

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287059

研究課題名(和文) X線ガンマ線偏光をプローブとした、系内コンパクト天体における粒子加速の探査

研究課題名(英文) Study of particle acceleration in Galactic compact objects by observing X-ray and gamma-ray polarization

研究代表者

水野 恒史 (Mizuno, Tsunefumi)

広島大学・宇宙科学センター・准教授

研究者番号：20403579

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：系内コンパクト天体における粒子加速の探査のため、X線偏光計(PoGOLite気球実験)を用いた天体観測、ガンマ線偏光観測装置(「ひとみ」衛星搭載SGD検出器)の開発、ピクセル型光検出器(PPD)を用いた将来装置の基礎開発、現行のX線衛星を用いたコンパクト天体の観測を進めた。PoGOLite気球実験は「かに星雲」「はくちょう座X-1」を観測し、SGDは視野を絞るコリメータ装置の開発と検出器のプロトタイプを用いた偏光ビーム試験を行い、PPDを用いた将来装置の基礎開発ではエネルギー閾値を評価し、現行のX線衛星を用いた研究ではガンマ線天体の観測を行った。いずれの成果も原著論文としてとりまとめた。

研究成果の概要(英文)：In order to study the particle acceleration in Galactic compact objects, we carried out (1) observations using balloon-borne X-ray polarimeter PoGOLite, (2) development of the SGD on board Hitomi X-ray satellite, (3) basic research of a detector system using PPD, and (4) observations of Galactic compact objects with conventional X-ray satellites. In (1), we observed Crab and Cygnus X-1, and in (2) we developed fine-collimator and carried out a beam test of the prototype at a synchrotron facility, and in (3) we evaluated energy threshold of the system, and in (4) we performed X-ray follow-up observations of Galactic gamma-ray sources. Those results were published in journal articles.

研究分野：X線ガンマ線宇宙物理

キーワード：宇宙物理(実験) X線ガンマ線天文学 偏光 粒子加速 コンパクト天体

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー天体からの電磁波放射のうち、電場・磁場ベクトルの振動方向を測る偏光観測は、対象の幾何学的構造や放射機構を知る強力な手段である。可視光などに比べ X 線ガンマ線領域では偏光観測の例数が乏しかったが、本研究課題で扱う PoGOLite 気球実験や「ひとみ」衛星搭載 SGD 検出器など、高い偏光感度を持った装置の開発が近年進んできており、特に信号強度が強く偏光度も高いと予想される系内コンパクト天体の偏光観測が大きく進展すると期待されていた。

2. 研究の目的

天体から放射される X 線ガンマ線の振動方向を測る偏光観測は、撮像がおよそ不可能な系の幾何学構造を知る強力な手段であり、空間分解できないジオメトリに強い制限を付け、ひいては粒子加速モデルを検証することができる。対象天体が高エネルギー放射を起こす素仮定は、シンクロトロン放射（パルサーまたはパルサー星雲）とコンプトン散乱（ブラックホール周りの降着円盤）に大別される。そこで X 線ガンマ線偏光に感度を持つ検出器で系内コンパクト天体（パルサー、パルサー星雲、ブラックホール連星）の偏光観測を行い、これらの系の磁場や降着円盤の構造を制限し、粒子加速現象を探索することを目指す。またより高い感度・より広いエネルギー帯に感度を持つ検出器の実現のため、観測装置の開発を行う。平行して、観測対象を増やし粒子加速現象をより理解するため、現行の X 線衛星を用いたコンパクト天体の観測も進める。

3. 研究の方法

本研究の具体的な方法は、以下の 4 つに大別される。

(1) PoGOLite 気球実験による、代表的な系内コンパクト天体である「かにパルサー・かに星雲」および「はくちょう座 X-1」の硬 X 線偏光観測

(2) ガンマ線に高い偏光感度を有する「ひとみ」衛星搭載 SGD 検出器の開発

(3) 将来の硬 X 線偏光観測への応用を目指した、ピクセル型光検出器 (PPD) を用いた検出器システムの基礎実験

(4) 現行の X 線衛星を用いた、系内コンパクト天体の観測的研究

このうち、(1)は 2013 年にフライトを行い、約 3 日間の観測を行い、また装置を改良したうえで 2016 年に約 1 週間の観測をした。(2)は偏光観測に重要な低エネルギー側で視野を絞るコリメータ装置の開発と、主検出器のプロトタイプを用いた偏光ビーム試験を行った。(3)は読み出し方法を工夫するなどして性能を向上させ、エネルギー・閾値を評価した。(4)は「はくちょう座 X」にある 2 つのガンマ線天体の X 線フォローアップ観測を行った。

4. 研究成果

(1)では 2013 年に、電気システムのトラブルのため 3 日間という短い期間ではあったが「かに星雲」を偏光観測し、硬 X 線領域 (20-120 keV) で初めて有意な上限をつけることに成功した (論文 [8] および 図 1)。偏光度はシンクロトロン放射の理論的上限 (約 70%) よりは有意に低かった。偏光方位角のベストフィット値はパルサーの回転軸方向と誤差の範囲で一致しており、このことから硬 X 線の放射領域候補としてパルサー周りのトーラスなどがあげられる。またこのフライトの経験を基に装置の改良を行い、2016 年に「かにパルサー・かに星雲」「はくちょう座 X-1」の約 1 週間の観測を行い、両天体について、初の硬 X 線偏光の検出または厳しい上限を付けることをめざし、データ解析を進めている。

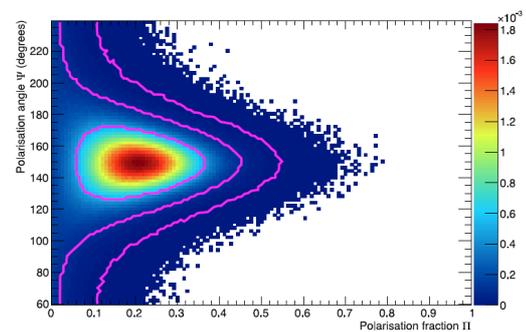


図 1 PoGOLite の 2013 年の観測で得られた、「かに星雲」の偏光度と偏光方位角の確率分布 (論文 [8] より)。ベストフィット値は偏光度 18.4%、偏光方位角 149.2 度 (図中で最も色の濃い部分) であり、1 シグマ、2 シグマ、3 シグマの信頼区間を紫の線で示してある。

(2)は SGD の偏光観測で重要となる、100 keV 程度のエネルギー領域で視野を絞るための金属コリメータの開発を進め、可視光と X 線を用いた角度応答の評価方法を確立し、また打ち上げ時の振動に耐え軌道上で所定の性能を発揮できる支持構造を開発した。最終的に衛星搭載品を製造し、全数の受け入れ試験・キャリブレーション・SGD 本体への組み込み・アライメント調整を行い、論文 ([10]) としてまとめた。また SGD 主検出器のプロトタイプを用いた偏光ビーム試験では、国内の大規模放射光施設 SPring-8 で 122 keV およびおおよび 197 keV という二つのエネルギーで詳細な偏光応答を取得し、3% 程度の高い精度で偏光を測定できることを確認し (論文 [2] および 図 [2])、装置開発・性能評価の両面で十分な準備をすませて、衛星の打ち上げ (2016 年 2 月) に臨むことができた。

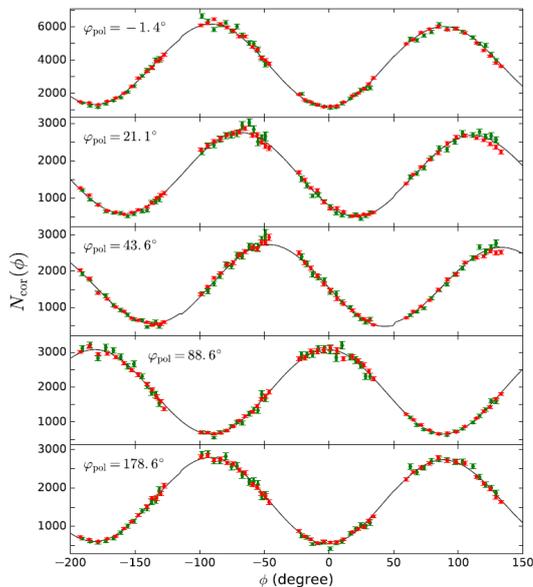


図2 SGD プロトタイプ検出器に 122 keV の偏光ビームを照射した際の角度応答(論文[2]より)。装置を回すことで疑似的に入射偏光方位角を変えて偏光応答を取得した。各方位角に対するモジュレーション(図の各パネルでの振幅の大きさ)は 3%程度で揃っており、これは偏光を精度よく測定できることを意味する。

(3)では、PPD は小型で取扱いに優れる・量子効率が高い・磁場の影響を受けにくいなどの利点を有する一方、センサー由来のノイズが大きいことが実用化に向け克服すべき課題である。そこで回路の読み出し速度を 50 ns 程度と早くするなどの工夫を施し、また新型のセンサーを用いてノイズを削減して性能を向上させ、最終目標に近い 5 keV 程度のエネルギー閾値を達成した(論文[4])。目標である 3 keV 程度の実現に向けたさらなる性能向上の取り組みも行っている。

(4)では大きく広がったガンマ線天体に着目し、広がった放射に感度の高い「すざく」衛星を主体とした X 線フォローアップ観測をすすめた。Fermi 衛星により GeV 領域で発見された「Cygnus cocoon」の観測では有意な X 線放射は検出されず、このことから X 線放射に強い制限をつけた。GeV 放射の起源は陽子シナリオ・電子シナリオに大別されるが、X 線観測により後者の場合に、加速された電子のエネルギースペクトルを議論することが可能であり、論文([9])としてまとめた。また TeV ガンマ線放射「VER J2019+368」の観測では既知のパルサーの周りに大きく広がった X 線放射(パルサー星雲)を検出し、TeV ガンマ線強度との比較から X 線パルサー星雲が TeV ガンマ線の主要な対応天体であることを示し、また X 線スペクトルの詳細な空間分布を調べることで、加速された電子のスペク

トルや伝播を議論した(論文[1])。

本研究全体についてまとめると、PoGOLite 気球実験は 2013 年のフライトが電気系統の不具合のため短時間の観測になったこと、「ひとみ」衛星の軌道上トラブルのため SGD の科学観測が短期間で終わったことにより、当初予定していた「10 前後のターゲットの系統的偏光観測」は残念ながら実現できなかった。しかしながら本科学研究費を活用することで、項目(1)-(4)の全てにわたり成果を上げ、都合 14 編(うち査読付き論文 6 編)の原著論文にまとめあげ、そのうち 5 編は研究代表者が主著者または執筆責任者を務めたもの、あるいは直接指導した大学院生が主著者を務めたものである(うち査読付き論文 4 編)。改めて本科学研究費のサポートに感謝したい。

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)

印は本科学研究費代表者が主著者または執筆責任者を務めたもの、あるいは直接指導した大学院生が主著者となったもの

(雑誌論文)(計 14 件)

[1] T. Mizuno, N. Tanaka, H. Takahashi, J. Katsuta, H. Hayashi, R. Yamazaki "X-ray Studies of the Extended TeV Gamma-Ray Source VER J2019+368," ApJ accepted (査読有), available as (<https://arxiv.org/abs/1705.02733>)

[2] J. Katuta, I. Edahiro, T. Mizuno, Y. Fukazawa, H. Tajima, H. Takahashi et al. (計 20 名) "Study of the polarimetric performance of a Si/CdTe semiconductor Compton camera for the Hitomi satellite," NIMA 840, 51 (2016) (査読有), DOI: 10.1016/j.nima.2016.09.057

[3] M. Ohno, H. Takahashi, T. Mizuno, Y. Fukazawa, H. Tajima et al. (計 47 名) "Development and verification of signal processing system of avalanche photo diode for the active shields onboard ASTRO-H," NIMA 831, 410 (2016) (査読有) DOI: 10.1016/j.nima.2016.04.063

[4] T. Nakaoka, T. Mizuno, H. Takahashi, Y. Fukazawa "Study of a detector system for high-energy astrophysical objects using a combination of plastic scintillator and MPPC," NIMA 831, 400 (2016) (査読有) DOI: 10.1016/j.nima.2016.03.063

[5] K. Hayashida, T. Mizuno, H. Takahashi et al. (計 16 名) "Hard x-ray imaging polarimeter for Polaris,"

Proc. SPIE 9905, 99051A (2016) (査読無)
DOI: 10.1117/12.2232472

[6] S. Watanabe, H. Tajima, Y. Fukazawa, T. Enoto, T. Mizuno, H. Takahashi et al. (計 42 名) "The soft gamma-ray detector (SGD) onboard ASTRO-H,"
Proc. SPIE 9905, 990513 (2016) (査読無)
DOI: 10.1117/12.2231962

[7] T. Takahashi, T. Enoto, Y. Fukazawa, T. Mizuno, H. Tajima, H. Takahashi et al. (計 269 名) "The ASTRO-H (Hitomi) x-ray astronomy satellite,"
Proc. SPIE 9905, 99050U (2016) (査読無)
DOI: 10.1117/12.2232379

[8] M. Chauvin, Y. Fukazawa, T. Mizuno, H. Tajima, H. Takahashi et al. (計 22 名) "Observation of polarized hard X-ray emission from the Crab by the PoGOLite Pathfinder,"
MNRAS 456L, 84 (2016) (査読有)
DOI: 10.1093/mnras/1/slv177

[9] T. Mizuno, T. Tanabe, H. Takahashi, K. Hayashi, R. Yamazaki, I. Grenier, L. Tibaldo "Suzaku Observation of the Fermi Cygnus Cocoon: The Search for a Signature of Young Cosmic-Ray Electrons,"
ApJ 803, 74 (2015) (査読有)
DOI: 10.1088/0004-637X/803/2/74

[10] T. Mizuno, Y. Fukazawa, H. Tajima et al. (計 29 名) "Development and calibration of fine collimators for the ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector,"
Proc. SPIE 9144, 91445F (2014) (査読無)
DOI: 10.1117/12.2054649

[11] H. Takahashi, M. Chauvin, Y. Fukazawa, M. Jackson, T. Kamae, T. Kawano, M. Kiss, M. Kole, V. Mikhalev, T. Mizuno, E. Moretti, M. Pearce, S. Rydstrom "Data acquisition system and ground calibration of polarized gamma-ray observer (PoGOLite),"
Proc. SPIE 9144, 91444I (2014) (査読無)
DOI: 10.1117/12.2056723

[12] Y. Fukazawa, H. Tajima, T. Mizuno, H. Takahashi et al. (計 36 名) "Soft gamma-ray detector (SGD) onboard the ASTRO-H mission,"
Proc. SPIE 9144, 91442C (2014) (査読無)
DOI: 10.1117/12.2055292

[13] T. Takahashi, T. Enoto, Y. Fukazawa, T. Mizuno, T. Tajima, H. Takahashi et al. (計 248 名) "The ASTRO-H X-ray astronomy satellite,"

Proc. SPIE 9144, 914425 (2014) (査読無)
DOI:10.1117/12.2055681

[14] K. Hayashida, T. Mizuno, H. Takahashi et al. (計 27 名) "X-ray gamma-ray polarimetry small satellite PolariS,"
Proc. SPIE 9144, 91440K (2014) (査読無)
DOI: 10.1117/12.2056685

〔学会発表〕(計 25 件)

[1] 大橋礼恵ほか、「硬 X 線偏光検出器 PoGOLite の読み出し回路の改良 (3)」(ポスター発表)、日本天文学会春の年会、2017 年 3 月 15-17 日、九州大学(福岡県・福岡市)

[2] K. Torigoe et al. "Study of performance of a plastic scintillator + MPPC system in low energy X-ray,"(ポスター発表) 2nd Core-U International Conference: Cosmic Polarimetry from Micro to Macro Scales, 2017 Feb. 17-18, 広島大学(広島県・東広島市)

[3] 高橋弘充ほか「硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球実験:2016 年の再フライト」日本物理学会秋の年会、2016 年 9 月 24 日、宮崎大学(宮崎県・宮崎市)

[4] 水野恒史ほか「「すざく」による広がった TeV ガンマ線放射 VER J2019+368 の X 線観測 (3)」日本物理学会秋の年会、2016 年 9 月 23 日、宮崎大学(宮崎県・宮崎市)

[5] 高橋弘充ほか「硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球実験:2016 年の再フライト」日本天文学会秋の年会、2016 年 9 月 16 日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

[6] 大橋礼恵ほか「硬 X 線偏光検出器 PoGOLite の読み出し回路の改良 (2)」日本天文学会秋の年会、2016 年 9 月 16 日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

[7] 田中慎之ほか「広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368 の X 線観測」日本天文学会秋の年会、2016 年 9 月 14 日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

[8] 水野恒史ほか「「すざく」による広がった TeV ガンマ線放射 VER J2019+368 の X 線観測 (2)」2016 年 3 月 21 日、日本物理学会春の年会、東北学院大学(宮城県・仙台市)

[9] 枝廣育実ほか「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器(SGD)コンプトンカメラのビーム試験」2016 年 3 月 16 日、日本天文学会春の年会、首都大学東京(東京都・八王子市)

[10] 高橋弘充ほか「硬 X 線検出器 PoGOLite 気球実験:2016 年の再フライトに向けての準

備状況」2016年3月15日、日本天文学会春の年会、首都大学東京(東京都・八王子市)

[11] T. Nakaoka et al. "Study of a detector system for high-energy astrophysical objects using a combination of plastic scintillator and MPC," (ポスター発表) 2015 Sep. 25-29, 10th international "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, International Conference Center (Xi'an, China)

[12] 水野恒史ほか「「すざく」による広がった TeV ガンマ線放射 VER J2019+368 の X 線観測(1)」2015年9月25日、日本物理学会秋の年会、大阪市立大学(大阪府・大阪市)

[13] 大橋礼恵ほか「硬 X 線偏光検出器 PoGOLite の読出し回路の改良」2015年9月10日、日本天文学会秋の年会、甲南大学(兵庫県・神戸市)

[14] 水野恒史ほか「「すざく」によるはくちょう座に発見されたガンマ線超過の X 線探査(2)」2015年3月24日、日本物理学会春の年会、早稲田大学(東京都・新宿区)

[15] 高橋弘充ほか「硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球実験: 2016年の再フライトに向けて」2015年3月24日、日本物理学会春の年会、早稲田大学(東京都・新宿区)

[16] 高橋弘充ほか「硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球実験: 2016年の再フライトに向けて」2015年3月20日、日本天文学会春の年会、大阪大学(大阪府・豊中市)

[17] T. Mizuno et al. "Suzaku Observation of the Fermi Cygnus cocoon," (ポスター発表) 2014 Oct. 20-24, 5th Fermi Symposium, 名古屋大学東山キャンパス(愛知県・名古屋市)

[18] 高橋弘充ほか「PoGOLite 気球実験: 2013年のパフラインダーフライト(2)」2014年9月13日、日本天文学会秋の年会、山形大学(山形県・山形市)

[19] 中岡竜也ほか「MPPC とプラスチックシンチレータを組み合わせた天体偏光 X 線検出器の検討」2014年9月13日、日本天文学会秋の年会、山形大学(山形県・山形市)

[20] 大野雅功ほか「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器(SGD)開発の現状」2014年3月21

日、日本天文学会春の年会、国際キリスト大学(東京都・三鷹市)

[21] T. Mizuno et al. "Ultraluminous X-ray Sources," 2014 Feb. 24, HXI/SGD workshop, 広島大学(広島県・東広島市)

[22] T. Nakaoka et al. "Development of a Detector System for High-Energy Astrophysical Objects Using a Combination of Plastic Scintillator and MPPD," (ポスター発表) 2014 Feb. 19-22, Suzaku-MAXI 2014, 愛媛大学(愛媛県・松山市)

[23] 高橋弘充ほか「硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球実験 2013年パフラインダーフライト」2013年9月21日、日本物理学会秋の年会、高知大学(高知県・高知市)

[24] 高橋弘充ほか「硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球実験 2013年パフラインダーフライト」2013年9月11日、日本天文学会秋の年会、東北大学(宮城県・仙台市)

[25] 河野貴文ほか「宇宙硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球実験の地上較正試験」2013年9月11日、日本天文学会秋の年会、東北大学(宮城県・仙台市)

【その他】
PoGOLite について一般向けにホームページで紹介
(X 線ガンマ線偏光で高エネルギー天体を探る気球実験"PoGOLite")
<http://www-heaf.astro.hiroshima-u.ac.jp/pogo/PoGOLite.html>

「ひとみ」衛星の偏光観測、系内コンパクト天体の観測について検討しレポジトリで公開

"ASTRO-H White Paper - Broad-band Spectroscopy and Polarimetry,"
Coppi, P., Mizuno, T., et al.
arXiv:1412.1190 (2014)

"ASTRO-H White Paper - Stellar-Mass Black Holes,"
Miller, J. M., Mizuno, T., et al.
arXiv:1412.1173 (2014)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 恒史 (Mizuno, Tsunefumi)
広島大学・宇宙科学センター・准教授
研究者番号: 20403579

(3) 連携研究者

高橋 弘充 (Takahashi, Hiromitsu)

広島大学・理学系研究科・助教
研究者番号：10537775

深沢 泰司 (Fukazawa, Yasushi)
広島大学・理学系研究科・教授
研究者番号：60272457

田島 宏康 (Tajima, Hiroyasu)
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授
研究者番号：80222107

田中 孝明 (Tanaka, Takaaki)
京都大学、理学系研究科・助教
研究者番号：20600406

(4)研究協力者

榎戸 輝揚 (Enoto, Teruaki)
京都大学・白眉センター・准教授
研究者番号：20748123