

SMILE+における銀河中心領域の観測

吉川慶、谷森達、高田淳史、水村好貴、竹村泰斗、中村優太、古村翔太郎、岸本哲朗、
谷口幹幸、小野坂健、齋藤要、黒澤俊介^A、身内賢太郎^B、澤野達哉^C、濱口健二^D、窪秀利
小財正義^E、莊司泰弘^F

京大理、^A: 東北大 NICHe、^B: 神戸大理、^C: 金沢大数物、^D: NASA GFSC、^E: JAXA

^F: 大阪大工

1. MeV ガンマ線天文学と SMILE-2+実験

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、核反応による元素合成[1]、活動銀河核やガンマ線バーストにおける粒子加速[2][3]、ブラックホール近傍の強い重力場[4]など、さまざまな天体現象を解明するプローブとなると期待されている。しかし、この波長帯は、雑音除去と撮像の技術的困難さから、高感度化が実現できず、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 32 天体だけである[5]。また、気球実験も含めて、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る[6][7]。

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。[8]

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。観測天体の一つは銀河中心領域からの電子・陽電子対消滅線であり、検出有意度が 5σ 以上になるように設計・計画し、気球のフライトが成功したことをこれまで報告している[9]。

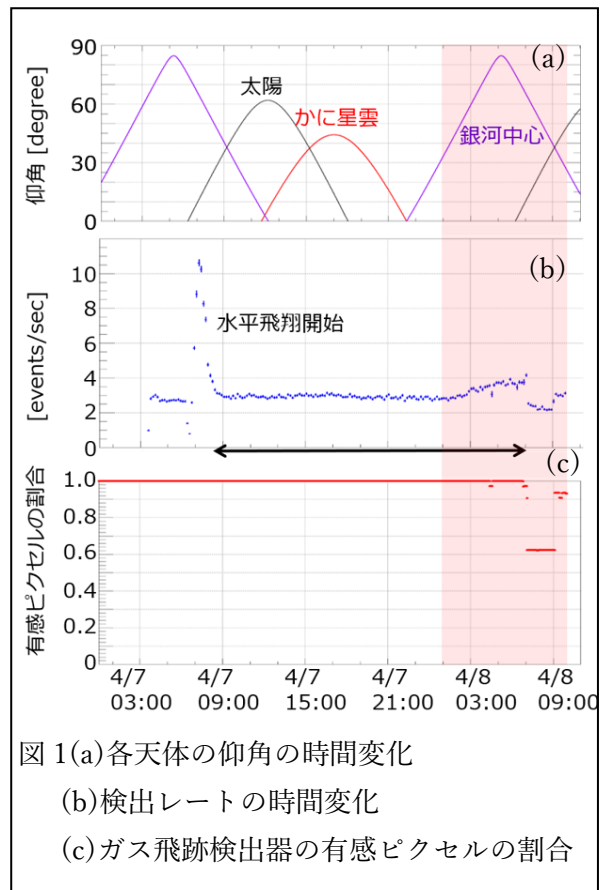


図 1(a) 各天体の仰角の時間変化

(b) 検出レート of 時間変化

(c) ガス飛跡検出器の有感ピクセルの割合

2. 検出数による初期解析

ここでは、検出事象数を用いた、銀河中心領域の初期解析について述べる。図1はフライトにおける天体の仰角、検出レート、有感ピクセルの割合の時間変化である。有感ピクセルの割合の減少は、ガス飛跡検出器のノイズによる。銀河中心領域が視野(~ 3 str)に入るにつれて、検出レートが増加し、視野から外れるにつれて、下がっていることが分かる。図2は天頂角 30° 以内のスペクトルである。この解析では、4/7 04:00-06:30の銀河中心領域が視野内に入り、かつ、まずは有感ピクセルの割合の減少が始まる前で信頼が高いデータを使い、これを ON とし、高銀緯が視野内に入る、4/7 11:00-13:00 を OFF とし、ON-OFF の解析をしている。緑のスペクトルが差分であり、511 keV のビンの有意度が、 5.5σ 、連続成分すべてを含めると 10σ である。銀河中心領域の時間帯に、予定した有意度と同等の超過があることが確認できる。

ここから、さらに解析を進めていくためには、検出器の応答関数を使い、検出事象数から光子数に変換する必要がある。そこで応答関数を求めるために、検出器シミュレーションを構築したので、その概要と実測とシミュレーションの比較・検証について述べる。

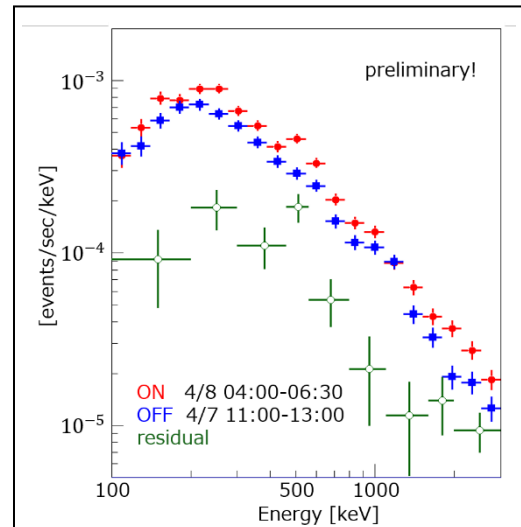


図2 天頂角 30° 以内のスペクトル。銀河中心領域が視野内の時間帯(赤)、高銀緯領域が視野内の時間帯(青)、差分(緑)。

表1 実測とシミュレーションの重量表

| [kg] | 実測 | シミュレーション |
|-------|-------|----------|
| 全体 | 511.0 | 514.6 |
| 与圧容器 | 95.9 | 90.8 |
| システム部 | 132.2 | 138.9 |

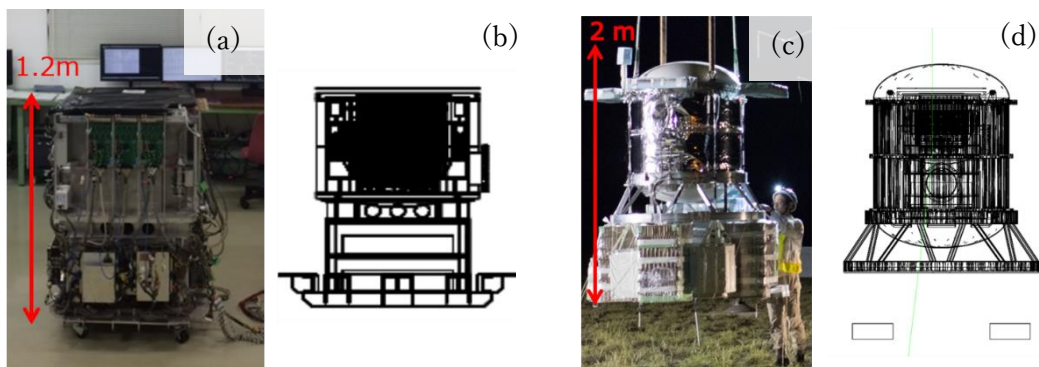


図3(a)地上実験モデルの写真、(b)地上実験モデルのシミュレーションでのジオメトリ、(c)フライトモデルの写真、(d)フライトモデルのシミュレーションでのジオメトリ

3. 応答関数を求めるための検出器シミュレーションの構築

検出器シミュレーションの構築には、モンテカルロシミュレーション Geant4[10]を利用し、地上実験での比較・検証用モデルと、フライトモデルとの2通りのジオメトリを作成した。それぞれの写真・モデルを図3に示す。また、重量の比較を表1に示す。シンチレーション検出器単体、ガス飛跡検出器単体、ETCCのシミュレーションの論理について、それぞれ述べる。ピクセルシンチレーション検出器は、Geant4によりエネルギーデポジットとデポジット位置を求め、周囲のピクセルへのリーク(~40%)を計算し、1ピクセル当たりの分解能でぼかす(662 keVで~11%)。回路での読み出しを考慮し、ADC値に変換し、実機と同じデータフォーマットに変換する。ガス飛跡検出器は、Geant4によりエネルギーデポジットと位置を計算し、トリガータイミングの揺らぎ(10 ns)でぼかし、ガスのW値(Ar 2気圧 27.2 keV)とファノファクター(0.2)を用いて、電子数を算出し、ポアソン分布で振り、ガス飛跡検出器での電子増幅を指数分布とポリヤ分布で再現し、回路応答を適応し、実機と同じデータフォーマットに変換する。図4-7は地上実験での ^{137}Cs 線源での実測とシミュレーションの比較である。図7での有効面積は実測 $0.221 \pm 0.004 \text{ cm}^2$ 、シミュレーションは $0.244 \pm 0.003 \text{ cm}^2$ であり、~10%の違いに抑えられている。これから体系的に、シミュレーションの再現性を検証していくが、おおよそ実測を再現するシミュレーションが構築できた。

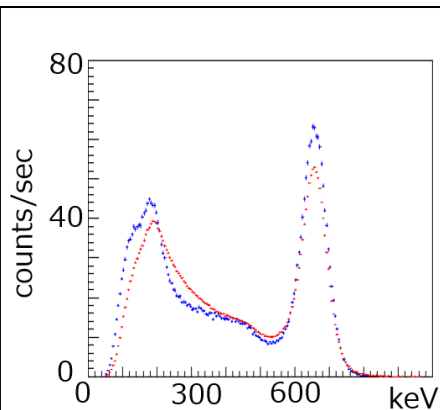


図4 ^{137}Cs でシンチレーション検出器でのスペクトル
実測(赤)、シミュレーション(青)

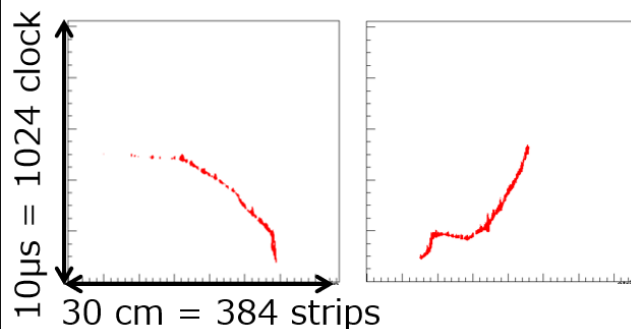


図6 ガス飛跡検出器での電子の飛跡
(a)実測、(b)シミュレーション

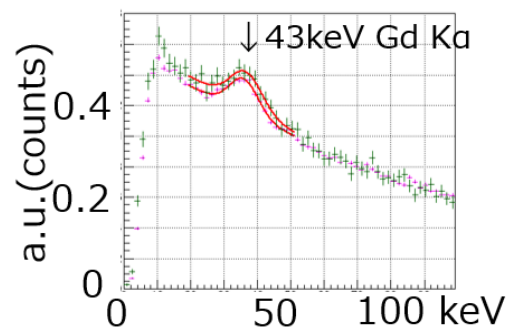


図5 ^{137}Cs でのガス飛跡検出器でのスペクトル
実測(緑)、シミュレーション(マゼンタ)

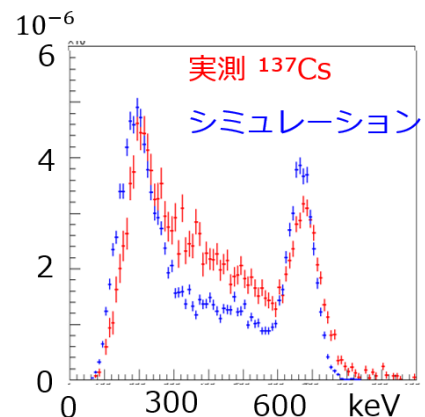


図7 ^{137}Cs でのETCCのスペクトル。
実測(赤)、シミュレーション(青)

4. 応答関数の引き戻しと銀河中心領域方向のスペクトル

シミュレーションが構築できたので、応答関数を用いて、光子数への変換を考える。まず地上実験での ^{137}Cs 線源の強度[photons/sec]の検証を行った。図 7 からエネルギーごとの強度を未知数として求め、650 keV での強度と日本アイソトープ協会による、その線源の強度を比較したところ、 $\sim 10\%$ の違いで、線源強度を求めることができた。この手法を用いて、図 2 の差分のスペクトルを光子数に変換してプロットしたものを図 8 に示す。この結果は、銀河中心領域の放射の大気散乱成分の見積もりや、銀河中心領域の大きさを詳細に詰めることによって、数倍程度、値は変わりうるが、INTEGRAL/SPI の観測と近い値が出ており、1 日の気球実験で、他の衛星観測と同様にプロットすることができている。これは、ETCC の撮像手法と雑音除去能力により、高い信号雑音比の観測ができたことを示している。今後、上記のような詳細な解析をしていく。

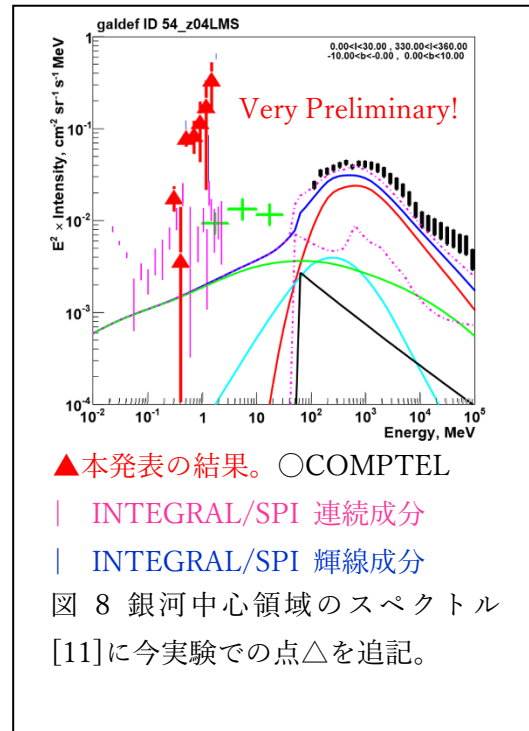


図 8 銀河中心領域のスペクトル
[11]に今実験での点△を追記。

参考文献

- [1] S. M. Matz., et al., Nature, 331, (1998) pp. 416-418.
- [2] C. M. Urry, & Padovani, P., PUB AST S P, 107, (1995) p. 803
- [3] M. S. Briggs, et al., ApJ, 524(1), (1999) pp. 82-91
- [4] M. McConnell, et al., A & AS, 120, (1996) pp. 149-152
- [5] Schonfelder., et al, A A Suppl., (2000)
- [6] Schonfelder., et al, New Astron. Rev. (2004)
- [7] Kierans., et al, PoS, (2016)
- [8] T. Tanimori, et al., ApJ, 810(1), (2015) p. 28.
- [9] 高田淳史, 他, 平成 30 年度大気球シンポジウム, isas18-sbs-019
- [10] Agostinelli., et al, NIMPA, 506, 250, (2003)
- [11] Strong., et al., WSPC(2011)