

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540245

研究課題名（和文） 気球実験による、かに星雲と白鳥座 CygX-1 からの軟ガンマ線偏光測定

研究課題名（英文） Hard X-ray Polarization Measurements on Crab Nebula and Cygnus X-1

研究代表者

釜江 常好 (KAMAE TSUNEYOSHI)

東京大学・大学院理学系研究科・名誉教授

研究者番号：90011618

研究成果の概要（和文）：硬 X 線で偏光が期待される「かに星雲」と「白鳥座 X-1」を気球搭載の偏光計 PoGOLite で観測し、当該天体での放射過程と磁場分布の決定を目指した。偏光計は 2010 年に完成し、スウェーデン北部の ESRANGE 気球基地で太陽パネル、制御系、通信系等を装備したゴンドラに組み込み放球の機会を待ったが、気球納入会社の不良品リコール、放球後のガス漏れ、天候不順などで観測出来ないまま 3 年の計画期間が終わってしまった。

研究成果の概要（英文）：The aim of the research program has been to mount the hard X-ray polarimeter (PoGOLite) we produced with other funds onto a gondola in ESRANGE balloon station in Sweden, and to carry out one-week-long observations of Crab Nebula and Cygnus X-1 onboard a balloon. The polarimeter, control system, and gondola assembly have been built on funds and grants from Stanford Univ., Wallenberg Foundation, JSPS and Swedish Space Board. Two possible long-duration flight routes have been considered: the shorter one is one-week-long flight from Sweden to northern Canada and the longer one is three-week-long circumnavigation around the North Pole. The polarimeter is most sensitive between 20keV and 60keV and capable of detecting 3% polarization in the energy band for Crab Nebula and Cyg X-1 in the hard state. Successful detection of polarization in the targets in the energy range will unravel the emission mechanism and the orientation of the magnetic field at the hard X-ray sources. So far no high accuracy measurement has been made in the energy range. The funds will be used to support Japanese collaboration members to participate in the balloon flight and data analyses.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：気球実験、軟ガンマ線偏光検出器、かに星雲、白鳥座、ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

研究代表者および連携研究者と研究協力者は、低バックグランド検出方法、井戸型フォスウィッチ検出器を考案し、硬 X 線領域での天体観測装置の開発で世界をリードしてきた。このタイプの検出器は、Suzaku 衛星硬 X 線検出器 (HXD) に採用され、8 年間にわたり、ブラックホールやパルサー星雲が放出する硬 X 線を捕らえ、それらの天体にある高エネルギー電子、磁場や光子場の様子を解明してきた。しかし硬 X 線を放出するメカニズムをシンクロトロン放射とコンプトン散乱の 2 つに絞り込むことが出来たが、前者では磁場の形状、後者では高密度の光子場の分布を特定するに至らなかった。これを解明する最適な方法が、硬 X 線の偏光度と偏向角の測定であることは、多くの科学者の共通認識であった。最大のチャレンジは、低バックグランドの偏光計を製作し、比較的手軽な方法で観測することであった。

研究代表者たちは、低バックグランド検出器作成の経験を偏光計に応用し、比較的手軽にできる気球実験で、代表的な中性子星天体 (かに星雲) とブラックホール天体 (白鳥座 X-1) の観測をスウェーデンや米国の研究者たちと共同で行うことを提案した。幸いスウェーデンのウォーレンベルグ財団やスウェーデン宇宙開発公社のサポートを得ることで、スウェーデン北部の ESRANGE 気球基地から北カナダあるいはシベリア経由で北極周回の飛行への道が開けた。「かに星雲」と「白鳥座 X-1」が放出する高エネルギー放射のメカニズムを解明できるだけでなく、ロシア政府の承認を得て、北極周回の長時間気球観測を可能にする点で、極めて大きな意義をもつ計画となった。

2. 研究の目的

かに星雲は、多くの天体物理分野で標準光源となり、粒子の加速機構など、重要な理論を検証する場となってきた。偏光測定も例外でない。かに星雲では、パルサーで加速された電子や陽電子が高速回転する磁気圏を離れパルサー星雲と呼ばれる空間へと拡散するが、理論的考察から、回転面上にドーナツ状の電子・陽電子磁気プラズマを形成することが予想されている。1970 年台の小田稔や牧島一夫の硬 X 線気球観測などにより、このドーナツ状の磁気プラズマが発見された。2000 年台に入り、チャンドラ衛星による精密な X 線撮像で、脈動する磁気プラズマのリングが観測されている。1970 年台にはワイスコフたちが、かに星雲から飛来する軟 X 線 (5.5 keV

以下) の偏光を測定したが、結果はドーナツ状の磁気プラズマに巻きついた高エネルギー電子が出すと予測される偏光度と偏向角からずれていた。私たちは、測定された X 線のエネルギーが低いため、より広い領域に分布する低エネルギーの電子の寄与が勝っていたと推測している。そして高エネルギー電子だけが寄与する硬 X 線で、偏光度を 3%、偏向角を 2-3 度の精度で測定し、ドーナツ状の磁気プラズマに巻きついている高エネルギー電子とそれを支える磁力線の方向を決定することを目的とした。

白鳥座 X-1 は、太陽の約 10 倍の質量をもつブラックホール連星で、X 線から軟ガンマ線の波長域で明るく輝いている。X 線の明るさやスペクトルが、数ヶ月から数年単位で大きく変わることから、ブラックホールの周りに形成されるガス円盤 (降着円盤と呼ばれる) の状態が大変遷すると考えられている。軟 X 線では暗いが硬 X 線で明るい状態 (ハードステート) では、ブラックホール近傍から出る熱的な軟 X 線が、降着円盤から噴出す高温の電子により散乱され、より高いエネルギーの硬 X 線になると予想されている。この仮説は、硬 X 線や軟ガンマ線の領域で偏光度を測ることで確かめることができるし、偏光角の測定で降着円盤の傾きも決定できる。

今まで気球実験は、荷電粒子測定が少ない成功例を除き、衛星計画提案前の予備実験と見られ、科学成果を生まない場合が多かった。本研究は、現実的予算内で 1 週間を超える長期観測を可能にするという、重要な技術的な側面も持っている。

3. 研究の方法

本研究で使う偏光計は、低バックグランドを実現できる 61 本の井戸形フォスウィッチ検出器アレイを 6 角柱の最密構造に組み、そこでコンプトン散乱した硬 X 線が出す蛍光を記録することで偏光度や偏向角を測定するものである (図 1 参照)。各井戸形フォスウィッチ検出器ユニットは、長い蛍光減衰時間のプラスチック・シンチレーターで作られた中空の 6 角筒、早い蛍光減衰時間のプラスチック・シンチレーターの 6 角柱と BGO 結晶から構成される (図 1 左図)。中空の 6 角筒は約 2 度の開口角をもつコリメーターとして働き、BGO は後方から来る硬 X 線を止める役目をする。狭い開口角から入ってくる硬 X 線は、6 角柱のプラスチック・シンチレーターでコンプトン散乱し、真横あるいは 1 本離れた 6 角柱で光電吸収される。その位置関係を使って、入射してきた硬 X 線の偏光度と偏向角を測定する (図 1 右図参照)。

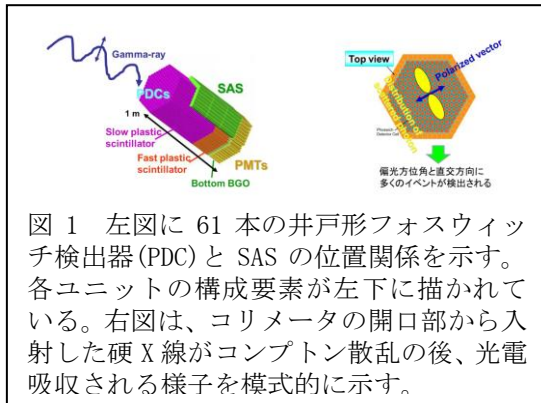


図1 左図に61本の井戸形フォスウィッチ検出器(PDC)とSASの位置関係を示す。各ユニットの構成要素が左下に描かれている。右図は、コリメータの開口部から入射した硬X線がコンプトン散乱の後、光電吸収される様子を模式的に示す。

この原理で測定される偏光測定に最適なエネルギー帯域は、20-60keVであり、かに星雲と白鳥座X-1から飛来する硬X線の偏光度と偏向角測定には最適である。これらの測定でのバックグラウンドとなるのは、宇宙線が大気上層部で作る中性子線とガンマ線である。PoGOLiteは、中性子を遮蔽するための厚さ10-15cmのポリエチレン(図1には描かれていない)と、ガンマ線を遮蔽する厚さ5cmのBGO(図1のSAS)で囲まれている。

観測では、PoGOLiteの軸を観測対象に向け、軸の周りに装置の位相角を左右180度回転させながら、コンプトン散乱したユニットと光電吸収したユニットを記録する。その結果は、図2に示すように、コンプトン散乱された事象の位相角の分布が、Sine関数的に変動する。Since関数の振幅が偏光度を与え、北極星方向を位相角ゼロと定義したときのSine関数の位相が、偏向角となる。

観測は北スウェーデンから北カナダ、さらには北極周回軌道で行われる。そのため、

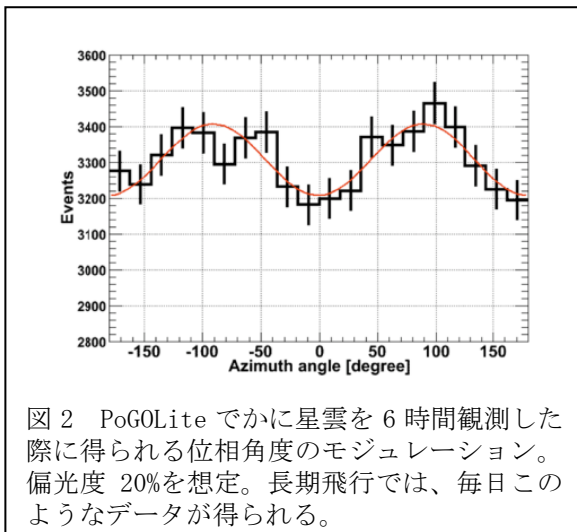


図2 PoGOLiteでかに星雲を6時間観測した際に得られる位相角度のモジュレーション。偏光度20%を想定。長期飛行では、毎日このようなデータが得られる。

ゴンドラの制御やデータの回収は、通信衛星網(この場合イリジウム)を通して行う。経費を抑えるには、通信を最小限にしなければならない。本計画では、緊急以外の場合は、自動的に観測が進行するように設定する。そし

て観測データは、固体メモリーに書き込み、ゴンドラと一緒に回収する予定である。予定している周回飛行では、太陽が気球に当たり続けるが、高度が大きく変化するため、偏光計が見る大気の厚さも大きく変動する。これらに対処するためのプログラムを含めた、総合的なテストが、毎年放球場で行われる。そのために費やす時間と努力は大変なものとなっている。図3に2012年夏のESRANGE気球基地でのテストの状況を示す。重量の軽減が最大課題であるため、太陽パネルは最適な角度に固定している。



図3 2012年7月に放球準備中のPoGOLite

4. 研究成果

2010年夏には、PoGOLiteは何時でも打ち上げられる状態になっていた。しかしオーストラリアで使用予定と同型の米国製気球が破裂する事故が起きた。それが気球の欠陥による可能性があったため、原因調査が完了するまで放球を中止することとなった。計画の2年目にあたる2011年には放球の機会に恵まれたが、上昇中に気球からヘリウムガスが漏れていることが判り、急遽回収することとなった。計画の最終年にあたる2012年にも放球を試みたが、天候不順が続き、放球が出来ないままシーズンを終えてしまった。残念ながら本基盤研究Cは、観測ができないまま終わってしまった。我々と関係がない場所での事故や不安定な気候条件に起因しているが、気球実験等の場合は計画期間が延長できるような余地を残してほしいと願っている。幸いスウェーデン側の資金等により、2013年の7月にも、北極周回飛行を試みるようになっていた。この観測に成功すれば、科学的成果だけでなく、日本の宇宙科学研究者に一週間を超える長時間気球飛行の可能性を開くことになる。これは極めて大きな意味を持つ。

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 1 件)

- ① H. Takahashi et al. (計 31 名), “The Polarized Gamma-Ray Observer, PoGOLite”, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 8, Pm_1-Pm_5, 2010, 査読有, DOI:10.2322/tastj.9.Pm_1

[学会発表] (計 5 件)

- ① 河野貴文、高橋弘充、釜江常好 他, “宇宙線 X 線検出器 PoGOLite 気球実験の地上校正試験”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 28 日, 広島大学
- ② 高橋弘充、河野貴文、釜江常好 他, “硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球実験の現状と今後”, 宇宙科学シンポジウム, 2012 年 1 月 5 日-1 月 7 日, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
- ③ H. Takahashi, “A Thermal-Neutron Detector with a Phoswich System of LiCaAlF₆ and BGO Crystal Scintillators onboard PoGOLite”, IEEE Nuclear Science Symposium, 2010 年 11 月 1 日, Tennessee・USA
- ④ 高橋弘充, “硬 X 線、軟ガンマ線観測のバックグラウンドとなる中性子の検出”, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 23 日, 金沢大学
- ⑤ 高橋弘充, “PoGOLite 気球実験のパスファインダーフライト(1):大気中性子モニター”, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 12 日, 九州工業大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

釜江 常好 (KAMAE TUNEYOSHI)
東京大学・大学院理学系研究科・名誉教授
研究者番号: 90011618

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

牧島 一夫 (MAKISHIMA KAZUO)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 20126163