

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740193

研究課題名(和文) PoGOLite 気球実験による「はくちょう座 X - 1」からの硬 X 線の偏光検出

研究課題名(英文) Hard X-ray Polarization Measurement of Cygnus X-1 by PoGOLite Balloon Experiment

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) 3,400,000 円、(間接経費) 1,020,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、我々が日米欧共同で開発・製作したPoGOLite検出器をもちいて「はくちょう座 X-1」から硬X線偏光を検出することを目指した。2011年度・2012年度では天候などによりPoGOLite気球の放球を実施・成功させることはできなかったが、2013年度には初めて放球に成功した。フライト中には、「はくちょう座X-1」だけでなく他のブラックホール連星系GRS 1915+105やパルサー星雲である「かに星雲」の観測を実施することができた。

研究成果の概要(英文)：We have developed PoGOLite balloon-borne experiment to detect hard X-ray polarization from a black-hole binary, Cygnus X-1. While, in 2011 and 2012, there were no successful launches due to bad weather etc., we have succeeded in 2013 for the first time. During the flight, Cygnus X-1 was observed as well as other black-hole binary, GRS 1915+105, and a pulsar nebula, Crab.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理

キーワード：宇宙物理 偏光観測 シンチレータ結晶 宇宙線 中性子 地球大気

1. 研究開始当初の背景

偏光観測は、天体の放射メカニズムや磁場構造、放射領域のジオメトリなどを調べる上で、ひじょうに強力な手段である。しかしながら、X線・ガンマ線の帯域では検出方法が技術的に難しく、研究を開始した時点で有意な偏光が検出された天体はパルサー星雲である「かに星雲」だけであった(しかも検出されたエネルギー帯域も、数 keV と 100 keV 付近の 2 帯域のみに限られる)。近年の技術的な進歩を受け、現在は国内外で数多くの偏光観測プロジェクトが進められているが、気球観測では予備実験的なものしか行われておらず、また衛星計画として認可されている日本の ASTRO-H 衛星は、打ち上げ時期が 2015 年であり観測は数年先の状況となっていた(他国については、偏光観測が可能な衛星ミッションで、打ち上げが認可されたものは現在もまだない)。

2. 研究の目的

こうした状況で、本研究では我々が長年かけて日米欧で共同開発・製作した PoGOLite 検出器を放球し、ブラックホール連星系の「はくちょう座 X-1」を観測することで、世界で初めてブラックホール連星系から硬 X 線偏光の検出を目指した。「はくちょう座 X-1」は、地球から約 2kpc と近傍に位置し、発見以来つねに X 線で明るく輝き続けているため、ブラックホール連星系の標準天体とも言える。またブラックホールへの降着量が比較的に少ない Low/Hard 状態と呼ばれる状態では、PoGOLite 気球実験が感度をもつ硬 X 線でのフラックスが増加し、PoGOLite にとって絶好の観測ターゲットとなる。測定される偏光度は、ブラックホール周辺の降着円盤で反射された放射成分の強度に比例すると予想され、従来のエネルギースペクトルや時間変動から得られる情報とは相補的に、ブラックホール近傍のジオメトリを明らかにできると期待される。

PoGOLite 気球は、日米欧の共同開発ミッションであり、その放球はスウェーデンのキルナ市にある Esrange 気球実験場で実施される予定であった。このフライトは世界で初めて北極を周回するコースを取り、1 周回すれば約 20 日間もの観測時間が得られる。これは衛星には及ばないものの、南極の周回フライトと並び気球では最長レベルであり、是非ともこの初フライトを成功させることが他のミッションからも望まれていた。

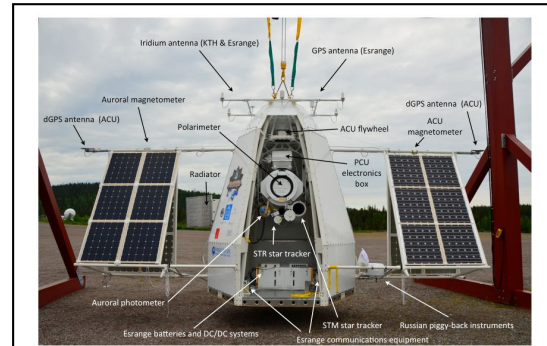
3. 研究の方法

本研究では、3 年度の間に以下の 3 項目の研究を行った。

(1) PoGOLite 気球の放球前の準備

PoGOLite 気球実験は、2011 年、2012 年、2013 年の夏にスウェーデンから放球が試み

られた。この間、毎回打ち上げ前には、打ち上げ場である Esrange 気球実験場に滞在し、検出器の動作確認、校正データの取得を行った。また他の PoGOLite チームメンバーと一緒にフライトの模擬運用も実施した。



2013 年 7 月に放球に成功した PoGOLite 気球の全体像。総重量 1.7 トン。

(2) PoGOLite 気球の放球と天体観測

PoGOLite の放球は、2011 年 7 月は気球からヘリウムが漏れてしまう不慮の事故のため、天体観測が可能となる 38km まで気球高度が達せず、またフライトも 5 時間しか行うことができなかった。また 2012 年夏は現地の天候が悪く、放球を実施することすらできなかった。

2013 年 7 月に初めて放球が成功した際には、現地でフライト中の検出器の運用に携わり、「はくちょう座 X-1」を含む実際の天体観測を行った。

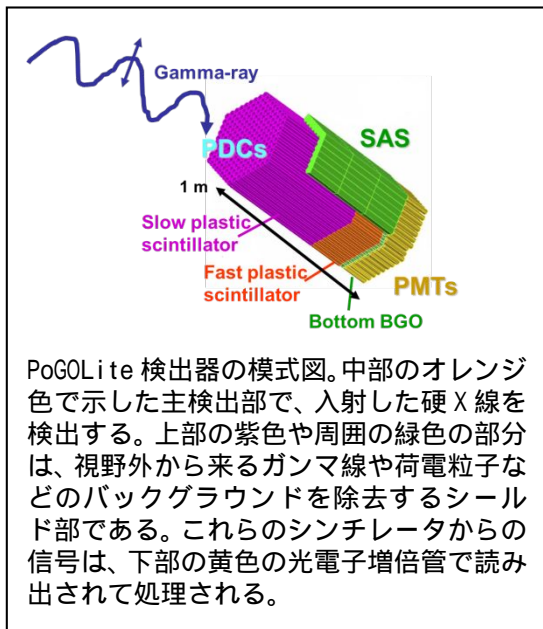
(3) PoGOLino 気球実験による大気中性子バックグラウンドの計測

PoGOLite 検出器にとって主要なバックグラウンド源と予想される大気中性子は、そのフラックスさえもスウェーデン上空では実際に計測されたデータが存在していなかった。そのため、PoGOLite の放球がなかなか成功裏に実施できない期間を利用して、大気中性子のフラックスとエネルギースペクトルのベキを計測できる PoGOLino 検出器を開発した。PoGOLino 気球も 2013 年 3 月に放球に成功している。

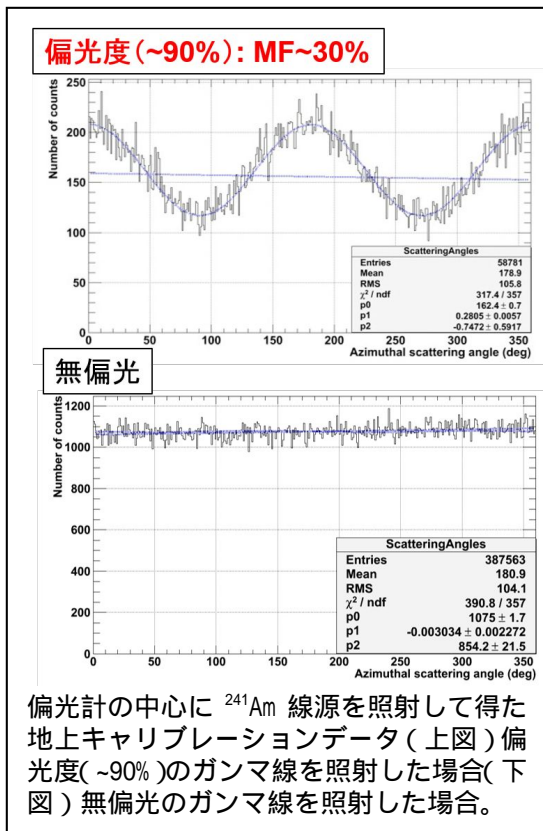
4. 研究成果

(1) PoGOLite 気球の放球前の準備

PoGOLite 検出器の中で、我々日本メンバーが主に開発・製作してきたのは硬 X 線偏光計である。放球前には ^{241}Am 線源から放射される 60keV のガンマ線を用いて、偏光計の校正を行った。偏光計は以下のような形をしており、61 本の主検出部で、天体からの硬 X 線がコンプトン散乱と光電吸収を起こした場所を同時に検出することで、入射した光子のコンプトン散乱角の異方性を測定できる(偏光した光子は、偏光方位角と垂直の方向に散乱しやすい)。

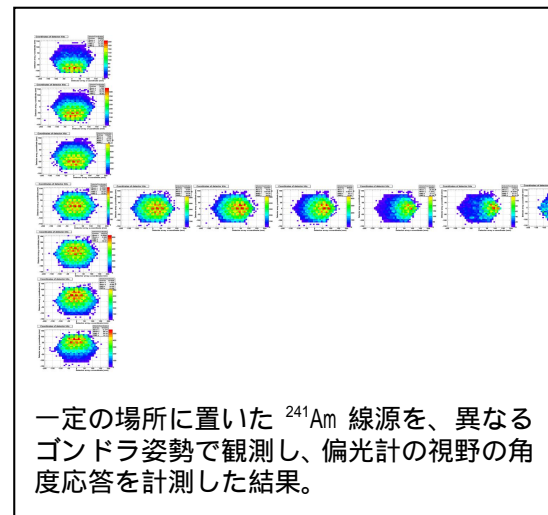


^{241}Am から放射されたガンマ線はそのままでは無偏光である。これを実際に検出器に照射すると、以下の下図のように偏光計は角度の異方性を 1%以下でしか示さないことを確認することができた。一方で、線源から放射されたのち、一旦プラスチックで散乱されたガンマ線は約 90%の直線偏光を示す。これを偏光計の中心へ照射した際のデータが上図であり、検出器の角度応答が約 30%のモジュレーションファクター (MF) を示すことを実際に検証することができた。



下は、 ^{241}Am を一定の位置に置くことで天体を模擬させ、この状態で PoGoLite 気球の姿

勢を上下左右に移動することで、偏光計の視野を較正した結果である。検出したガンマ線のイベント数が高い場所が変化していることが分かり、これにより主検出部の上部で視野を絞っているコリメータの角度応答を調べることができた。



(2) PoGoLite 気球の放球と天体観測

3. 方法で述べたように、2011 年と 2012 年には、気球の不具合や悪天候により、PoGoLite 気球は正常なフライトを実施することはできなかった。2013 年は 6 月末に検出器、ゴンドラともにフライトレディーな状況にすることができた。7 月になってロシア政府からロシア上空をフライトする許可が下りたため、天候に恵まれれば北極圏を周回する準備が整った。そして 7 月 12 日、ついにスウェーデン・キルナ市にある Esrange 気球実験場から気球を放球することに成功した。以下に、放球の様子を載せる。またその下は、スウェーデンからその後カナダ上空、ベーリング海峡を経て、7 月 26 日にロシアのノリリスク近郊で降るされるまでの 14 日間のフライトの軌跡である。北極圏を周回し、これだけ長期間のフライトを実施したのは世界初の成果である。

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、本研究も目標天体である「はくちょう座 X-1」だけでなく、他のブラックホール連星系 GRS 1915+105 やパルサー星雲である「かに星雲」の観測を実施することができた。一方で、硬 X 線偏光計は 3 日目に電源系に不具合が生じ、3 日間の観測データしか取得できていない。着陸した気球をロシアからスウェーデンへ輸出する手続きに時間がかかり、検出器自身とフライトデータが 2014 年になってからやっと手元に戻ってきたため、不具合の原因究明と観測データの詳細な解析は現在も進行中である。

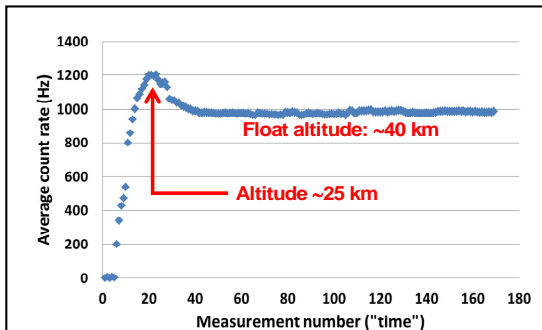


2013年7月12日、放球直前のPoGOLite。



2013年7月12日~26日の14日間のPoGOLite気球のフライトの軌跡。

下の図は、放球直後から高度40kmに到達するまでに、シールド部で観測された主に荷電粒子に起因するバックグラウンドレートの変動を示した図である。約25kmの高度で、Pfozter Maximumと呼ばれる帯域に対応して、最大のレートを示していると考えられ、上空の真空状態でも検出器が正常に動作していたことを示す証拠の1つである。



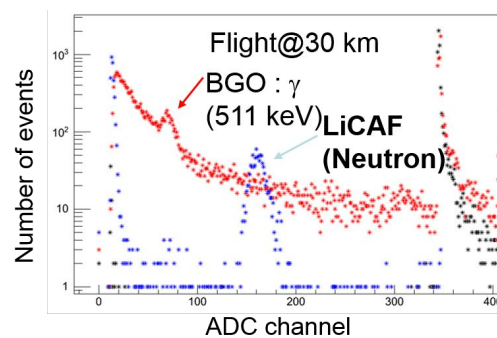
シールド部で検出されたバックグラウンドレートの変動(約半日のデータ)。放球直後(左側)から上昇し、Pfozter maximumで最大に達した後、減少している。

(3)PoGOLino 気球実験による大気中性子バックグラウンドの計測

PoGOLino 検出器は、PoGOLite 検出器の主要なバックグラウンドと考えられる大気中性子を計測するために、日本とスウェーデンで共同開発した。主検出部は、新規開発された熱中性子に感度を持つLiCAFシンチレータを、荷電粒子とガンマ線に感度を持つBGOシンチレータで上下を挟んだフォスウィッチ構造になっている。これは、日本チームが東北大学と(株)トクヤマと共同開発したものである。これを2個用意し、1つはそのまま熱中性子に感度を持たせ、もう1つは厚み7cmの

ポリエチレンの内側に入れることで、元は1MeV程度の入射エネルギーをもつ高速中性子に感度を持たせた。こうして両者で検出したイベント数の違いから、大気中性子のフラックスだけでなく、エネルギースペクトルのベキも推定できる。

PoGOLinoは、2013年3月20日に、PoGOLiteと同じEsrance気球実験場から放球された。この間、放球後3時間にわたって、地上から上空31kmまでの大気中性子の計測を行うことに成功した。下の図は、上空30kmにおいてポリエチレンで覆われた検出器で計測した観測データである。こうして得られた大気中性子の情報は、PoGOLite検出器の硬X線シグナルに対するバックグラウンドの推定に役立つと考えている。



スウェーデン上空30kmにおいて、PoGOLinoにより検出された(青)大気中性子と(赤)ガンマ線+荷電粒子のエネルギースペクトル。LiCAFシンチレータで核捕獲反応を起こした大気中性子がピーク構造として検出されている。

ロシアからの輸出に時間がかかったため、PoGOLiteによる天体からの硬X線偏光の観測データはまだ解析が完了していない。PoGOLinoによって計測された大気中性子バックグラウンドの影響を考慮した上で、結果が出次第、論文や学会などで報告する予定である。またPoGOLiteにより北極圏を初めて周回した際のフライトの実績および経験は、今後長期間フライトを行う他のミッションにとっても非常に有益な成果と考えられる。

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82件、主要なもの3件)

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

2. K. Reitberger, ... H. Takahashi (6番目/6人中), "Gamma-ray follow-up studies on Carinae" Astronomy & Astrophysics, Vol. 544, 1-9 (2012) (査読あり)
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201219249>

3. H. Takahashi et al., "Rossi X-ray Timing Explorer Observations of the Low-mass X-ray Binary 4U 1608-522 in the Upper-banana State" Astrophysical Journal, Vol. 738, 62-71 (2011) (査読あり)
10.1088/0004-637X/738/1/62

〔学会発表〕(計 23 件、主要なもの 3 件)

1. 高橋弘充他、"PoGOLino 気球実験による大気中性子フラックスの計測"、日本物理学会 2014 年春季年会、2014/3/28、東海大学

2. 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、2014/1/9-1/10、宇宙科学研究所・宇宙航空研究開発機構

3. 高橋弘充他、"LiCAF and BGO Phoswich Detectors for Simultaneous Measurements of Atmospheric Neutrons and Gamma-Rays"、IEEE NSS/MIC、2013/10/31、ソウル(韓国)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-heaf.hepl.hiroshima-u.ac.jp/pogo/PoGOLite.html>

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

なし