

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340039

研究課題名(和文) 硬X線偏光気球観測による非熱的放射機構と構造の解明

研究課題名(英文) Hard X-ray polarimetry balloon observations to examine non-thermal emission

研究代表者

國枝 秀世 (Kunieda, Hideyo)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00126856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙において高エネルギーに加速された荷電粒子による非熱的X線放射を決定付けるため、20-60 keVの硬X線領域での撮像偏光気球観測X-Caliburを米国と共同で実施した。名大は硬X線望遠鏡と昼間星カメラを、NASAがゴンドラ、ワシントン大学が偏光検出器を準備した。2013年は気象条件が揃わず延期したが、2014年9月に9時間半のフライトを実施した。星カメラは正常に作動したが結果的にPOINTING観測はできなかった。検出器はX線背景放射を観測し、荷電粒子起因のノイズの排除によりほぼ予想通りの硬X線係数が観測された。この実績に基づき、2016年の打ち上げ、衛星ミッション提案も計画されている。

研究成果の概要(英文)：In order to confirm the non-thermal X-ray emission from accelerated particles, hard X-ray (20-60 keV) imaging polarimetry balloon experiment "X-Calibur" was performed with groups in USA. Hard X-ray telescope and a day time star camera were developed by Nagoya University. Gondola was prepared by a NASA group, and the polarimeter was developed by a group of Washington University. In 2013, flight was not done because of bad wind condition in the launch window. In September 2014, the flight was successfully performed for 9.5 hours. Though the star camera worked well, pointing observation was not possible. The detector detected X-ray sky background and the observed counting rate was close to expected one after the noise reduction logics. Based on the present flight, next flight in September 2016 and a proposal of polarimetry satellite mission are being considered.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線 偏光 望遠鏡 気球実験

1. 研究開始当初の背景

X線観測は1-10 keVの詳細な観測で、宇宙における激しい現象を次々と明らかにして来た。その半ばは、高温プラズマに代表される熱的現象が主役であった。その中で、超新星残骸、銀河団などで、高エネルギーに加速された荷電粒子による、非熱的放射が見え始めて来た。そこでは磁場による加速が期待され、それを決定付けるのは硬X線の強度分布観測と、偏光観測である。特に非熱的成分が卓越する20-60 keV領域ではより多くの偏光成分が期待され、硬X線領域での撮像偏光観測が重要だと考えられた。

2. 研究の目的

X線観測においては、三つの新しい軸が考えられている。(1)硬X線撮像観測、(2)軟X線高分解能分光、(3)偏光観測の三つである。前者の二つはASTRO-Hの二つの柱として開発が進められている。偏光観測は、10 keV以下の軟X線領域で始められているが、偏光を示す非熱的プロセスは、10 keV以上の硬X線領域でこそ、顕在化すると考えられる。本計画では、これまで開発を進めて来た、気球搭載硬X線撮像用望遠鏡を用い、米国のチームと共に、世界で初めての、硬X線偏光気球観測を行うことを目的とする。我々は硬X線の偏光観測により、ASTRO-Hの観測と共に新たな世界への扉を開く。本提案では、既に完成している硬X線望遠鏡と星カメラを米国で開発中の偏光検出器と組み合わせることで撮像偏光観測システムを搭載した気球実験を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 硬X線望遠鏡

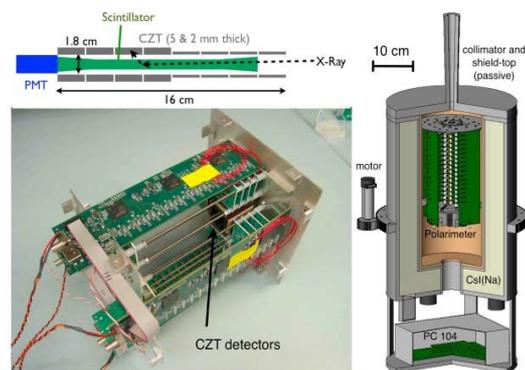
当グループでは、多層膜スーパーミラーを成膜して数十 keV まで集光結像する硬X線望遠鏡を世界に先駆け実現した(Yamashita et al., Appl. Opt. Vol. 37, 8067-8073(1998))。これは、Pt と C の様に軽重二種の元素の薄膜(~nm)を数十~百ペア積層したもので、1組毎の周期長を変化させて、幅広いエネルギー領域で十分な反射率を得た。これを、Suzaku 衛星搭載軟X線望遠鏡で用いた、レプリカ法と組み合わせることで、超軽量の硬X線望遠鏡を開発した。1997年の試作鏡に続き、世界最初の天体観測を、2001年に日米共同気球実験 InFOC μ S 計画の第一回飛翔実験で実現した。硬X線望遠鏡は名古屋大が担当し、 Gondola、姿勢系、焦点面検出器はNASAゴダード研究所のTueller博士のグループが準備した。2004年には第二回、第三回の飛翔実験を行い、9月16日の観測では幾つかのX線連星で、明確な硬X線像と、X線パルス波形を検出した(Okajima et al. Proc. SPIE, Volume 5898, pp. 452-459(2005))。本プロジェクトでは、InFOC μ S で回収した多層膜スーパーミラー硬X線望遠鏡を再調整、

集光特性の再測定を行って用いることにした。右図が名古屋大学が準備し、搭載した硬X線望遠鏡である。



(2) 偏光検出システム

本研究課題の協力者である、ワシントン大学のKrawczynskiらは、新しく硬X線偏光計を開発し、気球実験を我々と共同で、NASAの気球実験に提案し(X-Calibur Project: NNH10ZDA001N-APRA)2013年度から採択され、2014年の打上げが認められた。搭載に用いられた検出器の写真を以下に示す。



(3) Gondola

気球自身は前述のInFOC μ S 実験に向けて開発をして来たGondola、姿勢制御システムを、共同提案者であるInFOC μ S チームが準備、提供した。上記偏光検出器を既存の硬X線撮像検出器と入れ替えることで硬X線偏光撮像システムを構成した。

(4) 昼間星カメラ

気球観測においては光学軸を目標天体に向ける姿勢制御のため、星カメラを搭載する。気球高度では太陽からの直接光を避けるバツフルと可視光カットのフィルターを用いることで通常のCCDカメラで姿勢決定が可能になる。この昼間星カメラとバツフルのシステムは名古屋大学が開発した。

4. 研究成果

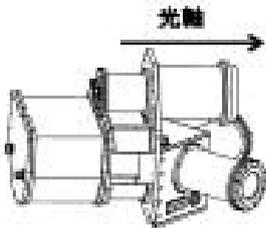
(1) 硬X線望遠鏡

望遠鏡の集光特性はInFOC μ S 実験の前で測定しており確定している。有効口径40cm、焦点距離8m、30 keVの有効面積80 cm²、結像性能2.5分HPD(光量50%が含まれる直径)。

(2) 昼間星カメラ

気球高度は大気圧の300分の1であるため、カメラ光学系と回路系を与圧容器に収納した(下図)。中央の口径の大きなカメラが望遠鏡観測軸に平行に置かれる。脇の2本の光学系は光軸に垂直な2軸であり、仰角が大きな天体観測において、主軸のカメラが気球自

身で隠されたケースの姿勢決定を行うものである。実天空の撮影、光学系の軸と設置した基準鏡との相対角度測定、与圧容器の気密性の確認、などを実施した上でNASAへ発送した。



(3) 気球ゴンドラへの組み込み

調整済みの硬X線望遠鏡、昼間星カメラを鏡筒の先端に組み込みを NASA Goddard 研究所で行う。信号系、電源系の接続と通信(コマンド送信とデータ読み出し)試験を行った。次にセオドライト等を用い、鏡筒の先端のプレートに一体に取り付け後、基準鏡を用い、衛星搭載姿勢検出と光学軸合わせを行った。



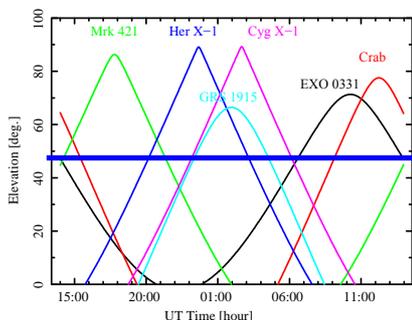
(右図では光軸カメラのバッフルは未装備)

(4) 打ち上げ準備

2013年9月の打ち上げを目指し、New Mexico州 Ft. SumnerにあるNASA気球実験場に移動し、打ち上げに向けた射場での準備を進めた。気球打ち上げにおいては、西風が東風に風向きが切り替わる秋口(9月)に飛翔をすると、打ち上げ後の水平移動が最小限になり、移動局なく長期間観測が可能になる。その風待ちをしている内に、2013年度の打ち上げ許容期間が過ぎてしまい、この年度の気球飛翔を諦めることになった。

(5) 打ち上げオペレーション

2014年8月に Ft. Sumner に機器、人員が結集し、前年度に確立した手順に従い打ち上げ準備を進めた。打ち上げ後の観測計画について検討した。次の図は、横軸が時間、縦軸が仰角でプロットした観測計画である。天体の動きに合わせ、大気吸収の少ない仰角の大きな天体をつなぎ合わせて計画した。



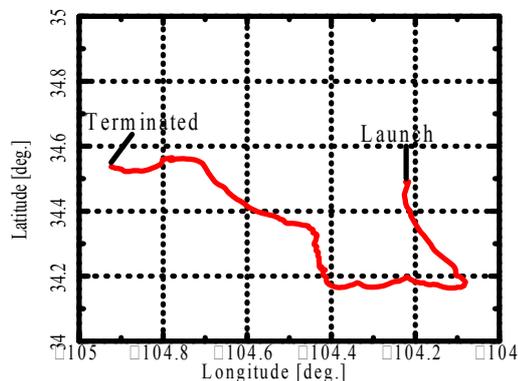
打ち上げ直前の気球ゴンドラの写真を示す。



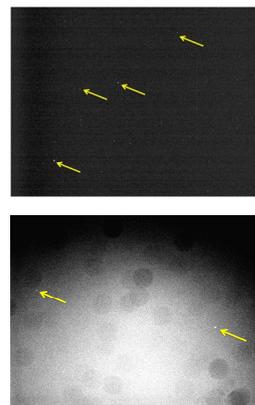
右端が鏡筒先端であり左端に検出器を組み込んだ与圧容器、姿勢系、通信系がある。

(6) インフライトデータ

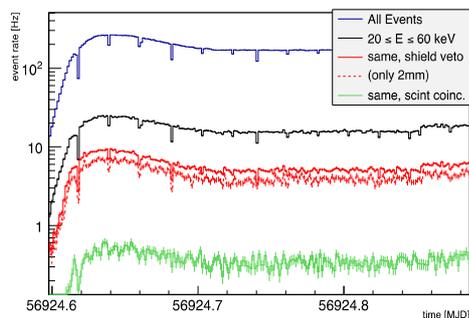
2014年9月24日14^h30^m22^s(UT)に打ち上げられ、24^h00^m(UT)に切り離し、観測を終了した。下図が飛行経路である。



右図は昼間星カメラによる実際の空のイメージである。上は打ち上げ前に夜間撮影したイメージである。右下は上空でのデータであり、星像も見えるが、光軸が太陽に近かったために明るい領域が中央に広がっている。



観測されたX線強度の時間変化をして示す。上から順にノイズ除去の条件を厳しくしている。緑の示す計数が天空からと考えられる



(7) 今後の展開

2014 年度に続く気球打ち上げ計画として 2015 年度は準備が米国側で整わなかったが、2016 年度秋が次の可能性として想定されている。2014 年度の観測データを解析して必要な改良を進める。

更に米国では本プロジェクトと同様の硬 X 線偏光観測を目指す衛星計画 Polarization Spectroscopic Telescope Array(PolSTAR)が検討されている(ref 2)。一般に気球観測で開発し、実観測でその性能を検証した上で、本格的な衛星計画に進むことが健全な進展と考えられている。本研究もその流れの一つとしての役割を果たしたとすることができる。

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 5 件)

1. Matthias Beilicke, Yoshito Haba, (15 名中 14 番目) et. al., "First flight of the X-ray polarimeter X-Calibur", Proc. IEEE Aerospace Conference, P.1-10, 2015.

DOI:10.1109/AERO.2015.7118915

2. Krawczynski, H., Matsumoto, H. (52 名中 39 番目), et al., "X-ray polarimetry with the Polarization Spectroscopic Telescope Array (PolSTAR)"

Astroparticle Physics, Volume 75, p. 8-28., 2016, 査読有り,

DOI: 10.1016/j.astropartphys.2015.10.009

3. Beilicke, M., Haba, Y. (9 番目), Kunieda, H. (11 番目), Matsumoto, H. (14 番目), et al. (合計 20 名) "The hard X-ray polarimeter X-Calibur" HIGH ENERGY GAMMA-RAY ASTRONOMY: 5th International Meeting on High Energy Gamma-Ray Astronomy. AIP Conference Proceedings, Volume 1505, pp. 805-808 (2012)., 2012, 査読無し

DOI: 10.1063/1.4772382

4. Beilicke, M., Haba, Y. (10 番目), Kunieda, H. (12 番目), Matsumoto, H. (14 番目), et al. (合計 20 名) "Design and tests of the hard X-ray polarimeter X-Calibur" Nuclear Inst.

and Methods in Physics Research, A, Volume 692, p. 283-284., 2012, 査読有り

DOI: 10.1016/j.nima.2011.12.111

5. Beilicke, M., Haba, Y. (10 番目), Kunieda, H. (13 番目), Matsumoto, H. (16 番目), et al. 合計 22 名, "Design and tests of the hard x-ray polarimeter X-Calibur" Proceedings of the SPIE, Volume 8507, id.

85071D 11 pp. (2012)., 2012, 査読なし

DOI: 10.1117/12.929292

[学会発表](計 1 件)

1. 佐治 重孝, 國枝 秀世, 田原 譲, 松本 浩典, 田村 啓介 (名古屋大学), 幅良統 (愛知教育大学), 「X 線気球観測実験 X-Calibur の現状」

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.u.phys.nagoya-u.ac.jp/uxgj.html>

<http://physics.wustl.edu/x-ray/xcalibur.shtml>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

國枝 秀世 (KUNIEDA Hideyo)

名古屋大学大学院・理学研究科・教授

研究者番号: 00126856

(2) 研究分担者

田原 譲 (TAHARA Yuzuru)

名古屋大学大学院・理学研究科・教授

研究者番号: 10135296

松本 浩典 (MATSUMOTO Hironori)

名古屋大学大学院・理学研究科・准教授

研究者番号: 90311365

幅 良統 (HABA Yoshito)

愛知教育大学・教育学部・講師

研究者番号: 60377950

(3) 連携研究者: なし