

SMILE-2+気球実験の解析結果報告

池田智法¹, 高田淳史¹, 阿部光¹, 小林滉一郎¹, 田原圭祐¹, 吉川慶¹, 荻尾真吾¹, 津田雅弥¹, 吉田有良¹, 水村好貴², 中森健之³, 黒澤俊介⁴, 澤野達哉⁵, 濱口健二⁶, 森正樹⁷, 櫛田淳子⁸, and 谷森達¹

¹ 京都大学,²JAXA,³ 山形大学,⁴ 東北大学,⁵ 金沢大学,⁶ メリーランド大学,⁷ 立命館大学,⁸ 東海大学

概要

SMILE プロジェクトでは、電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) を開発してきた。2018 年には ETCC 望遠鏡を用いた、オーストラリアでの気球実験 SMILE-2+が行われ、その後 2022 年には 4.0σ の有意度でのかいの検出報告がなされている。本研究では SMILE-2+で得られた約 9 時間のレベルフライトの観測データを用いて銀河拡散ガンマ線の解析を行なった。銀河中心領域 ($|l| < 30^\circ$, $|b| < 30^\circ$) では 150–2100 keV のエネルギー範囲で系統誤差を考慮して 4.3σ のガンマ線検出有意度が得られた。また、150–600 keV の低エネルギー領域についての放射強度を求め、その値は INTEGRAL の観測結果と良い一致を示した。

1 はじめに

宇宙 MeV ガンマ線観測では元素合成や活動銀河核、ガンマ線バーストにおける粒子加速、ブラックホール近傍の強い重力場、宇宙線と星間物質の相互作用といった現象を観測できると期待されている。しかし、MeV 帯域のガンマ線観測は keV・TeV 帯域に比べて検出感度が非常に悪いため、sub-MeV、MeV 領域はまだ未開拓の領域であり、高感度での観測が求められている。特に、銀河面の銀河拡散ガンマ線放射は、ポジトロニウム中間状態を介した電子・陽電子崩壊ガンマ線、ISRF (the interstellar radiation field) の逆コンプトン散乱、星間ガスでの電子・陽電子宇宙線からの制動放射、星間ガスと原子核宇宙線との相互作用によって生成されたパイ中間子の崩壊ガンマ線などいくつかのプロセスが存在する。そのため MeV 領域の精密なスペクトル強度やその形状の観測データはそれらの同定に必要不可欠である。しかしながら、現在稼働中の銀河面 sub-MeV 領域の放射を観測できる検出器は INTEGRAL/SPI[2] だけである。

われわれ SMILE グループでは、入射ガンマ線の方向を一意に決定することができる電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC) を開発してきた。ETCC はコーデッドマスクや COMPTEL 型 [1] の従来のコンプトンカメラと違い、X 線望遠鏡と同様、光学原理に基づいた定量的なイメージングができる [3, 4]。2018 年の気球実験 SMILE-2+ではその予測感度が実測感度と完全に一致し、ETCC 望遠鏡の性能を証明した (図 1) [5]。

この解析方法をもとに、本研究では SMILE-2+で得られた約 9 時間のレベルフライトの観測データを用いて銀河拡散ガンマ線についての解析を行ない、銀河中心領域の放射強度を求めた。

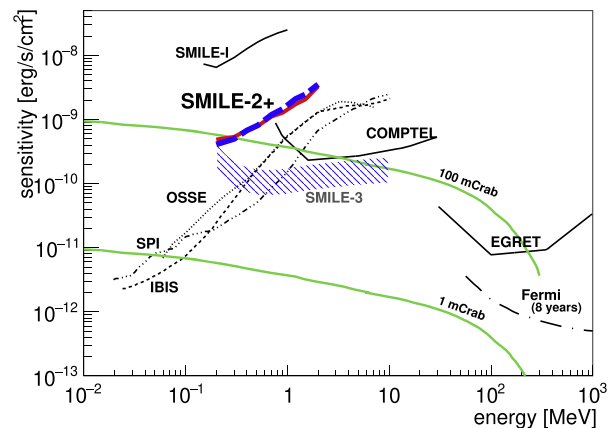


図 1: keV・MeV・sub-GeV 帯域のガンマ線の 3σ 点源検出感度図 (参考文献 [5] から引用)。青点線が SMILE-2+ の観測バックグラウンドデータを用いて計算された感度。赤線はシミュレーションによって計算された背景ガンマ線、大気ガンマ線、宇宙線と検出器の相互作用に由来するバックグラウンドガンマ線を用いて計算された SMILE-2+ の検出感度。

2 SMILE-2+実験

SMILE-2+で使用された ETCC は、コンプトン散乱体となるガス検出器 TPC と吸収体となる GSO シンチレータアレイで構成される (図 2)。TPC は $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^2$ の体積を持つアルゴンベースのガス (Ar:CF₄:isoC₄H₁₀ =95:3:2) 2 気圧と 2 次元飛跡検出器 μ -PIC [6] で構成される。GSO シンチレータアレイは、ピクセルサイズが $6 \times 6 \text{ mm}^2$ 、そのピクセルが 8×8 ピクセルで一つの PMT で読み出されている。TPC の底面部には厚さ 26 mm のシンチレータアレイが 36 個、側面には厚さ 13 mm のシンチレータアレイが 18 個設置されている。SMILE-2+の有効面積は天頂方向が最も大きく、ガンマ線直接成分のその有効面積は約 $0.3 \text{ cm}^2 @ 662 \text{ keV}$ である。FoV は天頂方向の有効面積の半分になる天頂方向で定義され、その値は 3.1 sr である。点源分解能は HPR(the half-power radius) で 20 度@662 keV、また ARM と SPD は FWHM でそれぞれ約 10.5 度、約 50 度になっている。これらは 2021 年に開発された機械学習法によって改善されており、従来の方法と比べて PSF は 32% も改善されたことになる [7]。

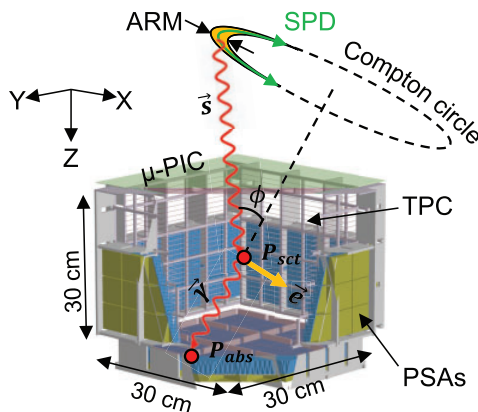


図 2: ETCC 検出器の概要図 (参考文献 [7] から引用)。天頂方向は図中の上向きで定義される。

2018 年 4 月にオーストラリアのアリススプリングスで、SMILE-2+気球実験が行われた。2018/4/7/8:44(ACST) から翌日 10:45 まで、高度 39.6 km での安定的な観測がなされた。レベルフライトでの残留大気圧は 2.4-3.8 hPa(高度 37.8-40.4 km) である。レベルフライト中の 511 keV ガンマ線の図 3 に示す。

3 銀河拡散ガンマ線の解析

銀河拡散ガンマ線を抽出するためにはバックグラウンドガンマ線を見積もる必要がある。バックグラウンドガ

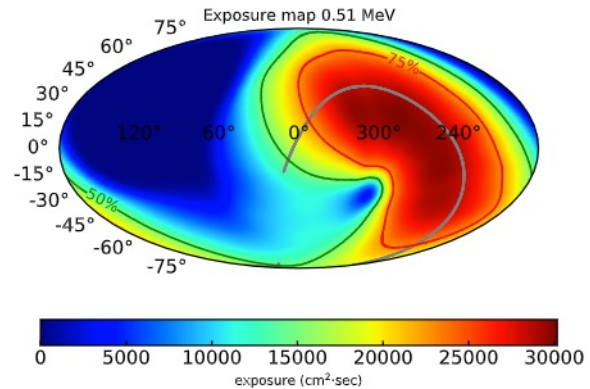


図 3:

ンマ線には系外拡散ガンマ線、大気ガンマ線、検出器と宇宙線の相互作用によって生成されたガンマ線がある。系外拡散ガンマ線は大気の吸収の効果により、また大気ガンマ線は大気の吸収と生成による効果によってどちらも残留大気圧に相関を持つ。これは「growth カーブ」として知られている [8]。われわれは実験データから growth カーブを作成し、これを経験的な関数でフィットすることで残留大気圧と計数率の相関係数を計算した。またここで得られた相関係数からレベルフライト中の残留大気圧を使ってバックグラウンドのモデル化を行なった。バックグラウンドの方向分布は銀中が視野に入らない時間帯の観測データを用いている。相関係数のフィットエラーと、バックグラウンドの方向分布作成時の統計誤差はそれぞれ系統誤差として扱っている。観測された 150-2100 keV の全天マップとバックグラウンドモデルの全天マップ、さらにその差分を図 4 に示す。マップの 1 ピクセルは約 1sr に相当する。明らかに銀河中心領域に超過成分が残っていることがわかる。ただし、検出器応答を考慮していないため、真の放射マップになっていないことに注意する。

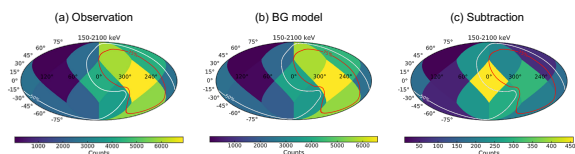


図 4: (a) レベルフライトの観測データの全天マップ。(b) バックグラウンドモデルを用いて作成したバックグラウンド全天マップ。(c) 観測データとバックグラウンドを差し引いた全天マップ。

銀河中心領域のピクセルのスペクトルを図 5 に示した。青点は観測データからバックグラウンドモデルを差

し引いたスペクトルである。統計誤差と系統誤差を考慮して 4.3σ の有意度で超過成分が検出された。系統誤差は前述した BG のモデル化に伴う不定性が起因している。

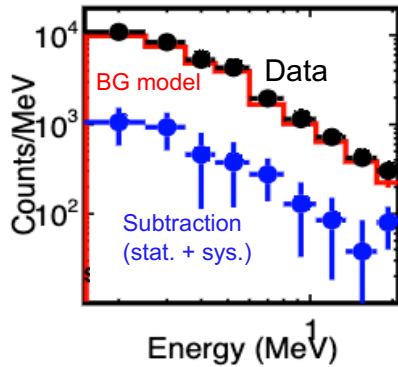


図 5: 銀河中心領域のスペクトル。黒は実験データ。赤はバックグラウンドモデル。青はそれらを差し引いたスペクトルである。エラーバーは統計誤差と系統誤差を含む。

このように、BG では説明できない超過成分が観測されたため、われわれは 150–600 keV の低エネルギー領域で期待される真の放射強度を求めた。本実験データは統計量が少なく放射マップまで計算することはできないため、放射マップは INTEGRAL/SPI で作成された 511 keV 対消滅ガンマ線マップを使用した [9]。また、点源天体からの寄与は INTEGRAL/SPI で観測されたものを使用している。観測放射マップは図 4 のように 12 ピクセルに分けられ、それぞれ図 5 のように 4 つのエネルギービン持つ。また、求めたい真の放射強度は 150–600 keV で 4 つのエネルギーに分けるため、フィットの自由度 (NDF) は 44 である。この時、真の放射強度から見積もられる検出器の応答を考慮した全天マップのピクセル p' と観測エネルギービン E' の期待されるイベント数 $m^{p',E'}$ は次式で表される。

$$m^{p',E'} = \sum_t \sum_{E=0}^{E=4} \sum_{p=0}^{p=12} R_{t,E,p}^{p',E'} (\theta_E M_{E,p} + P_{E,p}) + \sum_t \phi_t^{E'} B_t^{p'} \quad (1)$$

ここで E は真の放射エネルギー、 p は真の放射マップのピクセル、 t は観測時間、 $R_{t,E,p}^{p',E'}$ は検出器の応答関数、 $M_{E,p}$ は銀河拡散ガンマ線放射マップ、 θ_E は真の放射強度、 $P_{E,p}$ は点源天体の放射モデル、 $\phi_t^{E'}$ は時間 (残留大気圧) に依存するバックグラウンドレート、そして $B_t^{p'}$ はバックグラウンドモデルのマップを示す。これによって求めた $m^{p',E'}$ は観測データと比較され、系統誤差も考慮して χ^2 検定により評価される。フィットされた銀

中のピクセルのスペクトルと、Unfolding された真の放射スペクトルを図 6 に示す。フィットにより得られた χ^2 値は $\chi^2/\text{NDF} = 40/44$ であった。ここで得られた放射強度を使って計算した銀河拡散ガンマ線のライトカーブと SMILE-2+ で得られたライトカーブを比較したものを図 7 に示す。時間変動としてもよく一致していることがわかる。

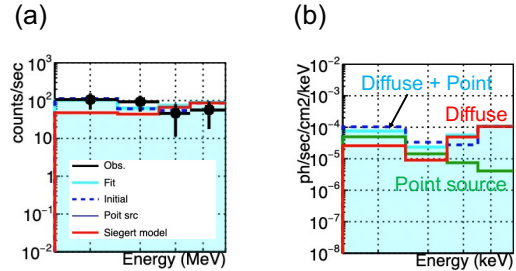


図 6: (a) 銀中の検出器応答を加えた観測スペクトル。黒のポイントは観測データを示す。赤のスペクトルはフィットで求めらえた銀河拡散ガンマ線からの寄与である。水色は点源天体からの寄与と銀河拡散ガンマ線を足し合わせたもの。(b) Unfolding で解かれた真の放射スペクトル。赤は銀河拡散ガンマ線からの寄与、緑は点源天体からの寄与を示す。水色は銀河拡散ガンマ線と点源天体の寄与を足し合わせたもの。

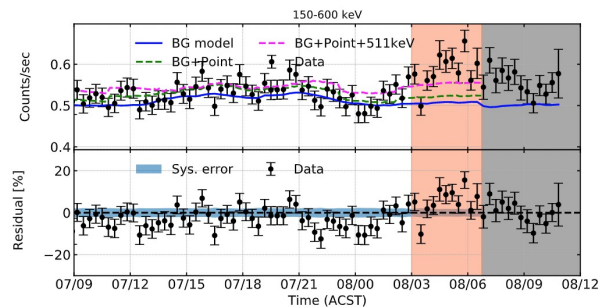


図 7: 上図はライトカーブの比較。黒点は実験データ、青は BG モデルである。緑の点線は点源天体からの寄与、ピンクの点線は計算された銀河拡散ガンマ線の寄与を足し合わせたものである。下図はそれらの差分であり、青の塗りつぶされた領域は系統誤差を示す。

4 議論

図 8 に他の実験と比較した放射強度を示す [10, 2]。ここで本研究で計算した SMILE-2+ の放射強度データの誤差は十分に評価できていないことに注意したい。しかしながら、その中央値は INTEGRAL/SPI (図中 Bouchet(2011)) とよく一致していることがわかる。また、図 7 では銀河中心領域で統計的に有意ではないが、本研究で用いたモデルでは説明できない超過成分が見られている。さらにこれは 150–250 keV のエネルギー領域で顕著に観測されるが、この領域では電子陽電子対消滅線よりも ISM と宇宙線の相互作用による寄与が大きいことが INTEGRAL の観測から知られている [10]。このことから、われわれが本研究で用いた電子陽電子対消滅線マップモデルでは説明できない傾向が 150–250 keV のライトカーブで出現した可能性がある。先述した通り、有意度が不十分であるので深い議論はできないが、今後の高統計な観測によって解決したい。

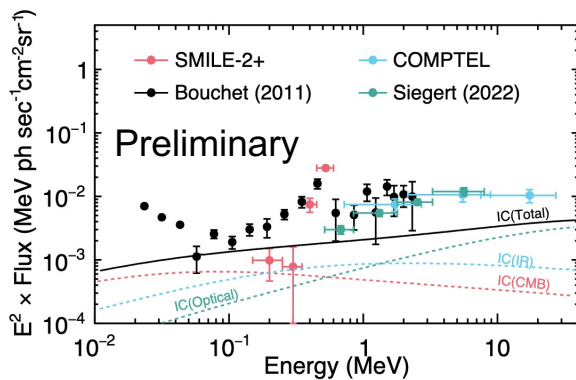


図 8: 銀河中心領域の放射強度。赤点は本研究で求められたもの。黒点は INTEGRAL/SPI の 2011 年の観測結果。緑は同じく INTEGRAL/SPI の 2022 年の観測結果である。青点は COMPTEL による結果を示す。

5 まとめ

本研究では、2018 年に打ち上げられた SMILE-2+ のデータを用いて銀河中心領域での銀河拡散ガンマ線の解析を行なった。銀河中心領域では系統誤差を評価して 4.3σ のガンマ線検出有意度が得られた。また、150–600 keV のデータを用いて真の放射強度を計算したところ、INTEGRAL/SPI の観測結果とよく一致していることがわかった。

参考文献

- [1] V. Schönfelder *et al.*, *Astrophysical Journal* **217**, 306 (1977)
- [2] T. Siegert *et al.*, *Astronomy&Astrophysics* **660**, A130 (2022)
- [3] T. Tanimori *et al.*, *Astrophysical Journal* **810**, 28 (2015)
- [4] T. Tanimori *et al.*, *Scientific Reports* **7**, 41511 (2017)
- [5] A. Takada *et al.*, *Astrophysical Journal* **930**, 6 (2022)
- [6] A. Takada *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **573**, 195–199 (2007)
- [7] T. Ikeda, *et al.*, *PTEP*, 083F01 (2021)
- [8] J.C. Ling, *Journal of Geophysical Research*, **80** (1975)
- [9] T. Siegert *et al.*, *Astronomy&Astrophysics* **586**, A84 (2016)
- [10] L. Bouchet, *et al.*, *Astrophysical Journal* **739**, 29 (2011)