

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14057

研究課題名（和文）MeVガンマ線天文学を切り拓く超高感度MeVガンマ線カメラの開発

研究課題名（英文）Development of the high-sensitivity MeV gamma-ray camera for opening the MeV gamma-ray astronomy

研究代表者

池田 智法（Ikeda, Tomonori）

京都大学・理学研究科・特別研究員（PD）

研究者番号：90898454

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：電子飛跡検出型コンプトンカメラETCCでは、ガンマ線に対する有効面積が小さいという問題がある。コンプトン散乱断面積の大きなガスであるCF₄ガスの高気圧環境下で飛跡検出器を運用することでこれを解決できる。そこで、独自に開発してきたガスイメージング検出器「3電極型u-PIC」とCF₄ガスを用いた試験を行なった。結果、Ne:CF₄=1:1の1気圧環境下でも要請ガス利得が得られることが確認された。さらに、3電極型u-PICの電極構造を活かした電圧供給をしたところ、3倍程度ガス利得が向上した。ETCCを構築し、662keVの点源分解能を評価したところ、21.5度が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙MeVガンマ線観測は元素起源と暗黒物質の解明にアクセス可能な重要な観測領域である。しかし、MeVガンマ線観測は他のエネルギー帯域と比べて非常に遅れており、COMPTEL実験の観測から20年もの間、感度が向上していない。これを解決するためには、コンプトン散乱事象の全ての情報を取得可能な、電子飛跡検出型コンプトンカメラETCCが有用である。本研究成果は、ETCCでも有効面積を拡大することができることを実験的に示した。また、新型の3電極型u-PICによって、さらに高性能な宇宙MeVガンマ線望遠鏡が開発できる指針を与える重要な結果となっている。

研究成果の概要（英文）：In the electron tracking Compton-camera (ETCC), there is an issue with the small effective area for gamma rays. We can overcome this issue by using CF₄ gas, which has a huge Compton scattering cross-section, in a high-pressure environment for the tracking detector. Therefore, we performed some tests using our specially developed gas imaging detector called the "three-electrode u-PIC" with CF₄ gas. We found that even at 1 atm with Ne:CF₄ = 1:1, we could get enough gas gain. Also, by applying voltage using the three-electrode u-PIC's electrode structure, the gas gain increased by about three times. Finally, we constructed the ETCC and evaluated the point spread function (PSF) of the 662 keV. The PSF was 21.5 degrees.

研究分野：宇宙素粒子物理学実験

キーワード：暗黒物質 ガンマ線 ガス検出器 コンプトンカメラ

1. 研究開始当初の背景

宇宙物質の理解には元素起源と暗黒物質(DM)の解明が必要であり、宇宙 MeV ガンマ線観測はその両方にアクセス可能な重要な観測窓となっている。例えば、超新星爆発や中性子連星合体のような元素合成天体は MeV ガンマ線輝線を放出することから、元素合成の現場を直接観測することができる。また、DM の有力候補である WIMP-DM からの対消滅線観測から、直接探査実験では難しい MeV 質量の軽い暗黒物質間接探査が可能である。しかし、残念ながら現在の宇宙 MeV ガンマ線観測は COMPTEL 実験の観測以来 20 年もの間停滞している。これは MeV ガンマ線と物質の主な反応がコンプトン散乱であり、従来型 MeV ガンマ線コンプトンカメラは反跳電子の方向を取得できないためコンプトン運動方程式が完全に解けず、ガンマ線の方向を一意に決定できなかったからである。

この問題を解決する新たな観測手法として、反跳電子の方向情報をガス飛跡検出器によって捉え、コンプトン運動学の全てのパラメータを取得し、入射ガンマ線方向を一意に決定できる「電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)」が開発されてきた。ETCC では低エネルギー電子の散乱方向情報を得るために、詳細な飛跡を記録可能なガス飛跡検出器が用いられている。しかし、これはコンプトン散乱体としての役割も担っているため、有効面積が小さいということが弱点である。そこで、独自に開発してきた「3 電極型 μ -PIC」を用いて高圧 CF_4 ガス充填式飛跡検出器を実現して、この弱点を克服する。

2. 研究の目的

これまで、ガス飛跡検出器には希ガス系、特にアルゴンガスをベースにした混合ガスが使用されてきた。しかし、本研究ではコンプトン散乱体としての役割を重視し、電子数の多い CF_4 ガスを採用する。 CF_4 ガスはクエンチングガスとしては実績のあるガスである。ここで問題となるのが放電であり、そのため CF_4 ガスの高気圧下での使用はこれまで不可能であった。ガス飛跡検出器 μ -PIC は、その電極間に大きな電位差、つまりは強電場を作ることでガス増幅(ガス利得)を得る。一般的に高圧ガス環境下ではより強い電場が必要とされているため、高気圧下での運用では、より高い電圧を電極に与えることになる。しかし、電極と基板とガスが 1 点で交わる 3 重点に電場が集中し、フィールドエミッションを起こして放電が発生しやすくなる。これを解決するために、本研究では 3 電極型 μ -PIC を使用する。これは μ -PIC の上にもう一層電極を形成した構造となっている。この 3 層目に比較的小さな電位差をつけることで電極間により電場が集中し、より効率的にガス増幅が起こるのである。さらに、シミュレーションでは 3 重点の電場集中度が小さくなることが確認された。その上、従来型 μ -PIC に比べて基板が厚いため、カソード電極からはアノード電位が見えにくくなっており、アノード近傍により電場が集中する構造になっている。これは低電圧でも高い利得を得られることを意味している。この 2 つの利点を合わせることで、3 気圧下でも高利得・安定動作が期待できる。

3. 研究の方法

まずは 3 電極型 μ -PIC での試験の前に、従来型 μ -PIC とガラス基板を用いた TGV- μ -PIC の基礎特性試験を行なった。TGV- μ -PIC は基板が従来型に比べて厚く、さらに絶縁体としてガラスを用いているため、高電圧化でも放電しにくいと期待できる。3 気圧耐圧容器を製作し、ドリフト距離 1cm を持った従来型 μ -PIC と TGV- μ -PIC、そのそれぞれの上に GEM(Gas electron multiplier)を設置し、ガスを封入した(図 1 左)。ガス利得を評価するために、 ^{55}Fe 線源を用いた。 CF_4 ガス単体ではガス利得が不足することが予想されたため、 $\text{Ne}:\text{CF}_4=1:1$ のガスを使用し、さらにアルゴンを少量添加することでペニング効果を引き起こし、ガス利得を最大にさせる添加量を調査した。その後、3 電極型 μ -PIC を用いた特性評価試験を行なった(図 1 中央)。3 電極型の試験では ETCC としての性能も評価するため、全てのストリップからの信号を読み出し可能な真空容器と読み出しエレクトロニクスを用いた(図 1 右)。吸収体には 48mm × 48mm

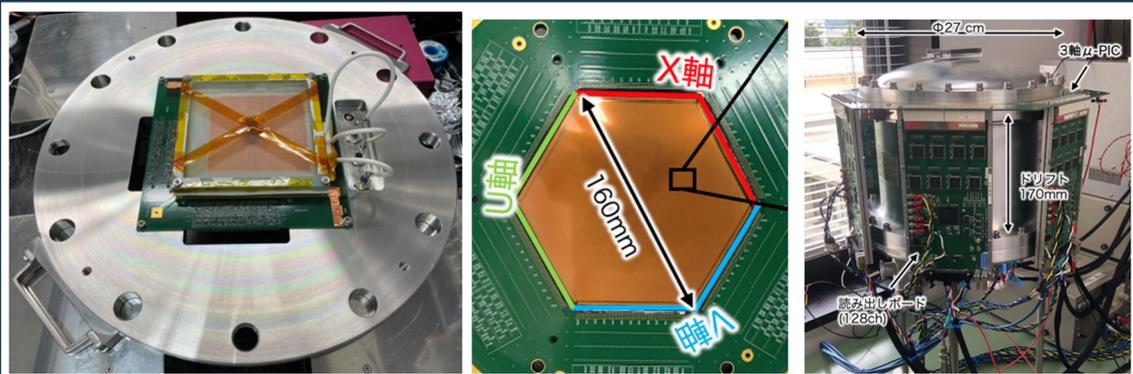


図 1: (左)本研究で使用した 3 気圧対応の真空容器写真。従来型 μ -PIC とその上に GEM、さらに線源が設置されている。(中央)3 電極型 μ -PIC の写真。(右)3 電極型 μ -PIC の試験で用いた真空容器と読み出し装置。ドリフト距離は 17cm になる。

$\times 13\text{mm}$ の GSO シンチレータアレイを 9 つ用意し、MPPC 光検出器によって信号読み出しを行なった。

4 . 研究成果

アルゴンを添加したペニング効果の試験では $\text{Ar}/(\text{Ne}+\text{Ar})$ の比率で 0.5% の時、ガス増幅を最大にさせることが確認された。この結果を用いて、従来型 μ -PIC で $\text{Ne}:\text{Ar}=1:1$ の 1 気圧下でのガス利得を調べたところ、要求値を満たすガス利得を得ることができた(図 2 左)。しかし 2 気圧下では高電圧を供給すると、放電によってガス利得を得ることができなかつた。一方で、TGV- μ -PIC を用いた試験では、従来型 μ -PIC では供給できなかった高電圧 780V を供給することができ、要請ガス利得を上回ることが可能となった(図 2 左)。やはり、TGV- μ -PIC では陽極陰極間の厚さが厚く、さらに絶縁素材もガラスになっていることが大きな要因であると思われる。

続いて、3 電極型 μ -PIC の $\text{Ne}:\text{CF}_4=1:1$ の 1 気圧下の試験でも、要請を満たす十分なガス利得が得られた(図 2 中央)。さらに、そのガス利得は従来型 μ -PIC よりも数十%大きいことが確認された。これは TGV- μ -PIC でも確認されており、絶縁体厚が厚いことに起因していると思われる。また、3 電極目に 90V の負の電圧を供給することで、ガス利得が 3 倍程度増加することが確認された。予想していた通り、電極間により電場が集中し、より効率的にガス増幅が起こることが原因であると思われる。

これらの結果から、3 電極型 μ -PIC でも電子飛跡を検出するための十分な性能が得られたため、ETCC を実際に構築し、基礎性能試験を行なった。コンプトン散乱角の決定精度(ARM)は 3.8 度を達成し、前気球実験で用いられた ETCC 検出器の精度の 2 倍以上に匹敵する。これは 3 電極 μ -PIC を用いたことにより、電子の位置決定精度が向上したことと、MPPC 読み出しによってシンチレータ検出器のエネルギー分解能が向上したことの 2 つが起因していると思われる。また、 ^{137}Cs 線源を用いて、662keV の点源分解能を評価したところ、21.5 度が得られた(図 2 右)。さらにこれを改善するために、3 電極 μ -PIC の位置決定精度の利点を活かすために、Geant4 シミュレーションを用いて電子飛跡をエミュレートし、機械学習を用いることで電子

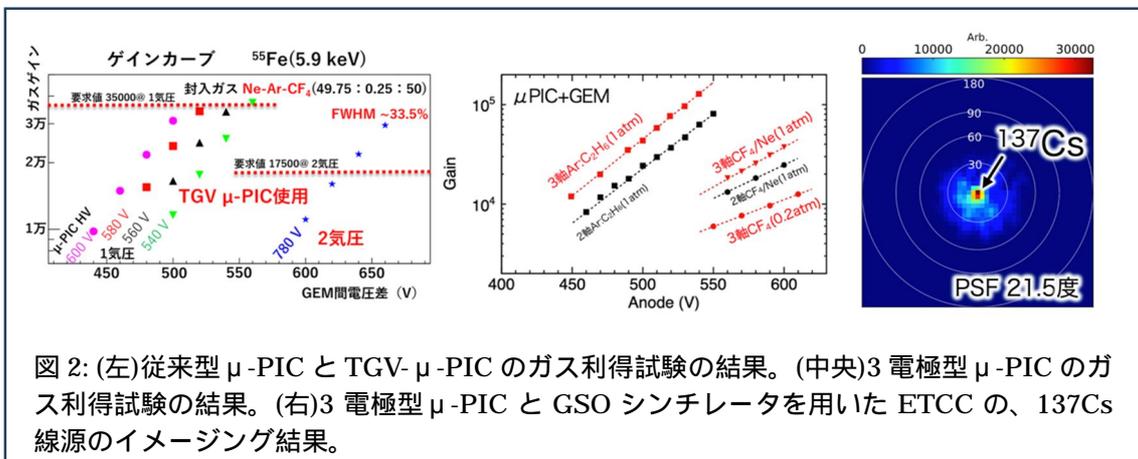


図 2: (左)従来型 μ -PIC と TGV- μ -PIC のガス利得試験の結果。(中央)3 電極型 μ -PIC のガス利得試験の結果。(右)3 電極型 μ -PIC と GSO シンチレータを用いた ETCC の、 ^{137}Cs 線源のイメージング結果。

飛跡の方向決定精度の向上を計った。結果、50keV のエネルギーを持った電子に対しても、約 30 度の角度分解能で決定できることが確認された。機械学習によってさらに点源分解能を向上することが期待される。以上から、本研究の目的である有効面積の拡大に向けた実験を完遂し、さらにその先の研究である ETCC の網羅的な評価に至るまで、若手研究としては十分な数多くの成果が得られたといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ikeda Tomonori, Takada Atsushi, Takemura Taito, Yoshikawa Kei, Nakamura Yuta, Onozaka Ken, Abe Mitsuru, Tanimori Toru, Mizumura Yoshitaka	4. 巻 108
2. 論文標題 Background contributions in the electron-tracking Compton camera aboard SMILE-2+	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123013
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.108.123013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 池田智法
2. 発表標題 SMILE69: SMILE-3に向けたETCC試験機の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2023年秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomonori Ikeda
2. 発表標題 Results of the SMILE-2+ balloon experiment
3. 学会等名 the 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------