

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13785

研究課題名(和文) イメージング核分光による超新星天文学の開拓

研究課題名(英文) Pioneering Study of Nuclear gamma spectroscopic observation for Super Novae

研究代表者

谷森 達 (Tanimori, Toru)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：10179856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：天体からの核ガンマ線検出は超新星(SN)の起源、元素合成に重要な情報である。しかしMeVガンマ線天文学は放射雑音と不完全な画像法を克服出来ず停滞している。我々は電子飛跡検出型コンプトンカメラを開発、MeVガンマ線画像化に必要なガンマ線到来方向測の2角の測定し明確なPSFを実現、現在より100倍高感度な測定が可能であることを示したこのETCCによるSNからの核ガンマ線検出予想のミュレーションを実施、60Mpc遠方のSNまのスペクトル観測が実現、多数のSNを観測、スペクトルを平均化することで理論モデルの判定が確実に出来ることを世界で初めて示した。

研究成果の概要(英文)：Nuclear gamma ray detection is the most important information for the origin of supernovae (SN) and nucleosynthesis. However, MeV gamma ray astronomy stagnates because we can not still overcome the problem of intense radiation noise and imperfect imaging method. We have developed an Electron Tracking Compton Camera, which measured complete gamma ray arrival direction required for MeV gamma ray imaging, and realized well-defined PSF similar to Optical telescopes, which is revealed to provide 100 times better sensitivity than current instrument. Here simulation for the prediction of nuclear gamma ray detection from SN by ETCC is carried out, and we have found that spectrum observation to SN of 60 Mpc far is realized, and the observation of a large number of SNs, averaging spectra makes it possible to reliably judge the theoretical model for the first time.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：MeVガンマ線天文学 イメージング核分光 電子飛跡検出型コンプトンカメラ MPGD 超新星爆発

1. 研究開始当初の背景

超新星爆発 (SN) からの核ガンマ線分光観測は元素合成の現場を直接観測できる唯一の手段であり、高精度観測が実現すれば SN の起源問題、特に Ia 型:White Dwarf 連星爆発か 2 つの WD 合体説に明確な答えを提示でき、さらには銀河の化学進化など天文学に大きな進展をもたらす。銀河面の観測からは宇宙線が分子雲との衝突で放射される炭素・酸素の脱励起ガンマ線検出(イオン宇宙線しか生成しない)による宇宙線起源の解明、陽電子消滅 511keV、²⁶Al ガンマ線の精密分布測定から銀河内の元素合成・物質流動の可視化など革新的成果が期待できる。しかし今まで核ガンマ線分光検出は数例のみである。特に銀河面核ガンマ線は画像手法の不完全さのため系統誤差が大きく精密な議論が出来ない。一方、現在提案されている次期 MeV ガンマ線衛星も従来のコンプトンカメラ(CC)法を用いているため他の波長領域のようなイメージング分光観測を実施することは不可能であり、SN 起源解明に必要な感度が実現できる新しい観測手法の確立が早急に必要である。

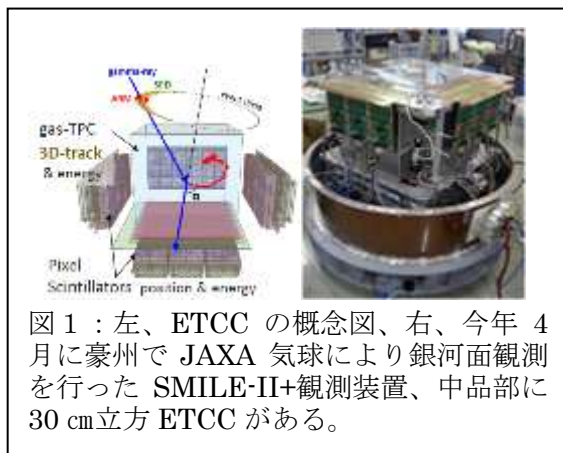


図1：左、ETCC の概念図、右、今年 4 月に豪州で JAXA 気球により銀河面観測を行った SMILE-II+観測装置、中品部に 30 cm立方 ETCC がある。

2. 研究の目的

2014 年に欧州の核ガンマ線観測衛星 INTEGRAL は超新星 SN2014J(距離 3.5Mpc)から世界初の Ia 型から核ガンマ線を検出、しかし発生確率は 40 年に 1 回であり、得られたスペクトルの統計精度も悪い。天体からの核ガンマ線検出(核分光)は超新星(SN)の起源、元素合成、爆発機構解明に最重要な情報であり天文学に大きな貢献が期待出来る。しかし MeV ガンマ線天文学は放射雑音と不完全な画像法を克服出来ず長年停滞している。我々は電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)を開発(図1)、世界で初めて MeV ガンマ線画像化に必要なガンマ線到来方向測の 2 角の測定し Point Spread Function(PSF)決定を実現(図2)、今後 1 度の PSF を実現し 100Mpc 遠方の SN の核ガンマ線検出が可能なことを 2015 年に ApJ に発表した。今、保有する ETCC を改善、今後の豪州及び極域

ETCC 気球観測 SMILE-II,III(図3)で銀河面 511keV、²⁶Al、⁶⁰Fe の核ガンマ線測定を予定、この申請で高感度イメージング核分光法技術を確立し、次期 MeV ガンマ線衛星で 500 個以上の SN 観測を実現、「超新星天文学」を開拓する。

3. 研究の方法

現在の 30cm 角 ETCC 技術の延長上にある衛星用大型 ETCC は PSF 設定による明確なイメージングから 10⁶秒で 4x10⁻¹²erg cm⁻²s⁻¹(1mCrab)の感度があり、さらに核ガンマ線分光ではエネルギーカットが加わり

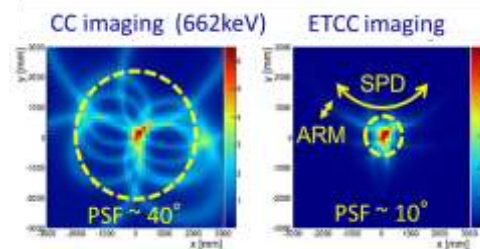


図2：左は従来の CC による点源の画像、円環でしか方向が決定できず再構成画像が広がるが、ETCC では右のように光学カメラ同様、1 点に集光し PSF が決定できる。

さらに感度が 1 桁改善し、4x10⁻¹³erg cm⁻²s⁻¹の感度が得られる。この実現には PSF の 1 度達成が不可欠であり、そのため電子飛跡精度向上が鍵となる。電子飛跡を測定している 2 次元ガス増幅マイクロパターン検出器 μPIC は 2 方向の信号ラインしか無いため同時に X、Y 軸のヒットがあった場合、飛跡ベクトルが決定できず SPD 角が決まらない。図4に示す 3 軸信号ラインにすることにより簡単にこの問題は解決できる。小型 3 軸 μPIC を開発し、3 次元飛跡の SPD 値が 10 度程度で得られるようにする。さらにその実測性能を用いてシミュレーションで評価、それに基づき理論研究者が熱望する多数の SN の核分光や、無バイアスな観測をもたらす新しい「超新星

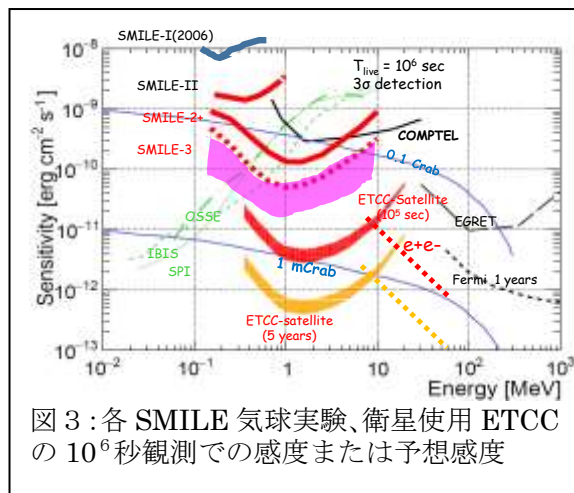


図3：各 SMILE 気球実験、衛星使用 ETCC の 10⁶秒観測での感度または予想感度

天文学」の実現を目指す。

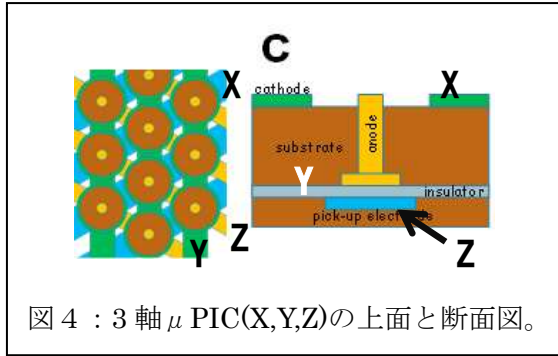


図4：3軸 μ PIC(X,Y,Z)の上面と断面図。

4. 研究成果

この研究が開始された H28 年に我々は核ガンマ線に対して世界で初めて明確に幾何光学に基づく Point Spread Function (PSF) を定義、ETCC のようなコンプトン電子散乱の方向測定が PSF の決定に不可欠であることを証明した。これにより電子の方向測定が不可能な従来のコンプトンカメラ (CC) では実際、PSF が 50 度程度と大きく曖昧であることを実証、今までの観測結果の不鮮明な理由を明らかにした。一方 ETCC のように明確な 2 次元 PSF を定義することで、感度が確実に決定できることを示し、今後の観測方向を明らかにした。

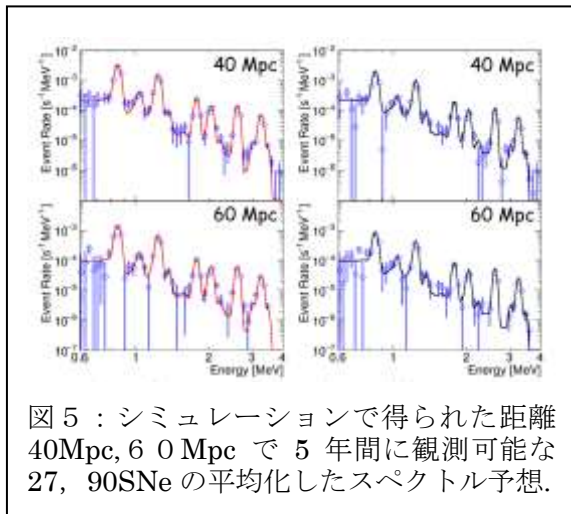


図5：シミュレーションで得られた距離 40Mpc, 60 Mpc で 5 年間に観測可能な 27, 90SNe の平均化したスペクトル予想。

この申請ではこれに基づき近い将来実現可能な 1 度程度の PSF と約 200 cm² の有効面積を持つ衛星による SN からのイメージング分光によるスペクトル予想とその意義をシミュレーションで議論した。特に Ia 型 SN の期限問題、単一の白色矮星の爆発 (WD) か白色矮星連星の合体 (DD) 説に決定的な答えを与えられるかを議論した。この研究において電子飛跡の精度できまる方向精度を利用すると 1MeV 以上の γ 線で PSF を 1 度以下に改善できることを発見、これにより 60 Mpc までの SN の γ 線スペクトルの観測が可能となることを示した (図 5)。60 Mpc 以内では 5 年で 100 個程度の SN-Ia のスペクトル観測が可能となり、個々の SN の個性を除き、系統的にライトカーブや、各ラインガンマ線の強度変化を研究することで 2 つのモデルに決定的な差が

出ることを明らかにした。この成果は今年 5 月に査読付論文に投稿した。他の観測提案では根 5 年で数個の SN 観測を予想するのみであり、この ETCC の導入で全く新しい「超新星天文学」が始まることを示した。

後、このシミュレーションを実現させるために不可欠な要素は電子飛跡検出の精度を上げ現在の PSF (10 度程度) を 1 度まで改善する必要がある。現在 PSF が悪い原因は飛跡検出器の回路を削減するためピクセル検出器でありながら読出しをストリップとすることで回路数は 2 桁低減するが、同時に複数ピクセルがヒットしたとき軌跡の方向が決定できず角度分解能を悪くしている。この問題を解決するため、2 つのストリップに新たな 3 軸目のストリップを導入することで大きく改善することが知られているが、今回使用している Micro Pattern Gas Detector (MPGD) での実現は今まで不可能であった。図 3 のような陽極電極の下に非接触な誘起電圧を検出するストリップを持つ MPGD を試作、実際に動作させ図 4 下のように誘起電圧をオシロスコープで確認したが、陽極信号の 10 分の 1 以下のパルス電圧と小さく、陽極のどのピクセルと対応が取れているかの確認までは至らなかった。経費が限られているためこの申請ではここまでであったが、現在、陰極の信号を 2 つに分割することで 3 軸読出しを実現する手法を目指している。

この研究では第 1 の目的とする PSF 導入によるイメージング分光観測が現在の宇宙核ガンマ線観測の感度を 2 桁以上改善、100 個以上の SN のスペクトル観測が実現され、新しい天文学を始動できることを示すことができた意義は大きいと感じている。

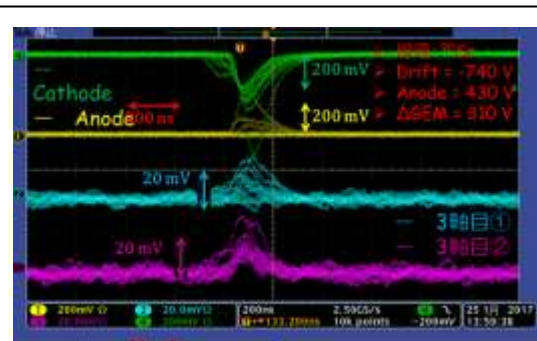


図6：オシロスコープで MPGD の陽極信号 (上、緑) と誘起電極信号 (青、赤)。誘起電極信号は陽極より 1 桁以上信号が小さい。

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 4 件)

H28 年

1. T. Tanimori, A. Takada et al., “Establishment of Imaging Spectroscopy of Nuclear Gamma-Rays based on Geometrical Optics” Scientific Reports 7 41511 (2017)
2. S. Komura, A. Takada, T. Tanimori et al., “maging Polarimeter for a Sub-MeV Gamma-Ray All-sky Survey Using an Electron-tracking Compton Camera”, The Astrophysical Journal 839 41 (2017)

H29 年

1. Y. Mizumura, T. Tanimori, A. Takada, “Possibility of Systematic Study of Supernova Explosions by Nuclear Imaging Spectroscopy”, JPS Conf. Proc. 14 020607 (2017)
2. T. Takemura, A. Takakda, T. Tanimori, et al., “Development of the micro pixel chamber based on MEMS technology”, EPJ Web of Conferences 174 02010 (2018)

[学会発表] (計 4 件)

H28 年

1. A. Takada, T. Tanimori et al., “Proposal of balloon and satellite observations of MeV gamma-ray using ETCC for reaching a high sensitivity of 1 mCrab”, HEAD 15th Divisional Meeting, Naples, US 2016 年 4 月
2. K. Mizumura, A. Takakda, T. Tanimori, “Possibility of Systematic Study of Supernova Explosions by Nuclear Imaging Spectroscopy”, 14th International symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC XIV) Niigata, Japan 2016 年 6 月

H29 年

1. A. Takada, T. Tanimori et al., “MeV Gamma-Ray Observation Based on the Ray-Tracing Cameras Loaded on Balloons”, The 31st International Symposium on Space Technology and Science, Matsuyama, Japan 2017 年 6 月
2. 谷森達, “ETCC による銀河中心ガンマ線観測気球実験の現状および 1mCrab 感度を有する小型ガンマ線観測衛星提案”、高宇連 第 17 回研究会 首都大学東京 2018 年 3 月

[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]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者 無

(3) 連携研究者

高田敦史 (TAKADA, Atsushi)

京都大学大学院理学研究科・助教

研究者番号 : 90531468