

MeV ガンマ線観測実験 SMILE-3 に向けた 高角度分解能を目指した装置開発

津田雅弥、谷森達、高田淳史、水村好貴^A、池田智法、吉川慶、竹村泰斗、
中村優太、小野坂健、齋藤要、阿部光、荻尾真吾、吉田 有良、
窪秀利、黒澤俊介^B、身内賢太郎^C、澤野達哉^D、濱口健二^E
京大理、A:JAXA、B:東北大、C:神戸大、D:金沢大、E:メリーランド大

1 MeV ガンマ線天文学

数百 keV から数十 MeV までの MeV ガンマ線領域は励起原子核からの脱励起線を観測できる帯域であり、元素合成の様子や合成された元素の拡散の様子を観測することができる。また、活動銀河核での粒子加速や最遠方のガンマ線バースト観測など非常に重要な領域である。しかし、MeV 領域はコンプトン散乱優位のエネルギー帯であり、また検出器と宇宙線が相互作用することで MeV 程度のエネルギーを持った大量のバックグラウンドを生成するため、観測が難しい。1991 年にはコンプトン法を用いた MeV ガンマ線望遠鏡の COMPTEL を搭載した CGRO 衛星が打ち上げられたが、LAT/*Fermi* 衛星が 30~100 MeV の帯域での 8 年の観測で 200 天体程度を発見している [2] のに対し、COMPTEL が発見した定常天体の数は 10 年の観測で 30 個程度にとどまった [1]。MeV 観測技術が向上すれば、未発見の天体や未解明の物理を数多く観測することができる。我々は MeV ガンマ線領域の観測を進めるため、ETCC(Electron-Tracking Compton Camera) の開発を行っている。ETCC はコンプトン散乱を用いた検出器であり、反跳電子の飛跡とエネルギーを得るためのガス飛跡検出器 TPC と散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点を求めるためのピクセルシンチレーション検出器を組み合わせている。従来の観測手法と異なり、ETCC では 1 イベント毎にコンプトン散乱を再構成し、入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を求めることができる。また、電子飛跡による粒子識別やコンプトン運動学によるカットなど高いバックグラウンド除去能力を持つ。

我々は ETCC を用いた科学観測を行うために SMILE(Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment) 計画を進めている。次期計画の SMILE-3 では長時間の気球観測を行い、様々な天体を観測する。最終的には人工衛星に ETCC を搭載しての全天観測を行い、 ~ 1 mCrab の感度を目指す。本報告では SMILE-3 の要素開発について述べる。

2 SMILE-3 に向けた装置開発

SMILE-3 にむけて現在 SMILE-2+ の有効面積 5 倍以上、角度分解能 2~3 倍を目標に装置開発を行っている。SMILE-2+ での ETCC はガス飛跡検出器として μ -PIC を用いた TPC と GSO シンチレータアレイと PMT を組み合わせたシンチレーション検出器から成る。本報告では μ -PIC の改良とシンチレーション検出器の光検出器部分の変更について述べる。

2.1 三軸 μ -PIC

μ -PIC は比例計数管の輪切り構造をした二次元ガスイメージング検出器である。特徴としてはピクセル間隔が 400 μm 、単体でも max \sim 15000 という高い増幅率や RMS \sim 120 μm という高い位置分解能を持ち、1 か月を超える安定動作が可能 (@ゲイン 6000) である [4][5]。SMILE-2+ では電力の削減のためアノードとカソードをストリップ毎に読み出している。そのため再構成される荷電粒子の飛跡の形が長方形になり、三次元飛跡に偽の像を生成し、真の飛跡の決定に大きな不定性を残す。この問題を解決するために現在の μ -PIC に

もう1軸を追加した三軸 μ -PIC を作成した。もう1軸追加することで、三次元飛跡の不定性がある程度解くことが可能になり、電子の反跳方向の決定精度の向上が期待できる。大日本印刷との共同研究で作成した三軸 μ -PIC を図1に示す。三軸 μ -PIC は最密充填なピクセル配置をしており、各軸のなす角は 120° になっている。実際に三軸 μ -PIC で取得したエネルギースペクトルを図2に示す。図2のように電荷積分により3軸全てで ^{55}Fe 線源を置いた時のスペクトルを確認することができた。電荷比としては anode : cathode 上 : cathode 下 $\approx 3 : 2 : 1$ になっていた。また、全面でエネルギー分解能は 20.6 % (FWHM) を達成した。次に図3にゲインカーブとゲインの位置依存性を示す。ゲインに関しては3軸化以外は同じ構造をしているため、TGV μ -PIC (ガラス基板を用いた μ -PIC) [6] と同程度のゲインを達成。また、ゲインの最大値はひとまず 1.4×10^4 までは確認することができた。ガス利得の場所依存性についても小さく抑えることができてい ($\sigma/\text{mean} = 0.6\%$)。さらに図4に示すように三軸全てのコインシデンスを取り、X線透過画像を得ることも成功した。最後に TPC として動かした際の三軸 μ -PIC で取得した電子飛跡の例を図5に示す。三軸 μ -PIC でも二軸 μ -PIC と同程度のゲインやエネルギー分解能を達成し、飛跡も取得できた。三軸 μ -PIC の開発は順調に進んでいる。

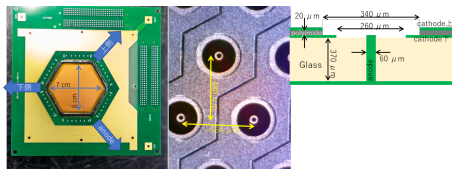


図1 開発した三軸 μ -PIC の写真。
大日本印刷との共同研究により開発。

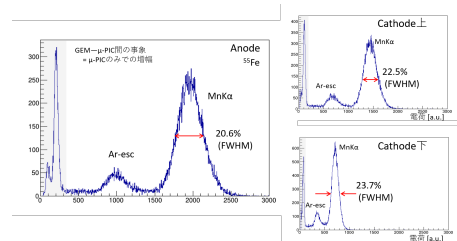


図2 三軸 μ -PIC で取得したエネルギースペクトル。左側が anode、右上が上 cathode、右下が下 cathode。

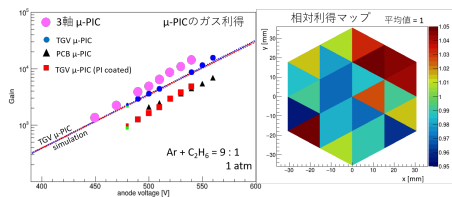


図3 三軸 μ -PIC の gain curve (左) と gain map (右)

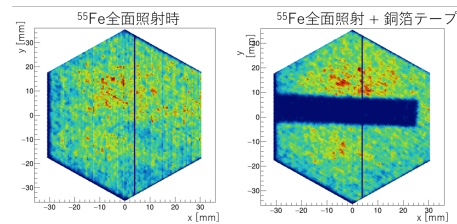


図4 三軸 μ -PIC で取得した X 線透過画像。左側が ^{55}Fe 線源を置き、 μ -PIC 全面に照射した時。右側が銅箔テープを貼った μ -PIC に ^{55}Fe 線源を置き、全面に照射した時。

2.2 PMT から MPPC へ

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) とは浜松フォトニクス社によって開発された半導体検出器である。増幅率が $10^5 \sim 10^6$ と高く、動作電圧は MPPC (S14161-3050HS-08、浜松フォトニクス社) で 40 V と低い。また、温度依存性がある。SMILE-2+ で使用していた PMT は動作電圧が 1000 V 程度と高く、価格も MPPC

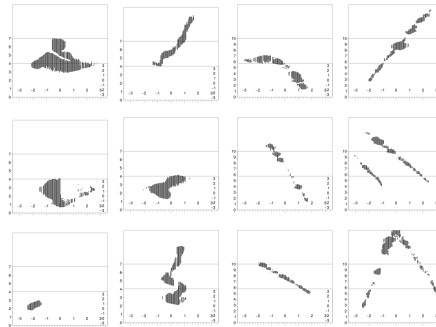


図5 TPCとして動かした三軸 μ -PICで取得した電子飛跡の例。線源は ^{133}Ba を用いている。図は三軸のコインシデンスを取ったもので、各軸単位は cm である。

のほうが安価である。量子効率に関しても現在採用している GSO シンチレータの発光波長 440 nm では PMT(H8500C、浜松フォトニクス社)~20%、MPPCは(S14161-3050HS-08、浜松フォトニクス社)~50%。特に気球実験である SMILE-3 では PMT より重量が軽く、サイズもコンパクトな上、動作電圧が低く、消費電力が抑えられるメリットがある。以上のことから SMILE-3 では PMT の代わりに MPPC を用いることを検討している。

MPPC の読み出し回路として MPPC の Head Amp Board を作製した(図6)。MPPC の HA は MPPC 基板、amp 基板、ADC 基板、FPGA 基板からなり、HA のみでデータ取得が可能になっている。MPPC は浜松フォトニクス社の S14161-3050HS-08 を使用している。SMILE-3 に向けて、MPPC 基板では MPPC に抵抗チェーンを設置し、4 端で読み出しをすることで、回路数や消費電圧を削減している [7]。amp 基板では high gain、low gain の二つの amp を搭載することで、ダイナミックレンジを拡大している。温度依存性の対策として HA に温度計を載せ、その値を用いて MPPC にかける電圧を調整することで対応する。

現在、トリガー方式に関しても変更を考えており、SMILE-2+ でのシンチレータの信号をトリガーにする方式から TPC の信号をトリガーにすることを考えている。シンチレータの hit rate は TPC より 2 桁多いため、従来の方法では不感時間が多くなってしまふ。そこで TPC トリガーにすることで不感時間を大きく減らすことが可能になる。このトリガー方式に対応するため、ADC 基板には従来の peak hold ADC ではなく、サンプリング ADC を使用することで、波形の情報を取得し、時間情報を取得可能になり、また複数の信号の切り分けが可能になる。このとき求められる性能はコンプトン散乱点の z 座標を μ -PIC の空間分解能と同程度の精度で求められる時間分解能である。散乱点の z 座標はドリフト速度とドリフト時間で求めるため、ドリフト速度を $4\text{ cm}/\mu\text{s}$ とすると、 μ -PIC の空間分解能 $400\ \mu\text{s}$ を得るには $\sim 10\ \text{ns}$ の時間分解能が必要になる。そのため時間分解能の調査を行っていく予定である。

実際に HA で取得した ^{137}Cs 線源を置いた時のスペクトルを図7、位置情報を図8に示す。GSO シンチレータは 8×8 のアレイ型で、1 ピクセルが $6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 13\text{mm}$ である。スペクトルに関しては ^{137}Cs の 662 keV のピークをエネルギー分解能 7~8% (FWHM) を達成した。PMT でのエネルギー分解能が $\sim 10\%$ 程度であるので、エネルギー分解能を改善することができた。また、位置情報についても図8に示したように 8×8 のピクセルを区別することができている。PMT から MPPC に変更することで、エネルギー分解能が良くなり、位置情報も正確に得ることができていることが分かった。これからは先ほどの時間分解能の調査や温度依存性の調査、ETCC としての動作試験を行っていく。

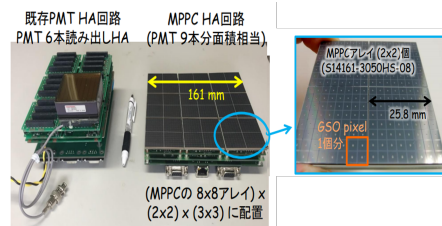


図6 MPPC の head amp board。比較のため、PMT の head amp も載せている

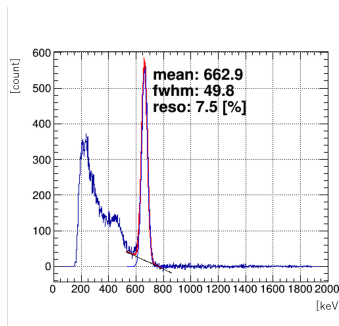


図7 MPPCHA で取得した ^{137}Cs 線源を置いた時のスペクトル

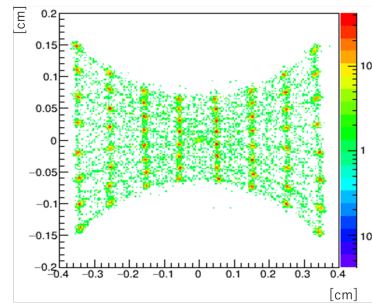


図8 MPPCHA で取得した ^{137}Cs 線源を置いた時の位置情報図 (バタフライ図)

3 まとめと今後

長時間気球を用いた科学観測を行う次期計画の SMILE-3 に向けて、SMILE-2+ での検出器の有効面積>5倍、角度分解能 2~3 倍を目標にしている。目標を達成するための取り組みとして、三軸 μ -PIC の開発やシンチレーション検出器の PMT から MPPC の変更を行っている。三軸 μ -PIC の開発では、3 軸全てで ^{55}Fe 線源を置いた時の信号を確認し、エネルギー分解能 20.6 % (5.9 keV, FWHM, 全面) を達成した。また、ゲインカーブや X 線透過画像の作成を行い、TPC として動作させたときの飛跡も確認した。今後は SMILE-2+ での Ar ベースの二気圧のガスを CF_4 ベースの三気圧の気体へ変更し、電子密度を上げ、コンプトン散乱の確率を上げることを考えている。MPPC の使用については、読み出し回路を作製し、エネルギー分解能を 7~8 % (FWHM) を達成した。今後は時間分解能、温度依存性の調査を行い、ETCC としての動作確認を行っていく。

参考文献

- [1] V. Schönfelder, et al., A&AS, 143 (2000) 145-179
- [2] G. Principe, et al., A&A, 618 (2018) A22
- [3] A. Takada, et al., ApJ 733 (2011) 13
- [4] K. Miuchi, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. (2003) 50 825-830
- [5] K. Miuchi, et al., Nucl. Instr. and Meth. A (2004) 535 236-241
- [6] M. Abe, et al., J. Phys. Conf. Ser. (2020) 1498
- [7] H. Sekiya, et al., Nucl. Instr. and Meth. A (2006) 563 49