

電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡による 系内拡散 MeV ガンマ線の観測

高田淳史, 谷森達, 池田智法, 阿部光, 荻尾真吾, 津田雅弥, 吉田有良,
小林滉一郎, 田原圭祐, 竹村泰斗, 吉川慶, 中村優太, 窪秀利 (京都大),
水村好貴 (JAXA), 黒澤俊介 (東北大), 身内賢太郎 (神戸大),
澤野達哉 (金沢大), 濱口健二 (メリーランド大)

1 銀河系内拡散 MeV ガンマ線観測の現状

数百 keV から数十 MeV にかけての MeV ガンマ線領域では、そのエネルギーが原子核の準位間エネルギー程度である為、放射性同位体や励起原子核の脱励起に伴う線スペクトルが観測される。従って、超新星爆発・中性子星合体等による元素合成や、銀河系内の物質拡散を直接的に観測する為のプロープとして、古くから期待されてきた。MeV ガンマ線領域での宇宙観測も歴史は古く、1960 年代半ばから気球による観測は始まっている [1]。しかしながら、MeV ガンマ線は波長が短く、透過力も強い為、可視光や X 線のようなレンズや鏡を用いた集光は困難な上、電子と光子の弾性散乱たるコンプトン散乱が卓越するエネルギー帯域である為、検出そのものが難しい。一方で、宇宙線と観測機筐体との相互作用から生じる放射性同位体や励起原子核が放射する雑音ガンマ線や、大気中性子などのガンマ線以外の雑音粒子も多量に到来する為、雑音優位な観測となる [2, 3]。この為、MeV ガンマ線の観測は他波長から大きく遅れをとり、COMPTEL が約 10 年間の全天観測で数十個の定常天体を検出したのに留まっている [4]。

数少ない検出された MeV ガンマ線源の内、銀河中心領域は複数の気球実験や衛星観測により検出報告のある稀有な例となっている。Figure 1 は、硬 X 線から GeV ガンマ線までの銀河中心領域におけるエネルギースペクトルである。1970 年代の気球実験による検出報告に始まった銀河中心領域から放射される電子陽電子対消滅線は、これまでの観測から、毎秒 $\sim 2 \times 10^{43}$ 個もの陽電子が $\sim 10^{37}$ erg/s の対消滅ガンマ線を放射している事、ほぼ全ての陽電子が電子-陽電子の束縛系であるポジトロニウムを生成してからの対消滅である事、点源ではなく大きな広がりを持っていることが示唆されている事、などが報告されている一方、陽電子の生成源は解明されていない [5]。また、電子陽電子対消滅線よりも高いエネルギー領域においても、0.1 MeV 以下の硬 X 線領域とは接続しない連続的なガンマ線放射が検出されており、MeV ガンマ線帯域においても銀河中心領域が非常に明るいと言われる。他波長の観測から、電子宇宙線と星の光との逆コンプトン散乱による連続成分が期待されている (Figure 1 中の IC) が、その予想強度は観測量の数割しか説明せず、放射の大部分は理解できていない [6]。しかしながら、MeV ガンマ線観測の難しさに起因する不定性が非常に大きく観測結果そのものの信頼性が乏しい為、銀河系内拡散 MeV ガンマ線の起源についての議論は、ほとんど進んでいない。

この銀河系内拡散ガンマ線の起源候補は、空間未分解な天体の集まり・宇宙線により励起された分子雲からの脱励起線の重なり・暗黒物質や原始ブラックホールと、多岐に渡る。硬 X 線領域と 1 MeV 付近のエネルギースペクトルとは接続しない為、異なる放射機構を持つと予想されるが、MeV 領域で特徴的に明るい天体種族は未発見である。また分子雲から脱励起線が検出された例は一つもなく、一般的な低エネルギー宇宙線モデルから予想される強度は電子宇宙線の逆コンプトン散乱による放射強度より一桁弱いとされる [7]。一方で、GeV 以下の質量を持つ暗黒物質が対消滅して生じるガンマ線は電子陽電子対消滅線と質量分のエネルギーまで続く連続成分を持つと期待され [8]、また $\sim 10^{17}$ g の質量の原始ブラックホールは $\sim 10^{15}$ 年と宇宙年齢よりも十分長い寿命を持ち、Hawking 放射により MeV 帯域でガンマ線放射をすると予想される。従って、銀河系内拡散 MeV ガンマ線の起源解明は宇宙物理学・天文学に留まらず、素粒子物理学にも大きな影響を与えるプロープとして注目されており、観測が待たれている状況にある。

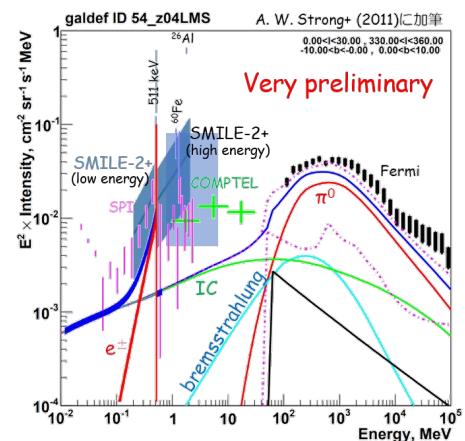


Figure 1: 銀河中心領域の拡散ガンマ線エネルギースペクトル ([6] に加筆)

2 MeV ガンマ線イメージングと電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡

天文観測において、放射源を特定する為に光子の到来方向の取得は必須となる。可視光や X 線領域で一般的に使用される集光系は、方向を表わす 2 つの角度情報を 2 つの位置情報へと置き換える全単射の写像である為、逆写像が存在し、検出器で取得したデータから真の光量空間分布を得る事ができる。この全単射の原理はピンホールカメラや電子陽電子対生成望遠鏡でも同様に成立する。全単射の測定原理に基づく検出器であれば、検出器の角度分解能程度の精度で ON-OFF 解析が可能となり、任意天体の観測を可能とする。一方で、MeV ガンマ線帯域で良く用いられる符号化マスク法や従来型コンプトン法は、原理的に単射でない。符号化マスク法は、任意の方向の光源による影絵パターンが他の方向成分の影絵パターンに混雑し判別できない事から、自己相関関数は完全な δ 関数とはならず単射でない。従来型コンプトン法も、散乱方向・散乱角度が共有される到来方向が event circle 上に多数存在する。単射でない写像は逆写像を持たない為、検出情報から真の空間分布を解析的に得る事ができず、反復計算を用いた統計的推論法に頼って混雑を解いた情報を推定する他ない。符号化マスク法や従来型コンプトン法の望遠鏡では、統計的推論法により検出原理の畳み込みを解いた後の画像でもって角度分解能を示すことが多いが、これは全単射の測定原理に基づく検出器における point spread function (PSF) に相当するパラメータではなく、推定された中心位置の決定精度 (= fitting error) である。事実、先に挙げた全単射の測定原理に基づく検出器では、検出器応答を解く前の情報に基づき PSF が与えられ、定義そのものが数学的に異なっている。観測領域外からの混入度合いを表わす PSF と中心位置決定精度とを混同して扱っていることが、MeV ガンマ線天文学の進展を阻害してきたと言える。

我々は、ガス飛跡検出器とそれを取り囲む位置感度型シンチレーション検出器とを組み合わせ、ガンマ線が飛跡検出器中で起こしたコンプトン散乱で生じた反跳電子と散乱ガンマ線の双方の運動量を測定し、運動量保存則に基づいて入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を得る、電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (electron-tracking Compton camera: ETCC) を開発してきた (Figure 2)。ETCC は、ガンマ線の到来方向の 2 つの角度情報を、入射ガンマ線の運動量の向きという 2 つの角度情報として測定する全単射の写像であり、集光系やピンホールカメラ・電子陽電子対生成望遠鏡と線型代数的に等価である。この為、視野外からの雑音ガンマ線はイメージングによって排除可能となり、天体観測も ON-OFF 解析が可能となる。加えて、ガス飛跡検出器中の荷電粒子のエネルギー損失率による粒子識別や散乱方向と反跳方向のなす角を用いたコンプトン運動学テストといった、余剰次元による雑音除去能力を独自に持つため、ガンマ線以外の雑音粒子を強力に排除でき、低雑音で高感度な観測が実現される。

この ETCC による天体観測を実現すべく、我々は段階的に検出感度を向上しつつ天体観測能力を実証し、科学観測へつなげる気球実験 (Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments: SMILE) を行ってきた。2006 年には、1 mm² の有効面積を持つ小型の ETCC を気球に搭載し、三陸大気球観測所から放球、高度 35 km の宇宙環境下におけるガンマ線観測試験として SMILE-I を実施、ETCC の持つ雑音除去能力により低雑音観測が実現できることが示された [10]。その後、有効面積を ~ 1 cm² に拡大した ETCC を気球に搭載、天体観測実証実験として 2018 年にオーストラリアから放球し、約 26 時間の水平浮遊中、かに星雲を数時間観測し、 4.0σ の有意度で検出に成功している [11]。この SMILE-2+ の検出感度は、実測されたガンマ線事象数から求めたもの (Figure 3 中の青破線) と地上校正試験から推定される感度 (Figure 3 中の赤実線) が一致しており、MeV ガンマ線領域において初めて設計検出感度を達成した広視野望遠鏡となった。この事は、ETCC の有効面積と PSF が設計できれば、宇宙環境下における検出感度が正確に予測でき、事前に MeV ガンマ線観測計画が立てられる初めての望遠鏡であることを示している。

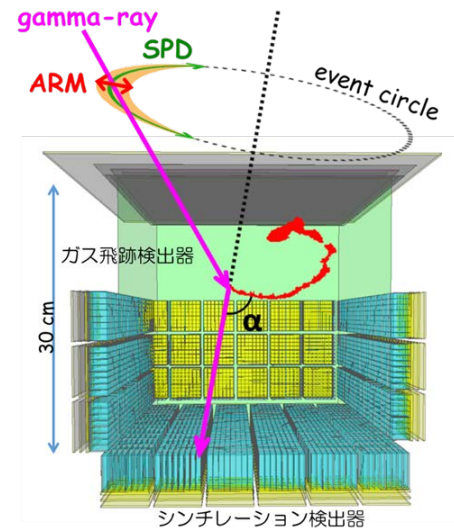


Figure 2: 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡概念図

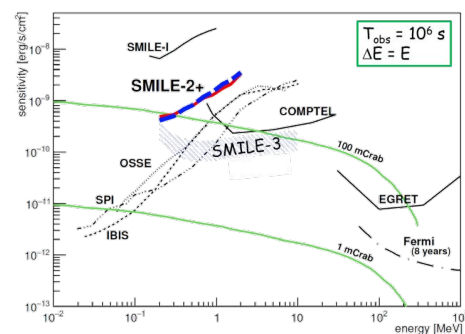


Figure 3: SMILE 実験の検出感度 (観測時間は 10⁶ 秒で規格化)

3 SMILE-2+による銀河中心領域観測

Figure 4 に SMILE-2+ の水平浮遊中の天体仰角とガンマ線検出率の時間変化を示す。天体からの信号以外にガンマ線として検出されているものは、宇宙から一様等方に到来する銀河系外拡散ガンマ線・宇宙線と大気の相互作用から生じる大気ガンマ線・宇宙線と気球ゴンドラとの相互作用から生じる機器由来ガンマ線がある。従来のかに星雲観測から知られている MeV ガンマ線帯域のフラックスは、天頂角 60° 以内から到来する銀河系外拡散ガンマ線の $\sim 3\%$ の強度に過ぎない為、かに星雲の影響はガンマ線検出率の時間変化に露わには表れていない。一方で、銀河中心の仰角変化に合わせてガンマ線検出率も変化している様子が顕著であり、電子陽電子対消滅線より高エネルギーな 0.7 MeV 以上のガンマ線のみ見ても、銀河中心領域が明るい事を示している。このガンマ線検出率の超過分から予想されるガンマ線強度 (Figure 1 中の SMILE-2+) は、SPI/INTEGRAL や COMPTEL/CGRO の観測と誤差の範囲で一致しており、矛盾は無い。Figure 5 は、銀河中心周りの $\sim 1\text{ sr}$ に再構成されたガンマ線事象のエネルギースペクトル (黒) と予想される背景事象のスペクトル (赤)、及びその差分 (青) である。このエネルギースペクトルからも、銀河中心領域からのガンマ線放射は 1 MeV を越えて高エネルギー側へ続いて見える。また、銀河中心領域からの放射の 0.6 MeV 以下の部分については、電子陽電子対消滅線と既知天体でおおよそ説明できるが、 0.6 MeV 以上では、SPI による観測でも検出された定常天体は全天でわずかに 4 個しかなく [12]、既知天体で観測スペクトルを説明するには大きく不足する。現在、銀河中心領域からの高エネルギー放射を理解すべく、幾つかの放射モデルとの比較を進めている。

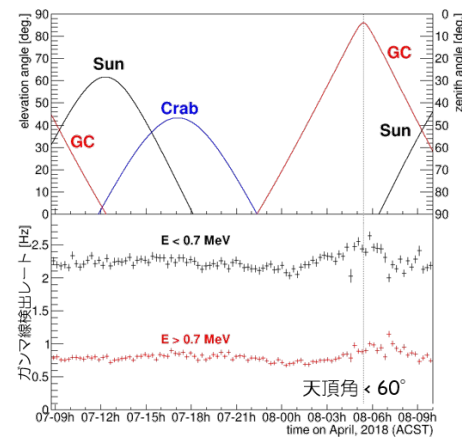


Figure 4: SMILE-2+ 水平浮遊中の天体仰角時間変化 (上) とガンマ線検出率の時間変化 (下)

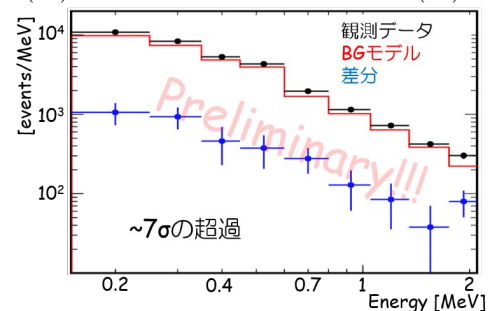


Figure 5: SMILE-2+ で取得した銀河中心領域のエネルギースペクトル

4 SMILE-3 観測計画

銀河系内拡散ガンマ線の起源が、空間未分解な天体の集合や宇宙線により励起された分子雲であれば、星や分子雲は銀河面に多く集まる為、拡散ガンマ線も銀河面に沿って放射強度が強いと期待される。他方、原始ブラックホールが起源であれば銀河の質量分布に比例、暗黒物質の対消滅が起源であれば質量分布の二乗に比例するような強度分布が期待される。従って、起源の解明には空間分解しての詳細な分光が必須となる。現在、銀河中心領域からの放射の高エネルギー側成分を理解すべく、SMILE-2+ の観測データを鋭意解析中であるが、SMILE-2+ の当初目的は天体観測実証であった為、銀河中心領域の放射機構を解明するには ETCC の有効面積・PSF とも不足している。従って、有効面積 $\sim 10\text{ cm}^2$ かつ半径 $5\sim 10^\circ$ の PSF を持つ ETCC を気球に搭載し、世界最高感度 (Figure 3 中の SMILE-3) でもって銀河中心領域を深く観測を計画している。Figure 6 は、銀河系内拡散ガンマ線と銀河系外拡散ガンマ線を考慮した場合、先述の様な ETCC を南半球中緯度で高度 38 km の気球へ搭載し、1 日間観測を実施した場合に期待されるガンマ線検出数マップである。この図から、1 日間の飛翔でも銀河面へ広がりを持つのか、銀河中心領域に集まるのか、がある程度判別可能であることが見て取れる。また、圧力气球を使用し 1 ヶ月以上の水平浮遊が実現できれば、銀河系内拡散 MeV ガンマ線の空間分布は明確となる。この為、ISAS の豪州気球実験および NASA の長期気球実験へ向け、準備を進めている。

この SMILE-3 観測を実現する為、SMILE-2+ からの ETCC の改良として、飛跡検出器のガス最適化・飛跡検出器の読み出し電極の改良・シンチレーション検出器のエネルギー分解能の向上、等を進めている。シンチレーション検出器については、位置感度型フラットパネル PMT から SiPM アレイへと変更することで、GSO シンチレータの発光波長における量子効率 2 倍改善し、 0.662 MeV におけるエネルギー分解能で 8% を達成した。SMILE-2+ では $11\sim 13\%$ であった為、 1.5 倍の改善となる。現在、ETCC へ組み込む為の回路開発を進めている。飛跡検出器についても、SMILE-2+ では荷電粒子の 3 次元飛跡を直交する 2 方向へ射影し、 $2\text{ 次元} \times 2$ の画像としてデータ取得し、オフライン解析で再構成する方法を取ってきた。しかし、この手法ではコンプトン散乱点位置の不定性が生じ、角度分解能を劣化させる原因ともなっていた。これを改善すべく、 120° 毎の 3 方向へ射影可能な読み出し電極を設計した。SMILE-I・SMILE-2+ でも用いた

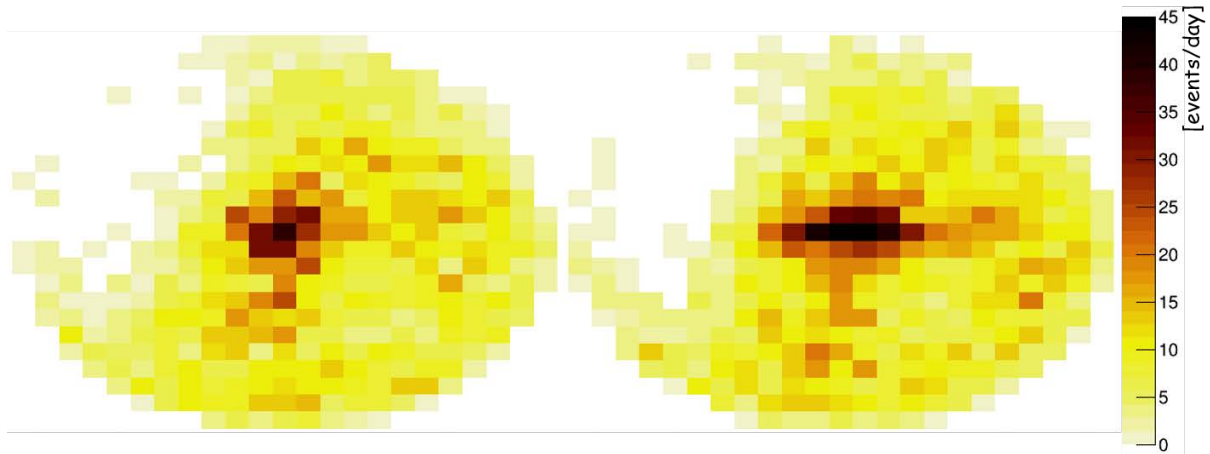


Figure 6: 南半球中緯度での高度 38 km において 1 日間観測した場合、0.45-0.55 MeV で観測されるガンマ線事象数期待値マップ。左は銀河中心領域に集中する分布、右は銀河面に広がる分布を仮定した。

μ -PIC は、元来比例計数管を輪切りにして並べたような電極構造となっているが、新しい電極構造は比例計数管の陰極を 2 つに分割、上下に並べた構造になっている。小型試作機の試験では、陽極および上下の陰極全てから信号取得に成功し、荷電粒子の 3 次元飛跡の位置精度が向上したことを確認している。また、この新電極構造の μ -PIC は、2 つの陰極間にも電位差を与える事で、より高ガス利得が得られる。小型試作機では、最大で $\sim 4 \times 10^4$ もの大きなガス利得が安定に得られている。SMILE-3 用には直径 30 cm 以上のものが必要となる為、大型化へ向けた開発が進行中である。ガス飛跡検出器用のガスとしては、コンプトン散乱の散乱確率は電子の個数密度に比例し、雑音の素になる光電吸収の確率は原子番号の 5 乗に比例する為、原子番号が小さい元素による分子がより適している。ガス検出器として動作可能な中で軽元素の分子ガスを選択すると、有力な候補が CF_4 である為、SMILE-3 では CF_4 の 3 気圧を計画している。但し、一般に分子ガスは高ガス利得が得にくいことから、動作が不安定になる可能性が残っている。この為、現在 Ne や Ar を混合したガスで配分の最適化を進めている。これらの改善が ETCC へ反映されると、0.3 MeV での有効面積は $\sim 10 \text{ cm}^2$ 、PSF も 0.5 MeV で 10° 程度が実現でき、銀河系内拡散 MeV ガンマ線の起源に迫る観測が可能となる。

References

- [1] L. E. Peterson+, AIAA Journal, **5** (1967), 1921-1927.
- [2] V. Schönfelder, New Astronomy Reviews, **48** (2004), 193-198.
- [3] R. Diehl+, A&A, **611** (2018) A12.
- [4] V. Schönfelder+, A&A, **143** (2000), 145-179.
- [5] N. Prantzos+, Reviews of Modern Physics, **83** (2011), 1001-1056.
- [6] A. W. Strong, arXiv:1101.1381 (2011).
- [7] H. Behabiles-Mezhoud+, ApJ, **763** (2013), 98.
- [8] K. Ahn & E. Komatsu, Phys. Rev., **72** (2005), 061301.
- [9] B. J. Carr+, arXiv:0912.5297v2 (2010).
- [10] A. Takada+, ApJ, **733** (2011), 13.
- [11] A. Takada+, arXiv:2107.00180 (2021).
- [12] L. Bouchet+, ApJ, **679** (2008), 1315-1326.