

SMILE-3: 南半球中緯度長時間気球実験による MeVガンマ線天文学の開拓

高田淳史, 池田智法, 阿部光, 荻尾真吾, 津田雅弥, 吉田由良, 小林滉一郎, 田原圭祐,
谷森達 (京都大), 水村好貴 (JAXA), 中森健之 (山形大), 黒澤俊介 (東北大),
澤野達哉 (金沢大), 濱口 健二 (UMBC), 森正樹 (立命館大), 櫛田淳子 (東海大)

1 MeVガンマ線天体観測の現状

0.1–100 MeV の MeV ガンマ線帯域は、電子陽電子対消滅線 (0.5 MeV) や放射性同位体からの核ガンマ線 (^{26}Al : 1.8 MeV, $^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$: 0.8, 1.2 MeV)・原子核からの脱励起線 ($^{12}\text{C}^*$: 4.4 MeV, $^{16}\text{O}^*$: 6.1 MeV) が存在し、宇宙における元素合成や銀河の化学進化を解明する為の重要なプローブとして古くから期待され、1960年代半ばには気球による観測が始まっている [1]。一方で、波長が $\sim\text{pm}$ と非常に短く、透過力も高い為、可視光や X 線で用いられる集光系は困難な上、電子と光子の弾性散乱であるコンプトン散乱が卓越する帯域であることから、MeV ガンマ線の検出自体が難しい。加えて、宇宙線と観測器筐体や地球大気との相互作用から、多量の雑音ガンマ線や雑音粒子も生成されてしまうため、雑音優位な環境での観測が避けられない [2]。Fig. 1 は、SN1987A 以来 30 年ぶりに ^{56}Co からの核ガンマ線が検出された Ia 型超新星爆発 SN2014J のエネルギースペクトルモデルと、実際に検出した SPI/*INTEGRAL* の点源観測における雑音レベルの比較である [3]。SN2014J は地球から 3.5 Mpc と非常に近い距離で起きたにもかかわらず、雑音レベルは信号よりも 4–5 桁も多く存在し、非常に難しい観測であったことがわかる。また、MeV ガンマ線帯域において最も明るい天体の一つである、かに星雲や銀河中心領域の電子陽電子対消滅線と比較しても、雑音レベルは 2–4 桁大きい。この為、MeV ガンマ線の観測は他波長から大きく遅れをとっており、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る [4]。

MeV ガンマ線帯域での天文学を開拓すべく、これまで様々な計画が立てられ、いくつかは気球観測も行われてきた。COMPTEL と同様のコンプトン望遠鏡では、有効面積を拡大すべく液体 Xe TPC を用いた LXeGRIT [5] や、エネルギー分解能を向上すべく Si 半導体トラッカーを用いた TIGRE [6] が 2000 年台前半に気球実験を実施したが、かに星雲の検出に至らずに終了した。Si 半導体検出器を用いてコンプトン散乱反跳電子を取得する、世界で初めての電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (electron-tracking Compton camera: ETCC) であった MEGA [7] は地上での校正線源や放射光を用いた試験で性能評価を行っていたものの、高高度での天体観測は実施できないままプロジェクト終了となっている。Ge 半導体検出器によるコンプトン望遠鏡 NCT/COSI [8] は、2000 年代後半から現在までに 5 回の気球実験を実施している。特に 2016 年の 46 日間に及ぶ長期気球実験では、数天体の検出 [9] や電子陽電子対消滅線 [10]・ ^{26}Al [11] が報告されており、現在 SMEX として衛星計画が採択され 2025 年の打ち上げを目指して進行している。しかしながら雑音レベルは依然高く、連続的なエネルギースペクトルや大きく広がった放射の観測は不得意であり、SMEX でもガンマ線バーストやラインガンマ線を観測対象としている。COMPTEL の観測終了から 20 年以上経過したが、雑音レベルを大幅に下げた信号優位な観測は未だ実現できず、MeV ガンマ線天文学を進展させる為、雑音除去能力の高い望遠鏡での観測が急務となっている。

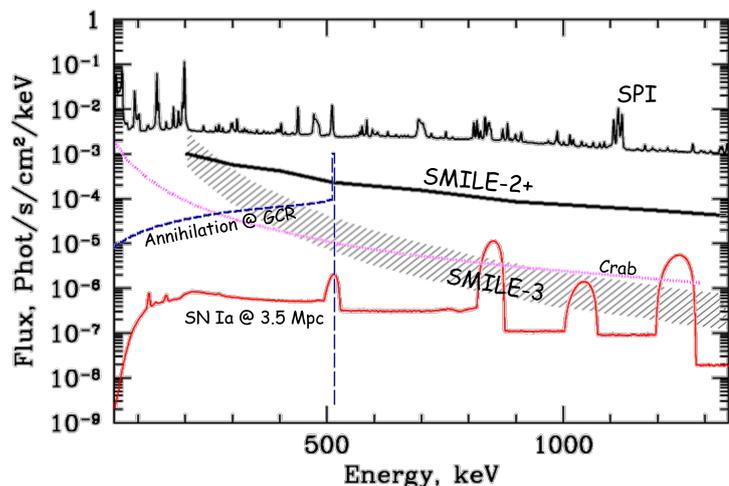


Figure 1: SPI・SMILE-2+・SMILE-3での点源観測における雑音レベルとかに星雲・SN2014J・銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線のエネルギースペクトルの比較 ([3] Extended data Figure 2へ加筆)。SMILE-2+が実現した雑音レベルは、SPIと比較して1桁以上低い。ETCCのPSFを改善することで雑音レベルはさらに下がる (SMILE-3)。

2 ETCC と SMILE 実験

MeV ガンマ線観測における雑音事象は、大気中性子や宇宙線などのガンマ線以外の粒子と系外拡散ガンマ線や大気ガンマ線などの観測対象以外からのガンマ線とに大別できる。COMPTEL では、2つの検出器間の飛行時間による到来方向制限・波形弁別による粒子識別・反同時計数による荷電粒子除去が雑音低減に用いられた [12]。後者2つは、ガンマ線以外の雑音粒子に対して特に有効である。一方で、従来型のコンプトン望遠鏡は、ガンマ線の入射方向を円環状にしか制限できない為、散乱角の平均値を半径とする領域内からの観測対象以外のガンマ線が全て雑音となってしまふ。Figure 2 は COMPTEL がとらえたガンマ線バーストの画像 [13] であるが、点源に対する COMPTEL の応答 (point spread function: PSF) が大きく広がっている事が見て取れる。一般にコンプトン望遠鏡の性能指標として、コンプトン散乱角の決定精度 (angular resolution measure: ARM) が用いられるが、どれだけ ARM を改善しても平均散乱角程度の領域からの雑音ガンマ線漏れ込みは抑えられない。事実、COMPTEL は散乱角に制限を与えることで、観測対象以外のガンマ線漏れ込みを抑えている [12]。

漏れ込む雑音ガンマ線を低減し、検出感度を向上させるには PSF を改善する他ない。この為には、コンプトン散乱時に発生する電子の反跳方向も測定し、事象ごとにガンマ線の入射方向を特定する必要がある。この為、我々はガス飛跡検出器をコンプトン散乱体とし、周囲に位置感度型シンチレーション検出器を配置した ETCC (Fig. 3) を開発してきた [14]。ガス飛跡検出器を採用することで、半導体やシンチレータでは困難な低エネルギー電子飛跡の取得が可能となる上、ガス中でのエネルギー損失と荷電粒子の飛程の関係から粒子識別も可能となる。加えて、散乱方向と反跳方向のなす角 (Fig. 3 中の α) は、定義から幾何学的に求まる一方、コンプトン散乱の運動学からエネルギー情報でも計算できる為、この2つの値の比較からコンプトン散乱である事を保証できる。このガス飛跡検出器を用いた ETCC を用いて、放射線の降り注ぐ宇宙環境下で天体観測が実現できるか、の実証実験として 2006 年 (SMILE-I) [15] および 2018 年 (SMILE-2+) [16] に ISAS/JAXA 大気球実験グループの支援の下、気球実験を行った。SMILE-I は宇宙環境下でのガンマ線観測実証実験として行われ、有効面積 $\sim 1 \text{ mm}^2$ の小型の ETCC を高度 35 km で動作させ、多量の宇宙線の中から粒子識別・ α 角による雑音除去によりコンプトン散乱事象を選び出し、宇宙拡散ガンマ線と大気ガンマ線のエネルギースペクトルを得ることに成功した [15]。有効面積 $\sim 1 \text{ cm}^2$ ・PSF $\sim 20^\circ$ へ改良した ETCC を用いて、高度 $\sim 40 \text{ km}$ で 26 時間の観測を行った SMILE-2+ では、かに星雲を 4σ ・銀河中心領域を $\sim 10\sigma$ の有意度で検出に成功している [15]。SMILE-2+ の雑音レベルは、SPI と比べて 1 桁以上抑えられており (Fig. 1 中の SMILE-2+)、ETCC 独自の雑音除去法により低雑音な観測が実現できたことを示している。また SMILE-2+ が実現した検出感度は、地上校正試験から推測された検出感度と一致した (Fig. 4)。広視野探査型の MeV ガンマ線望遠鏡で、地上校正試験による予測と実際の検出感度が一致したのは、SMILE-2+ が世界で初めてである [15]。SMILE-I・SMILE-2+ の結果から、ETCC が宇宙環境下において MeV ガンマ線の低雑音観測を実現し、その検出感度を設計可能であることが示されており、計画的に MeV ガンマ線天文学を開拓する為の望遠鏡としてふさわしいことが示された。この為、次のステップとして長期気球を用いた科学観測 (SMILE-3) を計画している。

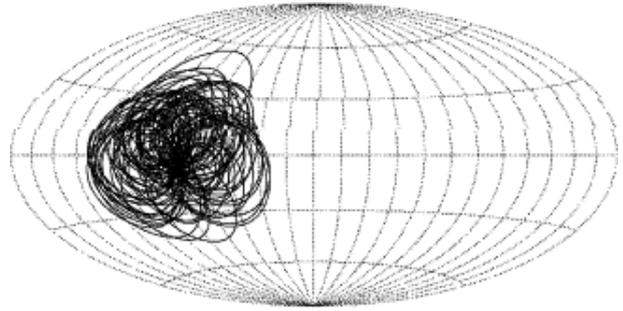


Figure 2: COMPTEL によるガンマ線バーストの全天画像 [13]。ガンマ線バーストは短時間の突発天体であるため、時間情報により雑音低減された画像は、PSF の良い確認になる。

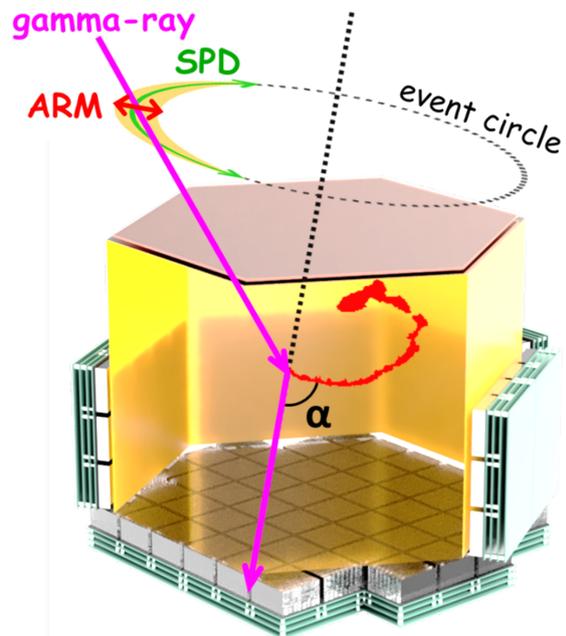


Figure 3: 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC) の概念図。ガス飛跡検出器の周囲に位置感度型シンチレーション検出器が配置してあり、コンプトン散乱で発生する電子の飛跡とエネルギーをガス飛跡検出器で、散乱ガンマ線のエネルギーと吸収位置をシンチレータでとらえ、運動量保存則に基づいて入射ガンマ線の方向とエネルギーを得る。図中の電子飛跡は、30 cm 立方のガス飛跡検出器で実際に取得した $\sim 40 \text{ keV}$ の電子飛跡の例。

3 SMILE-3 計画

SMILE-2+でも検出された銀河中心領域のガンマ線放射は、SPIやCOMPTELでも検出されている一方で、その放射起源は未解明である。Figure 5は、硬X線からMeV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。0.1–0.5 MeVでは電子陽電子対消滅線が卓越しており、このスペクトルから毎秒 $\sim 2 \times 10^{43}$ 個もの陽電子が、電子-陽電子の束縛系であるポジトロニウムを生成し消滅している事が判明している。一方で、ポジトロニウムが形成されていることから、陽電子のエネルギーは $O(10)$ eVと推定されるが、陽電子の供給源の候補である放射性同位体の β^+ 崩壊・パルサーなどの天体・宇宙線と分子雲の相互作用などは、いずれも陽電子のエネルギーが高く、空間分布も電子陽電子対消滅線の空間分布とは大きく異なっており、陽電子の起源は未だ未解明のままである [18]。Figure 5では0.5 MeVより上のエネルギー帯域においても、銀河中心領域に連続的なスペクトルが確認できる。この放射は0.1 MeV以下の硬X線とは明確に接続せず、また、GeVガンマ線帯域で卓越する π^0 起因の放射とも異なる放射である。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 5中の緑線)が、Voyager 1やAMS-02の観測結果に基づく逆コンプトン散乱放射の強度は、観測の説明には大きく不足する [19]。

MeVガンマ線帯域における銀河系内拡散ガンマ線の起源は、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、様々な候補が存在する。空間的に未分解な天体の集合である可能性は否定されていないが、0.1 MeV以下の硬X線帯域の外挿よりも大きな強度である為、MeVガンマ線帯域に特有の放射が要求される。また、かに星雲ほどの光度をもつ天体が銀河中心領域に存在すると仮定すると、Fig. 5のMeVガンマ線強度を説明するには、 ~ 50 個を必要とする。しかし現状では、硬X線では暗くMeV領域で特徴的に明るい種族の天体は未発見である。宇宙線により励起された分子雲からの脱励起線については、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以上弱く [20]、分子雲から脱励起線が観測された例もない。銀河中心領域のガンマ線放射が天体や宇宙線起源であれば、その放射は銀河面に沿った空間分布が期待される。他方、 10^{16-17} gの質量の原始ブラックホールは 10^{12-15} 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帯域で熱的なガンマ線放射をすると予想される [21]。また、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ている [22]。これら物質起源のガンマ線放射は、天の川銀河の質量分布に相関する (原子ブラックホールは密度に比例、暗黒物質の対消滅は密度の二乗に比例)。加えて、低エネルギー電子・陽電子の放出も伴うため、自然にポジトロニウムからの対消滅放射が発生する。

この銀河中心領域のガンマ線放射起源の解明には、詳細なエネルギースペクトルと同時に、放射の空間分布が重要な鍵となる。放射領域が非常に大きい為、その空間分布の測定には、大きな視野での掃天観測が適しており、3 srと大立体角を視野として持つ我々のETCCは最適な望遠鏡と言える。有効面積を ~ 10 cm²、角度分解能を $5-10^\circ$ に改良したETCCで高高度気球実験を行うと、雑音レベルはSMILE-2+からさらに1-2桁改善 (Fig.1中のSMILE-3)する。ISAS/JAXAの豪州気球実験であれば、高度39 kmで約1日

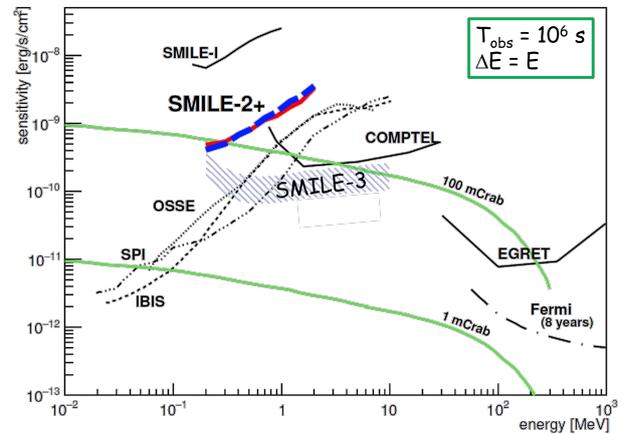


Figure 4: SMILE 実験の検出感度。SMILE-2+の検出感度は、地上校正試験からの予測 (青破線) と実現した検出感度 (赤実践) で一致する。広視野探査型の MeVガンマ線望遠鏡で、検出感度が地上試験で予測できたのは世界初。

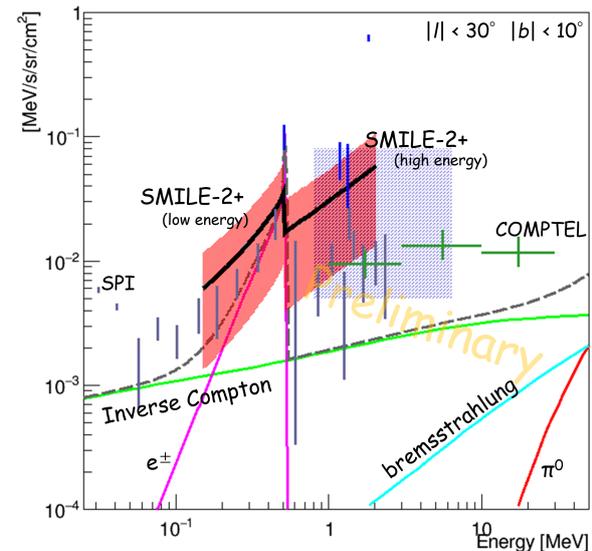


Figure 5: 銀河中心領域のエネルギースペクトル ([17]に加筆)。COMPTEL・SPI・SMILE-2+は、時期・方法・高度が全て異なるが、観測結果は誤差の範囲で一致する。0.5 MeV以下は電子陽電子対消滅線で説明できるが、陽電子起源は判明していない。観測されている0.5 MeV以上の連続成分に対して、期待される逆コンプトン散乱 (緑) では強度が不足している。

間の水平飛翔から銀河中心領域を 3×10^4 秒は観測できる為、1日の気球実験での到達感度は COMPTEL の10年間の観測と同程度になる。さらに NASA が提供するスーパープレッシャー気球を用いて、南半球中緯度長時間気球が実施できれば、約1か月の水平飛翔で銀河中心領域の観測時間は 10^6 秒に達し、到達検出感度も COMPTEL を上回る (Fig.4 中の SMILE-3)。SMILE-3 では、これら南半球での長時間高高度気球実験から、銀河中心領域のガンマ線放射のエネルギー帯域毎の空間分布を得て、暗黒物質の対消滅や原始ブラックホールの存在量に迫る。加えて高銀緯を観測している時間帯は、遠方の銀河からのガンマ線放射が足し合わされた系外拡散ガンマ線放射を観測することになる。MeV ガンマ線帯域の系外拡散ガンマ線放射は明るいと知られている一方、どの種族の銀河からの放射かは特定に至っていない。硬 X 線領域と GeV ガンマ線領域から、背景放射のエネルギースペクトルを外挿しても繋がらない事から、MeV ガンマ線領域に何か構造があると想像されるが、観測の不定性が大きく議論できていない。仮に、天の川銀河が原始ブラックホールや暗黒物質の対消滅によるガンマ線放射を持つのであれば、他の一般的な銀河も質量に相関した強度のガンマ線放射を持たなければならない。よって、銀河中心領域のガンマ線放射と系外拡散ガンマ線の双方から、暗黒物質の対消滅や原始ブラックホールの存在量を議論することが可能である。また、ETCC の広視野・低雑音をもたらす到達検出感度が COMPTEL を超える事から、通常の天体観測も同時に実施する。南半球中緯度での気球実験である SMILE-3 では、かに星雲・パルサーや電波銀河 Cen A、Vela 領域が主な観測対象となり、20年以上空白であった MeV ガンマ線帯域の観測が気球実験で大きく進展する。

References

- [1] L. E. Peterson+, *AIAA Journal*, **5** (1967), 1921–1927.
- [2] V. Schönfelder, *New Astron. Rev.*, **48** (2004), 193–198.
- [3] E. Churazov+, *Nature* **512** (2014), 406–408.
- [4] V. Schönfelder+, *A&A*, **143** (2000), 145–179.
- [5] E. Aprile+, *NIM A* **461** (2002), 256–261.
- [6] D. Bhattacharya+, *New Astron. Rev.* **48** (2004), 287–292.
- [7] P. F. Bloser+, *New Astron. Rev.* **46** (2002), 611–616.
- [8] S. E. Boggs+, *New Astron. Rev.* **48** (2004), 251–255.
- [9] J. L. Chiu+, *PoS* **301** (2017), 796.
- [10] T. Siegert+, *ApJ* **897** (2020), 45.
- [11] J. Beechert+, *ApJ* **928** (2022), 119.
- [12] V. Schönfelder+, *ApJS* **86** (1993), 657–692.
- [13] J. M. Ryan, *New Astron. Rev.* **48** (2004), 199–204.
- [14] T. Tanimori+, *New Astron. Rev.*, **48** (2004), 263–268.
- [15] A. Takada+, *ApJ*, **733** (2011), 13.
- [16] A. Takada+, *ApJ*, **930** (2022), 6.
- [17] A. W. Strong, *arXiv:1101.1381* (2011).
- [18] N. Prantzos+, *Reviews of Modern Physics*, **83** (2011), 1001–1056.
- [19] T. Siegert+, *A&A*, **660** (2022), A130.
- [20] H. Behabiles-Mezhoud+, *ApJ*, **763** (2013), 98.
- [21] B. J. Carr+, *arXiv:0912.5297v2* (2010).
- [22] K. Ahn & E. Komatsu, *Phys. Rev.*, **72** (2005), 061301.