

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 7 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2014

課題番号：21224005

研究課題名(和文) 広視野ガンマ線カメラによる MeV ガンマ線銀河内天体気球観測

研究課題名(英文) Observation of Galactic Gamma-ray Sources using Electron Tracking Compton Camera with Balloon borne Experiment

研究代表者

谷森 達 (Tanimori, Toru)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10179856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 163,000,000 円

研究成果の概要(和文)：MeVガンマ線天文学は大量の放射雑音と不完全なイメージングのため進展が遅れた未開拓領域である。我々は世界に先駆けコンプトン電子の方向測定が可能な電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)を開発、ガンマ線の方位角の決定による明瞭なイメージング及びdE/dxによる強力な雑音除去を実現、従来のコンプトン法の10倍の感度改善に成功。またMF値0.6と世界最高レベルの高感度偏光観測も実現。この技術により中型衛星で従来の100倍の感度での観測の可能性も示した。4時間の気球観測でCrabを8-10⁻⁶で検出、同時に偏光測定も行える30cm角ETCCを搭載した気球実験装置を完成し、実験準備を終了した。

研究成果の概要(英文)：For MeV gamma-ray astronomy, we developed Electron Tracking Compton Camera (ETCC) consisting of TPC and scintillators. By measuring electron tracks, ETCC measures the direction of gamma-rays as a small arc, which provides good background rejection by the dE/dx, and clear imaging. Here a 30cm-cube-ETCC was developed to catch gammas from Crab in SMILE-II balloon with $>5\sigma$ for 4 hrs in 2013. SMILE-II was irradiated by intense gammas and neutron by 140MeV proton, and measured clear image of a weak RI without the efficiency deterioration under 10 times stronger radiation than space by removing most background by dE/dx. Finally its sensitivity was improved to 8-10⁻⁶ by attaining the angular resolution of the track to that determined by multiple scattering. Thus we show the ability of ETCC to give a 10 times better significance than standard CCs with a same detection area by ETCC. Based on this technology, 4 modules of 50cm-cube ETCCs in space is expected to exceed over 1mCrab.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：MeV 線天文学 コンプトンカメラ 高エネルギー天体 超新星 元素合成 GRB TPC MPGD

1. 研究開始当初の背景

MeV ガンマ線天文学は未開拓な領域であるが、超新星と元素合成、GRB など魅力的な天体現象が多く重要な領域である。しかしイメージング手法が困難なことなどから観測が進まなかった。新たな観測手法を開拓し、他のガンマ線領域と同等の観測を実現する。我々はガスを用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron-Tracking Compton Camera: ETCC, 図1) を開発しガンマ線の方位角の決定、 dE/dx による雑音ガンマ線・宇宙線除去の可能性を06年に10cm角ETCCを用いて3時間の気球観測 (SMILE-I) で示した。この手法を発展させ、この問題を解決する糸口が見つかった。

2. 研究の目的

SMILE-Iの結果に基づき、次のステップとして天体観測が可能となる30cm角大型ETCCの技術を確認、気球実験でその能力を実証する。特に最新のガス検出器 μ PICの30cm角大型化、電子飛跡検出器であるTime Projection Chamber (TPC)の信号回路、TPCの周囲を囲むGSOシンチレーターを用いたPixel Scintillator Array (PSA)信号回路の小型省電力化を実現。JAXA国内気球を用いてCrabを6時間で 3σ 以上の感度で観測を行う。これを実現するため30cm角ではSMILE-Iの100倍の有効面積 $0.5\text{cm}^2 @ 300\text{keV}$ 、ARM (Angular Resolution Measure) 角分解能 (半値10度) の性能達成が必要となる (図1参照)。従来のCompton Camera (CC) では測定出来ないガンマ線方向決定に不可欠な方位角 (SPD: Scatter Plane Deviation 角, 図1) を測定、さらには雑音除去に有効な dE/dx を高精度で求め、これらが雑音除去およびイメージング能力改善にどのように有効かを明らかにすることで、今後の長時間飛行気球観測や衛星観測での観測感度の予想を可能にする。

3. 研究の方法

SMILE-Iの経験を基に、気球実験に必要なSMILE-Iの100倍以上の感度を持ち気球実験に耐えうる信頼性を備えたSMILE-II観測装置を実現する。またその性能を地上で実証するための実験手法を開発し、偏光測定実験も実施する。個々の開発項目を以下に挙げる

- (1) μ PICの高利得と安定性を実現、電子飛跡検出率を10%から100%に改善。
- (2) μ PIC専用、16chアンプを持つ専用LSIを開発、全体で電力消費をSMILE-Iと同程度にする。同様にPSA回路も以前と同じ電力量で3倍の信号処理を実現する。
- (3) JAXA気球用に重量および電力消費量をSMILE-Iと同程度以下にする。
- (4) 設計評価のためSMILE-Iの結果を反映させた大気雑音&装置シミュレーションプログラムを開発する。
- (5) 高精度な電子飛跡からARM, SPDを求め高感度画像化する手法の開発
- (6) 宇宙放射線環境を加速器により実現、宇

宙放射線環境での安定動作評価法を確立。偏光測定能力の評価。

- (7)
- (8) JAXA気球を用いCrabの観測を実施する。

4. 研究成果

まず、2010年ぐらいからJAXA気球は大樹町気球基地の航空航路との干渉問題から1時間以上の観測時間が必要な天体観測の気球実験実施が不可能となり、この申請で予定していた国内での気球実験は不可能となった。2011年当時北欧の地球科学研究者から北極圏での高層大気ガンマ線観測の共同研究の話がありスウェーデンでの北極周回気球実験を検討、スウェーデンに実験申請を行ったが、日本が主体の実験であることや、まずはCrabの観測を行い性能評価が必要という理由から採択されなかった。そのため13年からCrab観測が可能な米国での気球実験を現在検討している。しかし米国の実験では、同じく日本の実験ということで1億円程度の経費負担が必要となる。現在、米国NASAの気球利用を、JAXAを通して議論している。今後の気球実験を効率的に行うため当初予定より高い性能と安定性の実現とその検証に成功、さらにMeVガンマ線観測の問題を克服し、今後MeVガンマ線天文学を発展させられる新しいガンマ線観測手法を実証、予想していなかったMeVガンマ線観測を一変する可能性を持つ手法を実現した。以下に具体的に述べる。

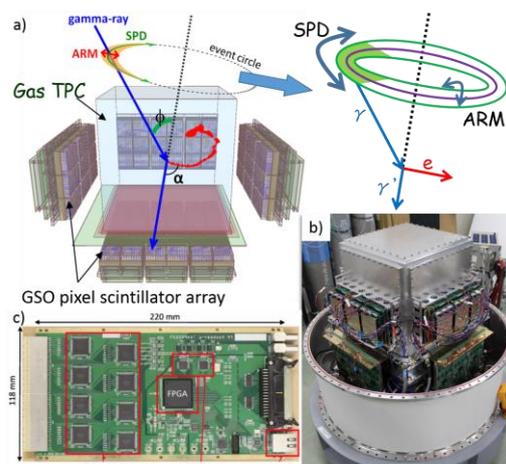


図1 (a)ETCC概念図、右に到来ガンマ線とARMおよびSPDの関係を表示。(b)SMILE-II ETCC気球観測装置、(c)専用LSIを搭載したTPC信号処理ユニット

(1) 装置の改善

SMILE-II 30cmETCCの構成図とそれを搭載した気球測定装置を図1に示す。まず30cm角 μ PICの利得6000での1年以上の安定動作、利得一様性20%と十分な性能を得、当初の要求を実現。また専用LSI及(図1c)びPSA小型回路の開発に成功、前回の3倍の信号数を前回以下の電力量・重量に抑え要求を満たした(論文①②③、全体構造は論文準備中)。

(2) 感度改善と雑音除去法

まず10%の飛跡検出率を回路と構成法の改良により100%に改善。鮮明な飛跡は dE/dx

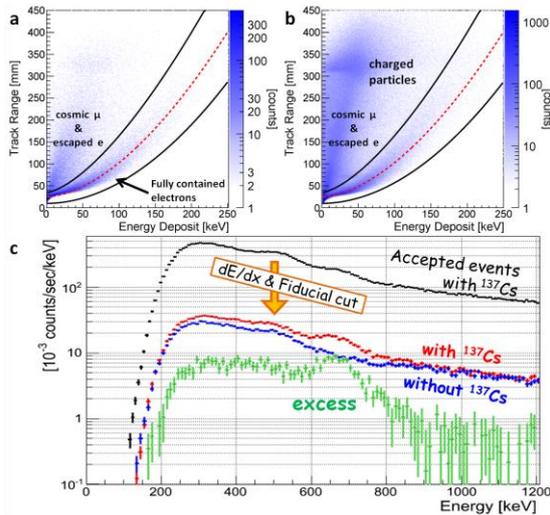


図2 dE/dx マップ(a: 通常時、b: 加速器による高雑音試験時)、加速器実験でのスペクトル変化(c)

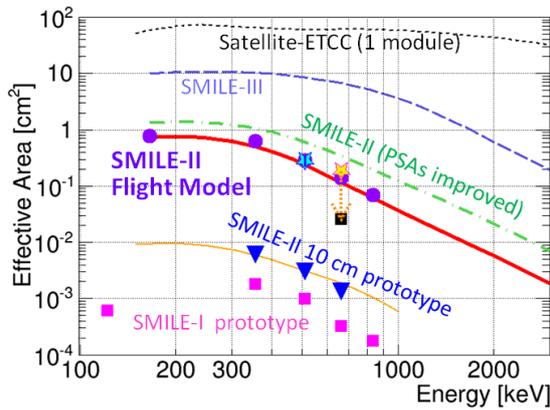


図3 有効面積(点: 実測、線: 推定)

分解能を向上させ、宇宙線、中性子、TPC から逃げる電子など雑音事象の大半の除去を実現 (図2 a)。TPC ガスとシンチレーターの散乱確率のみを考慮した場合の計算と良く一致。(図3の中 SMILE-II)。有効なコンプトン事象を100%捉えた画期的な手法である。当初の要求の2倍の有効面積1 cm²とARM分解能5度が得られた。さらにガスを3 atm CF₄

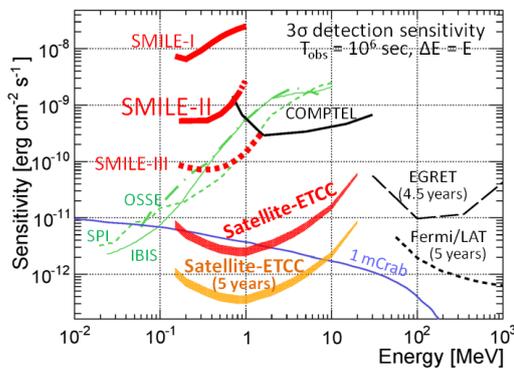


図4 SMILE 計画の感度曲線

に変更すると図3 SMILE-IIIの様に10 cm² (@

300 keV) の有効面積が得られ、COMPTEL に匹敵する能力が30cm角で実現、50cm角を用いれば60cm²を超えガンマ線観測衛星の要求も満たせる(図3,4のSatellite-ETCC)。さらに次に述べるSPD導入によるPoint Spread function (PSF)の決定、dE/dxによる雑音減から従来型CCより10倍以上の感度改善を実証、予想以上の成果が出た(論文①④およびApJ(Astrophysical Journal)に投稿中)。

(3) 高感度イメージング

従来型CCは、ガンマ線到来方向円環(図1 a)を天空に積み上げるため、PSFが数十度に広がり、多くの雑音が入り感度が大きく劣化する。この問題をSPD導入で解決した。SPDの分解能はH25年では180度であり多重散乱角100度には達していなかった。しかし、この分解能でも円環の広がる範囲を2分の1以

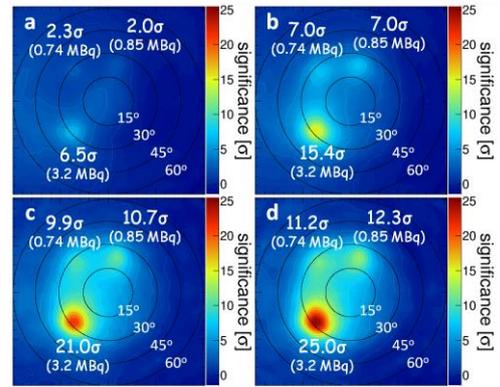


図5 ガンマ線源3つの再構成画像。(a)従来CC模擬、(b)ETCC:SPD=200°、(c)SPD=100° (d)SPD=90°(電子エネルギー<80 keV),45°(>80 keV)を併用

内に制限できる。図5に示すよう有意度は従来CCより3倍の改善を実現。26年末にTPCのパルス幅から時間補正の精度を向上、同時に複数ヒットした不定性の量を大幅に軽減し3次元飛跡の精度を大幅に改善。SPD角50-100度とガスの多重散乱と一致。感度を図5c及びdに示すようにさらに2倍以上、従来型CCに比べ5倍以上の改善を達成した。今後、TPCの改善から短い飛跡でのSPD導入を行い10度が可能となる。この議論は(7)で詳しく述べる(論文①②、ApJに投稿中)。

(4) 宇宙環境を模擬した評価試験の実現

宇宙では宇宙線・中性子・ガンマ線、さらに検出器自体の宇宙線による放射化ガンマ線

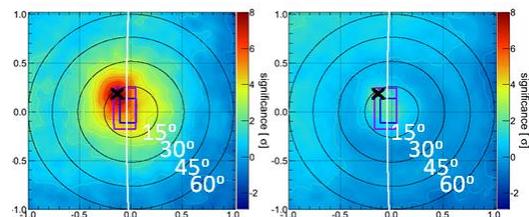


図6 高雑音試験の線源有意度マップ。(左: ETCC、右: 従来CC模擬)

等、大量の雑音放射線が存在する。このような放射線場を加速器で実現し、ETCC の感度安定性を精密に調査した。RCNP の加速器を用い 140 MeV 陽子を水に照射、MeV ガンマ線・中性子を大量に生成させ、実験室の中にガンマ線と中性子で満ちた放射線場の実現に成功。気球環境の 5 倍程の強放射線場で ETCC の性能を評価した。弱 RI 線源 (^{137}Cs , 0.7 MBq) の画像化を行い、図 2b に示すように dE/dx を用いて、雑音を図 2c のスペクトルからわかるように 1 桁以上削減することで鮮明な画像を得た (図 6a, b)。電子飛跡を用いないと線源は消えてしまう。また従来型 CC で起こった有効面積の放射線による劣化は無く、高放射線場においても定量性が保たれることが証明出来た。従来型 CC の解析では感度は 7 分の 1 に減少した。このように ETCC の優位性が明らかになった (論文②、ApJ に投稿中)。

(5) 偏光測定能力の検証

一般に CC はコンプトン散乱の散乱点と散乱ガンマ線方向を計測するため高感度な偏光観測装置である。ETCC は特に雑音除去に優れ、雑音に弱い偏光測定には理想的でありシミュレーションでは MF 値が 0.5 以上と高性能な結果を得た。SPring-8 の 180 keV ビームを用い偏光計測を実施、MF 値 0.6 と世界最高性能を得た (図 7)。この広視野装置でのイメージングによる高感度偏光観測が実現すれば、衛星観測で一期に 10 mCrab 以上の全天の天体に対し 10% 以上の偏光観測を 100keV 以上で実現できる。

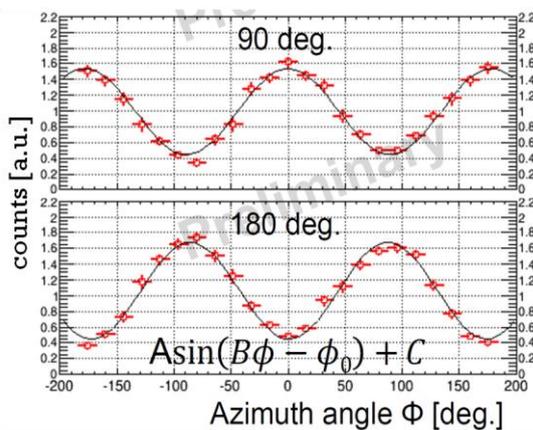


図 7 SPring-8 実験で得たモジュレーションカーブ

(6) 天体を模擬した超微弱ガンマ線源測定

SMILE-II では Crab 観測でガンマ線と雑音の SN 比は 0.017 と予想される。地上実験で同様な SN 比での観測能力検証を行った。世界初である。27kBq ガンマ線を 5.5m 離して用い SN 比は 0.005 とした。 dE/dx および画像位置から 2 桁以上の雑音を除去 8σ の信号が得られた。これを基に気球観測で予想される有意度は $5-8\sigma$ となり、SMILE-II が予定した検出感度にあることが証明できた。実際は有効面積をさらに 2-3 倍にするため、 12σ 以上もの高統計での検出と 30% 以下の偏光観測が期

待できる (ApJ に投稿中)。

(7) 定量的イメージングの実現 (Point Spread Function (PSF) の設定)

一般に望遠鏡の感度は、検出可能な光量を決める有効面積と、焦点に集中する割合を表す PSF で決まる。一方従来型 CC は SPD 測定が出来ず円環が 100 度近く広がり PSF は大きく広がる。これを最適化手法 MLEM (Maximum Likelihood Expectation Maximization) により ARM の分解能に近づける。しかし最適化

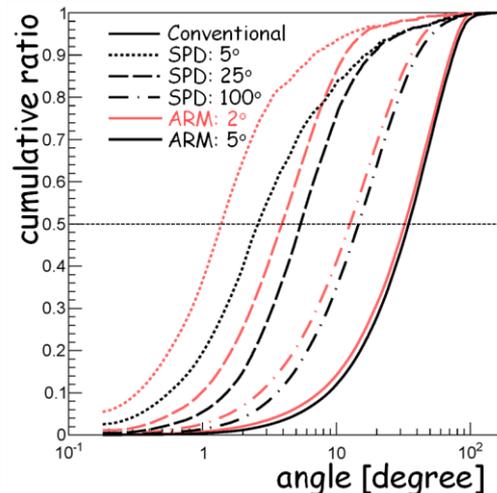


図 8 PSF の ARM & SPD 特性

法は信号の統計精度が高いときのみ有効で、またどの程度の統計まで有意に作用するかは不明であり、従来型 CC では予定の感度実現が困難となっている。一方、SPD と ARM が分かればその分解能による PSF が図 8 のように確実に決まる。従来 CC では PSF (半分の光が集中する割合) は 40 度と大きく、ARM の改善もほとんど有効ではない。現在ガンマ線天文学では約 1 度の PSF の達成は不可欠であり、20 度以下の SPD の導入で実現できる。PSF から SPD が約 20 度まで改善できれば CC より 10 倍以上感度の向上が得られることが簡単にわかる (図 9 : ARM5 度の時)。このように SPD 導入は今後の MeV ガンマ線観測の最重要課題であることが明確になった。しかし今までそのような指摘は全く無く、我々以外に SPD を導入した観測用 ETCC を開発しているグループも無い。この研究が今後の MeV ガンマ線天

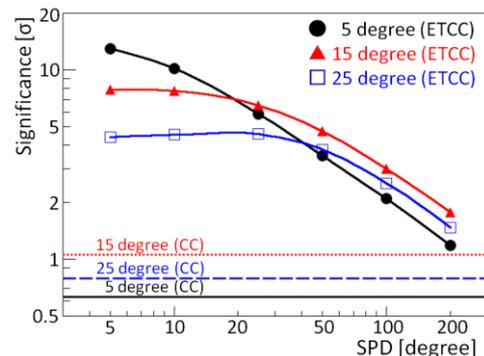


図 9 有意度の SPD 特性 (ARM 5 度)

体観測の方向を大きく変え飛躍させる転機となる(ApJに投稿中)。

(8) 成果のまとめ

①申請時に予定した成果に対して、

申請時に予定した電子飛跡改善による雑音除去、イメージング改善は、有効面積で当初の4倍、角度分解能で2倍、感度で4倍と大きな進展があった。省電力化、小型化を実現、気球用フライトモデルを完成させ、必要な真空試験も終了、JAXA 気球委員会の技術審査でも高い評価を得ている(ApJに投稿中)。ただJAXAの気球が現在JAXA側の理由により使用不能であり、JAXAの協力を得て米国気球による観測を目指している。またETCC技術の社会還元も進み、JST 先端機器開発事業で堀場製作所から世界発のガンマ線分布の定量的画像が得られる世界最高感度の環境ガンマ線画像装置が今年発売予定であり、医療応用においても京大COI事業に採用されキヤノンと共同で約7年後の実用化を目指している。

②当初予定外の成果

(4)の陽子線による宇宙放射環境模擬試験は並行して実施している陽子線がん治療用イメージングの実験から思いつき実施した。従来、衛星の個々の部品に陽子線やガンマ線を照射する等の耐放射線試験のみが可能であり、一様な中性子、ガンマ線混合場という宇宙環境と類似した放射環境での試験は世界でも行われていなかったが、今回上に述べたように強度や混合比の調整が自在な実験法を開発できた。(投稿準備中)

(5)の偏光観測も申請では述べていなかったが放射光施設での実験を行いMF値0.6という世界最高能力を実証した。今後イメージングと組み合わせることで反射望遠鏡による硬X線偏光装置と同等の性能が広視野観測で可能となり、一期にガンマ線偏光という新しい分野が開かれる可能性を示し、大きなインパクトが予想される(投稿準備中)

(7)は今回最大の成果であり、今後の世界のMeVガンマ線天文学の方向を大きく変える可能性がある。コンプトン法にSPDを精密に測定することで、PSFを厳密にCCで定義出来ることを実証。MeVガンマ線領域でも他波長と同様な1度程度のPSFを定義することで明確に感度を定義できることを示した。さらにこの結果は今後、精密なSPD測定の導入で、今後MeVガンマ線観測を大きく進展させることを示した(ApJに投稿中)。これはガンマ線イメージング全体に対応し、医療、環境モニターなど幅広いガンマ線関連科学全般に大きな進展をもたらすことが期待される。

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を付記。論文および発表件数は当研究と関係あるものみの件数、ページ制限により一部のみ記載、残りは件数のみ表示)

[雑誌論文](記載12件、他13件、合計25

件) 査読付論文の記載

- ① Y. Mizumura, T. Tanimori, H. Kubo, A. Takada, 他15名, "Development of a 30 cm-cube Electron-Tracking Compton Camera for the SMILE-II Experiment", *JINST*, **9**, C05045 (2014), doi:10.1088/1748-0221/9/05/C05045
- ② Y. Matsuoka, T. Tanimori, H. Kubo, A. Takada, 他15名, "Performance of a New Electron-Tracking Compton Camera under Intense Radiations from a Water Target irradiated with a Proton Beam", *JINST*, **10**, C01053 (2015), doi:10.1088/1748-0221/10/01/C01053
- ③ A. Takada, T. Tanimori, H. Kubo, 他19名, "Simulation of Gas Avalanche in a Micro Pixel Chamber using Garfield++", *JINST*, **8**, C10023 (2013) doi:10.1088/1748-0221/8/10/C10023
- ④ T. Sawano, T. Tanimori, H. Kubo, A. Takada, 他18名, "SMILE-II: Balloon-borne Telescope for Background-suppressed Soft Gamma-ray Imaging", *JPS Conf. Proc.*, **1**, 013099 (2014), doi:10.7566/JPSCP.1.013099
- ⑤ J. D. Parker, ..., H. Kubo (8番目), ..., A. Takada (17番目), T. Tanimori (18番目), ..., "Neutron imaging detector based on the μ PIC micro-pixel chamber", *NIM A*, **697**, 23 (2013) doi:10.1016/j.nima.2012.08.036
- ⑥ S. Kurosawa, H. Kubo, T. Tanimori et al., "Development of a new imaging device using a VUV scintillator and a gas photomultiplier with a μ -PIC and GEM", *JINST*, **7**, C03013 (2012), doi:10.1088/1748-0221/7/03/C03013
- ⑦ Ueno, H. Kubo, A. Takada, T. Tanimori et al., "Development of the Balloon Borne sub-MeV Gamma-ray Compton Camera Using an Electron-Tracking Gaseous TPC and a Scintillation Camera", *JINST*, **7**, C01088 (2012), doi:10.1088/1748-0221/7/01/C01088
- ⑧ A. Takada, H. Kubo, T. Tanimori et al., "Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Rays at Balloon Altitudes with an Electron-Tracking Compton Camera", *ApJ*, **733**, 13 (2011) doi: 10.1088/0004-637X/733/1/13
- ⑨ M. Takahashi, H. Kubo, A. Takada, T. Tanimori et al., "Development of an Electron-Tracking Compton Camera using CF₄ gas at high pressure for improved detection efficiency", *NIM A*, **628**, 150 (2011), doi:10.1016/j.nima.2010.06.305
- ⑩ S. Kurosawa, H. Kubo, A. Takada, T. Tanimori et al., "Development of an 8

- × 8 array of LaBr3(Ce) scintillator pixels for a gaseous Compton gamma-ray camera”, *NIM A*, **623**, 249 (2010) doi: 10.1016/j.nima.2010.02.211
- ⑪ A. Takada, H. Kubo, T. Tanimori et al., “The Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Rays with an Electron-Tracking Compton Camera Loaded on a Balloon”, *JPSJ*, **78**, 161 (2009), doi:10.1143/JPSJS.78SA.161
- ⑫ S. Kurosawa, H. Kubo, A. Takada, T. Tanimori et al., “Performance of 8 × 8 Pixel LaBr3:Ce and Gd2SiO5:Ce Scintillator Arrays Coupled to a 64-channel Multi-anode PMT”, *IEEE TNS*, **56**, 3779 (2009), doi:/10.1109/TNS.2009.2034657
- [学会発表] (記載 12 件他 173 件, 計 185 件)
- ① T. Tanimori, “High sensitivity observation for celestial MeV gamma rays by Electron Tracking Compton camera with a balloon borne experiment”, *TIPP 2014*, Amsterdam, Netherlands, 2014 年 6 月
- ② A. Takada, “Imaging polarization measurement above 100 keV with a wide field of view by electron tracking Compton camera”, *X-ray polarization in astrophysics*, Stockholm, Sweden, 2014 年 8 月
- ③ T. Tanimori, “Possible high sensitivity observations for both line and continuum MeV gamma rays from Super Nova and Remnants by electron tracking Compton camera”, *EUL GRB Workshop 2013*, Moscow, Russia, 2013 年 10 月
- ④ T. Tanimori, “Imaging detection for GRBs with high sensitivity and good polarimetry by Electron Tracking Compton camera”, *Long-term Workshop on Supernovae and Gamma-Ray Bursts Yukawa Institute for Theoretical Physics*, Kyoto, Japan, 2013 年 11 月
- ⑤ T. Tanimori, “Development of electron tracking Compton camera for both balloon and future satellite experiments of MeV gamma-ray astronomy”, *Int. Workshop, “Gamma-Ray Bursts”*, Moscow, Russia, 2012 年 6 月
- ⑥ T. Tanimori, “Observation of Celestial and Terrestrial MeV Gamma-Rays using Electron Tracking Compton Camera with Balloon Experiment in the North Pole”, *39th COSPAR Scientific Assembly*, Mysore, India, 2012 年 7 月
- ⑦ A. Takada, “Simulation Study for the Higher Sensitivity of an Electron-Tracking Compton Camera at over 1 MeV”, *2011 IEEE NSS/MIC/RTSD*, Valencia, Spain, 2011 年 10 月
- ⑧ T. Sawano, “SMILE: A Balloon-Borne sub-MeV/MeV Gamma-ray Compton Camera Using an Electron-Tracking Gaseous TPC and a Scintillation Camera”, *32nd ICRC*, Beijing, China, 2011 年 8 月
- ⑨ T. Tanimori, “Observational Possibility on the Early GRBs using a Gaseous Electron Tracking Compton Camera with a Wide Band of 0.1-100MeV”, *Deciphering the Ancient Universe with Gamma-ray Bursts*, Kyoto, Japan, 2010 年 4 月
- ⑩ A. Takada, “Observation of sub-MeV gamma rays with an Electron Tracking Compton Telescope using a gaseous TPC at balloon altitudes”, *38th COSPAR*, Bremen, Germany, 2010 年 7 月
- ⑪ S. Kurosawa, “Development of a Compton gamma-ray camera with LaBr3(Ce) pixellated arrays for medical imaging”, *10th International Conference on Inorganic Scintillators and their Applications*, Jeju, Korea, 2009 年 6 月
- ⑫ H. Kubo, “Compton Gamma-Ray Camera Using an Electron-Tracking Gaseous TPC and a Scintillation Camera”, *IEEE NSS/MIC 2009*, Orland, USA, 2009 年 10 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.scphys.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 無し
- (3) 連携研究者
 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
 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