

平成30年6月4日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17608

研究課題名(和文)系外拡散ガンマ線の起源特定の為の広視野・低雑音MeVガンマ線望遠鏡の開発

研究課題名(英文) Development of MeV gamma-ray telescope with a wide field-of-view and low background for the determination of the origin of extra galactic diffuse gamma-rays

研究代表者

高田 淳史 (Takada, Atsushi)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：90531468

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：銀河系外から一様に到来する系外拡散ガンマ線の由来は、遠方のIa型超新星爆発や活動銀河核などが挙げられているが、過去の観測による測定点は誤差も大きく特定には至っていない。系外拡散ガンマ線の詳細なスペクトルを得るべく、コンプトン散乱を利用し、コンプトン反跳電子の飛跡を取得してガンマ線の入射方向を一意に決定できる新しい望遠鏡である電子飛跡検出型コンプトンカメラをシミュレーションを用いて設計し開発した。開発した望遠鏡は気球に搭載し、2018年4月にオーストラリアから放球された。気球は26時間に渡って高度40km付近を飛翔し続け、安定に観測することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The type Ia supernovae or the active galactic nuclei are expected as the origin of extragalactic diffuse gamma-rays. However, the observation in the MeV region is not advanced enough to determine the origin. For obtaining a detail energy spectrum, we developed a new MeV gamma-ray telescope, electron-tracking Compton camera (ETCC). An ETCC, which is a kind of the Compton cameras, can decide the incident direction photon by photon utilizing the tracks of the Compton-recoil electrons. The developed ETCC was loaded on a balloon, and it was launched from Australia on April, 2018. The balloon flown at the altitude of approximately 40 km during 26 hours. The ETCC was operated stably during this flight, and it was successful to observe the gamma-rays at the balloon altitudes.

研究分野：ガンマ線天文学

キーワード：MeVガンマ線天文学 コンプトン望遠鏡 系外拡散ガンマ線

1. 研究開始当初の背景

1 MeV 付近の MeV ガンマ線領域においても、全天に広がる背景放射が存在し、系外拡散ガンマ線と呼ばれる、空間分解できない非常に遠方の天体からの放射が存在する。これまで Apollo や COMPTEL によって観測され、背景ガンマ線のスペクトルは 1 MeV 付近で大きく変化している。その起源として Ia 型超新星で生成される ^{56}Ni からの核ガンマ線、セイファート銀河や FSRQ (flat spectrum radio quasar) といった種族の活動銀河核などが候補に挙げられているが、MeV 領域の観測は雑音が多く観測が難しい為、誤差の大きな観測しかなされず、特定に至っていない。近年の研究から、系外拡散ガンマ線の到来方向の非一様性を見ることで系外拡散ガンマ線の起源と考えられる活動銀河核の種族の特定し、遠方銀河の進化を探る提案や [Y. Inoue+, ApJ, 2013]、到来方向と宇宙大規模構造との角度相関を見ることで Ia 型超新星が起こるレートの時間変化を探る提案 [P. Zhang & J. Beacom, ApJ, 2004] がなされており、銀河進化や星生成率への新たな知見となる。これらはいずれも数百 keV から数 MeV にかけての詳細なスペクトルと数度程度の精度での到来方向の観測を要求している。

MeV 領域のガンマ線観測では、宇宙線と衛星筐体との相互作用による原子核励起から多量の雑音ガンマ線を生じる上、地球大気からもガンマ線や中性子が到来し、観測自体が難しい。さらにこの領域での確立したイメージング技術がなく SN 比の良い観測も実現できていない。1991 ~ 2000 年に 0.75-30 MeV において約 30 個の定常天体を発見した COMPTEL による系外拡散ガンマ線の観測は、10 年の観測でも雑音が多く残り系統誤差が大きく、精度が非常に悪い。COMPTEL 以降では、INTEGRAL 衛星がこの領域の観測を試みたが、数百 keV 以上での進展はなく、Astro-H はポインティング観測であるため全天に広がる背景放射の観測には向かない。

この状況を打開するため開発してきた電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) は、ガス飛跡検出器と周囲を取り囲むシンチレーションカメラで構成され、ガス飛跡検出器でガンマ線をコンプトン散乱させ反跳電子の飛跡とエネルギーを得、散乱したガンマ線は周囲のシンチレーションカメラでエネルギーと吸収位置を捉えるものである。他の MeV ガンマ線検出器と異なり、反跳電子の飛跡が得られることで、光子毎にエネルギーと到来方向を一意に特定可能な上、コンプトン散乱の運動学・エネルギー損失率を用いた粒子識別といった独自の雑音除去が可能となっている。既に 2006 年には気球実験 SMILE-I を行い、1 MeV 以下で COMPTEL よりも 1 桁高い雑音除去能力を実証することに成功した [A. Takada+, ApJ, 2010]。その後、かに星雲観測に向け 30 cm 立方サイズのカメラを開発しており、300 keV において有効面

積 1 cm^2 、角度分解能 6° を達成している。

2. 研究の目的

系外拡散ガンマ線の観測の為、エネルギー帯域を数 MeV まで伸ばし、低雑音・広視野なガンマ線カメラを開発し、MeV 領域のイメージング手法を確立させる。また、気球実験により系外拡散ガンマ線の 0.2 ~ 2 MeV の詳細なスペクトルを得て、その起源を特定する。具体的には、

1 MeV 以上のエネルギーに対しても感度を持たせるべく、3 放射長のシンチレータ検出器を安定度の高い MPPC を用いて開発する。エネルギー分解能の良い GAGG シンチレータを試験し、これをガス飛跡検出器内に設置したコンプトンカメラに導入・試験する。Geant4 を用いたシミュレーションを並行して進め、検出効率と角度分解能を向上できるよう配置・解析方法を検討する。気球実験にて詳細な系外拡散ガンマ線のスペクトルを得て、その起源を特定する。さらに、その数年後に行う南極周回気球実験で系外拡散ガンマ線の非一様性の検出を行うべく、検出器の設計を行う。

3. 研究の方法

ETCC の感度を数 MeV まで伸ばすべく、3 放射長のシンチレーションカメラを安定度の高い MPPC を用いて開発を行う。シンチレータとしてはエネルギー分解能の良い GAGG シンチレータを試験する。また、コンプトンカメラとして組み上げ、1 MeV 以上のガンマ線に対する検出感度を実測する。一方、Geant4 を用いたシミュレーションを並行して進め、検出効率と角度分解能を向上できるよう配置・解析方法を検討し、実機に対してフィードバックを行う。平成 28 年度以降に行うかに星雲観測気球実験にこの改良を実装し、6 sr もの広視野を生かしてかに星雲観測と同時に系外拡散ガンマ線の詳細なスペクトルが同時に得て、その起源を特定する。

4. 研究成果

シンチレーションカメラの開発

本研究で開発する ETCC のエネルギー分解能はシンチレーションカメラのエネルギー分解能で制限される。従来の ETCC では GSO シンチレータとマルチアノード PMT を組み合わせて使用してきた。しかし、達成できたエネルギー分解能は 662 keV で半値全幅 11% というものである上、将来の ETCC 大型化においては PMT の消費電力が大きく、飛翔体実験に対して大きな制限となってしまう。この為、本研究において新しい光検出器である MPPC を用いた光読み出し回路を開発した (図 1 上左)。この開発は JAXA 宇宙科学研究所の搭載機器基礎開発実験費の補助も受けて行った。新規に開発した光検出器

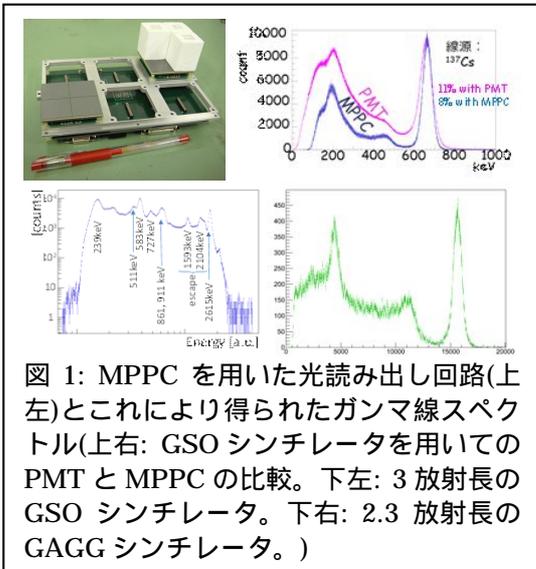


図 1: MPPC を用いた光読み出し回路(左上)とこれにより得られたガンマ線スペクトル(右上: GSO シンチレータを用いての PMT と MPPC の比較。下左: 3 放射長の GSO シンチレータ。下右: 2.3 放射長の GAGG シンチレータ。)

と GSO シンチレータを組み合わせたところ、662 keV で半値全幅 8% を達成し、大きな改善が見られた(図 1 右上)。これは GSO の発光波長での MPPC の検出効率が PMT の量子効率よりも 2 倍良い事に起因する。シンチレータの厚みを 3 放射長に伸ばすと図 1 下左のようなスペクトルが得られた。シンチレータが厚い分、エネルギー分解能は 662 keV で半値全幅 8.9% と少し落ちてきているものの、2.6 MeV のガンマ線まで検出できていることが見て取れる。一方で、近年開発されたエネルギー分解能の良い GAGG シンチレータでは図 1 下右のスペクトルになり、662 keV で半値全幅 6% を達成している。価格の面から ETCC に組み込むまで大型化できなかったが、シンチレーションカメラのエネルギー分解能の大幅な向上に成功した。

Geant4 による検出器の設計

本研究開始以前に開発してきた ETCC が測定できるエネルギー帯域は 0.15~1 MeV である一方、本研究で重要なエネルギー帯域は 0.3~数 MeV の領域である。よって、気球実験に向けて 1 MeV 以上のガンマ線に感度を持つよう、Geant4 シミュレーションを用いてフライトモデル検出器の設計を行った。ETCC エネルギー帯域を律速していたのは、i) 1 気圧 Ar ガスの一辺 30 cm 立方体のガス飛跡検出器で測定できる反跳電子は 200 keV 以下のみ、ii) 13 mm 厚の GSO シンチレータでは 500 keV の散乱ガンマ線も 40% は素通りしてしまう、という 2 つの問題があった。これを解決するべく、a) シンチレータをガス飛跡検出器内部に設置し、300 keV 以上の反跳電子のエネルギーをシンチレータで測定可能に、b) シンチレータの一部を 26 mm 厚に変更し、散乱ガンマ線の阻止能を向上、c) ガス飛跡検出器の気圧を 2 気圧へ上げることで ETCC の有効面積そのものを向上させる、という 3 点の改良を考え、Geant4 を用いてシミュレーションを行った。図 2 にシミュレーション結果を示す。本研究以前の ETCC

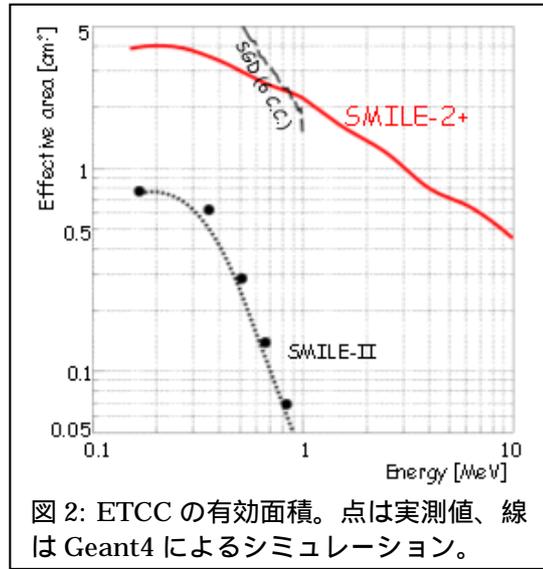


図 2: ETCC の有効面積。点は実測値、線は Geant4 によるシミュレーション。

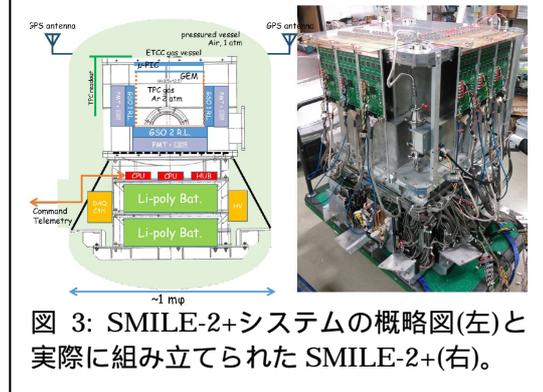


図 3: SMILE-2+ システムの概略図(左)と実際に組み立てられた SMILE-2+(右)。

(SMILE-II) と、改良後の ETCC (SMILE-2+) は、ガス飛跡検出器の体積及び GSO シンチレータの面積は同じであるが、特に 1 MeV 以上での有効面積が大きく改善するのが見て取れる。これは、測定できる反跳電子のエネルギー帯域が 150 keV 以下から数 MeV 以下にまで大きく広がった効果である。さらに、シンチレータをガス飛跡検出器内部に設置した副産物として、シンチレータと飛跡検出器の距離が縮まり、散乱ガンマ線を検出できる立体角が 2 倍程大きくなった。この為、ガス気圧を上げたことと合わせて、低エネルギー側でも 4~5 倍の利得が得ることができた。

気球実験 SMILE-2+

i) フライトモデル検出器の開発

図 2 の Geant4 シミュレーション結果を基に、フライトモデル検出器の設計を行った。本研究で開発した MPPC による光検出器はプロジェクト全体の費用の面から採用には至らなかったが、シミュレーションで検討した 3 つの改良点は全て取り入れたシステム(図 3)を構築している。図 4 は構築したフライトモデル検出器で得られたトリウムタングステン棒からの 2.6 MeV のガンマ線事象の例である。シンチレータをガス飛跡検出器の内部に設置したことにより、1.8 MeV の高エネルギーな反跳電子を検出可能になり、2.6 MeV というこれまでは測定できなかったガ

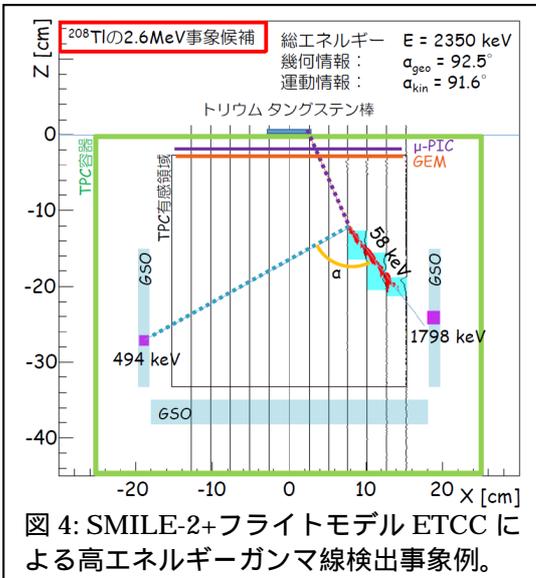


図 4: SMILE-2+フライトモデル ETCC による高エネルギーガンマ線検出事象例。



図 5: 熱真空試験中の SMILE-2+。

ンマ線も測定できていることが分かる。2017年10月には、宇宙科学研究所大気球実験室にて、真空恒温槽を用いて熱真空試験を行い、気球高度環境での動作確認を行った(図5)。

ii) 2018年豪州気球実験

ETCCの天体観測能力実証実験 SMILE-2+ は、2018年の ISAS 豪州気球実験 B18-02 として採択された。銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線やかに星雲を観測し、地上校正実験の結果から予想される検出感度と比較することで、雑音除去能力やガンマ線イメージング能力を実証することを目的としている。2018年3月初めにオーストラリアのアリスプリングスに入り、SMILE-2+システムの立ち上げ・気球制御システムとのかみ合わせ試験・電波感度試験を行った後、4月7日の6:24(ACST)に打上げられた。8:45頃に高度39.6kmで水平浮遊に入り、翌8日の11:07まで飛翔を続けた。この間、SMILE-2+システムは安定に動作し続け、8日の10:45に電源をシャットダウンするまで順調にデータ取得が行われた。この観測時間の内、7



図 6: SMILE-2+の放球準備の様子。

日10時から14時、及び7日20時から8日1時は、銀河中心領域やかに星雲などの明るい定常天体がない時間帯である為、この時間帯のデータは系外拡散ガンマ線の解析に使用可能である。現在、このデータ解析を進めているところである。

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 8件)

S. Komura, A. Takada (2/20), Y. Mizumura, S. Miyamoto, T. Takemura, et al., Imaging Polarimeter for a Sub-MeV Gamma-Ray All-sky Survey Using an Electron-tracking Compton Camera, The Astrophysical Journal, 査読有, 839, 2017, 41

DOI:10.3847/1538-4357/aa68dc

T. Tanimori, Y. Mizumura, A. Takada (3/19), S. Miyamoto, T. Takemura, et al., Establishment of Imaging Spectroscopy of Nuclear Gamma-Rays based on Geometrical Optics, Scientific Reports, 査読有, 7, 2017, 41511

DOI:10.1038/srep41511

Y. Mizumura, T. Tanimori, A. Takada, Possibility of Systematic Study of Supernova Explosions by Nuclear Imaging Spectroscopy, JPS Conference Proceedings, 査読有, 14, 2017, 020607

高田淳史 (1/10), 谷森達, 窪秀利, 水本哲矢, 水村好貴ら, 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡による MeV ガンマ線天文学の革新, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告: 大気球研究報告, 査読有, JAXA-RR-16-008, 2017, 49-67

<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/609985>

A. Takada (1/19), T. Tanimori, H. Kubo, T. Mizumoto, Y. Mizumura, et al., MeV gamma-ray observation with a well-defined point spread function based on electron tracking, Proceedings SPIE Space Telescopes

and Instrumentation 2016, 査読無, 9905, 2016, 99052M
DOI:10.1117/12.2232171
T. Tanimori, H. Kubo, A. Takada (3/20), et al., An Electron-Tracking Compton Telescope for a Survey of the Deep Universe by MeV gamma-rays, The Astrophysical Journal, 査読有, 810, 2015, 28
DOI: 10.1088/0004-637X/810/1/28
T. Mizumoto, Y. Matsuoka, Y. Mizumura, T. Tanimori, H. Kubo, A. Takada (6/20), et al., New readout and data-acquisition system in an electron-tracking Compton camera for MeV gamma-ray astronomy (SMILE-II), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 査読有, 800, 2015, 40-50
DOI:10.1016/j.nima.2015.08.004
S. Komura, T. Tanimori, A. Takada (3/20), Balloon-Borne Experiment for Deep Sky Survey of MeV Gamma Rays using an Electron-Tracking Compton Camera, Proceedings of 34th International Cosmic Ray Conference, 査読無, 2015, 1019
DOI:10.22323/1.236.1019

〔学会発表〕(計 20 件)

A. Takada, MeV Gamma-Ray Observation Based on the Ray-Tracing Cameras Loaded on Balloons, The 31st International Symposium on Space Technology and Science, 2017
A. Takada, u-PIC and its applications, AFAD2016, 2016
A. Takada, Proposal of balloon and satellite observations of MeV gamma-ray using ETCC for reaching a high sensitivity of 1 mCrab, HEAD 15th Divisional Meeting, 2016
A. Takada, MeV gamma-ray observation with a well-defined point spread function based on electron tracking, SPIE astronomical telescopes + instrumentation, 2016
A. Takada, SMILE: Sub-MeV/MeV gamma-ray survey using electron-tracking Compton camera loaded on balloon, High-Energy Large- and Medium-class Space Missions in the 2020s, 2015

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 淳史 (TAKADA, Atsushi)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 9 0 5 3 1 4 6 8