、入射光子の方向や全エネルギーが測定できない。さらに、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、X線との比較では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。

新たな「MeV の窓」を開くため、次世代観測衛星が欧米で検討されおり、日本もこれに参加している (ESA Voyage2050 “ASTROMEV” A. De Angelis+ 2019, US Decadal Survey Astro2020 “AMEGO” J. McEnery+ 2019 など)。しかし、GeV 帯域の Fermi 衛星の感度に並ぶために検出器が大型で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。MeV 観測の突破口として今なすべきことは、実績のある検出器技術を駆使し、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であると我々は考える。

次世代の MeV 観測技術の有力な一つが、半導体を散乱体とする半導体コンプトン望遠鏡 (Semiconductor Compton Telescope : SCT) である。エネルギーと位置の分解能に優れるため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、上記の次世代 MeV 観測衛星案にも採用されている。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は、SCT の特徴である。SCT 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」(Takahashi+ 2004, Watanabe+ 2005, Nakazawa+2012 など) である。宇宙 X 線衛星「ひとみ」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

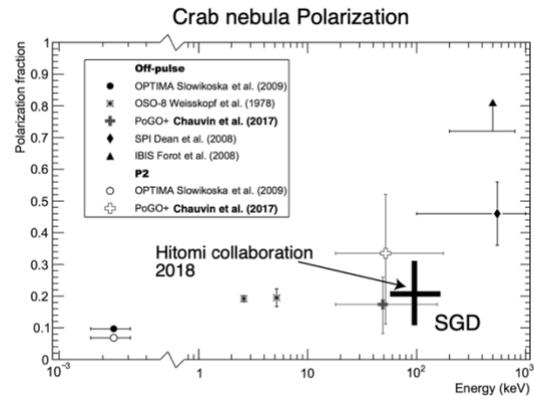
実証された世界唯一の **SCT** 技術となった(Tajima+ 2018、Watanabe+ 2018)。SGD は量子論的限界によりコンプトン再構成の角分解能が低い ~ 100 keV、すなわち sub-MeV 帯域に重点を置き、広視野を捨て、

「すぎく」衛星で成功した日本独自の「結晶シンチレータで視野を絞るアクティブシールドによ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。しかし衛星が失われたため観測は継続できず、それ以上その威力を発揮できなかった。

本研究では、**Si/CdTe-SCT** 技術を用いた将来の本格 MeV 観測の早期実現を目標に、大気球高度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激しいため、視野を絞って大気密度の薄い大仰角を選択的に観測することが有効である。すなわち、SGD で採用した「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 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 程度の気球用マイクロ SGD を開発し、総重量 60 kg 程度のゴンドラとし、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 観測を実施す

ると同時に、その技術およびサイエンスをフィードバックして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。

本研究は「ひとみ」衛星 SGD のコンセプトと技術をベースにしつつ、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する。エネルギー分解能も改善して、有効面積以外の全ての面において SGD を凌駕する Si/CdTe-SCT とし、バックグラウンド除去能力を向上させる。これを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-3 では、NASA などの ULDB 利用を考えるが、現状ではその到達高度は 32 km 前後と低い。高度 40 km と比べて、大気の吸収も大気ガンマ線も強くなるが、長時間の露光により高い感度を得られる。Step-2 では、高度を 40 km ほどに上げるオプションも検討している。

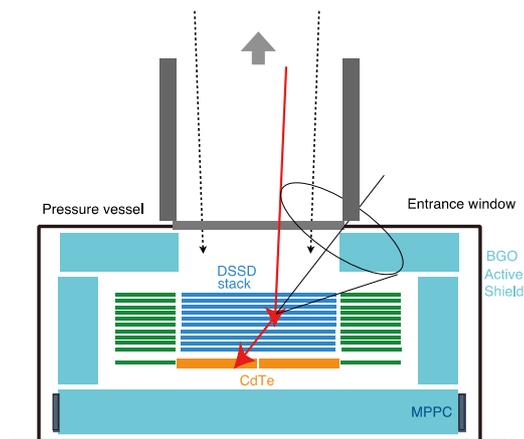
狭視野にするアクティブシールドは、「ひとみ」の硬 X 線イメージャ(Hard X-ray Imager: HXI)でも採用され、世界最良の低バックグラウンドを達成した(Nakazawa+ 2018, Hagino+ 2018, 2019)。また、CdTe-DSD 技術は将来の硬 X 線イメージャへの採用が検討されている。本研究では、マイクロ SGD をコンプトンカメラとして動作させつつ、同時に光電吸収イベントも取得し後で解析することで、FORCE などの硬 X 線帯域の将来計画でも応用できるデータを得る。

Step-1 では検出器が小さく、バックグラウンドの検証が主目的であるが、可能な限り、かに星雲などの明るい天体の観測も狙う。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。

3：開発の進捗

本研究では迅速に結果を得るべく、革新的な技術と実績ある技術を組み合わせる。具体的には、主検出部は「ひとみ」HXI でも用いた 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

させている。アクティブシールドでは結晶シンチレータを読み出す光センサーを MPPC に変更し、装置を簡素化しつつ性能向上を図る(右図参照)。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 Gondola ごと太陽を一定角度で追跡することで、太陽やかに星雲の観測を実現する。本年度より検出器システムの調達を開



始し、CdTe-DSD については同等品を用いた性能評価を始めた。アクティブシールドについては、MPPC と組み合わせたコンパクトな多チャンネル読み出しシステムは既存であり、これをベースに気球用に改良したものの開発を進めている。

4：今後の展開

MeV 観測の中規模・大規模な将来計画としては、欧州中心”ASTROMEV” (A. De Angelis+ 2019)や eASTROGAM、米国の”AMEGO”(J. McEnery+ 2019)計画があり、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。これとは独立に、二回りほど小さい COSI-SMEX 衛星が Phase-A に進んでおり、来年にダウンセクションがある。こちらは Ge 半導体コンプトン望遠鏡を用いて百 keV から数 MeV の帯域の広視野サーベイを狙っている。本提案で用いる Si/CdTe-SCT 技術は、これら 3 つの計画よりも低いエネルギー帯域に最適化している。

本計画の特徴はまた、視野を絞って全天観測をオミットする一方で、低バックグラウンドを実現して少数の天体の詳細観測に特化する独自のアレンジをしていることである。大気球の弱点である大気の悪影響も狭い視野により抑制するアプローチである。SGD の結果を受けてこれを迅速に発展させ、段階を踏んで観測を改善してゆくプロセスの一翼を担う。

大気球による MeV 観測では、数百 keV から数 MeV で広視野で高感度を狙う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。本計画はこれと大きく異なるコンセプトであり、狙う帯域も 100 keV 中心である点が異なる。

Reference

- “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)
- “Polarimetric performance of Si/CdTe semiconductor Compton camera”, S. Takeda, et al (含む中澤), NIM-A, 622, 619--627 (2010)
- “A Si/CdTe semiconductor Compton camera”, S. Watanabe et al. (含む中澤) IEEE TNS 52, 2045--2051 (2005).
- “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
- “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)