

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654067

研究課題名(和文)ガンマ線イメージングによる最遠方ガンマ線バースト検出法の開拓

研究課題名(英文) Study of MeV gamma-ray imaging trigger for early GRBs using Electron Tracking Compton Camera

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) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：我々が開発したMeVガンマ線の方向を捕らえる電子飛跡検出コンプトンカメラ(ETCC)の性能を基に、可能な改善を行い $z \sim 10$ の遠方GRB検出の可能性を検討する。このETCCは気球実証実験へ向けて開発を完了、性能評価で有効面積、角度分解能とも予定以上の性能を達成、さらに宇宙環境の10倍雑音が強くても感度の劣化がないことが判明し、高い能力が判明した。さらにシミュレーションから、3気圧のCF₄をTPCのガスとして用いると0倍の検出感度改善が実現し、極域での長期間観測では10以上のGRBの検出が予想され、イメージングによる高感度GRBトリガー法の検証が可能であることが判明した。

研究成果の概要(英文)：We have developed the Electron Tracking Compton Camera with long-flight balloon Experiment for a wide sky survey for MeV gamma-ray astronomy. Performance test of the Flight Model shows the good reliability of its simulation and the robustness for intense background condition with keeping its detection efficiency. By this simulation, an easy improvement with the change of gas in the ETCC to CF₄ with 3atm will increase its effective area up to 10 times of the present ETCC, which will enable us to detect 10-20 GRBs in one month flight. This expected number of GRB is considered enough to certificate the ability of imaging trigger performance of ETCC for long duration early GRBs.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：ガンマ線バースト Population-III コンプトンカメラ 気球実験 小型衛星 宇宙初期 ガンマ線天文学

1. 研究開始当初の背景

① 宇宙最初の星の発見は人類の夢であり、銀河形成、宇宙暗黒エネルギー解明などに大きな発展をもたらす。そのために 30m 大型望遠鏡などが検討されている。一方遠方の天体は超新星爆発を用いて $z \sim 6$ までが発見されたが、近年 SWIFT 衛星が発見したガンマ線バースト (GRB) をプローブとし、大型望遠鏡で観測することで $z > 5$ 以上の天体が発見されている。現在最遠方天体 ($z=8.9$) は GRB により発見されている。このように $z \sim 10$ 程度の最遠方天体では GRB をプローブとすることが今後の次期大型望遠鏡には不可欠な手法である。一方従来 GRB 発見は、唯一コーデッドマスクを用いた広視野 X 線衛星によって地上の望遠鏡観測に十分な位置精度が得られている。しかし遠方 GRB では赤方偏移および Time dilation 効果により雑音の大きい 10keV 以下 (SWIFT では 15keV-150keV) でのトリガーが必要となる。またコーデッドマスクは図 2 に示すように視野の画像全体のシフトを検出するため原理的に視野全体からの大量の雑音が混入する。この 2 つの効果から次期 GRB 衛星候補で、最大の EXIST (SWIFT の 10 倍の検出面積) でも $z \sim 11$ が検出限界と予想される。しかし宇宙最初の星は $z \sim 20$ 以上と考えられ、このように現在 $z \sim 10$ 以上の天体の有効な検出方法が提案されていない。

2. 研究の目的

宇宙最初の星の発見は人類の最も基本的な科学探究である。これをめざし 30m 大型赤外線望遠鏡などが検討されている。一方、今最遠方天体はガンマ線バースト (GRB) をプローブとしている。次世代でも $z > 10$ 以上の宇宙初期星の発見には GRB をプローブとする方法が最右翼である。しかし GRB 発見に用いる X 線コーデッドマスクでは SWIFT 衛星の 10 倍以上の装置を用いても $z \sim 10$ 程度が検出限界であり、 $z > 10$ の GRB を捕らえる手法が無い。我々は GRB の主放射領域であるサブ MeV ガンマ線の方向を捕らえる電子飛跡検出コンプトンカメラ (ETCC: 図 1) を世界に先駆け開発し、 $z \sim 20$ の GRB からのガンマ線を検出し 0.2 度以内の精度でオンライン・アラート発信の可能性を得た。ETCC の最適化を行い $z \sim 20$ 以上の最遠方

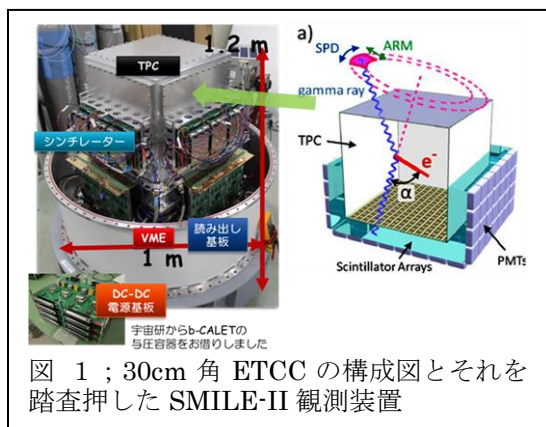


図 1 ; 30cm 角 ETCC の構成図とそれを踏査押した SMILE-II 観測装置

GRB 検出手法を提案且つ検証する。

3. 研究の方法

我々は 100keV 以上のガンマ線のコンプトン散乱電子の方向を測定出来る電子飛跡検出コンプトンカメラ (ETCC) を世界で唯一開発、すでに小型 ETCC 気球実験でサブ MeV 拡散宇宙ガンマ線測定を成功させた (SMILE-I)。サブ MeV は GRB の主放射領域であり雑音も硬 X 線領域より一桁以上低い。ETCC はガンマ線毎に数度で到来方向が決まることを生かし、完全なイメージングトリガーが行える。50cm 角程度の ETCC (有効面積 $\sim 100\text{cm}^2$) を想定することで $z \sim 20$ で 10^{52}erg 以上、つまり大半の GRB が位置精度 0.2 度以内で検出する可能性がある。この ETCC の GRB 検出能力を定量的に評価するためにシミュレーションを行う。さらに 2015 年以後に中型 ETCC の気球実験で、かに星雲を観測するための SMILE-II が完成する。この気球実験装置の性能を評価し、気球実験で GRB 探査の可能性を実際の性能を基にシミュレーションで見積、どのようなトリガーが可能かを定める。

ETCC ではガンマ線毎に方向を決定し、且つ 5 str という広視野で、GRB のような連続スペクトルに対して強力な雑音除去が可能な世界で唯一のガンマ線イメージング装置であり、我々のみが実用化に成功している。この手法を発展させることで、宇宙最初の星である Population-III の GRB の特徴である継続時間が数時間を超え、強度の弱い長時間 GRB を多数観測し、その存在を示すことで宇宙最初の星による GRB を発見することを可能にする。今後大型望遠鏡は国際共同でしか実現しない、日本が最遠方 GRB 検出可能なアラートを実現することは、日本の大変大きな貢献となる。

4. 研究成果

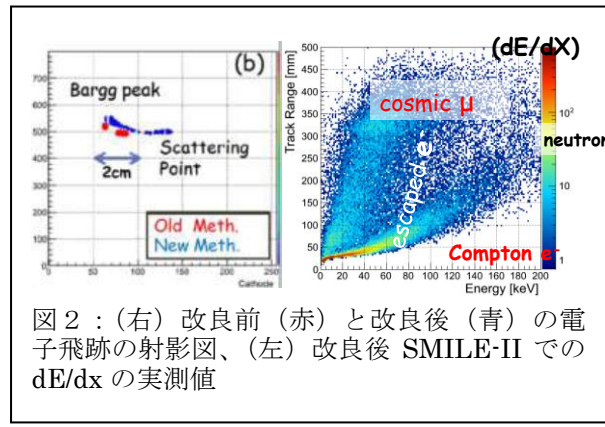


図 2 : (右) 改良前 (赤) と改良後 (青) の電子飛跡の射影図、(左) 改良後 SMILE-II での dE/dx の実測値

① SMILE-II の性能評価

次期気球用実験のために開発された SMILE-II (30cm 角 ETCC: 図 2) は SMILE-I で問題であった電子飛跡検出率の悪さ (10%) を改善、電子飛跡を検出する μ パターンガス検出器 (μ PIC) のピクセル間隔 $400\mu\text{m}$ 毎に飛跡のサンプリングに成功し、感度を 100% に改善、さらに各ピクセルのパルス幅計測から

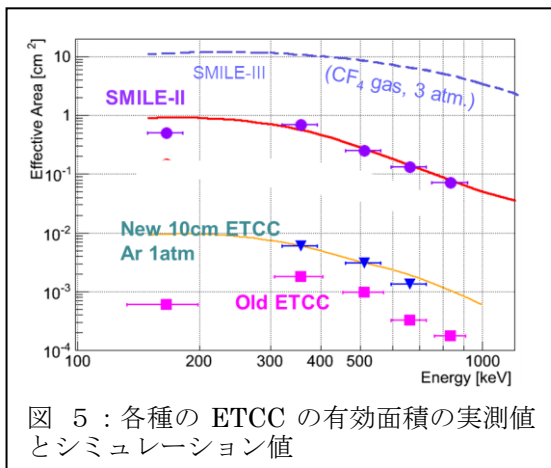


図 5 : 各種の ETCC の有効面積の実測値とシミュレーション値

電子飛跡の dE/dx の精密計測が可能となった。これらの改善で、有効面積が予以上の $1\text{cm}^2 @ 300\text{keV}$ 、角度分解能 $5\text{度} @ 662\text{keV}$ (予定の $1/2$) と大変高い性能を達成し、4 時間で、かに星雲が 5σ 以上と世界最高性能の感度が得られた。ETCC 内のコンプトン散乱電子を完全に飛跡として測定し、多重散乱や装置外に出た電子など従来のコンプトンカメラでは除去が困難な事象も簡単に除去でき、シミュレーションと実測の性能がほとんど一致 (図 3)、装置の今後の改善による性能評価が高

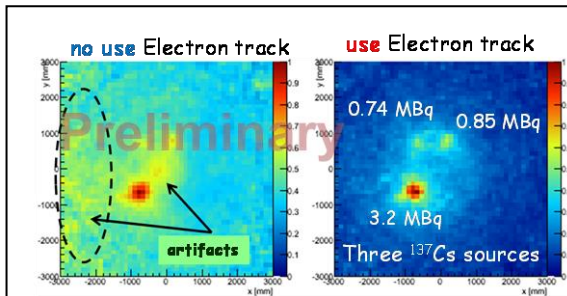


図 4 : SMILE-II による強度の異なる ^{137}Cs 線源 3 つの再構成イメージ。電子飛跡を用いない場合 (左図) と電子飛跡を用いた場合 (右図) 右には多くの偽信号 (artifacts) が現れている。

精度で行えることが実証できた。特にガス種を電子数の多い CF_4 に変え、3 気圧にするという既存の技術で可能な範囲の改良で有効面積が 10 倍増加することがわかった。さらにシンチレータ長を 2 倍にすれば 20cm^2 の有効面積が実現できる。

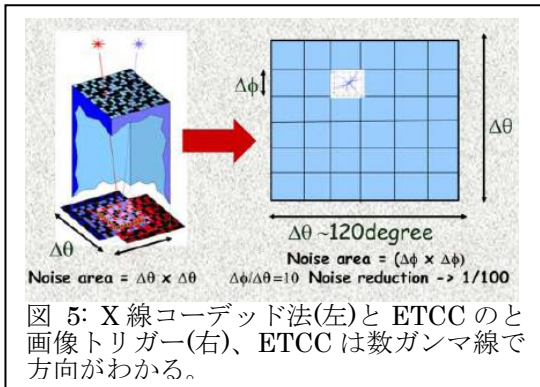
さらに上記で述べた dE/dx の雑音除去により、従来のコンプトンカメラ (CC) やコーデッドマスク法では除去が困難な中性子、さらには検出器内で 2 度散乱したような再構成出来ないガンマ線事象を完全に除去可能となる。さらに電子飛跡の方向測定から可能になるガンマ線到来方向の SPD 角が決定できることから雑音ガンマ線と信号ガンマ線の分離が格段に向上する。この図 4 の測定は信号ガ

ンマ線が雑音を上回る状態で行っても 3 倍以上の感度向上があった。実際の宇宙観測では雑音が信号を上回る、このような状況ではさらに大きな感度改善が予想される。このように SPD 角の決定は、CC 法、コーデッドマスク法どちらも大きな雑音源ある視野外からの漏れ込みガンマ線を非常に効率よく除去可能となる。

特に GRB や多くの天体からの放射は連続スペクトルとなりガンマ線エネルギーによる制限を掛けることが困難になる。従来の CC 法ではガンマ線のエネルギーで制限を掛ける必要があり連続ガンマ線の感度は悪かった。この ETCC は dE/dx や SPD 角の効果で従来の CC と同じ有効面積で 10 倍程度感度の改善 (有効面積や観測時間では 100 倍の違い) が期待できる。

さらに SMILE-II では検出感度の角度依存性を測定、感度が半分になる範囲を視野と規定すると仰角 90度 つまり上半球 6str という従来の装置と比べて数倍大きな視野が得られる。気球実験では大気吸収を考慮し 4str となるがこれでも最大規模の視野である。

数年後に予定している SMILE-II の改良した有効面積 10cm^2 の装置を用いた GRB 検出のシミュレーションを行った。場所は極域を想定して宇宙線増加を考え、中緯度観測の 5 倍の宇宙線雑音を考慮、今までに観測された GRB のスペクトルを基に計算を行った。このように仮定を抑え信頼度を高めた。表 1 にシミュレーションの結果を示す。100 秒以上の長い GRB に対しても雑音は数事象と少ない。これは図 5 に示すように ETCC はガンマ線到来方向を得ることで普通の望遠鏡と同様に画像範囲を狭くすることが出来、大幅に雑音が下がり、 10^3 秒の観測でも数 10 事象の雑音のトリガー領域 (5×5 度) に残るのみである。また典型的な 10^2 秒程度の GRB では標準的な 10^{-6}erg/cm^2 の Fluence の GRB ならば検出可能であることがわかった。極域を周回する長時間気球での観測時間 1 ヶ月では、このクラスの GRB は 10 事象程度観測が予想され、 10^{-5}erg/cm^2 の大型 GRB も数事象期待され、確実に観測されることが判明した。さらにこの 10^{-6}erg/cm^2 クラスの GRB でも 10^3 秒継続するような長時間 GRB のフラックスは 10^{-9}erg/cm^2 となり今までの観測では雑音に埋もれて検出は不可能である。しかし SMILE 実験では 100 個程度のガンマ線検出が予想され 8σ 程度の感度が得られ、今まで検出されていない強度が弱い長時間 GRB が検出される可能性が出てきた。これが複数検出されれば宇宙最初の星と考えられる POP-III に由来する GRB の可能性が高く、宇宙開闢が直接見られることが証明できる可能性も出てきた。



このようにETCCを用いたSMILE気球実験でも今後の天文学の最大の研究対象である宇宙最初の星、銀河の発見に挑む新しい観測手法となることが示すことできた。現在すでにSMILE-II帰郷観測装置は完成し、地上での性能試験をすべて終えている。早急に気球実験を行い、早期の極域観測を実現させていきたい。

GRBs detected with <i>Fermi</i> -GBM Nava et al. (2011) (10cm ²) of SMILE-II expected						
GRB	z	T90 [s]	Fluence (8-1000 keV) [erg/cm ²]	detects (0.15-1 MeV) [ph.]	bg. [ph.]	sigma
GRB090618	0.54	155	2.7x10 ⁻⁴	4.3x10 ³	7	~70
GRB090717A	-	70	4.5x10 ⁻⁷	8	3	~2
GRB090528	-	102	4.65x10 ⁻⁵	9.4x10 ²	4	~30
090117640	-	21	1.8x10 ⁻⁶	6	0.9	~2

表 :Fermi で観測された GRB を基に SMILE 気球実験での GRB 検出予想

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 5 件)

査読付論文のみ記載

25 年度

1. Y. Mizumura, T. Tanimori, H. Kubo, A. Takada, J. D. Parker, T. Mizumoto, S. Sonoda, D. Tomono, T. Sawano, K. Nakamura, Y. Matsuoka, S. Komura, S. Nakamura, M. Oda, K. Miuchi, S. Kabuki, Y. Kishimoto, S. Kurosawa, and S. Iwaki, "Development of a 30 cm-cube Electron-Tracking Compton Camera for the SMILE-II Experiment", *Journal of Instrumentation*, Vol. 9, C05045 (2014)
2. A. Takada, T. Tanimori, H. Kubo, J. D. Parker, T. Mizumoto, Y. Mizumura, S. Iwaki, T. Sawano, K. Nakamura, K. Taniue, N. Higashi, Y. Matsuoka, S. Komura, Y. Sato, S. Namamura, M. Oda, S. Sonoda, D. Tomono, K. Miuchi, S. Kabuki, Y. Kishimoto, S. Kurosawa, "Simulation of Gas Avalanche in a Micro Pixel Chamber using Garfield++" *Journal of Instrumentation*, Vol. 8, C10023 (2013)

3. T. Sawano, T. Tanimori, H. Kubo, A. Takada, J. D. Parker, T. Mizumoto, S. Sonoda, Y. Mizumura, D. Tomono, K. Nakamura, Y. Matsuoka, S. Komura, Y. Sato, S. Nakamura, K. Miuchi, S. Kabuki, Y. Kishimoto, S. Kurosawa, S. Iwaki, M. Tanaka, M. Ikeno, and T. Uchida, "SMILE-II: Balloon-borne Telescope for Background-suppressed Soft Gamma-ray Imaging", *JPS Conf. Proc.* Vol. 1, 013099 (2014)

23 年度

4. K. Ueno, T. Mizumoto, K. Hattori, N. Higashi, S. Iwaki, S. Kabuki, Y. Kishimoto, S. Komura, H. Kubo, S. Kurosawa, Y. Matsuoka, K. Miuchi, K. Nakamura, H. Nishimura, J. Parker, Y. Sato, T. Sawano, A. Takada, T. Tanimori, "Development of the Balloon-Borne sub-MeV Gamma-ray Compton Camera Using an Electron-Tracking Gaseous TPC and a Scintillation Camera", *Journal of Instrumentation*, 7 (2012) C01088

5. Atsushi Takada, Hidetoshi Kubo, Hironobu Nishimura, Kazuki Ueno, Kaori Hattori, Shigeto Kabuki, Shunsuke Kurosawa, Kentaro Miuchi, Eiichi Mizuta, Tsutomu Nagayoshi, Naoki Nonaka, Yoko Okada, Reiko Orito, Hiroyuki Sekiya, Atsushi Takeda, Toru Tanimori, "Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Rays at Balloon Altitudes with an Electron-Tracking Compton Camera", *The Astrophysical Journal* (2011) 733:13

arXiv:1103.3436

[学会発表] (計 18 件)

25 年度

1. Tanimori, T. et al. "MILE-II: Observation of Celestial and Terrestrial MeV Gamma rays at Balloon altitude using Electron Tracking Compton Camera in the North Pole", *The 21st ESA Symposium on European Rocket and Balloon Program and Related Research* 9-13 June 2013 Thun Switzerland
2. Tanimori, T., "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 "Gamma-Ray Bursts: New Missions to New Science" Extreme Universe Laboratory, Moscow State University, 7-11 Oct. 2013 Moscow Russia*
3. 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

Univ. 2013 8th Nov, 2013

4. Tanimori, T., H. Kubo, K. Miuchi, J. D. Parker, S. Komura, S. Iwaki, T. Sawano, K. Nakamura, S. Nakamura, Y. Matsuoka, T. Mizumoto, Y. Mizumura, M. Oda, S. Sonoda, A. Takada, D. Tomono, E. Turunen, and M. Yamauch, "Observation of relativistic electron and proton precipitations with Balloon Experiment around the Polar", CapInternational CAUSES-II Symposium; Nagoya Univ. Toyota Hall. Nagoya Japan November 18-22, 2013

24 年度発表

5. T.Tanimori, et al." Development of electron tracking Compton camera for both balloon and future satellite experiments for MeV gamma-ray astronomy" SPIE: Space Telescopes and Instrumentation 2012, 1-6 July 2012, Amsterdam Netherland

6. T.Tanimori et al., "Development of electron tracking Compton camera for both balloon and future satellite experiments of MeV gamma-ray astronomy", Int. Workshop "Gamma-Ray Bursts: Probing the Science, Progenitors and their Environment", 13-15 June 2012, Moscow state University, Russia

7. T.Tanimori et al.} "Observation of Celestial and Terrestrial MeV-Gamma-Rays using Electron Tracking Compton Camera with Balloon Experiment in the North Pole", 39th COSPAR Scientific Assembly, 14-22 July 2012, Mysore, India

8. 谷森達, 「北極域での気球による相対論的電子降下ガンマ線観測」平成 24 年度・名古屋大学太陽地球環境研究所共同研究集会「脈動オーロラ研究会」. 24 年 8 月 7 日、名古屋大学}

9. T.Tanimori et al." Observation of Gamma-Rays from relativistic electron precipitation with Balloon Experiment around the Northern Polar Cap, 第 36 回極域宙空圏シンポジウム, 24 年 11 月 26 日、国立極地研究所 東京

10. 谷森達, 「高感度全方位 X 線偏光測定のプロ案」, 24 年 11 月 28 日、「ガンマ線バースト研究会」、石川文教会館、金沢

11. 谷森達, 「 γ 線で宇宙と地球を見る」、24 年度宇宙ユニットシンポジウム、25 年 2 月 2 日、京大時計台大ホール、京都

12. 谷森達他, 「高感度 MeV ガンマ線観測により期待される宇宙線物理への貢献」、24 年度太陽圏シンポジウム・研究集会、25 年 3 月 1 日、名大理学部、名古屋

13. 谷森達他, 「MeV ガンマ線全天探査のための電子飛検出型コンプトンカメラ開発の進展」、第 13 回高宇連研究会、25 年 3 月 4 日、石川文教会館、金沢

23 年度

14. A. Takada, T. Tanimori, H. Kubo, K. Miuchi, S. Kabuki, J. D. Parker, Y. Kishimoto, T. Mizumoto, K. Ueno, S. Kurosawa, S. Iwaki, T. Sawano, K. Taniue, K. Nakamura, N. Higashi, Y. Matsuoka, S. Komura, Y. Sato, "Simulation Study for the Higher Sensitivity of an Electron-Tracking Compton Camera at over 1 MeV", 2011 IEEE NSS/MIC/RTSD, Valencia, Spain, 23 - 29 Oct, 2011.

15. T. Sawano, T. Tanimori, H. Kubo, K. Miuchi, S. Kabuki, J. D. Parker, A. Takada, Y. Kishimoto, T. Mizumoto, K. Ueno, S. Kurosawa, S. Iwaki, K. Taniue, K. Nakamura, N. Higashi, Y. Matsuoka, S. Komura, Y. Sato, "Improvement of an Electron-Tracking Compton Camera for Observation of the Crab Nebula at Balloon Altitudes "

16. "Development of the Balloon-Borne sub-MeV Gamma-ray Compton Camera Using an Electron-Tracking Gaseous TPC and a Scintillation Camera"

Tetsuya Mizumoto, Toru Tanimori, Hidetoshi Kubo, Kentaro Miuchi, Atsushi Takada, Joseph Parker, Satoru Iwaki, Tatsuya Sawano, Kiseki Nakamura, Yoshihiro Matsuoka, Yasushi Sato, Shotaro Komura, Shigeto Kabuki, Yuji Kishimoto, Shunsuke Kurosawa, Kazuki Ueno

The 9th International Conference on Position Sensitive Detectors (PSD9), Aberystwyth, UK, 12-16 September, 2011.

17. S. Iwaki, T. Tanimori, H. Kubo, A. Takada et al., "Development of a Low-Power Read-Out System Using CMOS ASICs for a m-PIC", 2nd International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors, Kobe, Japan, 29 Aug - 1 Sep, 2011.

18. T. Sawano, K. Hattori, N. Higashi, S. Iwaki, S. Kabuki, Y. Kishimoto, S. Komura, H. Kubo, S. Kurosawa, Y. Matsuoka, K. Miuchi, T. Mizumoto, K. Nakamura, H. Nishimura, J. Parker, Y. Sato, A. Takada, M. Takahashi, T. Tanimori, K. Taniue, K. Ueno, "SMILE-II: Balloon-borne Experiment for Astronomical Observation Using an Electron-Tracking Compton Camera Based on a Gaseous Time Projection Chamber and a Position Sensitive Scintillation Camera", 2nd International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors, Kobe, Japan, 29 Aug - 1 Sep, 2011.

[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

()

研究者番号：

(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