

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800168

研究課題名(和文) ロケットによる天体からのX線偏光観測の実現

研究課題名(英文) X-ray Polarimetry for Cosmic Sources with Sounding Rocket Experiment

研究代表者

早藤 麻美 (Hayato, Asami)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：80632314

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、大きな期待が寄せられながら観測例の極めて少ない、天体のX線偏光観測の実現を最終目的とする。期間内の目標はNASAのXACTロケット実験をベースにNASAと我々が共同で開発してきたX線偏光計で「かに星雲」と「さそり座X-1」の天体観測を成功させることであった。しかし現在NASAのスケジュールは遅れ、残念ながら打ち上げはまだ行われずにいる。一方、我々は最終目標へ向け、X線偏光計の改良と評価実験を行い、偏光計の性能を向上させることに成功した。2014年12月、その結果を元にNASAと理研などが共同でアメリカの小型衛星計画(SMEX)の公募へX線偏光観測専用の衛星を提案している。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this study is to measure X-ray polarization from astronomical objects. The XACT sounding rocket experiment from NASA had planned to be launched in 2013-2015, aiming to make X-ray polarization measurements of Crab nebula and Scorpius X-1; however, it have not implemented yet due to its delayed schedule. Meanwhile, we have been modified the polarimeter and successfully improved its performance. Based on these results, the polarimeter team from NASA and RIKEN had proposed an X-ray polarimetry mission to Small Explorer Program of NASA in December 2015.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：X線 X線偏光 中性子星 ブラックホール ガス検出器 GEM TPC

1. 研究開始当初の背景

1960年代に初めて宇宙のX線源が発見されて以降、天体をX線で観測し、ライトカーブやスペクトル、イメージを取得することで数多くの発見がなされてきた。ところが電波や可視光では当然のように観測されている「偏光」だけ、X線帯域 (i.e., 2-10 keV) での観測例はほとんどない。一方でX線偏光は、X線が発生した現場の物理状態を直接探る強力なプローブとなり得るため、その観測は大いに期待されている。

本研究が開始された当初は、NASAによる世界初のX線偏光観測専用小型衛星プロジェクト GEMS (Gravity and Extreme Magnetism for SMEX)[1]が、予算の関係で中止された直後であった。それを受け我々は、NASAと協力しX線偏光観測の再起を狙ってロケット観測実験 X-ray Advanced Concepts Testbed Sounding Rocket (XACT) 計画[2]の実行へ向けて動き出したところであった。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、天体のX線偏光観測を実現させることである。しかしX線は地上では観測できないため、偏光計を衛星に搭載する必要がある。そこで、本研究では将来の衛星計画への足がかりとして、まずは我々が開発してきたX線偏光計をロケットに搭載し「かに星雲」と「さそり座 X-1」の偏光観測を世界に先駆け成功させることを目標とした。具体的には、

- (1) 技術実証として、観測を通して偏光計のキャリブレーションを完成させ、軌道上でOSO-8偏光計の数十倍の偏光測定精度を達成させる。
- (2) 科学的成果として (a) カニ星雲の磁場構造につながる偏光度/偏光方向を測定する。また (b) さそり座 X-1 が「どこまで偏光していないか」、「スペクトルが異なる場合に偏光はどう振る舞うのか」を検証する。

3. 研究の方法

本研究は2013から2014年度に計画されていた2回のXACTロケット観測を軸に進めていく予定であった。我々はすでに、GEMS衛星用の偏光計を1台製作していたので、ロケット実験のために必要な作業は、(1) 衛星搭載用に開発してきた偏光計をロケット実験向け改良すること、(2) その較正試験を行うこと、そして(3) 観測とそのデータ解析である。

XACT偏光計は2-5 keVのエネルギー帯に感度をもつ、ガス検出器の一種である。X線がガス分子に光電吸収される際、光電子の放出方向は、入射X線の進行方向を軸とした電場の方位角を θ_0 とすると $\cos^2(\theta - \theta_0)$ という異方性を持つ。XACT偏光計は、Time

Projection Chamber (TPC) の技術を応用し、イベント毎に光電子の2次元イメージを取得することができ、そこから光電子の放出方向を再構成する(図1)。これらの統計をためて得られる、光電子の放出角度分布(モジュレーション)から偏光度/偏光方向を測定することができる。

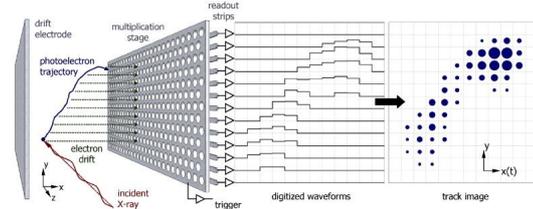


図1: TPC型偏光計の測定原理 [3]

4. 研究成果

2015年春時点でのXACTに関するNASAのスケジュールは遅れており、打ち上げそのものはまだ行われずにいる。そこで我々は本研究の最終目標である「天体のX線偏光観測の実現」へ向けて、以下に挙げた内容で研究を進展させてきた。

(1) 小型衛星計画への再提案

NASA、Iowa大学、そして私が所属する理研など、元GEMSチームが共同で、2020年の打ち上げを想定したNASAの小型衛星計画 Small Explorer program (SMEX) にX線偏光観測衛星の再提案を行った。提案書には、GEMSの時よりも偏光計の性能が確かなものであることを、以下に挙げるような我々の研究結果をもとに示した。1次審査の結果は2015年の夏に出る予定となっている。

(2) ロケット用偏光計の性能評価

ロケットの打ち上げは遅れているが、ロケット搭載のために必要な改良やそれに伴う性能評価は予定通りに行ってきた。例えば、ロケットと衛星では軌道が異なり、観測時間も限られる。その代わりに観測対象が決まっているため、ロケット観測に最適な設定を選ぶことができる。我々はこういった見積もりを行い、例えばロケット観測では偏光計の封入ガスの気圧は衛星の場合の約半分(100 Torr)が最適であることがわかった。そこで、これまでに確認されていない低圧下での部品の動作の実証実験を行い、問題がないことを確認した。[論文(6), (10), (11), 学会発表(13), (17)]。

(3) GEMS偏光計の改良と性能評価

次の衛星計画へ向けて、GEMS偏光計のデザインを改良した偏光計をNASAで製作し、さらにその性能実証試験をアメリカBrookhaven National LaboratoryのNational Synchrotron Light Source Iの放射光を用いて行った。解析の結果、予想通りに偏光計の性能を表す指数である変動

因子が向上したことを確認できた [論文 (4), 学会発表 (2), (4), (10)]。

(4) 日本国内における較正試験専用偏光計の立ち上げと性能評価

これまで行ってきた偏光計実験から、偏光計の系統誤差についてさらなる調査が必要な部分が少なからず存在することが明らかになってきていた。しかし GEMS 偏光計は、衛星用にデザインが固定されており、そのような細かい調査を行うことができないのが問題であった。そこで、我々は、そのような調査を手軽に行うため、GEMS と同型でありながら、デザインの微調整が可能など、取り扱いやすさを重視した偏光計を、NASA と協力し日本で立ち上げた(図 2)。デザインは GEMS 偏光計がベースであるが、読み出し回路は、GEMS 偏光計で使用されていた独自の ASIC 回路ではなく、CERN で開発/販売している Scalable Readout System を使用した。立ち上げ後、まずは GEMS 偏光計と同じだけの性能がでているかを SPring-8 の放射光を利用して評価した。その結果、GEMS 偏光計と新しい偏光計では変調因子がほとんど変わらないことがわかった(図 3)。今後、これを利用して偏光計の系統誤差の調査等を行っていく予定である [論文(1), 学会発表 (1), (3)]。

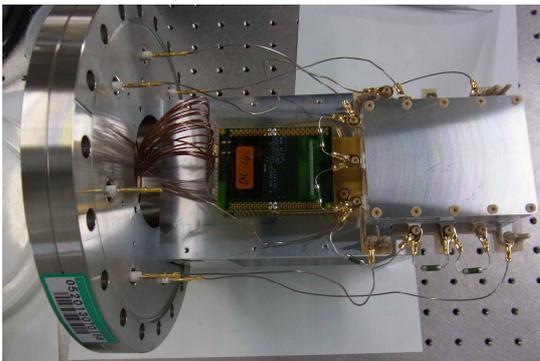


図 2 : 較正試験専用偏光計

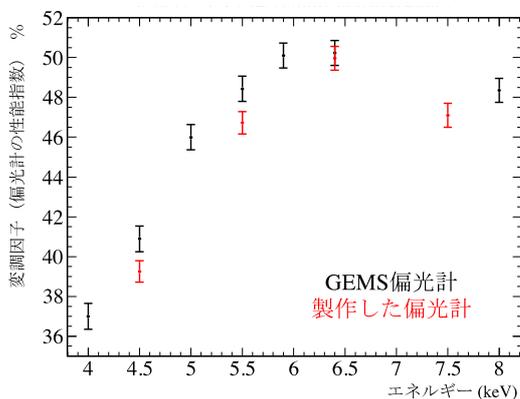


図 3 : 偏光計の性能比較

(5) 較正試験用小型変調 X 線発生装置の製作と電子ドリフト速度測定

偏光計のキャリブレーションには電子ドリフト速度を精度よく知ることが不可欠であり、そのためにはナノ秒スケールで同期した X 線をオンオフできる装置が必要となる。それを可能にしたのが、小型変調 X 線発生装置 (MXS: Modulated X-ray Source) である。我々は NASA で使用していた MXS のデザインをもとに、国内でも同型の MXS を製作した(図 4)。さらに、それを使用して偏光計内の電子ドリフト速度を測定し、シミュレーションと一致することを確認した(図 5) [論文 (2), (5), 学会発表 (6), (7)]



図 4 : 製作した MXS

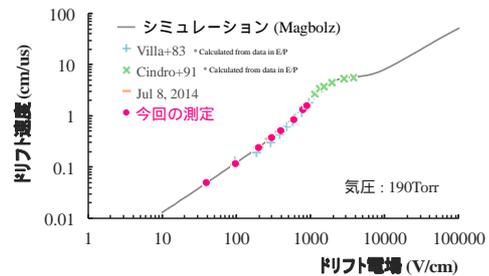


図 5 : MXS を利用したドリフト速度測定

(6) TPC 型偏光計シミュレーション

Geant4 をベースとした TPC 技術を用いた X 線偏光計のモンテカルロシミュレータを立ち上げた。これにより、様々な基礎特性や、小さなデザイン修正による性能の違いなどを簡単に見積もることができるようになった [論文(8), 学会発表(11), (16)]。

<引用文献>

[1] Keith Johoda, The Gravity and Extreme Magnetism Small Explorer, Proc. SPIE 7732, Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray, 2010, 77320W

[2] Keith Gendreau et al., The x-ray advanced concepts testbed (XACT) sounding rocket payload, Proc. SPIE 8443, Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray, 2012, 84434V

[3] J.K. Black et al, X-ray polarimetry with a micropattern TPC, NIMA, Volume 581, Issue 3, 1 November 2007, Pages 755-760

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 13 件)

(1) A. Hayato, T. Tamagawa, T. Kitaguchi, E. Teruaki, W. B. Iwakiri, Y. Takeuchi, M. Kubota, and K. Nishida, Fabrication of a TPC X-ray Polarimeter and Preliminary Testing with the Synchrotron Radiation Light Source at Spring-8, RIKEN Accelerator Progress Report, refereed, 2015, In press, http://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/index_e.html

(2) M. Kubota, T. Kitaguchi, A. Hayato, W. Iwakiri, T. Enoto, K. Nishida, Y. Takeuchi, A. Yoshikawa, and T. Tamagawa, Measurement of the electron drift velocity in DME gas, RIKEN Accelerator Progress Report, refereed, 2015, In press, http://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/index_e.html

(3) T. Enoto, T. Tamagawa, T. Kitaguchi, A. T. Hayato, T. Yuasa, W. B. Iwakiri, H. Noda, A. Yoshikawa, Y. Takeuchi, M. Kubota, and K. Nishida, Spectral and Temporal Approach to Physics of Neutron Stars, RIKEN Accelerator Progress Report, refereed, 2015, In press, http://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/index_e.html

(4) W.B. Iwakiri, K. Black, T. Kitaguchi, J. Hill, K. Jahoda, T. Enoto, T. Tamagawa, Y. Takeuchi, M. Kubota, H. Marlowe, R. Cole, K. Nishida, and A. Hayato, Performance test of TPC Polarimeter for cosmic X-ray sources at BNL NSLS-1, RIKEN Accelerator Progress Report, refereed, 2015, In press, http://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/index_e.html

(5) W. B. Iwakiri, K. Gendreau, A. Hayato, Y. Takeuchi, K. Nishida, M. Kubota, and T. Tamagawa, Performance test of Modulated X-ray Source using UV-LED and Channel Electron Multiplier, RIKEN Accelerator Progress Report, refereed, 2015, In press, http://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/index_e.html

(6) Y. Takeuchi, T. Tamagawa, T. Kitaguchi, S. Yamada, W. Iwakiri, F. Asami, A. Yoshikawa, K. Kaneko, T. Enoto, A. Hayato, T. Kohmura, and

the GEMS/XACT team, Property of LCP-GEM in Pure Dimethyl Ether at Low Pressures, RIKEN Accelerator Progress Report, refereed, 2015, In press, http://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/index_e.html

(7) Teruaki Enoto, Kevin Black, Takao Kitaguchi, Asami Hayato, Joanne E. Hill, Keith M. Jahoda, Toru Tamagawa, Kenta Kaneko, Yoko Takeuchi, Akifumi Yoshikawa, Hannah R. Marlowe, Scott Griffiths, Philip E. Kaaret, David Kenward, Syed Khalid, Performance verification of the Gravity and Extreme Magnetism Small explorer (GEMS) x-ray polarimeter, Proc. SPIE 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, 2014, 91444M, DOI: 10.1117/12.2056841

(8) Takao Kitaguchi, Toru Tamagawa, Asami Hayato, Teruaki Enoto, Akifumi Yoshikawa, Kenta Kaneko, Yoko Takeuchi, Kevin Black, Joanne Hill, Keith Jahoda, John Krizmanic, Steven Sturmer, Scott Griffiths, Philip Kaaret, Hannah Marlowe, Monte-Carlo estimation of the inflight performance of the GEMS satellite x-ray polarimeter, Proc. SPIE 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, 2014, 91444L, DOI: 10.1117/12.2057334

(9) Kiyoshi Hayashida, Daisuke Yonetoku, Shuichi Gunji, Toru Tamagawa, Tatehiro Mihara, Tsunefumi Mizuno, Hiromitsu Takahashi, Tadayasu Dotani, Hidetoshi Kubo, Yoichi Yatsu, Fuyuku Tokanai, Takeshi Nakamori, Shinpeo Shibata, Asami Hayato, Akihiro Furuzawa, Yuji Kishimoto, Shunji Kitamoto, Kenji Toma, Masaaki Sadamoto, Keigo Yoshinaga, Juyong Kim, Shunichiro Ide, Fumiyoshi Kamitsukasa, Naohisa Anabuki, Hiroshi Tsunemi, Jun Katagiri, Juri Sugimoto, X-ray gamma-ray polarimetry small satellite PolariS, Proc. SPIE 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, 2014, 91440K, DOI: 10.1117/12.2056685

(10) Yoko Takeuchi, Takao Kitaguchi, Asami Hayato, Toru Tamagawa, Wataru Iwakiri, Fumi Asami, Akifumi Yoshikawa, Kenta Kaneko, Teruaki Enoto, J. Kevin Black, Joanne E. Hill, Keith M. Jahoda, Properties of the flight model gas electron multiplier for the GEMS mission, Proc. SPIE 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, 2014, 91444N, DOI: 10.1117/12.2057159

(11) Y. Takeuchi, T. Tamagawa, T. Kitaguchi, S. Yamada, W. Iwakiri, F. Asami, A. Yoshikawa, K.

Kaneko, T. Enoto, A. Hayato, T. Kohmura, the GEMS/XACT team, Property of LCP-GEM in pure dimethyl ether at low pressure, refereed, Journal of Instrumentation, JINST, vol 9, 2014, C01002
DOI:10.1088/1748-0221/9/01/C01002

(12) Joanne E. Hill, J. Kevin Black, Lubos Brieda, Patsy L. Dickens, Kristina Montt de Garcia, Douglas L. Hawk, Asami Hayato, Keith Jahoda, Jelila Mohammed, Lifetime estimation of a time projection chamber x-ray polarimeter, Proc. SPIE 8859, UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XVIII, 2013, 88590O,
DOI: 10.1117/12.2024724

〔学会発表〕(計 19 件)

(1) 早藤麻美、北口貴雄、岩切渉、玉川徹、武内陽子、窪田恵、西田和樹、榎戸輝揚、宇宙観測を目的としたTPC型X線偏光計の性能評価試験、日本物理学会 第70回年次大会、2015年3月21-24日、東京都 早稲田大学 早稲田キャンパス

(2) 岩切渉、北口貴雄、早藤麻美、玉川徹、武内陽子、窪田恵、西田和樹、榎戸輝揚、Keith M. Jahoda, Joanne E. Hill, J. Kevin Black, PRAXyS衛星搭載X線偏光計のシンクロトロン放射光を用いた性能評価、日本物理学会 第70回年次大会、2015年3月21-24日、東京都 早稲田大学 早稲田キャンパス

(3) 北口 貴雄、玉川 徹、早藤 麻美、岩切 渉、窪田 恵、西田 和樹、武内 陽子、榎戸 輝揚、武井 大、高山 裕貴、SPRING-8 によるマイクロパターンガス偏光計の詳細な性能評価、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18-21日、大阪府 大阪大学

(4) 窪田めぐ、武内陽子、西田和樹、吉川瑛文、金子健太、榎戸輝揚、早藤麻美、北口貴雄、岩切渉、玉川徹、Keith M. Jahoda, Joanne E. Hill, J. Kevin Black、PRAXYS 衛星搭載に向けた光電効果型ガス偏光計の性能評価、日本天文学会2015年春季年会、2015年3月18-21日、大阪府 大阪大学

(5) 北口貴雄、玉川徹、早藤麻美、榎戸輝揚、岩切渉、吉川瑛文、金子健太、武内陽子、窪田恵、西田和樹、X線の直線偏光・分光・到達時間を測定できるマイクロパターンガス検出器の開発、日本物理学会 2014年秋季大会、2014年9月18-21日、佐賀県 佐賀大学

(6) 窪田恵、早藤麻美、北口貴雄、武内陽子、榎戸輝揚、岩切渉、金子健太、西田和樹、吉川瑛文、玉川徹、変調型X線源を用いたジメチルエーテル中での電子輸送特性の測定、日本物理学会 2014年秋季大会、2014年9月

18-21日、佐賀県 佐賀大学

(7) 岩切渉、早藤麻美、武内陽子、玉川徹、北口貴雄、榎戸輝揚、吉川瑛文、金子健太、窪田恵、西田和樹、Keith Gendreau, 小型かつ変調型の X 線発生装置 Modulated X-ray Source (MXS) の製作と性能評価、日本天文学会 2014年秋季年会、2014年9月11-13日、山形県 山形大学

(8) 武内陽子、玉川徹、北口貴雄、早藤麻美、榎戸輝揚、岩切渉、吉川瑛文、金子健太、窪田恵、西田和樹、光電子追跡型 X 線偏光計の製作および基礎性能評価、日本天文学会 2014年秋季年会、2014年9月11-13日、山形県 山形大学

(9) 林田清、吉永圭吾、キムジョン、井出舜一郎、上司文善、穴吹直久、常深博、郡司修一、柴田晋平、片桐惇、中森健之、米徳大輔、三原建広、玉川徹、早藤麻美、杉本樹梨、高木利紘、水野恒史、高橋弘充、谷津陽一、堂谷忠靖、齋藤 芳隆、古澤彰浩、窪秀利、當真賢二、岸本祐二、Keith Jahoda, Joe Hill, 他 PolariS-WG、X 線ガンマ線偏光観測小型衛星 PolariS:開発の現状 2014、日本天文学会 2014年秋季年会、2014年9月11-13日、山形県 山形大学

(10) Teruaki Enoto, Kevin Black, Takao Kitaguchi, Asami Hayato, Joanne E. Hill, Keith M. Jahoda, Toru Tamagawa, Kenta Kaneko, Yoko Takeuchi, Akifumi Yoshikawa, Hannah R. Marlowe, Scott Griffiths, Philip E. Kaaret, David Kenward, Syed Khalid, Performance verification of the Gravity and Extreme Magnetism Small explorer (GEMS) x-ray polarimeter, SPIE 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, June 22-26, 2014, Montreal (Canada)

(11) Takao Kitaguchi, Toru Tamagawa, Asami Hayato, Teruaki Enoto, Akifumi Yoshikawa, Kenta Kaneko, Yoko Takeuchi, Kevin Black, Joanne Hill, Keith Jahoda, John Krizmanic, Steven Sturmer, Scott Griffiths, Philip Kaaret, Hannah Marlowe, Monte-Carlo estimation of the inflight performance of the GEMS satellite x-ray polarimeter, SPIE 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, June 22-26, 2014, Montreal (Canada)

(12) Kiyoshi Hayashida, Daisuke Yonetoku, Shuichi Gunji, Toru Tamagawa, Tatehiro Mihara, Tsunefumi Mizuno, Hiromitsu Takahashi, Tadayasu Dotani, Hidetoshi Kubo, Yoichi Yatsu, Fuyuku Tokanai, Takeshi Nakamori, Shinpeo Shibata, Asami Hayato, Akihiro Furuzawa, Yuji

Kishimoto, Shunji Kitamoto, Kenji Toma, Masaaki Sadamoto, Keigo Yoshinaga, Juyong Kim, Shunichiro Ide, Fumiyoshi Kamitsukasa, Naohisa Anabuki, Hiroshi Tsunemi, Jun Katagiri, Juri Sugimoto, X-ray gamma-ray polarimetry small satellite PolariS, SPIE 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, June 22-26, 2014, Montreal (Canada)

(13) Yoko Takeuchi, Takao Kitaguchi, Asami Hayato, Toru Tamagawa, Wataru Iwakiri, Fumi Asami, Akifumi Yoshikawa, Kenta Kaneko, Teruaki Enoto, J. Kevin Black, Joanne E. Hill, Keith M. Jahoda, Properties of the flight model gas electron multiplier for the GEMS mission, SPIE 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, June 22-26, 2014, Montreal (Canada)

(14) 玉川徹、早藤麻美、北口貴雄、榎戸輝揚、山田真也、岩切 渉、阿佐美ふみ、吉川瑛文、武内陽子、金子健太、幸村孝由、田原謙、高橋忠幸、牧島一夫、Keith Jahoda、Joanne Hill、ほかGEMSチーム、X線偏光観測衛星GEMS開発の現状(III)、日本物理学会 第69回年次大会、2014年03月27日~2014年03月30日、神奈川県 東海大学 湘南キャンパス

(15) 玉川徹、早藤麻美、北口貴雄、榎戸輝揚、山田真也、岩切 渉、阿佐美ふみ、吉川瑛文、武内陽子、金子健太、幸村孝由、田原謙、高橋忠幸、牧島一夫、Keith Jahoda、Joanne Hill、ほかGEMS collaboration、林田清、郡司修一、水野恒史、米徳大輔、ほかPolariS collaboration、X線偏光観測衛星GEMSの現状(II)、日本天文学会 2014年春季年会、2014年03月19日~2014年03月22日、東京都 国際基督教大学

(16) Takao Kitaguchi, Kevin Black, Teruaki Enoto, Scott Griffiths, Asami Hayato, Joanne Hill, Keith Jahoda, Philip Kaaret, Hannah Marlowe, Toru Tamagawa, Performance Evaluation of Micro-pattern Gas Polarimeter with Synchrotron X-ray Beamline, 日本物理学会 2013年秋季大会、2013年09月20日~2013年09月23日、高知県 高知大学

(17) 武内陽子、玉川徹、北口貴雄、岩切 渉、阿佐美ふみ、吉川瑛文、早藤麻美、榎戸輝揚、山田真也、金子健太、幸村孝由、ほかX線偏光計チーム、低圧の純ジメチルエーテル下でのGEM動作特性、日本物理学会 2013年秋季大会、2013年09月20日~2013年09月23日、高知県 高知大学

(18) 玉川徹、早藤麻美、北口貴雄、榎戸輝

揚、山田真也、岩切 渉、阿佐美ふみ、吉川瑛文、武内陽子、金子健太、幸村孝、田原謙、高橋忠幸、牧島一夫、Keith Jahoda、Joanne Hill、ほかGEMS collaboration、林田清、郡司修一、米徳大輔、ほかPolariS collaboration、X線偏光観測衛星GEMSの現状とPolariSとの協力、日本天文学会 2013年秋季年会、2013年09月10日~2013年09月12日、宮城県 東北大学

(19) Joanne E. Hill, Joel K. Black, Lubos Brieda, Patsy L. Dickens, Kristina M. Montt de Garcia, Douglas L. Hawk, Asami Hayato, Keith Jahoda, Jelila Mohammed, Lifetime estimation of a time projection chamber x-ray polarimeter, SPIE optics and photonics, August 25-26, 2013, San Diego (USA)

〔その他〕
ホームページ等
<http://astro.riken.jp>
http://www.riken.jp/research/labs/rnc/high_ener_astro/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早藤 麻美 (HAYATO, Asami)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：80632314

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：