

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2013～2016

課題番号：25302003

研究課題名(和文) スウェーデンでの気球実験による硬X線偏光観測と高感度な焦点面偏光計の開発

研究課題名(英文) Balloon-borne hard X-ray polarization measurement and development of high-sensitivity focal-plane polarimeter in Swenden

研究代表者

高橋 弘充 (Takahashi, Hiromitsu)

広島大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10536775

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、国際研究チームでスウェーデンからPolarized Gamma-ray Observer (PoGOLite, PoGO+) 気球を打ち上げ、硬X線帯域において天体の偏光観測を実施することと、将来の望遠鏡と組み合わせた高感度観測を実施するために、焦点面に置く偏光計を開発することであった。

2013年にPoGOLite、2016年にPoGO+を放球に成功し、それぞれ数日～1週間にわたってパルサー星雲「かに星雲」とブラックホール連星系「はくちょう座X-1」の偏光観測を実施することができた。また焦点面に置く小型偏光計のため、シンチレータを光検出器(Si-PM)で読み出す回路を作成した。

研究成果の概要(英文)：We launched the balloon-borne hard X-ray polarimeter, Polarized Gamma-ray Observer, from Sweden in 2013 (PoGOLite) and 2016 (PoGO+). Following the successful launches, there were several days~1 week polarization observations of a pulsar-wind nebula, Crab nebula and a black-hole binary, Cygnus X-1.

For the future small polarimeter as a focal-plane detector, we developed and investigated the performance of scintillators with a photo-detector (Si-PM) readout.

研究分野：X線ガンマ線宇宙物理学

キーワード：宇宙物理 偏光観測 気球実験 シンチレータ結晶 光検出器

1. 研究開始当初の背景

偏光は、イメージ、タイミング、エネルギーとは独立な観測量であり、宇宙観測においてもイメージでは直接分解できない天体の構造を探る上で重要な観測手段である。X線・ガンマ線帯域においても、シンクロトロン放射や反射・散乱に起因した放射を検出することで、パルサー星雲(かに星雲など)の磁場構造や、ブラックホール連星系(はくちょう座X-1など)の降着円盤の幾何構造などを明らかにできると考えられてきている。しかしながら検出メカニズムが複雑なため検出器開発が遅れており、本研究開始時までには有意な偏光が検出されていたのは40年前のOSO-8衛星(X線@2.6 keVと5.2 keV)によるもっとも明るいX線天体の1つ「かに星雲」の観測のみに限られる。2010年代になって、「かに星雲」と「はくちょう座X-1」についてINTEGRAL衛星(ガンマ線@100 keV以上)による報告があるが、偏光検出を目指して開発された検出器ではないため測定誤差が大きい。本研究が対象としている10-100 keVの硬X線帯域は、偏光のエネルギー依存性を調べる上で必要不可欠だけでなく、非熱的な放射が卓越してくる重要なエネルギー帯であるにも関わらず、天体からの有意な偏光検出にはいまだ至っていない。こうした中、世界中で様々なX線・ガンマ線偏光ミッションが走っている状況である。

2. 研究の目的

こうした状況を踏まえ、本研究では日米欧の国際研究チームでスウェーデンからPolarized Gamma-ray Observer (PoGOLite, PoGO+) 気球を打ち上げ、硬X線帯域において天体からの世界初の本格的な偏光観測を実施することと、将来の望遠鏡と組み合わせた高感度観測を実現するために、焦点面に置く偏光計をスウェーデンチームと共同で開発することを目指した。

(1) 気球実験による硬X線帯域での世界初の本格的な偏光観測

PoGOLite, PoGO+気球実験(PI: スウェーデン王立工科大学Mark Pearce教授、日本代表: 本研究の代表者)は、我々が国際研究チームで10年近くにわたって入念に立ち上げてきた。望遠鏡を利用しないコリメータ型の偏光計であるが、2013年の夏にスウェーデンのキルナ市にあるEsrangle気球実験場から放球することが決定していた。フライトに際してスウェーデンの実験場に滞在しリアルタイムで気球の運用に参加することで、2週間におよぶ長期間フライトを成功裏に完了させる。世界で初めて北極圏を周回する2週間もの長時間観測を実施することで、PoGOLiteでは25-80 keVの硬X線帯域において、「かに星雲」と「はくちょう座X-1」の2天体から約10%の偏光度を検出できると予想していた。この観測により、「かに星雲」のシンクロトロン放射(磁場の強度および方向)には

エネルギー依存性があるのか、また「はくちょう座X-1」の反射・散乱された放射によって、ブラックホール周辺の降着円盤の幾何学的な構造を観測結果から明らかにすることができる。

2013年のPoGOLiteのフライト自体は2週間にわたって大成功であったが、偏光計は電源系のトラブルにより3日間しか観測を実施することはできなかった。このため、検出器もゴンドラも改良し、PoGO+とミッション名を変更して、2016年に再度スウェーデンからフライトを実施している。



2016年7月に放球したPoGO+気球の全体像。総重量1.7トン。

(2) 将来の望遠鏡と組み合わせた高感度観測を想定した焦点面偏光計の開発

PoGOLiteやPoGO+の偏光計では、地上で可能な最大限の観測時間(約2週間)をもってしても、偏光が有意に検出可能な天体は最も明るい上記2天体に限られてしまっている。より高感度な観測を実現するためには、検出器の感度を向上させる必要がある。そこで我々は、硬X線望遠鏡をPoGOに搭載し感度を2桁向上させることを考えている。現在のPoGOでは、コリメータにより視野を絞っているだけであるため、偏光計の容量が大きくバックグラウンドによって感度がリミットされてしまっている。これに対し望遠鏡が使えるれば、天体信号を集光することで偏光計サイズを2桁小さくすることができる。

望遠鏡の焦点面に置く小型偏光計の開発に際しては、日本・スウェーデン共同で行う。シンチレータには、PoGOのスペアを利用する。光検出器には、現状の光電子増倍管ではサイズが大きいため、新規開発されたSi-PM(MPPC)に置き換える。

3. 研究の方法

(1) 気球実験による硬X線帯域での世界初の本格的な偏光観測

2013年のPoGOLiteと2016年のPoGO+の放球の際には、他のメンバーと一緒に前もって打ち上げ場であるEsrangle気球実験場に滞在し、検出器の動作確認、校正データの取得やフライトの模擬運用を実施した。それぞれのフライト中(1~2週間)には、現地で運用に携わり、「かに星雲」と「はくちょう座X-1」

の天体観測を行った。

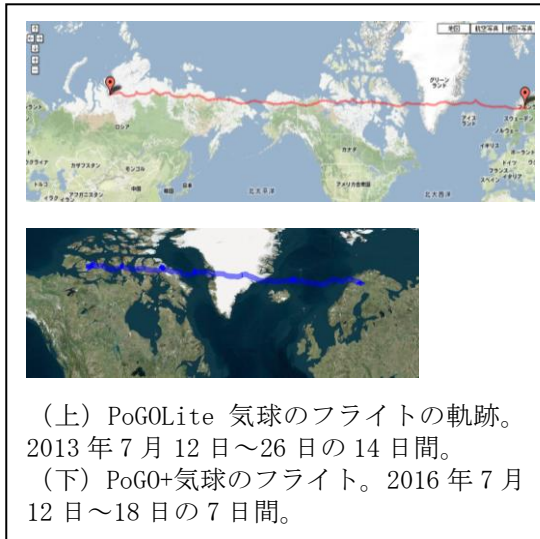
(2) 将来の望遠鏡と組み合わせた高感度観測を想定した焦点面偏光計の開発

我々は偏光を検出するために、偏光した光子がコンプトン散乱する際に散乱角に異方性を持つことを利用している。このために PoGO でも将来の焦点面に置く小型の偏光計でも、光子が散乱しやすい散乱体と、散乱した光子を検出する吸収体の2種類が必要である。そこで、1cm角サイズの小型の散乱体(プラスチックシンチレータ)と吸収体(BGO、CsI(Tl)、GAGG)それぞれについて、光検出器MPPCと組み合わせての性能を評価した。

4. 研究成果

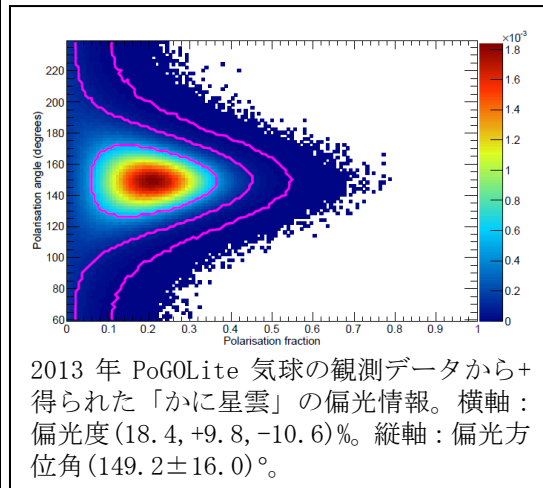
(1) 気球実験による硬 X 線帯域での世界的な本格的な偏光観測

以下の図が 2013 年の PoGOLite、2016 年の PoGO+ のフライトの軌跡である。



上述のように、PoGOLite は 2013 年 7 月 12 日～26 日の 14 日間におよぶフライトに成功し、高度 34～40 km でスウェーデンの Esrangle 気球実験場からカナダ上空を経てロシアのノリリスク近郊まで、北極圏を周回させることに成功した。この間、姿勢制御については要求精度 0.1° を 1 桁上回る十分な精度でコントロールすることができた。一方で、硬 X 線偏光計は 3 日目に電源系が動作しなくなり、3 日間の観測データしか取得できなかった。偏光計の地上較正実験、ゴンドラやフライト、また得られた科学的な成果については、それぞれ論文として報告済みである。観測時間が短かったことから、偏光情報は「かに星雲」(パルサー星雲) について上限値を得ることしかできなかったが、この 25–80 keV の硬 X 線帯域ではこれまでで最も良い精度での観測結果である。もう 1 天体の「はくちょう座 X-1」は、残念ながら天体自身が硬 X 線のフラックスが低い high/soft 状態に遷移していたため、PoGOLite では有意な天体信号を検出することはできなかった。

この最初のフライトが 3 日間と短時間しか行えなかったことから、我々は 2016 年 7 月



12～18 日の 7 日間にもわたって再フライトを実施した。この際には、偏光計が動作不良に陥った原因への対策を施すとともに、5 日間の観測時間でも「かに星雲」から約 10%の偏光度を検出できるように偏光計を改良しており、プロジェクト名を PoGO+に変更している。PoGO+は 7 日間で、スウェーデン Esrangle 実験場から、グリーンランド上空を経て、カナダのビクトリア島まで到達し、すでにゴンドラに保存していた全フライトデータを無事に回収できている。約 40km の高度に到達し、予定通りに運用・姿勢制御も実施できたため、7 日間で「かに星雲」を 7 回、「はくちょう座 X-1」を 6 回観測することに成功した(硬 X 線フラックスの高い low/hard 状態にあり、PoGO+でも有意な天体信号を検出することができている)。ゴンドラに設置したカメラによって、打ち上げ前から高度 40km でのフライト中、気球を切り裂いてからパラシュートで着地するまでの映像が、スウェーデン宇宙公社により youtube に投稿されている (<https://www.youtube.com/watch?v=0oxd9-W1-Qg>)。

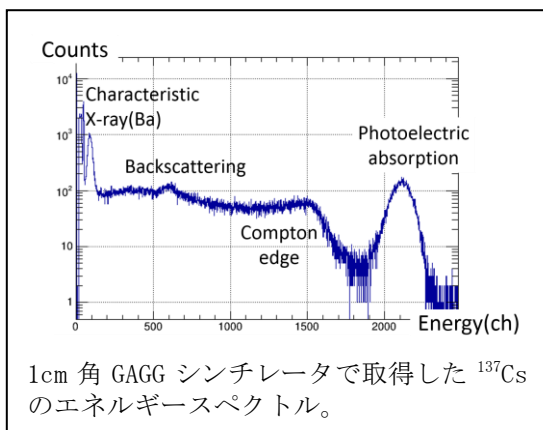


この上空での映像からも、ゴンドラが方位角を規則正しく変えていることが分かり、天体観測とバックグラウンド観測を予定通り交互に実施できていることを確認することができる。打ち上げ前の偏光計の地上較正実験

については既に論文に報告しており、現在は天体観測データの詳細な解析を進めている。

(2) 将来の望遠鏡と組み合わせた高感度観測を想定した焦点面偏光計の開発

以下が 1cm 角 GAGG シンチレータを 6x6mm² の受光面を持つ光検出器 MPPC で読み出した際のエネルギースペクトルである。従来利用されてきた BGO や CsI(Tl) よりも、低いエネルギースレッショルドを達成できており、将来より天体からの光子数の多い低エネルギー帯域から観測可能となる。



GAGG は近年に日本で新規開発されたシンチレータであり、潮解性がない、密度が 6.6 g/cm³ と大きくガンマ線阻止能が高い、また光量が 60000 光子/MeV と高くエネルギー分解能が良いという特性を持ち、偏光計においてコンプトン散乱後のガンマ線を光電吸収させるのに適している。実験では、読み出し回路に我々が開発した省電力アナログ回路を利用し、温度条件が悪いことも想定して常温 (MPPC の暗電流ノイズが高い) で測定したが、662 keV の光電吸収ピークのエネルギー分解能は 6%、エネルギースレッショルドは 15 keV を達成することができた。

偏光計のもう 1 つ構成要素である散乱体としては、プラスチックシンチレータが適している。本研究では、エネルギースレッショルドとして約 5 keV を得ることができた。この値は MPPC の暗電流で決まってしまう。よりコンプトン散乱時のエネルギーデポジションが小さい信号も検出できるように、今後はより低温での動作や吸収体とのコインシデンスを取ることで、より低いスレッショルドの達成を目指している。

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 18 件、主要なもの 4 件)

1. M. Chauvin, M. Friis, M. Jackson, T. Kawano, M. Kiss, V. Mikhalev, N. Ohashi, T. Stana, H. Takahashi, M. Pearce, “Calibration and performance studies of

the balloon-borne hard X-ray polarimeter PoGO+”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2017, 859, 125-133 (査読あり) 10.1016/j.nima.2017.03.027

2. M. Chauvin, H. Takahashi (12 番目), Y. Fukazawa (15 番目), T. Mizuno (18 番目), H. Tajima (20 番目), 他 (計 22 番目), “Observation of polarized hard X-ray emission from the Crab by the PoGOLite Pathfinder”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 456, L84-L88 (査読あり) 10.1093/mnrasl/slv177

3. 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”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2016, 831, 400-403 (査読あり) 10.1016/j.nima.2016.03.063

4. Y. Kitamura, H. Takahashi, Y. Fukazawa, “Suzaku observation of the symbiotic X-ray binary IGR J16194-2810”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2014, 66, 6 (1-11) (査読あり) 10.1093/pasj/pst001

[学会発表] (計 32 件、主要なもの 4 件)

1. H. Takahashi 他, ” PoGOLite, PoGO+, SPHiNX”, 2nd CORE-U Conference: Cosmic Polarimetry from Micro to Macro Scales, 2017/2/17, 広島大学

2. H. Takahashi 他, “Development of Scintillator Readout System with MPPC for Portable Compact Gamma-ray Spectrometer”, HSTD10, 2015/9/25~29, 中国, 西安

3. H. Takahashi 他, “Data Acquisition System and Ground Calibration of Polarized Gamma-ray Observer (PoGOLite)”, SPIE2014, 2014/6/22~27, カナダ, モントリオール

4. 高橋弘充 他, “硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球実験: 2013 年パスファインダーフライト”, 宇宙科学シンポジウム, 2014/1/9~10, 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: ホスウィッチ型熱中性子検出器
発明者: 高橋弘充 (1 番目)、深沢泰司 (4 番

目)、他 (計 11 名)
権利者：同上
種類：特許
番号：特許第 5894916 号
取得年月日：2016 年 3 月 4 日
国内外の別：国内

[その他]
ホームページ等
<http://web.particle.kth.se/pogo/>
<https://www.youtube.com/watch?v=0oxd9-W1-Qg>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 弘充 (TAKAHASHI, Hiromitsu)
広島大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：10536775

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

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

深沢 泰司 (FUKAZAWA, Yasushi)
広島大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：60272457

田島 宏康 (TAJIMA, Hiroyasu)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授
研究者番号：80222107

(4) 研究協力者

なし