

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610042

研究課題名(和文) 小型衛星用広視野X線偏光装置の開発と系統的GRB偏光測定

研究課題名(英文) Development of a wide field polarimeter for hard X-rays in small satellite

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：ガンマ線バーストは宇宙最大の爆発現象であるがその爆発機構はまだ不明である。その解明に不可欠なのがX線ガンマ線偏光度であり磁場構造や幾何学情報を与えてくれる。しかしその測定は困難であり、現在、数例の精度の不十分な観測結果のみが報告されている。我々が開発した電子飛跡検出コンプトンカメラは軟ガンマ線領域で広視野を有しさらにイメージングによる雑音除去が可能であり、理想的な偏光観測性能が予想される。実際に放射光で偏光実験を実施、M値が0.6と世界最高性能を達成、さらに弱線源によるイメージングによる偏光測定にも成功、世界で初めて広視野かつイメージングが可能なガンマ線偏光測定装置の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have developed Electron Tracking Compton Camera for exploring MeV gamma astronomy, which have a capability of high quality imaging with a wide Field of View of 4str and strong background rejection. Thus, ETCC is considered to be a good detector for the detection of GRBs. Also, since Compton scattering keeps a polarization of gamma very well, ETCC would be a good polarization-measured instrument having an imaging ability. After checking the good modulation factor of ETCC for above 100 keV by simulation, we have examined the modulation factor of ETCC at Synchrotron Facility in Japan and obtained a good modulation factor of ~0.6 at 130keV which is one of best results for hard X-ray polarization detector. Furthermore, we succeeded to measure the polarization using a weak RI source by applying an imaging cut for the background suppression. This is a first result in the world of imaging polarimeter for hard X-rays and nuclear gammas.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：硬X線偏光測定 ガンマ線バースト 電子飛跡検出型コンプトンカメラ 気球実験 コンプトン散乱 ガスTPC 光電効果 イメージング

### 1. 研究開始当初の背景

GRB の爆発機構はほとんど解明されていない。粒子加速には磁場が強く関与することが予想され、磁場の存在と GRB 放射の何らかの関係が見いだせば爆発機構解明の大きな手掛かりとなる。磁場の有無を直接探査できる観測が X・ガンマ線偏光の測定である。しかし現在、宇宙 X 線偏光測定はシンチレーターによるトムソン散乱偏光測定が超小型衛星で行われている程度であり高精度観測の計画はほとんど無い。偏光の可能性を示すデータは報告されたが精度が不十分な状態である。このトムソン散乱偏光装置は効率が悪くスペクトルも観測出来ない、視野も 1 sr が限界である。一方エネルギー測定が可能なガス光電効果放出電子の測定装置が X 線望遠鏡用として開発されている。しかし現在は数 cm 角の小型装置のみで、広視野用の大型ガス偏光観測装置の提案は無い。

我々はマイクパターンガス検出器では世界をリードしてきた。大型化が可能な Micro Pixel Gas Counter ( $\mu$  PIC) を開発、回路数が少ないストリップ読出でサブミリ精度の 3 次元粒子飛跡検出技術を確認 (Time Projection Chamber:TPC)、それを用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) を完成し (図 1)、MeV ガンマ線天文学を開拓するため気球実験を行っている (SMILE-II)。近年、再構成法の改善で飛跡検出効率が大きく改善、すでに 10cm 角 TPC で 8-30keV の X 線電子飛跡検出率を 10 倍改善した (図 1 の飛跡は実際に測定された飛跡である)。この TPC 技術を用いれば約 20cm 角の  $2\pi$  視野で検出効率が 30-100% の全視野型高感度 X 線偏光装置が早期に実現できる。超小型衛星を用いて 1 年 100 個の GRB を数% の精度で偏光度測定が出来る画期的な装置となる。当然、多数の他の突発天体の測定出来る

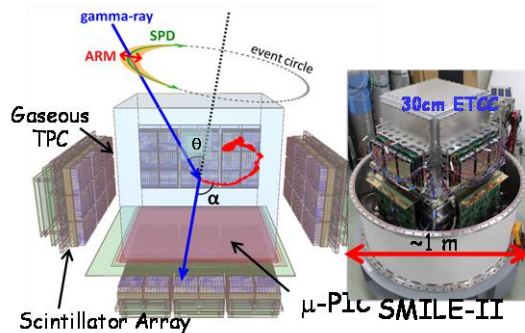


図 1 : (左)ETCC 概念図、右に到来ガンマ線と ARM および SPD の関係を表示、(右) SMILE-II ETCC 気球観測装置の写真

### 2. 研究の目的

X 線偏光測定は今まで決定的な観測手段が無く、そのため観測数が極端に少なく Crab の低 X 線領域での測定が唯一確かな結果である。しかし、近年、GRB や AGN など巨大な高エネルギー加速天体の加速機構解明に

は偏光データが重要であることが指摘され、その必要性は高まっている。しかし、まだ高感度の確定した観測手法が無く、観測例は数例しかない。この申請は GRB、AGN など突発天体を数% の偏光測定精度で年間 100 天体程度観測し、偏光観測を飛躍的に進歩させる可能性を探る。すでに気球開発で小型低消費電力回路等の開発が実際に進展しており、実現が早い気球または超小型衛星に搭載可能な装置の実現可能性を示す。この申請の装置は 5 年程度で実際に観測も可能な規模である点が特色である。

具体的には、大型ガス検出器による X 線偏光測定を実現するため、既存の小型 TPC による X 線性能評価試験を行い、5-30KeV での X 線の飛跡検出能力を評価する。気球用新型回路は低雑音であり閾値 1 keV を充分達成できる。また研究室にある X 線発生装置 (8、16keV) によりトムソン散乱で偏光 X 線を作り、偏光感度(モジュレーション値: M)を測定し、改善していく。そのデータを基にシミュレーションを行い、10x10x10cm 程度の超小型衛星用装置の概念設計を行う。このような新型の GRB 偏光装置の研究から、最も早期に高精度な GRB 偏光観測の可能性を探る。

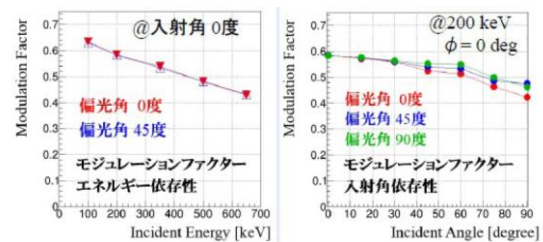


図 2 : SMILE-II の偏光に対するモジュレーション値 (M 値) のシミュレーション結果、左はガンマ線エネルギー、右は入射方向に対する依存性。

### 3. 研究の方法

まず気球開発用小型 TPC の X 線性能評価試験を行う。まず 10KeV 以下での X 線検出の飛跡検出能力を評価する、気球用新型回路は低雑音であり、予定閾値 1 keV を充分達成できる可能性があり、偏光に必要な飛跡がどのエネルギーまでとれるか評価する。X 線発生装置によりトムソン散乱で偏光 X 線を作り、8 と 16keV での偏光感度(モジュレーション値: M)を測定し、改善していく。得に検出効率を上げるため Ar ガスの圧力と偏光測定能力の関係を調べ、最適な圧力、偏光感度を求める。次にデータを基にシミュレーションを行い、超小型衛星用装置の概念設計を行う。また大型装置の搭載が可能で安価な気球実験での GRB 偏光測定の可能性も検討する。

### 4. 研究成果

この申請では、小型衛星搭載可能な程度の規模の装置 (10 cm 角程度) でも、X 線の吸収係数が大きく、高統計な偏光計測が 5-30keV の X 線領域で光電効果電子の散乱方向測定で実

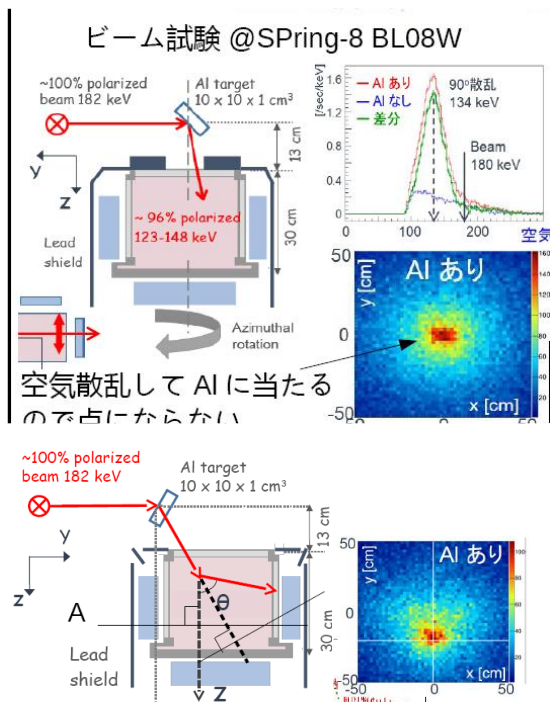


図3：上はSP-8でのセットアップ図と入射ガンマ線エネルギー分布とそのイメージ、下は45度入射角度を変えたセットアップとそのイメージ。明らかに方向（場所）が移動している。

現できると考えていた。しかし光電効果電子を用いた場合、偏光度測定の精度を決める Modulation 値 (M値) がこのエネルギー領域で、散乱効果が小さいA rを用いた場合でもガス中の電子の拡散効果がかかなり大きく、0.2-0.3 と小さく抑えられることがシミュレーションにより明らかになった。そのため系統誤差の小さい信頼性の高い偏光測定の可能性が低いことが分かってきた。

一方100keV以上のETCCが測定しようとしている軟ガンマ線領域でコンプトン散乱を用いた偏光測定を行った場合、このM値は0.5以上が期待できることが図2に示すようにシミュレーションで明らかになった。100keV以上では宇宙背景放射が急激に減少し、高いS/Nが得られる可能性があり、さらに高い信頼度の偏光測定が可能となる。ただしこの場合、ガンマ線のフラックスがX線領域より桁少なく30x30x30cm程度のガス体積が最低限必要となる。この性能は気球用の電子飛跡検出コンプトンカメラ (ETCC) の性能に近く、さらにETCCは100keV以上で高い雑音除去と6strという広視野を持ち、イメージングが可能となり、今なお実現来ていない広視野かつイメージングが可能な偏光検出器実現の、可能性があることがわかった。

これはGRB偏光検出では最適な装置である。特にETCCは内が立方体という単純な構造であり大きなM値が予想される。すでに30cm角大型ETCCが気球実験用にできている。GRB探査に必要な検出予想個数も現在、米国を中心に実施されている極域周回気球実験を行えば30日の観測で20個以上のGRB観測が可

能なことが判明した。そのため短い準備期間で高精度GRB偏光観測が確実に実行できる手段であることがわかり、このETCCでの気球実験のGRB偏光測定の可能性を探ることにこの申請の目的を変更した。

実際にこの申請では放射光による精密な気球実験用ETCCのM値測定、さらに雑音が実際の観測に近い弱線源を用いた実験による偏光観測を実施し、以下に示すように十分な能力が実証された。

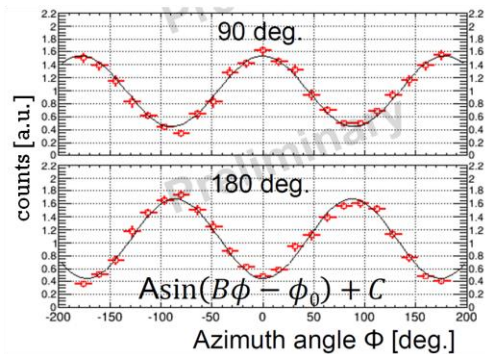


図4：上は真上からの入射でのモジュレーションカーブ、M値は0.6を得た。下は45度斜め入射でのモジュレーション、M値は0.5以上を得ている。

25-26年度

シミュレーションで得られたM値0.5以上(100-500keV)を実証するためにSP8放射光施設の140keV硬X線ビームを90度散乱させ100%偏光光を作り30cm角ETCCに入射、M値の計測実験を26年1月に行った(図3)。このような大型装置で、シミュレーションの予想通りのM値を得ることはかなり困難と予想していたがETCCの雑音除去能力により実験値も0.6と、シミュレーションと大変一致する結果を得た(図4)。これは装置の理解が大変進んでいることを示し、ETCCの持つ高い偏光測定を実証した。この実験では実際の宇宙観測に近い状態での偏光能力を評価するため、多くの偏光実験で行われるビームを絞り装置の一部のみに照射されることは行わず装置全面に広く照射するようにし、イメージング能力で雑音を落とさせることを試み、それにも成功した。またガンマ線入射方向も真上(90度)以外に、斜め45度と大きく変化した測定も実施。イメージングによりガンマ線照射源の方向を自分のデータから求め、偏光を求めた。この場合もM値0.6と予想通りの高い数値を得ることに成功した(図3, 4

下図)。このように広視野かつイメージング

Polarization sensitivity :  $3\sigma$  MDP  
 Crab nebula ~ 15 %, Cyg X-1 ~ 20 % (half-day flight)  
 GRBs ~ 6% for  $10^{-6}$  erg/cm<sup>2</sup>s (2-3 GRBs/month)  
 ~ 20% for  $10^{-7}$  erg/cm<sup>2</sup>s (~10 GRBs/month)

表1 : SMILE 気球実験で予想される偏光測定のパフォーマンス、GRBでは10の6乗秒の観測時間(2週間)を想定した値である。

が可能な世界初の軟ガンマ線偏光装置の開発に成功した。

このM値をもとに極域での ETCC 気球実験を実施した場合表1にあるように一か月の飛行時間で5個程度の強いGRBに対しては6%の偏光まで観測可能となり20個程度の中強度GRBでは20%程度までの偏光測定が可能となることがわかった。

現在、計画されている小型衛星を用いた観測装置では、年に1つのGRBに対して20%程度の偏光測定が可能な程度の感度しか無いことを考えると、この性能がGRBの磁場の存在の有無を確認するには十分な精度と統計があることが分かる。気球極域周回観測は費用面でも超小型衛星よりさらに安価で大型科研費で実現可能な規模であり、この申請で目指した成果が確実に可能であることが判明した。

26—27 年度

さらに偏光測定の精度を高めるため高い雑音環境での偏光測定を模擬する実験として、実験室で1 MBq の Ba (350keV) の弱線源を用い、そのガンマ線を鉛でコンプトン散乱させ90度方向の50%偏光度を有する180keVガンマ線を作偏光測定を実施した(図5)。このように散乱後の非常に強度が弱いX線を用い、しかもビームも大きく広がり実際の宇宙環境のS/Nに近い状態で偏光測定を行った。このような雑音の強い環境での測定実験は世界でも前例がないが、宇宙での性能実証には重要であり先駆的な実験である。まだ最終結果は出ていないが大まかに放射光実験と同じM値が得られているようなデータを得ている(図6)。現在、繊細な解析とシミュレーションによる比較を行っている。

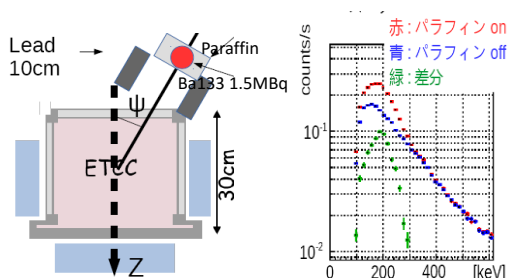


図5 : 左は Ba(350keV)を用いてパラフィンでコンプトン散乱させ偏光ガンマ線を作った実験室での偏光実験のセットアップ、右はその時のエネルギースペクトルである。Sp8 実験に比べ S/N が 10 倍程度悪い状態を実現している。

この実験ではビーム入射角が大変広がり、平行光である天体ガンマ線よりさらに困難な偏光観測から、かなりのM値が得られたことは我々の装置の理解が正しいことを示し、放射光実験で得られたGRB感度の信頼性の高さを示している。このようにイメージング能力を用いた強力な雑音除去能力により、短時間の気球実験に於いても小型衛星の今後の偏光観測を凌駕する結果が得られる可能性が高いことを示すことができた。これは当初全く予想していなかった成果である。

SP8、およびこの線源を用いた偏光観測は28年中には結果をまとめ論文として投稿する。

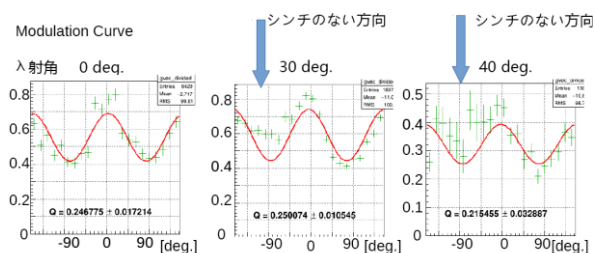


図6 : 実験室で Ba を用いた高雑音下での偏光実験のモジュレーションカーブの途中結果。モジュレーションは明らかに見えている。現在、シミュレーションと比較してM値を求めている。入射ガンマ線の偏光度、入射角度の変化などすべてが含まれているのでM値は低そうに見えるが、このような効果を取り除く必要がありシミュレーションでの検討が不可欠である。結果は28年度初旬には得られる予定である。

## 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)

27 年度

1. T. Mizumoto, T. Tanimori et al., "Performance of a New Electron-Tracking Compton Camera under Intense Radiations from a Water Target irradiated with a Proton Beam" JINST, 10, C06003 (2015)
2. T. Tanimori et al., "An Electron Tracking Compton Telescope for a Survey of the Deep Universe by MeV gamma-rays", ApJ. 810, 28 (2015)
3. T. Mizumoto, T. Tanimori et al. "New readout and data-acquisition system in an electron-tracking Compton camera for MeV gamma-ray astronomy (SMILE-II)", NIM-A, 800 40, (2015)

26 年度

4. 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
5. 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”, *JISNT*, **10**, C01053(2015), doi:10.1088/1748-0221/10/01/C01053
  6. K. Nakamura, K. Miuchi, T. Tanimori, H. Kubo, A. Takada, 他 11 名, “Direction-sensitive dark matter search with gaseous tracking detector NEWAGE-0.3b’ ”, *PTEP*, 043F01 (2015), doi:10.1093/ptep/ptv041  
24 年度
  7. 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
  8. 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
- [学会発表] (計 13 件)  
27 年度
1. S. Komura, T. Tanimori et al., “Balloon-borne experiment for deep sky survey of MeV gamma rays using an Electron-Tracking Compton Camera”, 34th International Cosmic Ray Conference, Hague, Netherlands, 2015 年 8 月
  2. T. Mizumoto, T. Tanimori et al., “An Observational Key to SN Ia Progenitors: MeV All-Sky Survey”, 14th Marcel Grossmann Meeting (MG14), Roma, Italy, 2015 年 7 月
  3. T. Tanimori et al., “Deep Sky Survey of MeV gamma rays due to advanced Electron Tracking Compton Camera (ETCC) with balloon experiment” 13<sup>th</sup> Pisa Meeting on Advanced Detectors, Erba, Italy, 2015 年 5 月  
26 年度
  4. T. Tanimori et al., “High sensitivity observation for celestial MeV gamma rays by Electron Tracking Compton camera with a balloon borne experiment”, Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014•Amsterdam, the Netherlands•2014 年 7 月
  5. T. Tanimori et al., “Possibility of deep all sky survey of MeV gamma rays due to Electron Tracking Compton Camera (ETCC)”, A Synergistic View of the High Energy Sky (10th INTEGRAL) Workshop, Annapolis, MD, USA • 2014 年 9 月
  6. A. Takada, T. Tanimori et al.” Imaging polarization measurement above 100 keV with a wide field of view by electron tracking Compton camera”, **Int. Workshop** “X-ray polarization in astrophysics - a window about to open?”, Stockholm, Sweden, 2014 年 8 月
  7. T. Tanimori et al. “Observation of Relativistic Electron Precipitation using Imaging gamma Camera with balloon experiment around the polar region”, Asia Oceanian Geoscience Society, Sapporo Japan, 2014 年 7 月
  8. 谷森達 “Sub-MeV/MeV ガンマ線観測による Ia 型超新星の爆発過程解明手段”, 日本天文学会 2015 年春季年会・大阪大学・2015 年 3 月
  9. 谷森達 “ガスコンプトンカメラと長時間気球実験”, 2020 年代の高エネルギー宇宙物理学: X 線・ガンマ線天文学の展望・ISAS/JAXA・2014 年 8 月 25 年度
  10. T. Tanimori 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 Thun Switzerland, 2013 年 6 月
  11. 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 “Gamma-Ray Bursts: New Missions to New Science” Extreme Universe Laboratory, Moscow State University, Moscow Russia, 2013 年 10 月
  12. 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 年 11 月
  13. R. Tanimori et al., “Observation of relativistic electron and proton precipitations with Balloon Experiment around the Polar region”, CAWSES-II Symposium; Nagoya Univ. Toyota Hall. Nagoya Japan 2013 年 11 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

### (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