

SMILE-2+ における MeV ガンマ線天体検出感度

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

1 MeV ガンマ線天文学と観測の課題

天文学における数百 keV から数十 MeV までの MeV ガンマ線観測は、元素合成にともなう核ガンマ線放射、活動銀河核や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といったさまざまな天体現象を解明する手段として期待されている。一方で、MeV ガンマ線観測は、雑音除去と撮像の技術的困難さから、高感度が実現できず、世界最高感度をもつコンプトン望遠鏡 COMPTEL による約 10 年の衛星観測でも、検出した定常天体は約 30 天体である [1]。また、地上での性能から予測される感度と、上空での実際の検出感度が一致しないという問題も挙げられている。一般に、 3σ 検出するための最小のフラックスを F_{min} とすると、バックグラウンドがシグナルと比べて過多のとき、

$$F_{min} = 3 \frac{\theta \sqrt{B}}{AT} = 3\theta \sqrt{\frac{I_B}{AT}} \quad (1)$$

とかける。B はバックグラウンド、 θ は角度分解能、A は有効面積、T は観測時間、 I_B はバックグラウンドインテンシティである。 I_B に予測バックグラウンドを代入すると、地上性能から予測される感度となり、B に実測値を代入すると、上空での実際の検出感度となる。COMPTEL では実測の方が約 3 倍悪かったことが指摘されている [2]。他の実験でも、MeV ガンマ線で明るい天体である、かに星雲において、予測光子数と実測光子数が合わず [3][4][5]、感度の不一致が問題となっている。

2 SMILE-2+ 実験

高感度化、感度の不一致という課題を克服するためには、雑音除去と角度分解能の厳密な定義と向上が必要であると我々は考えている。式 1 から分かるように感度はバックグラウンドの 0.5 乗できいてくる。また、MeV ガンマ線は撮像技術の難しさから、可視光や X 線のような 2 次元の point spread function を厳密に定義できていないため、予測と実測で値が一致していないのではないかと考えている。そこで、我々はこれらの困難の打破のため、電子飛跡検出型コンプトンカメラ ETCC を開発してきた。ETCC はガス飛跡ピクセル検出器と GSO ピクセルシンチレーション検出器の構成で、散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点をシンチレーション検出器で得、反跳電子のエネルギーと反跳方向をガス飛跡検出器で得る。荷電粒子の識別、コンプトン運動学テストによる雑音除去能力と鋭い point spread function を持ち、将来の衛星観測のための優れた検出器の候補である [6]。2018 年 4 月には、ETCC を搭載した気球実験をオーストラリアにて行った。その目的は明るい天体の観測により、地上較正実験から予測される感度と、上空での実際の検出感度を比較・検証し、望遠鏡としての性能を実証することである。観測天体はかに星雲と銀河中心領域からの電子・陽電子対消滅線である。装置の性能としては、300 keV で有効面積 1 cm^2 、600 keV で角度分解能 Half Power Radius 30 度となっている。本稿では、これらの天体の解析結果とともに、検出感度について述べる。昨年と比較した進捗としては、データのクロスチェックを行い、信頼性の高い解析にした後、かに星雲のフラックスや、検出感度の値をフィックスしているところであり、近日論文投稿予定で、銀河中心領域についても論文文化を進めている。

2.1 銀河中心領域

銀河中心領域の仰角の時間変化を図3上に、レベルフライトでのエネルギーごとのライトカーブを図1に示す。データのクロスチェックの結果、低エネルギーの超過が昨年の結果と比べて下がったが、どの時間帯においても、観測の後半に超過が見られることが分かる。これを定数+ガウシアンでフィットを行った。表1はフィット結果である。銀河中心領域の北中時刻とほぼ一致した値をとっており、同期した変動であることを示唆している。ライトカーブで銀河中心領域のシグナルが見られるということは、シグナルノイズ比1程度の高いバックグラウンド除去能力有していることを示している。図2は銀河中心領域が視野内のスペクトルから視野外のスペクトルを差し引きした結果である。差し引き前のスペクトルでは、系外拡散ガンマ線や大気拡散ガンマ線が主な成分となっているが、差し引き後は銀河中心領域成分を表している。スペクトルを比較したときに銀河中心領域の方が、非常に硬い結果となっている。電子陽電子対消滅線より大きなエネルギー(0.511 MeV)の銀河中心領域の放射は、宇宙線電子と宇宙背景放射との逆コンプトンが理論的に計算されているが、COMPTELの結果を説明できるほどの強度はなく、MeVの空への理解が足りていないため、議論ができないことが指摘されている[14]。今回の結果は、逆コンプトン成分では説明できないことをサポートすることを示唆する。天体由来か、astroparticle由来か特定するために、精度よく観測をすることが期待されている。

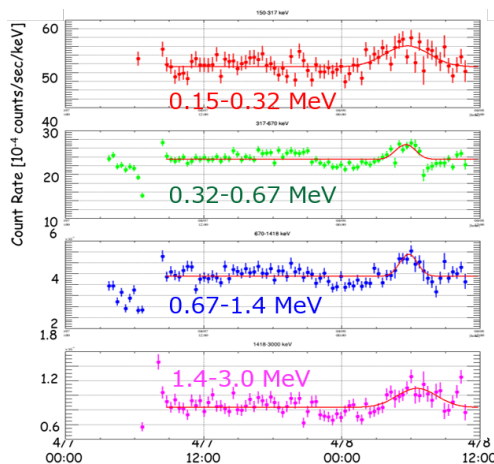


図1 レベルフライトでのエネルギーごとのライトカーブ

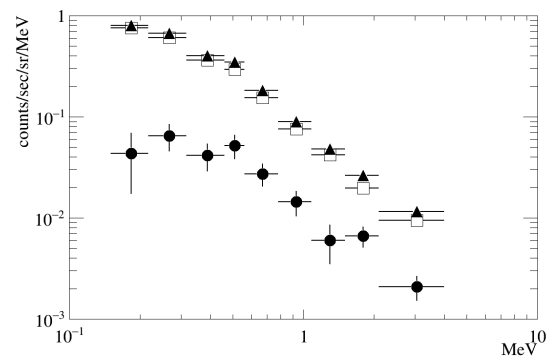


図2 銀河中心領域の差分解析。三角が銀河中心領域視野内、四角が視野外、丸が差分スペクトルである。

表1 ライトカーブのフィット結果

エネルギー範囲 [MeV]	中心時刻 [ACST]	中心時刻誤差 [minute]	ガウシアン 1σ
0.15-0.32	5:10:32	22.3	116.6
0.32-0.67	5:02:40	11.1	50.7
0.67-1.4	5:18:08	9.8	45.6
1.4-3.0	6:02:42	12.7	103.8
銀河中心北中	5:12:24	-	-

2.2 かに星雲

観測条件は、南半球からの大天頂角観測となっている。図3上は、かに星雲の仰角の時間変化を表している。視野内での平均仰角約50度となっている。図3下は、残留大気圧の時間変化でかに星雲の時間帯は高度が下がっていて、約3.5 g/cm²である。残留大気圧 d と仰角 θ としたとき、残留大気圧を $d/\sin\theta$ とかき、ガンマ線減衰率を計算すると、図4となる。300 keV で約半分の光子数に減衰する。それらを考慮し、かに星雲から40度以内をONとし、バックグラウンドと差し引きをしたとき、約100光子観測し、3-5 σ で受かると事前予測していた。実際のデータでの解析ではバックグラウンド領域を、同等の飛翔高度で、高光度天体のない時間帯に設定し、差し引きをすると、3.5 σ で検出できた。これは事前予測と一致する。冪関数 $N(\frac{E}{MeV})^{-\Gamma}$ photons/sec/MeV を仮定して、検出器の応答を畳み込んで、検出スペクトルとフィッティングし、パラメータを求めたところ、 $N = 1.84 \pm 1.55$ 、 $\Gamma = 2.20 \pm 0.93$ となり、これまでの他の検出器でのフラックスと誤差の範囲で一致した。COMPTEL と SPI での衛星観測以降、MeV 領域で、かに星雲の観測ができていない中で、SMILE-2+ が検出できたのは、観測的に大きな成功であり、ETCC という手法の有意性を示す結果だと考えている。

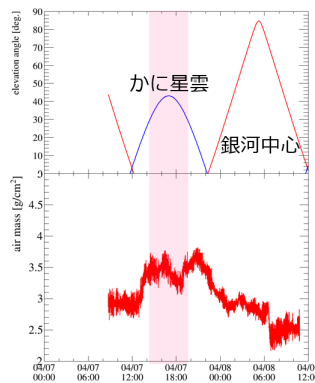


図3 SMILE-2+ での観測天体の仰角変化と残留大気圧

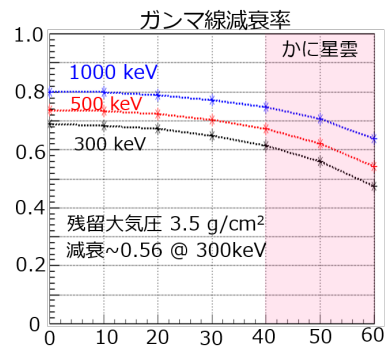


図4 ガンマ線の大気減衰率

2.3 検出感度

式1から2通りの感度の計算をした。実測感度はレベルフライトでのデータを用いた。天頂方向のデータを、エネルギーごとに角度分解能でしぼり、検出計数率から算出を行った。地上性能からの予測感度の計算にはバックグラウンドを仮定する必要がある。MeV 領域では、バックグラウンドの成分として、系外拡散ガンマ線、大気拡散ガンマ線、宇宙線と検出器との相互作用ガンマ線、宇宙線事象などガンマ線以外の雑音の誤検出が挙げられる。系外拡散ガンマ線は残留大気圧量に依存して、減衰・散乱する。大気拡散ガンマ線は、宇宙線量に依存するため、地磁気による遮蔽を表すパラメータのカットオフレジディティの-1.13 乗に比例 [7] し、太陽活動による宇宙線強度変化によって、太陽活動極大と極小で 1.2-2.0 倍変化することが報告されている [8][9]。宇宙線と検出器との相互作用ガンマ線、宇宙線事象などガンマ線以外の雑音の誤検出には、宇宙線と検出器のシミュレーションを行い、算出する必要がある。現在、算出中であるため、予測バックグラウンドには入れ込まなかった。一方で、前回の気球実験 SMILE-I では、この成分は 10-20% 程度だった [10] ので、SMILE-2+ でも同等程度に少ないことが予想される。予測バックグラウンドの候補には日本原子力機構

が開発した PHITS での、大気での宇宙線・ガンマ線シミュレーションの Expacs[11] と半経験式 Ling モデル [12][13] がある。Expacs のガンマ線成分は一次電子・陽電子を考慮しておらず、系外拡散ガンマ線成分も含まれていない。一方で、Ling モデルは観測に基づく半経験式なので、現実を反映したものであり、大気拡散ガンマ線と系外拡散ガンマ線の両方を含んでいる。そのため、今回の予測バックグラウンドモデルとして、Ling モデルを採用した。ただし、Ling モデルのもととなった観測と SMILE-2+ の観測は太陽活動度とカットオフリジディティの条件がちがうので、先に挙げた変化量でスケールを行った。予測感度と実測感度が 300 keV、1200 keV でそれぞれ 5.02×10^{-10} と 5.05×10^{-10} 、 1.69×10^{-9} と 2.72×10^{-9} erg/s/cm² となった。一致度はエネルギー依存性があり、低エネルギーほどよく一致し、高エネルギーほど離れていく。これは、予測バックグラウンドで今回の計算に入っていない、宇宙線と検出器との相互作用ガンマ線と宇宙線事象などガンマ線以外の雑音の誤検出ではないかと考えているが、実際にシミュレーションをして確かめる必要がある。一方で、他の検出器では実現できなかった範囲での感度の一致ができ、ETCC が MeV ガンマ線観測手法として適していることを実証している。

3 まとめと展望

元素合成をはじめ、さまざまな物理解明の手段として、MeV ガンマ線観測は期待されている。一方で、雑音除去と撮像技術が難しく、観測が進んでいないのが現状である。その現状を打破すべく、我々は、MeV 領域で初めて point spread function を厳密に定義できる望遠鏡 ETCC の開発を進めてきた。SMILE-2+ は天体での ETCC の撮像能力を実証する実験であり、予定通り、かに星雲を 3.5σ で観測し、他の検出器での観測と矛盾のないスペクトルを得た。また、MeV 領域でいままで実現できなかった、実測での検出感度と地上性能からの予測での感度との一致ができた。かに星雲と検出感度については、近日論文として投稿する。さらに、銀河中心領域と同期した時間帯からの信号を超過を確認できた。銀河中心領域は空間分布やエネルギースペクトルの解析を進めている最中である。

参考文献

- [1] Schonfelder *et al.*, *AA Suppl*, 2000.
- [2] Schonfelder *et al.*, *New Astron. Rev.*, 2004.
- [3] Bandstra *et al.*, *ApJ*, 2011.
- [4] Curioni, *PhD thesis*, 2004.
- [5] Kamiya, *PhD thesis*, 2011.
- [6] Tanimori *et al.*, *ApJ*, 2015.
- [7] Thompson *et al.*, *Journal of Geophysical Research*, 1981.
- [8] Morris, *Journal of Geophysical Research*, 1984.
- [9] Sazonov *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007.
- [10] Takada *et al.*, *ApJ*, 2011.
- [11] Sato, *PLOS ONE*, 2016.
- [12] Ling, *Journal of Geophysical Research*, 1975.
- [13] Ling *et al.*, *Journal of Geophysical Research*, 1977.
- [14] Strong *et al.*, *Proceedings of the 12th ICATPP Conference*, 2011.