

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20244026

研究課題名（和文） 広視野ガンマ線カメラを用いた気球実験による MeV 領域ガンマ線天体観測の開拓

研究課題名（英文） Development of Astronomical Observations in the MeV Gamma-ray Band Using a Balloon-borne Gamma-ray Camera with a Wide Field of View

研究代表者

窪 秀利 (KUBO HIDETOSHI)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：40300868

研究成果の概要（和文）：X線・ガンマ線領域で、天体観測が最も遅れている MeV ガンマ線を開拓すべく、ガンマ線が検出器中でコンプトン散乱した際の反跳電子の3次元飛跡を測定するという、新しい検出原理に基づいた、高感度広視野のコンプトン散乱型ガンマ線カメラを完成させた。このカメラは、ガスを用いた3次元飛跡検出器とピクセル型シンチレータを用いたガンマ線検出器から構成され、気球に搭載するため、小型省電力読み出し回路を開発した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a Compton gamma-ray camera with a wide field of view and high sensitivity to develop the MeV gamma-ray band where astronomical observations lag behind the most in the X-ray to gamma-ray band. The camera is based on a new method of detecting the three dimensional track of an electron Compton-recoiled in a detector where a gamma-ray is Compton-scattered. The camera consists of a three dimensional tracker using a gas chamber and a gamma-ray camera with a pixelated scintillator. In addition, we have developed a compact readout system with low power consumption for a balloon flight.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	14,700,000	4,410,000	19,110,000
2009年度	11,900,000	3,570,000	15,470,000
2010年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
総計	35,300,000	10,590,000	45,890,000

研究分野：天体物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：天体観測、ガンマ線、コンプトンカメラ、気球実験

1. 研究開始当初の背景

1960年代に始まったX線天文学に続き、90年代に入り、GeV・TeVガンマ線天文学が飛躍的な進歩を遂げた。CGRO衛星EGRETの全天サーベイにより約270個のGeVガンマ線天体が発見され、続いて、地上望遠鏡によるTeVガンマ線検出天体は70個を越えた。GeV・TeVガンマ線領域は、硬X線領域と同

等の感度を達成しているが、1～30MeVのガンマ線領域は、2000年に観測終了したCGRO衛星COMPTELの全天サーベイがあるのみで、他の領域より1桁以上悪い感度となっており、衛星計画がない。実際、多くの天体の検出が期待されながら、定常的放射天体は未だ30個程度が発見されたのみである。MeVガンマ線は、電磁波天文学では数少ない

未開拓領域であるが、この領域は、超新星の元素合成(核ガンマ線放射)、ブラックホール近傍の直接観測(π^0 の崩壊)、降着円盤、活動銀河核ジェット、パルサー、ガンマ線バースト、銀河面拡散放射、ガンマ線背景放射、銀河のバリオン量の測定、太陽フレア、さらには原始ブラックホール探査など、宇宙物理から、素粒子、宇宙論にまたがる重要な問題が多い領域である。これらの問題を解明すべく、高感度のMeVガンマ線観測を実現するには、広視野でガンマ線の到来方向が数度の精度で測定でき、バックグラウンド除去能力の高いイメージング装置による全天サーベイが必要である。

COMPTELのような従来の観測装置は、コンプトン散乱が起きた場所と反跳電子のエネルギー、散乱ガンマ線の方向とエネルギーしか測定しないために、入射ガンマ線の到来方向が円錐上にしか求まらない。そのため、宇宙線が検出器と衝突して作るバックグラウンドの除去が難しく、結果的に、打上げ前に予想された感度よりも1桁悪い感度しか達成できないことが打上げ後に判明した。そこで、我々は、平成18年度で終了した特定領域研究(計画研究)により、コンプトン散乱の反跳電子の飛跡を3次元測定し、この情報を加えることで、入射ガンマ線の到来方向を小さな円弧上に1事象毎に決定できる次世代コンプトン検出器の開発に成功し、イメージング能力が格段に向上したことを示した。さらに、我々が開発したカメラは、コンプトン散乱ガンマ線の検出立体角が大きく、広視野を持つことも示した。

2. 研究の目的

X線・ガンマ線領域で、天体観測が最も遅れているMeVガンマ線を開拓すべく、ガンマ線が検出器中でコンプトン散乱した際の反跳電子の3次元飛跡を測定するという、新しい検出原理に基づいた、高感度広視野のコンプトン散乱型ガンマ線カメラを用いた気球実験を推進し、将来的には、衛星搭載による全天サーベイを目指す。本研究で、コンプトン反跳電子の3次元飛跡を測定する、新しい検出法による30cm角カメラを完成させ、気球に搭載するためのシステムを組み上げる。

3. 研究の方法

コンプトン反跳電子の飛跡を検出する、10cm角ガンマ線カメラによる気球実験(2006年)での宇宙背景・大気ガンマ線測定の成功を踏まえて、本研究では、30cm角に大型化した飛跡検出型コンプトンガンマ線カメラ(図1)を完成させ、気球に搭載するシステムを完成させる。そのため、シンチレータ結晶検出器の拡張とガス検出器の拡張・容器軽量化および読み出し回路の省電力化、気球搭載シ

ステムの構築、環境試験を行う。

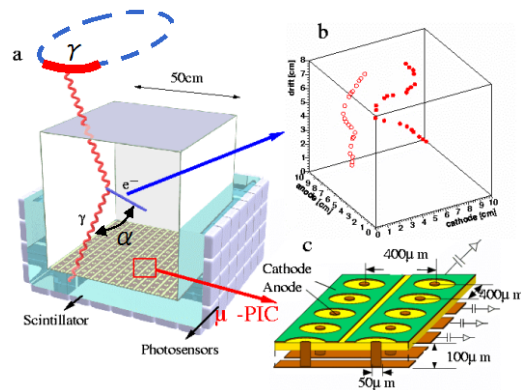


図1：(a) 本研究で開発した飛跡検出型コンプトンガンマ線カメラの構成図。(b) 実際に測定された電子の飛跡。(c) ガス検出器の構成図。

4. 研究成果

(1) コンプトン反跳電子の3次元飛跡を行う、ガスTime Projection Chamber (TPC)を開発した。その構成要素である、2次元読み出しを行う、我々独自開発の微細電極型ガス比例計数管(μ PIC)、ドリフトケージ、および、軽量かつガンマ線散乱・吸収率を抑えた耐圧容器を製作した。

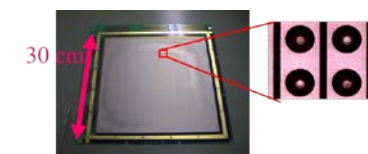
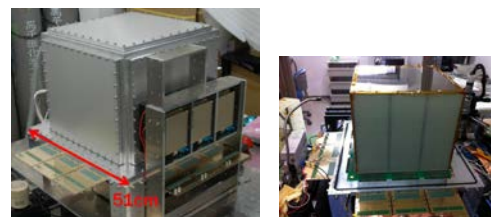


図2：開発したガスTime Projection Chamber。耐圧容器(左上)、ドリフトケージ(右上)、30cm角ガス比例計数管 μ PIC(下)。

(2) ガス検出器からの信号を省電力で読み出すために、高エネルギー加速器研究機構と

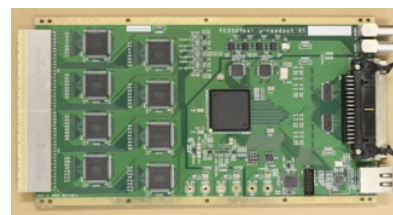


図3：独自に開発したASICを用い、小型省電力化したガス検出器読み出し回路。

共同開発した CMOS 型 ASIC をガス検出器に接続するための回路基板を製作し、ガス検出器からの信号を取得した。

- (3) ガス検出器に用いるガスの組成最適化を行い、アルゴンと CF_4 を用いることとした。
 (4) 気球実験では消費電力の制限が厳しいため、シンチレータ検出器に用いる光電子増倍管の読出し回路の省電力化を行った。



図 4：小型省電力化した光電子増倍管読出し回路。

- (5) 8×8 ch のマルチアノード型光電子増倍管に、GSO シンチレータ結晶 ($6 \times 6 \times 13 \text{ mm}^3$) の 8×8 アレイを取り付け、光電子増倍管読出し回路を接続し、ガス検出器中でコンプトン散乱したガンマ線の 2 次元入射位置とエネルギーを測定するシンチレータ検出器のユニットを量産した。

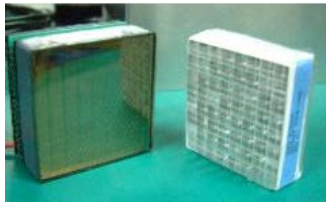


図 5： 8×8 ch のマルチアノード型光電子増倍管(左)と、開発した GSO シンチレータ結晶ピクセルアレイ(右)。

- (6) 上記のガス検出器とシンチレータ検出器を組み合わせ、30cm 角コンプトンカメラを完成させた。



図 6：開発した気球搭載型 30cm 角コンプトンガンマ線カメラ。

- (7) ガス検出器中の 3 次元飛跡を検出する回

路の位置演算法を改良し、飛跡点が増え、検出効率が一桁向上した。

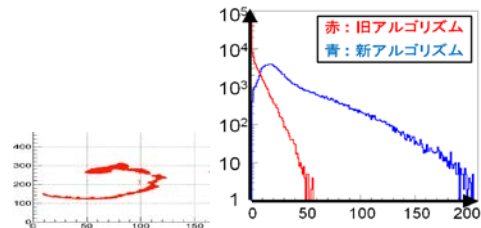


図 7：改良後の飛跡の例(左)と、飛跡点の数分布(右；位置演算法の改良前後)。

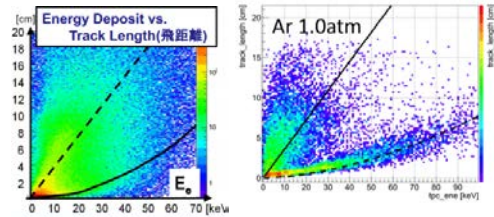


図 8：ガス検出器で測定されたエネルギーと飛跡長。改良前(左)と後(右)。

- (8) ガンマ線検出効率のシミュレーションを行い、測定値と一致していることを確認した。

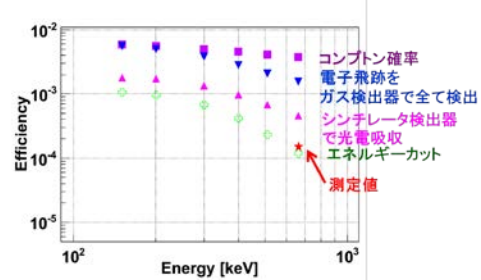


図 9：ガンマ線検出効率。測定値(赤)とシミュレーション値(赤色以外。緑色が、測定と同じイベント選別条件)。

- (9) 観測装置全体を耐圧容器に入れ、気球高度下での環境条件による試験を行い、検出器の動作を確認した。

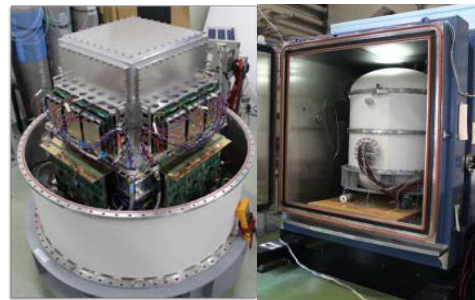


図 10：開発したガンマ線カメラの気球高度環境試験。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① Kazuki Ueno, Hidetoshi Kubo(9 番目), Toru Tanimori(19 番目), 他 16 名, "Development of the Balloon-Borne sub-MeV Gamma-ray Compton Camera Using an Electron-Tracking Gaseous TPC and a Scintillation Camera", *Journal of Instrumentation*, 査読有, 7, (2012) C01088, DOI:10.1088/1748-0221/7/01/C01088
- ② A. Takada, T. Tanimori(2 番目), H. Kubo(3 番目), 他 15 名, "Simulation Study for the Higher Sensitivity of an Electron-Tracking Compton Camera A. Takada at over 1 MeV", 2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 査読無, (2011) pp.1215-1221, DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/NSSMI> C.2011.6154605
- ③ T. Sawano, H. Kubo(7 番目), T. Tanimori(16 番目), 他 15 名, "SMILE: A Balloon-Borne sub-MeV/MeV Gamma-ray Compton Camera Using an Electron-Tracking Gaseous TPC and a Scintillation Camera", *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference*, 査読無, 9 (2011) pp.183-186
- ④ A. Takada, T. Tanimori(2 番目), H. Kubo(3 番目), 他 17 名, "SMILE-II: Observation of celestial and atmospheric MeV gamma-rays using a balloon-borne wide field of view electron tracking Compton camera", *Proceedings of the 20th Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, 査読無, 700 (2011) pp.567-571
- ⑤ Atsushi Takada, Hidetoshi Kubo(2 番目), Toru Tanimori(16 番目), 他 13 名, "Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Rays at Balloon Altitudes with an Electron-Tracking Compton Camera", *The Astrophysical Journal*, 査読有, 733 (2011) 13, DOI:10.1088/0004-637X/733/1/13
- ⑥ Michiaki Takahashi, Hidetoshi Kubo(6 番目), Toru Tanimori(14 番目), 他 13 名, "Development of an Electron Tracking Compton Camera using CF₄ gas at high pressure for improved detection efficiency", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 査読有, 628 (2011) pp.150-153, DOI:10.1016/j.nima.2010.06.305
- ⑦ Kazuki Ueno, Toru Tanimori(2 番目), Hidetoshi Kubo(3 番目), 他 14 名, "Development of the Tracking Compton/Pair-Creation Camera based on a Gaseous TPC and a Scintillation Camera", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 査読有, 628 (2011) pp.158-161, DOI:10.1016/j.nima.2010.06.307
- ⑧ S. Kurosawa, H. Kubo(2 番目), T. Tanimori(12 番目), 他 10 名, "Development of an 8 × 8 array of LaBr₃(Ce) scintillator pixels for a gaseous Compton gamma-ray camera", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 査読有, 623 (2010) pp.249-251, DOI:10.1016/j.nima.2010.02.211
- ⑨ Shunsuke Kurosawa, Hidetoshi Kubo(2 番目), Toru Tanimori(13 番目), 他 12 名, "Performance of 8 × 8 Pixel LaBr₃:Ce and Gd₂SiO₅:Ce Scintillator Arrays Coupled to a 64-channel Multi-anode PMT", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 査読有, 56 (2009) pp.3779-3788, DOI:10.1109/TNS.2009.2034657
- ⑩ Atsushi Takada, Hidetoshi Kubo(2 番目), Toru Tanimori(5 番目), 他 11 名, "The Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Rays with an Electron-Tracking Compton Camera Loaded on a Balloon", *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有, 78 (2009) Supplement A, pp.161-164, <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJS/78SA/161/pdf>
- ⑪ H. Kubo(1 番目), T. Tanimori(13 番目), 他 13 名, "Low-power wide-dynamic-range readout system for a 64-channel multi-anode PMT of a scintillation gamma camera", 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 査読無, (2008) pp.1181-1185, DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/NSSMIC.2008.4774613>
- ⑫ K. Ueno, H. Kubo(6 番目), T. Tanimori(13 番目), 他 12 名, "Compton imaging Camera using an Electron-Tracking gaseous TPC and a scintillation camera", 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 査読無, (2008) pp.3470 - 3474, DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/NSSMIC.2008.4775084>
- ⑬ K. Ueno, T. Tanimori(2 番目), H. Kubo(3

番目), 他 8 名, “Development of an electron-tracking Compton camera based on a gaseous TPC and a scintillation camera for a balloon-borne experiment”, SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation 2008 proceedings, 査読無, 7011 (2008) 70113A, DOI: 10.1117/12.789258

[学会発表] (計 19 件)

- ① T. Sawano, H. Kubo, “Improvement of an Electron-Tracking Compton Camera for Observation of the Crab Nebula at Balloon Altitudes”, 2011 IEEE NSS/MIC/RTSD, 2011 年 10 月 23 日~29 日, Valencia, Spain
- ② T. Sawano, H. Kubo, “SMILE: A Balloon-Borne sub-MeV/MeV Gamma-ray Compton Camera Using an Electron-Tracking Gaseous TPC and a Scintillation Camera”, 32nd International Cosmic Ray Conference, 2011 年 08 月 11 日~18 日, Beijing, China
- ③ A. Takada, H. Kubo, “SMILE-II: Observation of celestial and atmospheric MeV gamma-rays using a balloon-borne wide field of view electron tracking Compton camera”, 20th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 2011 年 05 月 22 日~26 日, Hyeres, France
- ④ 澤野達哉, 窪秀利, 「SMILE15: 新データ取得システムを搭載した気球搭載用電子飛跡検出型コンプトンカメラの現状報告」, 日本物理学会、2013 年 3 月 28 日、広島大学
- ⑤ 水本哲矢, 窪秀利, 「SMILE14: 電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) の新データ取得システムの性能評価」, 日本物理学会、2012 年 9 月 14 日、京都産業大学
- ⑥ 古村翔太郎, 窪秀利, 「電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける飛跡取得アルゴリズムの改良 III」, 2012 年 9 月 13 日、日本物理学会、京都産業大学
- ⑦ 澤野達哉, 窪秀利, 「SMILE12: 大型化による電子飛跡検出型コンプトンカメラの有効面積拡張」, 2012 年 3 月 27 日、日本物理学会、関西学院大学
- ⑧ 水本哲矢, 窪秀利, 「電子飛跡検出型コンプトンカメラの飛跡取得法性能評価と PMT 電圧供給回路開発」, 2012 年 3 月 27 日、日本物理学会、関西学院大学
- ⑨ 澤野達哉, 窪秀利, 「SMILE10: 次期気球実験 SMILE-II への気球システムの設計と開発状況」, 2011 年 9 月 17 日、日本物理学会、弘前大学
- ⑩ 岩城智, 窪秀利, 「気球実験に向けたコンパクトなガス検出器読み出しシステムの開発」, 2011 年 9 月 17 日、日本物理学会、弘前大学
- ⑪ 岸本祐二, 窪秀利, 「SMILE8: 次期気球実験に向けた詳細なシミュレーションとコンプトンカメラの開発現状」, 日本物理学会, 2010 年 9 月 11 日, 九州工業大学
- ⑫ 高橋慶在, 窪秀利, 「電子飛跡検出型コンプトンカメラに用いるガスの最適化」, 日本物理学会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学
- ⑬ 岩城智, 窪秀利, 「CMOS ASIC を用いた気球実験用ガス検出器読み出しシステムの開発」, 日本物理学会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学
- ⑭ 上野一樹, 窪秀利, 「micro-TPC を用いた電子陽電子対生成カメラの原理実証」, 日本物理学会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学
- ⑮ 岩城智, 窪秀利, 「6mm 角 LaBr3 (Ce) ピクセルアレイと 64ch マルチアノード PMT 読み出しシステムを用いたシンチレーションカメラの開発」, 日本物理学会, 2009 年 9 月 10 日, 甲南大学
- ⑯ 上野一樹, 窪秀利, 「SMILE 5: 上空におけるバックグラウンド特性とコンプトンカメラの開発現状」, 日本物理学会, 2009 年 3 月 28 日, 立教学院
- ⑰ 上野一樹, 窪秀利, 「SMILE 4: micro-TPC を用いたガンマ線イメージング検出器の開発現状」, 日本物理学会, 2008 年 9 月 23 日, 山形大学
- ⑱ H. Kubo, “Low-Power Wide-Dynamic-Range Readout System of a 64-Channel Multi-Anode PMT for a Scintillation Camera”, 2008 IEEE NSS, 2008 年 10 月 20 日, Dresden, Germany
- ⑲ K. Ueno, H. Kubo, “Compton Imaging Camera Using an Electron-Tracking Gaseous TPC and a Scintillation Camera”, 2008 IEEE NSS, 2008 年 10 月 19 日~25 日, Dresden, Germany

[その他]

ホームページ

<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/MeV-gamma/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

窪 秀利 (KUBO HIDETOSHI)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 40300868

(2) 連携研究者

谷森 達 (TANIMORI TORU)

京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：10179856