

気球による銀河中心からの初の放射線（軟ガンマ線）の直接検出に成功

—軟ガンマ線天文学の夜明け—

概要

物質を構成する元素が宇宙のどこでどのように作られたのか、ということは未だ大きな謎です。安定な元素と一緒に放射性同位元素（radioisotope, RI）^{※1}が作られ、この RI から軟ガンマ線（天文学用語。一般に放射線のガンマ線と同じ意味で用いる）が放射されます。この軟ガンマ線は、宇宙や銀河の年齢よりはるかに短い RI から放射されるため、宇宙でまさしく今元素が作られている現場が唯一直接観測可能な帯域とされ、50 年以上前から注目されています。しかし、宇宙線由来の雑音^{※2}の中から軟ガンマ線のみを取り出すための、光学原理に基づいた確立した画像化手法が、電磁波の種類の中では唯一存在しないことから、他の波長域と比べて観測が大幅に遅れ、天文学では唯一の未開拓領域と言われていました。

京都大学理学研究科 高田淳史 助教、谷森達 教授（研究当時、現：名誉教授）らの研究グループは、天体観測から重元素の生成や宇宙線加速の起源を解明することを目的に、軟ガンマ線完全画像化方法に基づいた電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡（Electron-Tracking Compton Camera, ETCC）を開発しました。この ETCC を用いて軟ガンマ線天体観測を実証すべく、2018 年に JAXA の気球に搭載してオーストラリアから打ち上げ、南半球の空を約 1 日間観測しました。過去、欧米の巨大衛星では約 10 年を費やし銀河中心方向からの軟ガンマ線放射を間接的に検出しましたが、本研究はわずか 1 日で直接検出に成功しています。今後、ETCC によるさらなる観測で銀河中心方向の軟ガンマ線放射の起源を解明することにより、宇宙初期の密度揺らぎ^{※3} から生成された原始ブラックホール^{※4} や暗黒物質^{※5} の存在に迫ります。また、ETCC による軟ガンマ線可視化技術は宇宙天気予報や月・火星の資源探査や医療応用・環境モニタリングなど、多岐に渡る貢献が期待されています。

本成果は、2022 年 5 月 1 日にアメリカ合衆国の国際天文学会学術誌「The Astrophysical Journal」に掲載されました。

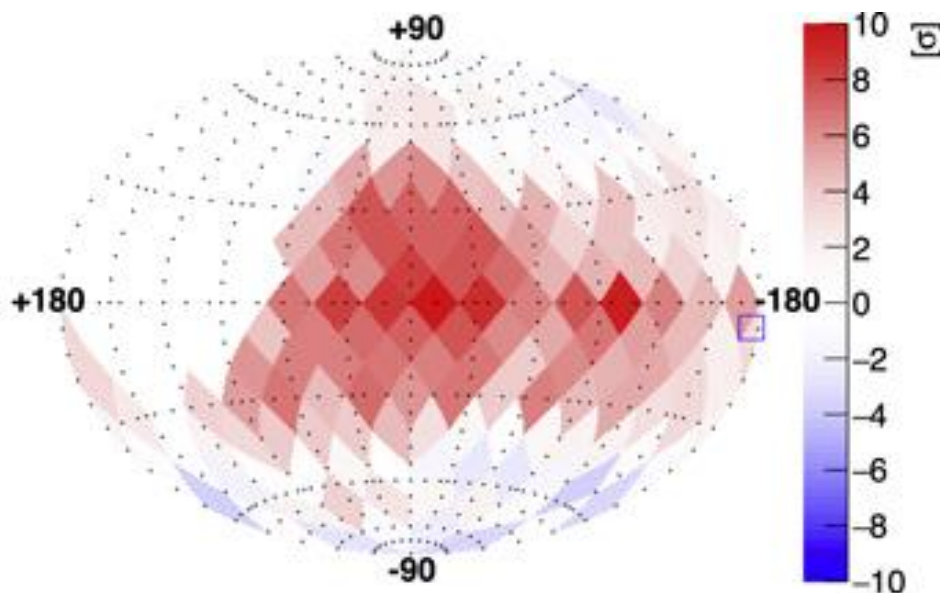


図 SMILE-2+ により観測された天の川銀河の軟ガンマ線マップ。青四角は、かに星雲の位置を示している。

1. 背景

私たちの体や身の回りにある物質を構成する元素が、宇宙のどこでどのように作られたのか、は未だ大きな謎となっています。安定な元素と一緒に放射性同位元素が作られますが、この RI から軟ガンマ線（天文学用語。一般に放射線のガンマ線と同じ意味で用いる）が放射されます。この軟ガンマ線は、宇宙や銀河の年齢よりはるかに短い RI から放射されるため、宇宙でまさしく今元素が作られている現場が唯一直接観測可能な帯域とされ、50 年以上前から注目されています。また、ブラックホール近傍の物質崩壊やホーキング放射^{※6}は、このエネルギー帯特有の現象であり、最近注目を集める軽い暗黒物質消滅由来のガンマ線^{※7}の観測も期待されていることから、軟ガンマ線の観測を実現することの科学的重要性がさらに高まっています。軟ガンマ線による宇宙観測は、1960 年代から気球や衛星を用いて行われてきました。しかし、宇宙線由来の雑音^{※6}が他波長より桁強く、その中から軟ガンマ線のみを取り出すために不可欠な、光学原理に基づく確立した画像化手法が存在しなかったため、可視光や赤外線・X 線など他の波長域の観測と比べて大幅に遅れた状況が続いています。

当研究グループは 2017 年に環境放射線や放射能に関する核ガンマ線の到来方向を決定する完全可視化技術を世界で初めて開発し、Cs 汚染由来のガンマ線撮像を例に報道しました（2017 年 2 月 3 日¹）。当研究グループは、同じ手法で宇宙からの軟ガンマ線を画像化し、天体観測から重元素の生成や宇宙線加速の起源を解明することを目的に、軟ガンマ線完全画像化方法を採用した望遠鏡を開発・気球に搭載しての実証および科学観測を行う SMILE (Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments) プロジェクトを進めています。軟ガンマ線は波長が非常に短く粒子性が卓越しますが、この光の粒(光子)が電子に衝突すると光子の持つエネルギーの一部を電子に与えて弾き飛ばす、コンプトン散乱という現象を起こします。ここで、コンプトン散乱により発生した電子と散乱後の光子のそれぞれの運動量を測定すれば、運動量保存則に基づいて元の光子の入射方向とエネルギーを得ることができます。この方法で測定した個々の光子の入射方向ごとに積算し画像化する、電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (Electron-Tracking Compton Camera, ETCC)を用いた軟ガンマ線観測計画が SMILE です。様々な地上での ETCC 原理検証実験を経て、2006 年には宇宙環境下での動作試験を三陸沖での気球実験(SMILE-I)にて行っています。

(参考 1) <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2017-02-14>

2. 研究手法・成果

軟ガンマ線天体観測を実証すべく、私たちは ETCC を宇宙航空開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所が運用する気球に搭載し、SMILE-2+として 2018 年にオーストラリア アリススプリングスから打ち上げ(図 1)、南半球の空を約 1 日間観測し、約 24 万個の軟ガンマ線事象を捉えました。図 2 は、SMILE-2+ 飛翔時の天体高度と天長角 60° 以内に検出された軟ガンマ線検出率の時間変化を示しています。観測された軟ガンマ線検出率は、①遠方天体からの放射の重ね合わせである宇宙背景ガンマ線、②宇宙線と地球大気の相互作用から生じる大気ガンマ線、③宇宙線と望遠鏡周囲



図 1：放球準備中の SMILE-2+。右のクレーンで吊り下げられているのが ETCC を搭載したゴンドラ。

の物質の相互作用から生じる雑音ガンマ線の合計 (①+②+③) で期待される検出率と良い一致が見られます。一方で観測された検出率では、銀河中心が正中する時刻に合わせてわずかな増減が見られます。統計的に約 10σ の精度があり、確実なものです。これは、銀河中心方向に存在する軟ガンマ線放射をとらえたものであり、軟ガンマ線帯域において銀河中心方向がとびぬけて明るい事が判明しました。銀河中心方向からの軟ガンマ線放射は、欧米の巨大衛星による約 10 年の観測からようやく見つかったものですが、本研究ではわずか 1 日の観測で検出に至っています。また、天頂角 60° 以内での宇宙背景ガンマ線・大気ガンマ線に対し、かに星雲からの軟ガンマ線放射はわずかに数%と小さいですが、かに星雲の方向から到来した光子のみに制限することで有意度 4.0σ の超過が確認でき、かに星雲から放射される軟ガンマ線のエネルギースペクトルを得ることに成功しました。このかに星雲の検出により、SMILE-2+の ETCC が目標としていた設計感度を達成したことが示されました。

従来の軟ガンマ線観測装置は、光子ごとの入射方向測定は不可能であったため、視野の中から観測対象の周辺部のみを取り出すようなことは非常に困難で、図2の紫線の宇宙線による雑音ガンマ線が青線の宇宙背景ガンマ線等より1桁以上強い状況でした。今回の結果は、私たちが開発してきた ETCC による観測では、一般的な望遠鏡やカメラと同様に、観測対象の空間的な広がりやエネルギースペクトルの形状によらず、視野の中から直接切り出して軟ガンマ線放射を調べられることを示しています。この方法は、高感度かつ低雑音な観測を実現するには必須なものであり、軟ガンマ線天体観測がようやく、他波長の天文学同様に高い精度で観測感度を見積もることができる、つまり現代天文学として確立した、と言えます。SMILE-2+は、今後の軟ガンマ線天文観測に大きな指針を与えるものとなりました。

3. 波及効果、今後の予定

SMILE-2+の観測で検出された天の川銀河中心方向からの軟ガンマ線がどのようにして放射されているかはわかっていません。複数の天体からの放射が重ね合わさっている可能性があります。観測が遅れていることが原因で軟ガンマ線を放射する天体がほとんど見つからないこともあり、どんな種族の天体の集合なのかは不明です。一方で、宇宙初期の密度揺らぎから生成された原始ブラックホールや暗黒物質を起因とする放射モデルも考えられており、天の川銀河中心領域の軟ガンマ線放射起源は、天文学のみならず素粒子物理学にも大きな影響をもたらすことが期待されています。現在私たちは、SMILE-2+ ETCC の 10 倍大きな有効面積と 5 倍良い角度分解能を持つ ETCC を開発し、1 か月を超えるような気球実験から世界最高感度での軟ガンマ線銀河面探査観測を実施することで、銀河中心領域の軟ガンマ線の空間分布やエネルギースペク

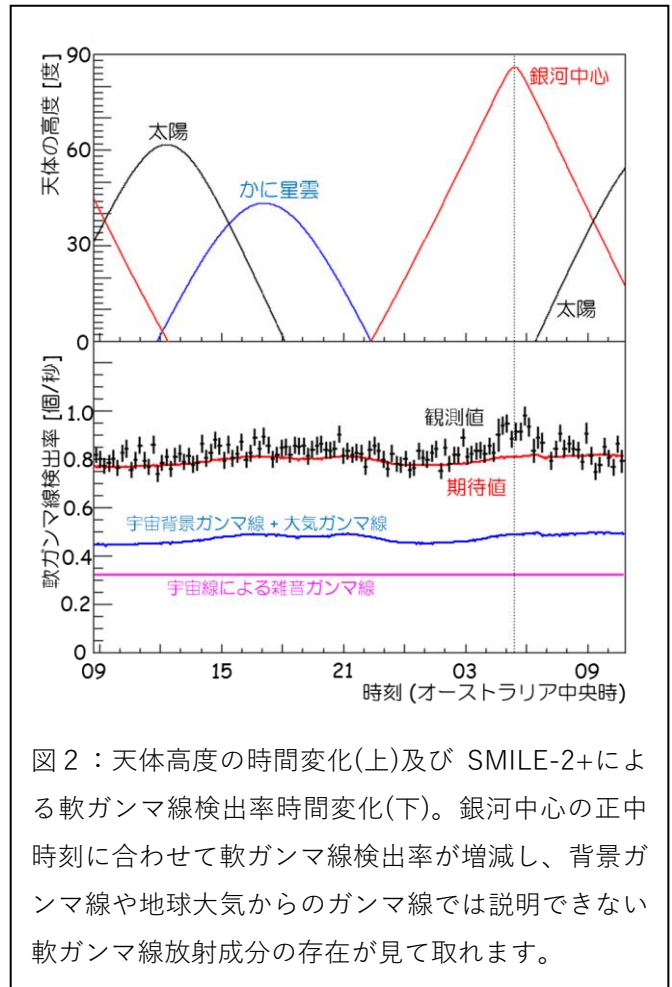


図2：天体高度の時間変化(上)及び SMILE-2+による軟ガンマ線検出率時間変化(下)。銀河中心の正中時刻に合わせて軟ガンマ線検出率が増減し、背景ガンマ線や地球大気からのガンマ線では説明できない軟ガンマ線放射成分の存在が見て取れます。

トルを得て、その放射起源を解明しようという計画 SMILE-3 を進めています。気球実験は衛星と比較して 1/100 程の開発費で迅速に実施できますので、日本独自の技術に基づくこの SMILE-3 により、長く停滞していた軟ガンマ線天文学を大きく前進させ、新時代を築くと確信しています。

一方で ETCC は、人の目には見えない軟ガンマ線を可視化する技術です。この軟ガンマ線可視化技術は宇宙天気予報や月・火星での資源探査など、放射線技術が関係する宇宙利用においても可視化を提供できます。また、医療分野や環境モニタリングの分野でも軟ガンマ線の可視化技術は重要視されてきています。今後の ETCC 開発は、宇宙科学のみならず多様な用途で社会全体への大きな貢献も期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

SMILE-2+ 気球実験は宇宙航空開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所大気球実験グループの運用する気球により実施されました。また、本研究は科学研究費助成費用 基盤研究(S) (21224005), 基盤研究(A) (20244026, 16H02185), 若手研究(B) (15K17608), 挑戦的萌芽研究 (23654067, 25610042, 16K13785, 20K20428), 特別研究員奨励費 (16J08498, 18J20107, 19J11323)及びグローバル COE プログラム「普遍性と創発性から紡ぐ次世代物理学」の支援を受けて実施しました。

<用語解説>

※1 **放射性同位元素**：不安定な原子核は、時間とともに崩壊して放射線を出し、安定な状態へと移ろうとします。このような不安定な原子核を持つ元素を放射性同位元素と呼びます。Cs-137 も放射性同位元素のひとつです。

※2 **宇宙線由来の雑音**：高エネルギー陽子を主とする宇宙線が物質の中を通過すると、放射線や放射性同位元素が生成されることがあります。従って、宇宙線が飛び交う宇宙空間に置かれる望遠鏡には、宇宙線によって生じた放射線が多量に混入します。この宇宙線が作り出す放射線の影響は、軟ガンマ線帯域に顕著に表れるため、軟ガンマ線観測においては深刻な雑音となります。

※3 **宇宙の密度揺らぎ**：現在の私たちの知る宇宙がどのようにできたかは未だ謎ですが、誕生したての初期宇宙に均一な密度からほんの少しだけ外れた密度の高い小さな領域が存在して、星や銀河・宇宙の大規模構造の種となったと考えられています。

※4 **原始ブラックホール**：初期宇宙の密度揺らぎの中には、非常に高密度な領域も形成される可能性があります。極端な高密度になると、ブラックホールが形成されると考えられており、この宇宙初期の密度揺らぎから生成されたブラックホールを原始ブラックホールと呼びます。

※5 **暗黒物質**：これまでの様々な観測から、宇宙に存在するエネルギーの 1/4 程を担う、質量を持つ粒子の存在が示唆されていますが、その正体は未だわかっていません。この粒子を暗黒物質と呼んでいます。暗黒物質は、宇宙の大規模構造や銀河形成も左右する重要な要素であり、暗黒物質の正体を解明することは、物理学・天文学の使命の一つです。

※6 **ホーキング放射**：入ってしまうと光ですら脱出できないブラックホールですが、ブラックホール表面付近の量子的効果により放射が生じることが予想されています。この放射を、提案した S. Hawking の名前を取って、ホーキング放射と呼んでいます。太陽系の小惑星くらいの質量を持つ原始ブラックホールが存在すれば、ホーキング放射により、軟ガンマ線帯域で弱く光ると考えられています。

※7 **暗黒物質消滅由来のガンマ線**：正体不明な暗黒物質ですが、2つの暗黒物質粒子が会って質量をエネルギーに転換する対消滅や、崩壊を起こすような理論モデルが考えられています。対消滅や崩壊が起きると

ガンマ線も放出されると考えられています。

<研究者のコメント>

大学院修士 1 年で係わり始めた当初は概念だけだった ETCC が、実際に天体観測し、大きな科学成果を狙えるところまで来たのは、とても感慨深いです。今後の軟ガンマ線天文学の開拓にワクワクしています。ノーベル賞クラスの発見が期待できる実験が科研費で行えるところが魅力で、科学者冥利に尽きます。(高田淳史)

<論文タイトルと著者>

タイトル : First Observation of the MeV Gamma-Ray Universe with Bijective Imaging Spectroscopy Using the Electron-tracking Compton Telescope on Board SMILE-2+ (SMILE-2+搭載の電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡による全単射写像のイメージングスペクトロスコピーに基づいた MeV ガンマ線宇宙の初観測)

著者 : Atsushi Takada, Taito Takemura, Kei Yoshikawa, Yoshitaka Mizumura, Tomonori Ikeda, Yuta Nakamura, Ken Onozaka, Mitsuru Abe, Kenji Hamaguchi, Hidetoshi Kubo, Shunsuke Kurosawa, Kentaro Miuchi, Kaname Saito, Tatsuya Sawano, Toru Tanimori

掲載誌 : The Astrophysical Journal DOI : 10.3847/1538-4357/ac6103