

SMILE-II+ MeV ガンマ線望遠鏡 性能評価

竹村泰斗、谷森達、高田淳史、水村好貴、古村翔太郎、岸本哲朗、吉川慶、中村優太、
谷口幹幸、小野坂健、齋藤要、水本哲矢、園田真也、窪秀利、黒澤俊介^{A,B}、
身内賢太郎^C、澤野達哉^D、濱口健二^{E,F}
京大理, A:東北大 NICHe, B:山形大理, C:神戸大理, D:金沢大数物
E:メリーランド大学, F:CRESST NASA/GSFC

1. SMILE-II+ MeV ガンマ線望遠鏡の構築

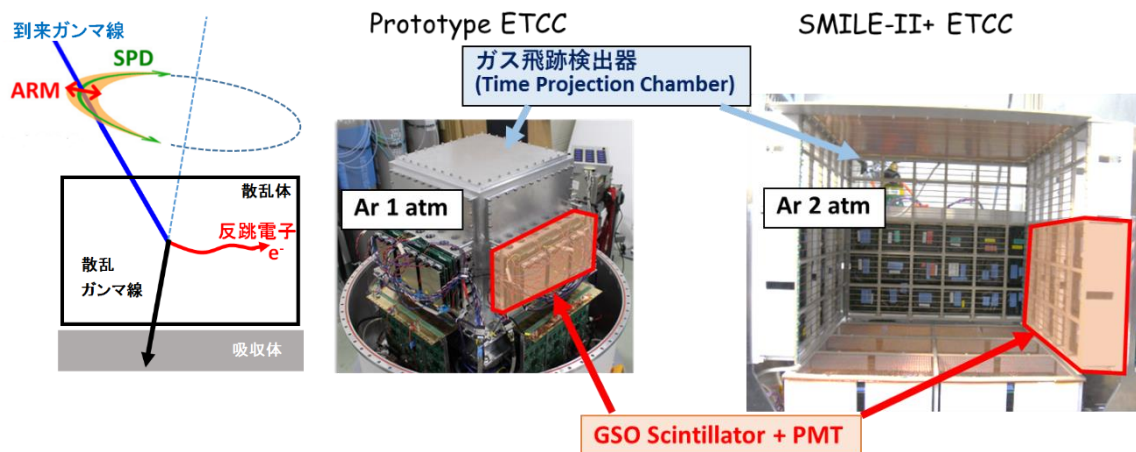


図 1 ETCC 概念図(左)、Prototype ETCC(中央)、SMILE-II+ ETCC(右)実物写真

MeV ガンマ線天文学はイメージングの技術的困難さと膨大な雑音ゆえに発展が遅れている未開拓な帯域である。この現状を打破すべく我々はイメージングと雑音除去に優れた MeV ガンマ線望遠鏡、ガス ETCC(Electron-Tracking Compton Camera)[1][2]の開発を進めている。我々の ETCC はガス飛跡検出器とその周りのシンチレータ検出器で構成されている。到来ガンマ線がガス検出器内でコンプトン散乱を起こし、散乱ガンマ線がシンチレータ検出器に吸収されたイベントを測定する。ガス検出器で反跳電子の散乱方向、エネルギーをガス検出器で取得し、シンチレータ検出器で散乱ガンマ線の吸収点とエネルギーを取得する。これらにより、図 1 左に示すように、ガンマ線の到来方向を 2 つの角度分解能 (ARM:検出器のエネルギー分解能に依存,SPD:電子の反跳方向取得精度に依存)により一意に決定する。散乱体にガス検出器を使用することにより、反跳電子の方向をより正確に取得し、SPD を制限でき MeV ガンマ線望遠鏡として優れた角度分解能を得る。

またガス検出器を用いることで、飛跡長・エネルギー損失から粒子識別や、電子の反跳角がコンプトン運動学と一致したイベントを抽出することによる偶然同時事象の削減、などの雑音除去能力を有しており、ガス ETCC は雑音に強い望遠鏡である。

SMILE-2+気球実験[3][4]においては ETCC の天体撮像能力の実証を主な目的とし、かに星雲と銀河中心を 5σ 以上の有意度で観測する。4 月のオーストラリアの 1 day のフライトにおいて、有効面積 $2.8 \text{ cm}^2 @ 511 \text{ keV}$, $2.0 \text{ cm}^2 @ 1 \text{ MeV}$, 角度分解能 HPR (Half Power Radius) $10 \text{ deg} @ 662 \text{ keV}$ が要求される。

この要求を満たすべく SMILE-2+ ETCC に三つの大きな改良を加えた。①シンチレータ検出器をガス容器内に配置。②ガス検出器のガス気圧を 2 atm に変更。③底面シンチレータの増強。①により、ガス検出器領域内に収まらない高エネルギー電子は、その後シンチレータに吸収される。ガス検出器とシンチレータを両方使うことで、電子のエネルギーを得ることができる。これにより、 500 keV 以上のガンマ線における有効面積が大きく向上する。また、電子は高エネルギーであるほど多重散乱の影響を受けないため、より正確に電子の反跳方向を取得、SPD が向上する。SMILE-2+ ETCC では 662 keV において SPD を 50 deg と予想される。また、ガス検出器とシンチレータ間の距離が近づいたことから、シンチレータ検出器間の隙間は減少し、有効面積を向上させる。②ガスの気圧を 1 atm から 2 atm に上げることで、散乱体の物質が増加し、有効面積が 2 倍となる。③底面部のシンチレータを 1 R.L. から 2 R.L. に増強することで高エネルギー散乱ガンマの検出確率を増加、 1 MeV においては約 1.6 倍増加。

以上の改良により SMILE-2+ ETCC の有効面積は $\sim 3 \text{ cm}^2 @ 511 \text{ keV}$, $\sim 2.1 \text{ cm}^2 @ 1 \text{ MeV}$, HPR は $10 \text{ deg} @ 662 \text{ keV}$ と要求値を満たす値であることがシミュレーションにより示された(図 2)。

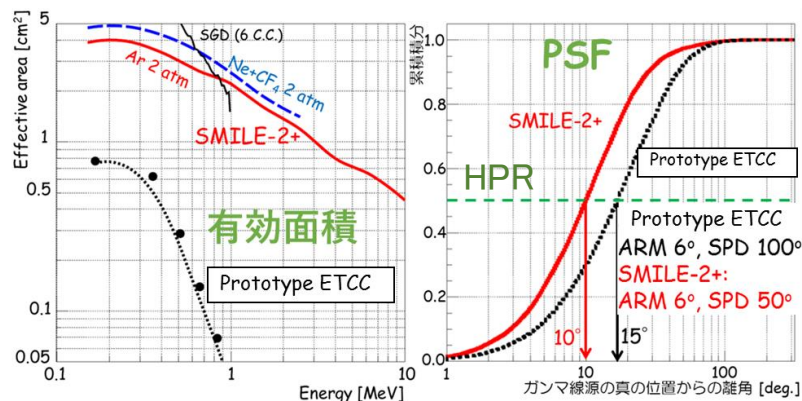


図 2 SMILE ETCC の有効面積と PSF

2. MeV ガンマ線望遠鏡動作確認

改良①、②を加えた SMILE-2+ ETCC にて、ガンマ線を測定し、動作に問題がないかの試験を行った。図 3 に SMILE-2+ ETCC におけるシンチレータ検出器とガス検出器のスペクトルを示した。SMILE-II+において観測するエネルギー幅は $300 \text{ keV} \sim 1400 \text{ keV}$ のガンマ線であることからシンチレータ検出器のダイナミックレンジを 150 keV 以上に調整した。

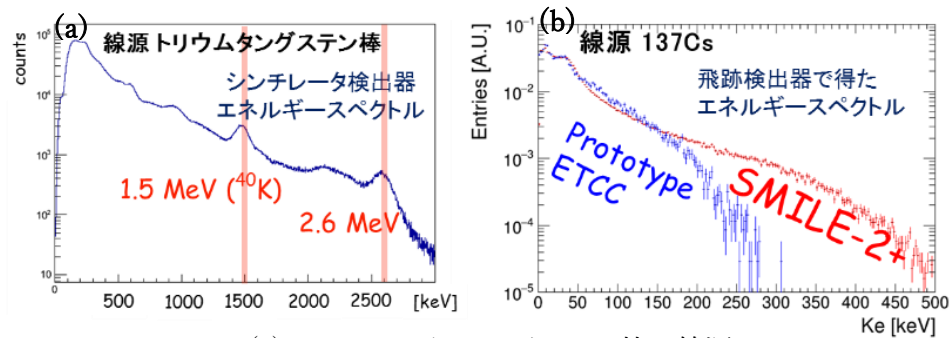


図 3 SMILE-2+ ETCC (a)トリウム入りタングステン棒を線源としたシンチレータ検出器スペクトル (b)137Cs 線源におけるガス検出器スペクトル

ガス検出器は 2 気圧化したことによる検出エネルギーの拡大が確認できた。このスペクトルにおいて高エネルギー電子がシンチレータに吸収された際のイベントは含んでおらず、その解析は現在作成中である。図 4 はトリウム由来の 2.6 MeV がコンプトン散乱し、高エネルギー電子が生じシンチレータにて吸収されたと考えられるイベントである。電子の反跳方向と散乱ガンマ線の角度 α は幾何学的に求めた $\alpha_{geo}(\cos(\alpha_{geo}) = -0.044)$ とコンプトン運動学から計算する $\alpha_{kin}(\cos(\alpha_{kin}) = -0.044)$ の値は一致していることから、先に述べた通りのイベントである可能性が非常に高い。SMILE-2+ ETCC 実機にて高エネルギー電子イベントの検出に成功した。

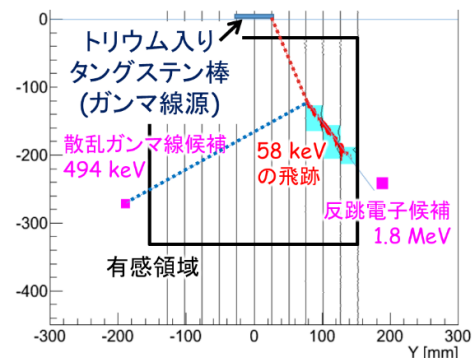


図 4 高エネルギー電子イベント図

137Cs 線源を ETCC にて測定した結果を図 5 に示す。散乱ガンマ線と反跳電子のエネルギー相関を示したものが(a)であり、合計エネルギー662 keV の領域にイベントが集中していることが見てわかる。(b)はコンプトン散乱角の相関 (c)天頂角 20 度に線源を配置したときの撮像図である。これらにより、SMILE-2+ ETCC がコンプトン散乱事象を検出し、撮像ができていることを確認できた。

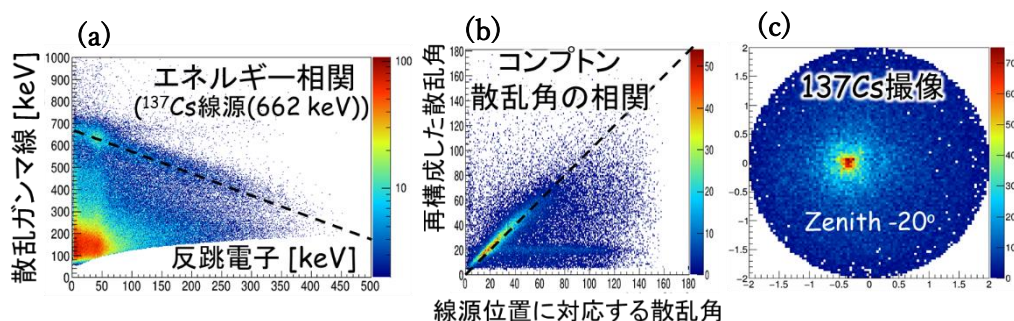


図 5 SMILE-2+ ETCC 137Cs 測定(a) 散乱ガンマ線と反跳電子のエネルギー相関 (b) コンプトン散乱角の相関 (c)天頂角 20 度位置における撮像

3. ガス純化システムとその効果

SMILE-2+ ETCC が Prototype ETCC と大きく異なる点はガス容器内に大量の物質が存在することである。新たな物質由来のアウトガスの影響により、Prototype ETCC と比べ早くガスが劣化する。実機において Prototype ETCC が約 2 週間使用可能なガス状態であったのに対して、SMIE-2+ ETCC では約 3 日で使用困難となるほどガスが劣化した。この対策として、我々はアウトガスの主成分である水の吸着剤ゼオラムと循環ポンプを用いたガス純化システムを導入した。図 6 はガス劣化とその純化の様子を示した図である。3 日ごとに 7 時間循環ポンプを動作させ、ガス浄化を行った。これによりガス検出器内の荷電粒子のドリフト速度とゲイン値がともに回復しており、合計 20 日以上ガス交換なく連続動作が可能であることを実証した。

以上の結果からフライト直前に浄化システムを動作すれば、1 day のフライトにおいてガス検出器が要求するガス状態を保ったまま観測可能であることが実証された。

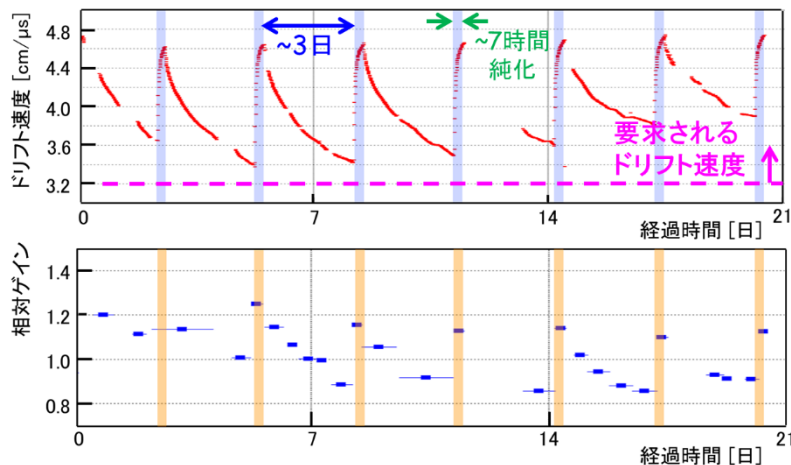


図 6 SMILE-2+ ETCC におけるガス状態（ドリフト速度、ガスゲイン）

4. 今後の予定

現在、SMILE-2+ ETCC は全ての改良を加え、性能評価のためデータ取得中である。高エネルギー電子イベントの解析を作成し、11 月と 12 月上旬において各エネルギー、天頂角・方位角ごとにデータを取得し、有効面積と HPR の実測値を導出する。12 月初めから梱包を進め、中旬に港に輸送する。

参考文献

- [1] T. Tanimori, et al., ApJ, 810(1), (2015) p. 28.
- [2] T. Tanimori, et al., Scientific Reports, 7, (2017) p. 41511.
- [3] 高田淳史, 他, 平成 29 年度大気球シンポジウム, isas17-sbs-024
- [4] 吉川慶, 他, 平成 29 年度大気球シンポジウム, isas17-sbs-025