

SMILE-2+フライトデータ解析状況報告

中村 優太, 高田 淳史, 谷森 達, 水村 好貴, 竹村 泰斗, 吉川 慶, 小野坂 健, 齋藤 要, 阿部 光, 古村 翔太郎, 岸本 哲朗, 谷口 幹幸, 黒澤 俊介^A, 身内 賢太郎^B, 澤野 達也^C, 濱口 健二^D, 窪 秀利, 小財 正義^E

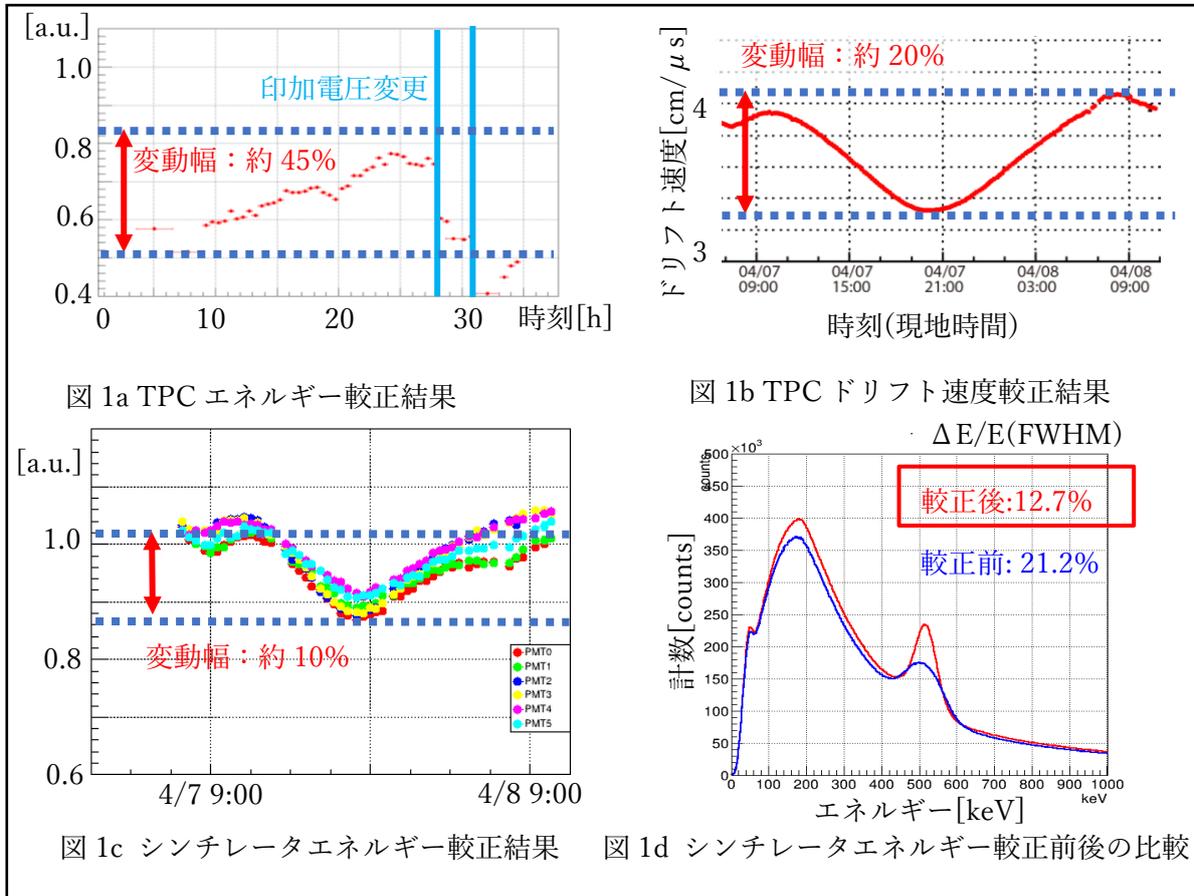
京大理, A: 東北大 NICHe, B: 神戸大理, C: 金沢大数物, D: メリーランド大, E: JAXA

1. MeV ガンマ線観測の現状と SMILE 計画

数百 keV から数十 MeV までの MeV ガンマ線帯域は励起原子核の脱励起に伴うガンマ線の帯域であり、元素合成過程や不安定核の銀河系内での拡散の様子についての情報が得られる。また、活動銀河核での粒子加速、ブラックホール周辺での強重力場中からの放射、太陽フレアなどの観測も期待される。一方で、MeV ガンマ線帯域での高い雑音量や撮像技術上の困難のために観測技術の開発は遅れており、CGRO 衛星(1991-2000)に搭載された COMPTEL による定常天体の発見数も約 30 個にとどまっている[1]。INTEGRAL 衛星(2003-)による観測でも 600 keV 以上では 4 個しか発見できていない[2]。従来の MeV ガンマ線撮像検出器は光子の到来方向を個々には決定せずに統計的手法を用いることで撮像を行っていた。このような手法では像のガンマ線放射領域以外への広範囲にわたる漏れ込みや虚像が発生するため高雑音条件下では十分な感度が得られない。

電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)はコンプトン散乱を利用したガンマ線撮像検出器であり、散乱体としてガス飛跡検出器である TPC を、吸収体としてピクセルシンチレータアレイ(PSA)を用いる。TPC により反跳電子の反跳方向を取得することができるためコンプトン運動学を完全に解くことができ、個々の光子の到来方向を再構成することができる。また、ETCC は散乱事象の幾何とエネルギー付与の無矛盾性によるテストや TPC 中の荷電粒子の電離損失を用いた粒子判別による雑音除去能力を兼ね備えている。Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment: SMILE 計画は ETCC による科学観測を行うことで MeV 天文学を切り開くことを目標としている。2006 年の三陸沖での最初の気球観測実験 SMILE-I では 10 cm 角小型 ETCC にて高度 32-35 km で約 3 時間の観測を行い Geant4 シミュレーションと合致する拡散ガンマ線スペクトルの取得に成功[3]、ETCC の雑音除去能力の有効性を示した。今回の豪州気球観測実験 SMILE-2+では 30cm 角 ETCC を用いて銀河中心からの 511 keV 放射やかに星雲からのガンマ線の撮像を行うことで気球高度での ETCC の撮像性能を実証することを目的としている。SMILE-2+では ETCC の大型化に加え検出器構造の設計変更を行うことで、従来の ETCC では TPC 有感領域から電子飛跡がはみ出してしまい再構成できなかった高エネルギー事象が解析可能となっており、1 MeV 以下で 1 cm² 以上の有効面積を持つ。SMILE-2+フライトの詳細については[4]で述べている。

2. 検出器の機上較正



2018年4月7日6:24(現地時刻)放球11:07切り離し約26時間の水平浮遊に成功した。当初、QPSK通信を用いてETCC検出事象のQLを行う予定であったがGPSとの干渉が問題となったため、取り止めとなった。検出器ヒットレートやHKデータにより上空での検出器の状態を間接的には把握していたものの、TPCで取得される飛跡の質が解析可能な水準を保っているかが危惧された。実際に取得された飛跡は図に示すように荷電粒子の運動方向が明瞭であり、十分解析可能な質を保っていた。

ETCCの取得データからガンマ線を再構成するにあたって、TPC・PSAのエネルギー較正とTPCでの電子ドリフト速度の較正を行う必要がある。TPCのエネルギー較正(図1a)には最小電離粒子の飛跡から求めたガス中でのエネルギー損失率(Arメイン2気圧中で5.08 keV/cm)を用いて行った。8日の4時以後にTPCの回路系での漏電と予想される雑音はTPCのヒットレートで検知されたため印加電圧の変更を行っており、利得の不連続な減少はこの操作によるものである。印加電圧変更まではほぼ単調に利得が上昇しており、最大値/最小値比は1.53程度の変化が見られた。電子ドリフト速度の較正(図1b)にはTPC有感領域を縦断する荷電粒子飛跡を利用した。較正で得られたドリフト速度はフライト中3.3-4.0 cm/μsの範囲で変化しており、TPCガス圧やTPC容器の温度の変化と対応している。PSA

のエネルギー較正(図 1c,d)には 511 keV のガンマ線の吸収事象を用いて行った。最大値/最小値比は 1.19 程度であり、TPC ドリフト速度同様に容器温度との対応を示した。これはシンチレータ光の読み出しに用いている PMT の光電面の感度およびシンチレータ材として用いている GSO の発光量の温度依存性によって説明できる変化量である。較正後の PSA のエネルギー分解能は全 PMT を用いたスペクトルで 12.7%(FWHM, @511 keV)となった。

3. Growth Curve の解析

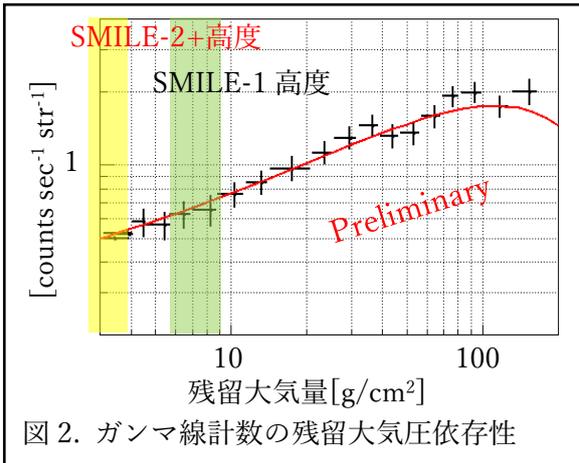


図 2. ガンマ線計数の残留大気圧依存性

銀河系外由来の宇宙拡散ガンマ線はセーフアート銀河やクエーサーによる放射であると考えられている[5]。特に MeV 帯域はスペクトルの折れ曲がりが存在することが知られており活動銀河核進化モデルの理解において重要な帯域となっている。SMILE-2+におけるレベルフライト時の残留大気量は 3 g/cm² 程となっており、宇宙拡散ガンマ線が大気拡散ガンマ線の 3 倍以上となる高高度での観測を行うことができた。

ETCC の有効面積が <500 keV で 1 cm² 以上程度であることから上昇中についても十分なデータを取得することができており、宇宙拡散ガンマ線量・大気拡散ガンマ線量の両方を精度よく決めることができる。現在、上昇中 3 時間における <300 keV 以下・Zenith < 20 deg のガンマ線事象の計数率が 300 keV・zenith 0 deg における Ling モデル[6]をスケーリングすると一致しており、残留大気量依存性が一致することを確認している。今後、筐体由来の雑音量のシミュレーションを行うことで拡散ガンマ線を雑音・各主成分への分離を行い、銀河系外拡散ガンマ線量の導出を行う。

4. 銀河中心領域の解析

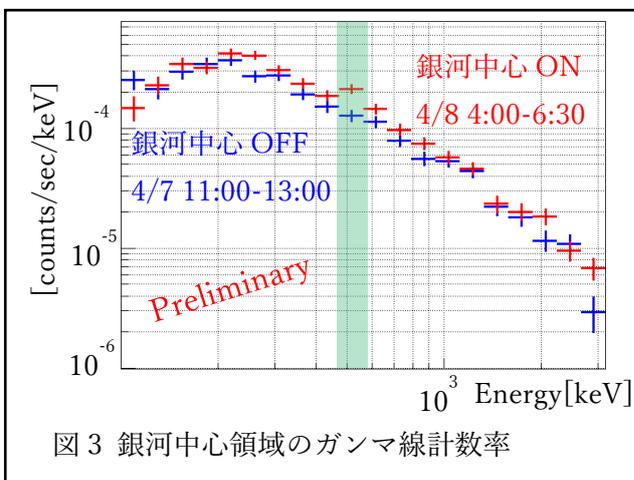
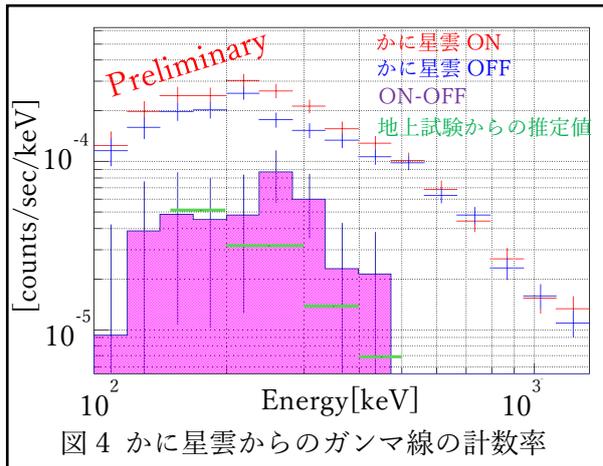


図 3 銀河中心領域のガンマ線計数率

銀河中心領域は 4/8 0:46 から 9:44 にかけて ETCC の視野内にあり、最高高度ではほぼ視野中心を通過している。そのため、姿勢情報を適用しなくても視野中心領域のみを使用すれば時刻によるカットのみでおよそのスペクトルを得ることができる。図 3 では銀河中心がほぼ視野中心にある 4/8 4:00 から 6:30 にかけての Zenith < 20 deg の事象を銀河中心領域からのガンマ線事象と

して使用した。バックグラウンドは視野中心が銀緯-90 deg 付近にある 4/7 11:00-13:00 のデータを使用した。511 ±45 keV の範囲に 0.9×10^{-4} photons/s/keV 程度の超過が確認でき、これは既知のバルジと Sgr A*からの寄与 1.3×10^{-5} photons/s/keV[7]とオーダーレベルで一致している。エネルギー分解能の違いによる連続成分の寄与が考えられるため、今後の解析で詳細を調べる。

5. かに星雲の解析



SMILE-2+ではかに星雲の高度角は最大でも 45 deg 程度であり、ガンマ線の大気減衰や ETCC の有効面積の Zenith 依存性のために銀河中心と比較すると検出が難しくなる。現状、フライトモデルでの有効面積の詳細なシミュレーションを進めている段階であり検出器座標系で異なる領域に再構成された像の計数率を単純比較することはできない。そこで、まず、同じ領域(Zenith: 30-60 deg, Azimuth:とある

45 deg 範囲)に再構成された事象について異なる時刻間で比較を行った。かに星雲が視野に入っている時間 4/7 9:30-14:00 と入っていない時間 4/7 15:00-18:30 との差分を見ると 200-300 keV 付近に 9×10^{-3} counts/sec/keV 程度の特に大きな超過が見られた(図 4)。200 keV 以下では地上で行った較正試験の結果[8]からの推定値と異なり計数率が下がる傾向が見られるが、これは与圧容器の上蓋を取り外した状態で地上試験を行っていたためであると考えられる。同じ時間帯に検出されたかに星雲と対称な領域の事象をバックグラウンドとして用いる解析においても同様の傾向が確認できている。また、かに星雲の位置に呼応して検出器系での領域ごとの計数率の 1-2 σ 程度の超過も移動していることが確認できている。より高エネルギー側の方が PSF の広がり小さくなるために雑音量が抑えられ、感度を高めることができるため、escaped 事象解析を行うことでより有意な検出が期待できる。

参考文献

- [1] V. Schönfelder, et al., A&ASS, 143 (2000) 145-179
- [2] L. Bouchet, et al., ApJ, 679 (2008) 1315
- [3] A. Takada, et al., ApJ, 733 (2011) 13
- [4] 高田淳史, 他, 平成 30 年度体気球シンポジウム, isas18-sbs-019
- [5] Y. Inoue, et al., ApJ, 776 (2013) 33
- [6] J. C. Ling, JGR, 80, 22 (1975) 3241-3252
- [7] G. Skinner, et al., Int. J. Mod. Phys., 30 (2014) 1460255
- [8] 竹村泰斗, 他, 平成 30 年度体気球シンポジウム, isas18-sbs-020