

# SMILE-2+における

## 高エネルギー事象解析状況報告

中村 優太, 谷森 達, 高田 淳史, 水村 好貴, 竹村 泰斗, 吉川 慶, 阿部 光, 古村 翔太郎,  
岸本 哲朗, 谷口 幹幸, 小野坂 健, 齋藤 要, 黒澤 俊介<sup>A</sup>, 身内 賢太郎<sup>B</sup>, 澤野 達也<sup>C</sup>,  
濱口 健二<sup>D</sup>, 窪 秀利, 小財 正義<sup>E</sup>, 莊司 泰弘<sup>F</sup>  
京都大, A: 東北大, B: 神戸大, C: 金沢大, D: メリーランド大, E: JAXA, F: 大阪大

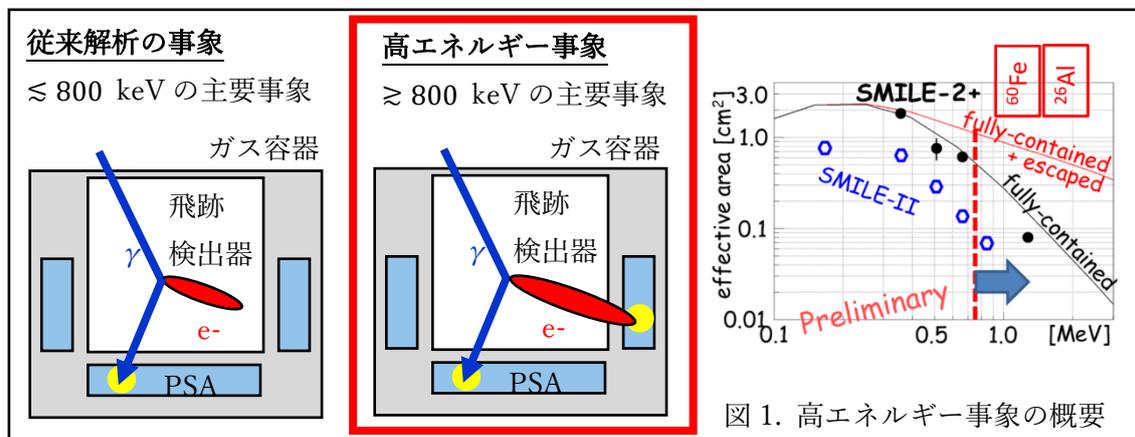
### 1. SMILE-2+実験

Sub-MeV/MeV gamma-ray imaging loaded-on-ballon experiment (SMILE) 計画では数百 keV から数十 MeV までのガンマ線観測を目的として電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) [1][2]を開発している。ETCC はガス飛跡検出器とピクセルシンチレータアレイ (PSA)を組み合わせることで入射ガンマ線の起こすコンプトン散乱事象を検出する撮像分光検出器である。従来の MeV ガンマ線望遠鏡では行ってこなかった電子反跳方向の取得を行うことでガンマ線の到来方向を一意に再構成できる点が革新的であり、また、コンプトン散乱の運動学や粒子種ごとの電離損失の違いを利用した高い雑音除去能力も兼ね備えている。

2018年4月に豪州にて宇宙相当の雑音環境下での ETCC の撮像性能の実証を目的として気球観測実験 SMILE-2+を実施した。水平浮遊高度 39 km で約一日のフライトに成功し、銀河中心領域を 8 時間、かに星雲を 6 時間観測した。従来から用いている事象解析手法により銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線を  $4\sigma$ 、かに星雲からの連続放射を  $3\sigma$  の有意度で検出できている[3][4][5]。

### 2. 高エネルギー事象の解析

不安定核の崩壊によって放出される銀河系内拡散ガンマ線として  $^{26}\text{Al}$  の 1.809 MeV や  $^{60}\text{Fe}$  の 1.332 MeV, 1.173 MeV の存在が知られている。これらの核種は大質量星内部や超新



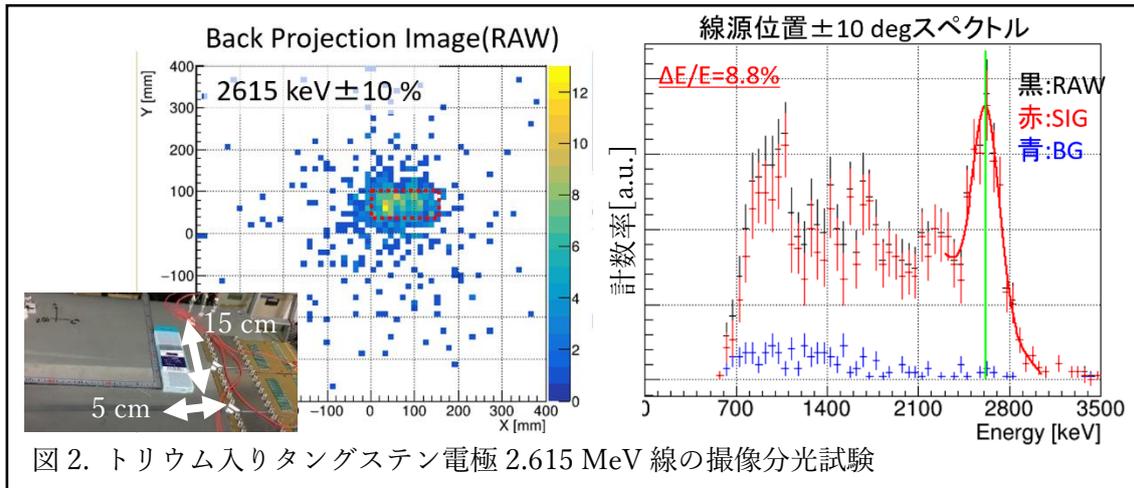
星などの爆発現象で合成されていると考えられており、両者の強度比や分布構造から元素合成の現場の環境や銀河系内の物質循環についての情報を引き出すことができる。SMILEで従来から使用してきた解析手法は反跳電子が飛跡検出器から飛び出さない1 MeV以下のガンマ線に対してのみ有効であった。そこで、先述の核ガンマ線に対しての感度を獲得することを目的に、SMILE-2+では従来ガス容器の外部に設置していたPSAを内部に配置変更することでガス飛跡検出器から飛び出した電子もPSAでエネルギー測定可能となるよう改良した(図1)。以下、このような事象を高エネルギー事象と呼ぶ。高エネルギー事象は反跳電子の運動エネルギーが大きいいため、ガス中でのクーロン多重散乱の影響が小さく、低エネルギー反跳電子の事象に比べて角度分解能が向上する利点もある。高エネルギー事象ではPSAのヒット点が通常の事象での散乱ガンマ線の吸収点に加え、反跳電子のヒット点も加わるため2点のPSAヒットが存在することから従来解析と高エネルギー事象解析は取り扱う事象が重複することのない独立な解析となっている。

飛跡検出器から飛び出した電子がPSAのシンチレータ材に入射するまでの間のガス相とシンチレータの暗幕でのエネルギー損失は検出不可であり、推定する必要がある。そこで、Geant4[6]を用いて飛跡検出器からの脱出角と運動エネルギー毎にモンテカルロシミュレーションを行い、検出不可領域でのエネルギー損失スペクトルの最頻値を補正值として採用した。例として飛跡検出器から垂直に脱出した600 keVの電子では140 keVが補正值となる。

高エネルギー事象解析ではPSAの2つのヒット点が散乱ガンマ線と脱出電子のどちらに対応するか判別する必要がある。単純な判別方法として飛跡端点とヒット点の位置関係を用いる手法とコンプトン散乱の運動学を用いる手法が考えられるが、PSAを飛跡検出器に隣接させた弊害としてPSA周辺の飛跡検出器のドリフト電場が歪み飛跡が変形しているためバルク領域の飛跡情報のみで解析可能な後者を採用した。電場歪みはElmer[7]を用いた電場計算とMagboltz[8]を用いたガス中での電子のドリフト速度シミュレーションをもとに補正を施した。治具に由来する特異な電場構造をもとにした飛跡位置評価により7 mmあったズレを1 mm以下まで抑えられていることを確認した。飛跡検出器の有感空間全体では最大で4.2 cmの位置補正が発生するがこれは有感領域の隅のごく限られた領域だけである。PSAの位置分解能が1.7 mmであり、補正後の位置ズレは反跳電子の脱出点とPSAヒット点の対応の解析において概ね問題のない水準である。

### 3. 地上試験による性能評価

高エネルギー事象解析における低エネルギー側については $^{22}\text{Na}$ 密封線源の1.275 MeV線を利用して性能を評価した。結果はエネルギー分解能 11.7%(FWHM)、散乱角決定精度(ARM) 13.0 deg(FWHM)、散乱平面決定精度(SPD) 29.6 deg(FWHM)となった。実験室内の構造物による散乱成分のためにARMやSPDがブロードな台の構造を持つため、関数フィットにより解析により除去することで推定した点源広がり関数(PSF)は10.6 deg(HPR)



となった。高エネルギー側についてはトリウム入りタングステン電極(トリウム系列由来のガンマ線を放出)の 2.615MeV 線を用いて評価した(図 2)。エネルギー分解能は 8.8%(FWHM)であり、バックプロジェクションによる像は線源の幾何幅 5 cm に対して 8.7 cm(FWHM)となった。撮像・分光とも良好であり 1.275 MeV から 2.615 MeV までの範囲に関しては高エネルギー事象解析が成立していることが地上試験レベルで確認できた。

現在、SMILE-2+用 ETCC のエミュレーターを用いて高エネルギー事象解析でのリスクの作成および実測データでの検証を進めている。SMILE-2+用 ETCC では飛跡検出器と PSA の間での放電の対策としてシンチレータ部に追加で絶縁テープを巻いており、1 MeV 以下のガンマ線に対する有効面積を下げている。次期気球実験に向けて、いかに暗幕と絶縁の物質量を少なくできるかが高エネルギー事象解析に関する課題である。

#### 4. フライトデータへの適用

従来解析で見えていた銀河中心領域の北中と同期したカウントレートの増加が高エネルギー事象解析でも確認できた。カウントレートの増加が確認できたことはガンマ線事象より 2 桁近く多い天体に寄らない宇宙線雑音をほぼ除去できたことの証拠である。

上昇中の天頂方向からのスペクトルには 1.3 MeV 付近に超過が見えている。この超過は従来解析でも確認できており、信頼性の高い超過である。また、レベルフライト以後についても多数ラインと考えられる超過が確認できている。現時点では不感エネルギーの推定に起因して解析上のエネルギーの不定性が大きい、不定性の評価や応答関数が固まり次第、詳細解析を進めていく。

#### 参考文献

- [1] T. Tanimori, et al., ApJ, 810(1), (2015) 28.
- [2] T. Tanimori, et al., Scientific Reports, 7, (2017) 41511.
- [3] K. Hamaguchi, et al., arXiv:1907.06658v1(2019)
- [4] 竹村泰斗 日本物理学会 第 74 回年次大会(2019)

- [5] 阿部光 日本物理学会 第 74 回年次大会(2019)
- [6] S. Agostinelli et al., Nucl. Instr. Meth., Vol. A506, (2003) 250–303
- [7] <https://www.csc.fi/web/elmer/white-papers>
- [8] S.F. Biagi, Nucl. Instr. and Meth. A 421 (1999) 234-240