

SMILE-3に向けた電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発

吉岡龍, 池田智法, 高田淳史, 塚本博丈, 阿部光, 谷森達, 竹村泰斗, 吉川慶, 中村優太, 田原圭祐, 小林滉一郎 (京大), 水村好貴 (JAXA), 黒澤俊介 (東北大), 身内賢太郎 (神戸大), 澤野達哉 (金沢大), 中森健之, 飯山陽輝 (山形大), 濱口健二 (メリーランド大), 岡知彦, 森正樹 (立命館大), 櫛田淳子 (東海大)

1 SMILE-3にむけたETCCの改良

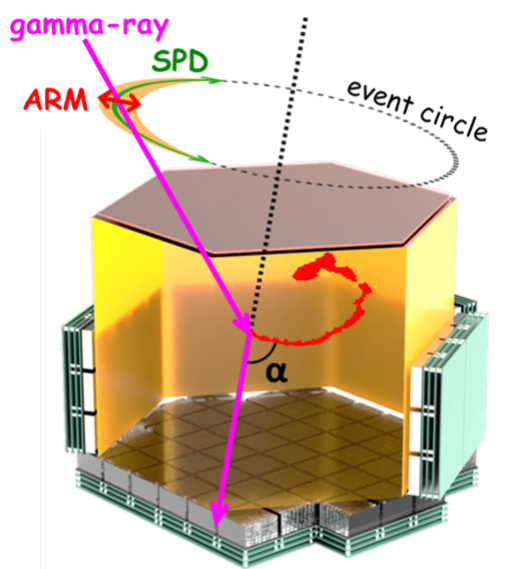


図 1: ETCC の概念図

SMILE-3では銀河中の拡散ガンマ線の観測を目的としている。この観測のために求められる検出器への要求は、有効面積が300 keVのガンマ線に対して5–10 cm² (SMILE-2+では1 cm²、角度分解能が662 keVに対してhalf power radiusで5–10° (SMILE-2+では20°)、エネルギー分解能が662 keVに対してFWHMで7–8% (SMILE-2+では13%)、観測可能エネルギー帯域が0.15–10 MeV (SMILE-2+では0.15–

2.1 MeV)である。図1にSMILE計画のElectron Tracking Compton Camera (ETCC)の概念図を示す。ETCCはガス検出器とシンチレータで構成されており、ガス検出器には、Micro Pixel Chamber (μ -PIC)[1]とGas Electron Multiplier (GEM)[2]を用いた、荷電粒子の飛跡情報を捉えることのできるTime Projection Chamber (TPC)を使用している。TPCに充填されているガスの電子と入射ガンマ線がコンプトン散乱を起こして散乱ガンマ線と反跳電子が生成される。散乱ガンマ線をシンチレータで検出し、反跳電子をTPCで検出する。SMILE-3では上記の要求を満たすためにTPCへの充填ガスの変更、粒子データ転送方式の変更、シンチレータの光検出器としてMulti-Pixel Photon Counter (MPPC)の使用、AIを用いた新たな解析方法による角度分解能の向上、検出器内の放射性物質の低減による内部バックグラウンドの削減を行う。

2 有効面積の拡大

ETCCの有効面積はTPC中でのコンプトン散乱確率に大きく依存する。コンプトン散乱は光子と電子の弾性散乱である為、その散乱断面積は単位体積当たりの電子数に比例する。ガス検出器の場合、単位体積当たりの電子数は、ガスの気圧と1分子当たりの電子数で決定される。そこで、SMILE-3ではCF₄ 3気圧のガスをコンプトン散乱標的として採用する。2018年のSMILE-2+ではAr 90% + CF₄ 3% + iso-C₄H₁₀ 2%の2気圧をコンプトン散乱標的としてい

た為 [3]、分子あたりの電子数は 18 から 42 に、気圧は 1.5 倍になる。よってコンプトン散乱確率は 3.5 倍大きくなる。分子あたりの電子数を大きくするには、Xe のような原子番号の大きな元素を用いることも可能だが、光電効果の確率も大きくなってしまふ為、シンチレータで先に反応した光子が TPC で吸収されたり、偶然同時係数を増加させるなど、雑音事象を多く生じてしまうことから、原子番号の小さい分子ガスを採用する。一方で、GEM や μ -PIC は比例計数管と同様の雪崩増幅で荷電粒子の信号を取得するが、分子構造を持つガスは希ガスに比べて増幅率が得にくい特徴がある。この為、Ar 主体のガスであった SMILE-2+ に比べて、SMILE-3 ではより高い電圧での動作が要求され、放電による電極損傷の懸念が高まる。これまでの μ -PIC の基板はポリイミドを使用していたが、大きな放電時に基板材質が変質してしまい微小な電流が流れ信号を取得できなくなってしまうため、放電に強いガラス基板の μ -PIC を開発した。[4] このガラス μ -PIC は、高い耐電圧と大きなガス利得を実現しており、現在 SMILE-3 用の大面積ガラス μ -PIC を製作中である。

[5]

3 不感時間の削減

TPC またはシンチレータで検出された粒子のデータを転送するときに新たな粒子検出が止まってしまう、不感時間が生じる。SMILE 計画は気球実験であるため、粒子検出に時間的制約がある。このため、不感時間を削減することは検出粒子数を増大させることにつながり、天体観測に有利になる。

ETCC の全体の大きさは数十 cm 程度である為、検出するべきコンプトン散乱で生じる散乱ガンマ線のシンチレータの信号と、ガス中の反跳電子はほぼ同時に発生する。TPC は反跳電子まわりに生じる電子雲を一定の電場で読み出し電極へドリフトさせて、ドリフトにかかる時間と読み出し電極の 2 次元情報を足し合わせて 3 次元飛跡情報を得る。従って、シ

ンチレータの信号から、TPC の信号は最大約 10 μ s ほど遅れうる。

SMILE-2+ ではデータを Common-Start 型と呼ばれる方式で読みだしていた [?]。2 のように、シンチレータで信号が発生次第、シンチレータの信号の取得を開始すると共に、TPC の信号を 10 μ s の間、待ち受ける。TPC の信号が存在する場合は、データ収集 CPU へ各々データを転送するが、TPC の信号が無かった場合は、取得済のシンチレータデータを破棄する。このデータ処理に最低 10 μ s かかる為、シンチレータの信号を検知してから最低 20 μ s の間、次のトリガーは発生しない。気球高度ではシンチレータのヒットレートは TPC より一桁大きいため、この方式ではシンチレータにヒットがあっても TPC ではヒットがない、という事象が多数発生し、膨大な不感時間が発生してしまう。図 4 は SMILE 計画の不感時間を表しており、SMILE-2+ では飛翔滞空時 (数百 kHz) の不感時間は約 20 % であり、改善の余地があることがわかる。

SMILE-3 では Common-stop 型のトリガー方式を採用する。3 に Common-Stop のタイミングチャートを表す。トリガー発生まで、シンチレータも TPC もデータを取り続け、シンチレータの信号発生から 10 μ s の間に TPC の信号があるときのみデータ取得をやめて、CPU へデータ転送する。この方式では有効なデータ名のみを転送するのでデータ転送時に発生する不感時間は減少する。図 4 のように、SMILE-3 では飛翔滞空時で約 10 % の不感時間を実現できる。[6]

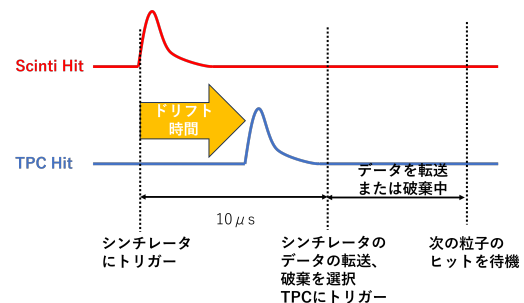


図 2: SMILE-2+での Trigger

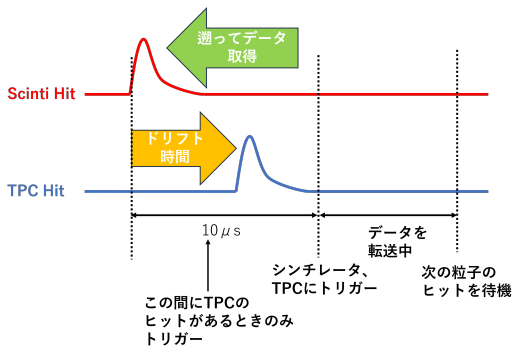


図 3: SMILE-3 での Trigger

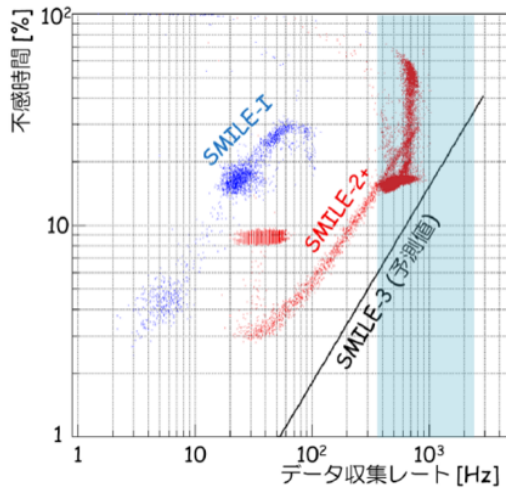


図 4: SMILE-3 の不感時間 [6]

4 エネルギー分解能の向上

入射ガンマ線のエネルギーは TPC とシンチレータから得られたエネルギーを足し合わせることで得られるが、損失するエネルギーはシンチレータの方が大きく、入射ガンマ線のエネルギーが数百 keV であれば、それぞれで損失するエネルギーは一桁異なる。このため、ETCC のエネルギー分解能にはシンチレータのエネルギー分解能でほぼ決定される。

散乱ガンマ線は GSO シンチレータに入射し、シンチレータ内部の原子を励起させ、その原子が脱励起時

に放出するシンチレーション光を光子検出器に入射させることでエネルギーを読み出す。SMILE-2+では光子検出器として Photomultiplier Tube (PMT) を用いた。GSO シンチレータ内で発するシンチレーション光は 440 nm であるのに対して、PMT の光子感度を表す Quantum Efficiency (QE) のピークは 350 nm と大きくずれており、必要な波長帯の QE が小さくなっている。SMILE-3では光子検出器として MPPC を用いる。MPPC の光子感度を表す Photon Detection Efficiency (PDE) のピークは 450 nm で入射ガンマ線の波長帯に近く、より検出される光子数が大きくなり、PMT の約 2 倍の光子を検出できる。検出光子数はエネルギー分解能の 1/2 乗に比例するので、エネルギー分解能は約 1.4 倍になり、662 keV でエネルギー分解能は 9 % となる。[8]

5 角度分解能の向上

角度分解能は Point Spread Function (PSF) で表され、Angular Resolution Measure (ARM) と Scatter Plane Division (SPD) に依存する (図 1 参照)。ARM はコンプトン散乱角精度を表しており、コンプトン散乱角は散乱ガンマ線と反跳電子のエネルギーに依存する。つまり、ARM はエネルギー分解能に大きく影響される。SPD は散乱平面の決定精度を表しており、反跳電子飛跡の決定精度に依存する。SPD を改善するために解析方法を変更する。新たな解析方法として Monte Carlo Simulation で訓練させた Convolutional Neural Network (CNN) によって反跳電子飛跡を特定する。この解析方法により SPD は 662 keV で 59° (SMILE-2+では 100°) になり、PSF は 15° (SMILE-2+では 15°) に改善する。[10]

6 内部バックグラウンドの削減

内部バックグラウンドとは検出器内部の放射性物質が発する放射線が偶発的なトリガーをかけてしまうことに起因するバックグラウンドである。SMILE-2+で使用した検出器の内部バックグラウンドを測定

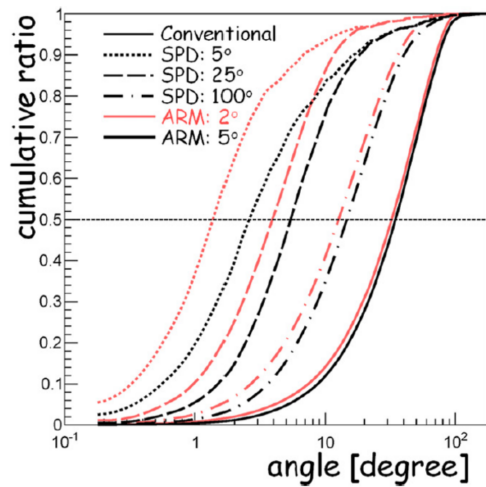


図 5: 様々 ARM、SPD に対する角度分解能

すると大気ガンマ線や宇宙線などの荷電粒子によるバックグラウンドより大きいことが分かった。これを削減することで有効データ数を増大させることができる。

高純度ゲルマニウム検出器を用いることで、GSO シンチレータには ^{238}U や ^{232}Th 、PMT の ^{40}K などが、PMT には PMT 中のガラスに含有している ^{40}K が放射性物質として存在していることが判明した。

SMILE-3 では PMT の代わりに MPPC を使用すること、より不純物の少ない GSO シンチレータを選別することで内部バックグラウンドの発生を削減する。[12]

7 まとめ

SMILE-3 では TPC を充填するガスに CF_4 (3 気圧) を用いて有効面積を 10 cm^2 (300 keV) にする。トリガーのかけ方を変更することで不感時間を 10 % (600 kHz) にする。PMT から MPPC に変更することでエネルギー分解能を 8 % (662 keV) にする。エネルギー分解能の向上と CNN を用いた SPD の向上で PSF を向上させる。PMT を MPPC に変更することと GSO シンチレータのうち不純物の少ないも

のを選択することで内部バックグラウンドを減少させる。[12]

参考文献

- [1] [1] A.Ochi et al. 2001, NIM A
- [2] [2] F. Sauli 1996, NIM A
- [3] [3] A.Takada et al. 2022, The Astrophysical Journal
- [4] [4] M Abe et al 2020 J. Phys
- [5] [5] K.Kobayashi 2023, 京都大学修士論文
- [6] [6] K.Tahara 2023, 京都大学修士論文
- [7] [7] M.Saito 2019, 京都大学修士論文
- [8] [8] M.Tsuda 2022, 京都大学修士論文
- [9] [9] Y.Nakamasu 2018, 京都大学修士論文
- [10] [10] T.Ikeda et al. 2021, PEPT
- [11] [11] T. Tanimori, et al. 2015, ApJ
- [12] [12] T.Ikeda et al. 2023, PRD submitted