

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01908

研究課題名（和文）世界最高感度の硬X線の偏光観測で実現する超巨大ブラックホールの相対論的効果の測定

研究課題名（英文）Hard X-ray polarimetric observations of relativistic effects around super-massive black holes

研究代表者

高橋 弘充（Takahashi, Hiromitsu）

広島大学・先進理工系科学研究科（理）・准教授

研究者番号：10536775

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000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XL-Calibur気球を打ち上げ、硬X線帯域において天体の偏光観測を高感度に実施することであった。そのために、日本製FFAST望遠鏡の調整を実施した後、較正データを取得し、XL-Calibur gondolaに搭載させた。コロナ禍で南半球でのフライトが実施できなかったことから、2022年7月にスウェーデンからカナダまで7日間のフライトを実施した。残念ながら気球運用の不具合により、天体信号は観測されなかったが、gondolaは無事に回収できている。次回フライトを成功させ、超巨大ブラックホールから硬X線偏光情報の取得を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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。しかしX線・ガンマ線帯域では、検出メカニズムが複雑なため検出器開発が遅れてきた。地表にはX線・ガンマ線は届かないが、上空40kmの成層圏では20keV以上の硬X線が観測可能である。今回、全長12mで総重量2.5トンの巨大XL-Calibur gondolaをフライトさせ、各機器は正常に動作し、天体観測が可能であることが実証できた。次回のフライトでは、長時間観測を実施することで、硬X線帯域での天体からの偏光情報の取得が期待される。

研究成果の概要（英文）：To perform highly sensitive polarimetric observations in the hard X-ray band, we launched the XL-Calibur balloon with an international collaboration team. The Japanese FFAST mirror was adjusted, calibrated and mounted on the XL-Calibur gondola successfully. There were no flight opportunities from the southern hemisphere due to the coronal disaster, we conducted a 7-day flight from Sweden to Canada in July 2022. Unfortunately, no celestial signals were observed due to a malfunction in balloon operations, but the gondola was successfully recovered. The next flight will again aim to obtain hard X-ray polarization information from supermassive black holes.

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 ブラックホール

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

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、パルサー星雲の磁場構造や、ブラックホール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、2010年以前に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。こうした中、我々は2016年に偏光観測に特化したPoGO+気球実験により、20-180 keVの硬X線において上記2天体から高精度な偏光情報を取得することに成功した。これにより、硬X線での偏光観測の有益性を示すことができた一方で、より高感度な観測には、望遠鏡により集光しバックグラウンドを低減する必要であることが示された。

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、望遠鏡を搭載する硬X線偏光観測気球XL-Calibur実験(PI:ワシントン大学Henric Krawczynski教授)を推進し、より高感度な硬X線偏光観測の実現を目指した。

(1) FFAST望遠鏡の準備と偏光計の低バックグラウンド化

XL-Calibur実験に搭載する硬X線望遠鏡は、日本でFFAST衛星計画のために製作されていたもので、「ひとみ」X線衛星と同型の世界最大の有効面積を誇る。3セグメントのうち2つはフライト準備が整っていたが、残り1セグメントは反射フォイルの位置調整がされていない状況であった。そこで、この1セグメントの調整および望遠鏡全体の較正実験を実施した。

偏光計についても、前身のX-Calibur実験よりもさらなる低バックグラウンドを実現するため、検出部のCZT半導体検出器およびアクティブシールド部に改良を施した。

(2) XL-Calibur気球のフライト

準備した望遠鏡と偏光計により、天体観測のため気球を打ち上げた。当初は、全天でX線で一番明るい超巨大ブラックホール「Cen A」観測を計画していた。しかし、コロナ禍で米国McMurdo南極基地が閉鎖され、南半球でのフライト機会が閉ざされた。そのため、北半球においてスウェーデンからカナダへの1週間フライトを実施した。

3. 研究の方法

(1) FFAST望遠鏡の準備と偏光計の低バックグラウンド化

望遠鏡の調整および較正には、天体からの硬X線信号を模擬するため、SPring-8のBL20において200m先の光源からの平行硬X線を利用した。まず3期にわたって、望遠鏡にある2段の反射鏡の位置を μm 単位で調整した。調整後の4期目において、20-70 keVのエネルギーにおいて、較正データである有効面積および角度分解能(half power diameter: HPD)を計測した。

CZT半導体検出器については、従来は2mm厚であったが、観測範囲の上限80keVに対して厚すぎた。そこで0.8mm厚に薄くし、バックグラウンドを1/2.5に軽減を図った。この際に、新しい素子でも問題なくエネルギー計測できることを調べた。従来のアクティブシールド部は、回路が1kHzしか処理できず、閾値が1MeVと高い状況であった。そこで、「すざく」X線衛星の光電子増倍管の回路を利用し、処理を高速化させた。またシンチレータをCsI(Na)からガンマ線阻止能の高いBGOに変更した。

(2) XL-Calibur気球のフライト

(1)で準備した各機器は、米国NASA/WFFやCSBFでの噛み合わせ試験を実施した後、2022年7月12日にスウェーデン・キルナ市にあるEsrangle気球実験場から打ち上げることができた。7月18日にカナダ北域に着陸するまで高度40km付近を7日間フライトした。

4. 研究成果

(1) FFAST望遠鏡の準備と偏光計の低バックグラウンド化

FFAST硬X線望遠鏡を、SPring-8で実験した際の様子と、各セグメントおよび望遠鏡全体で較正された有効面積と角度分解能を図1、2に示す。有効面積は $175\text{cm}^2@30\text{keV}$ 、 $73\text{cm}^2@50\text{keV}$ であり、角度分解能HPDは $2.0'@30\text{keV}$ 、 $2.1'@50\text{keV}$ と、「ひとみ」衛星と同程度であり、XL-Calibur実験の要求性能を満たすことが実測された。



図1: SPring-8において、反射フォイルを位置調整した際のFFAST望遠鏡。口径450mm。

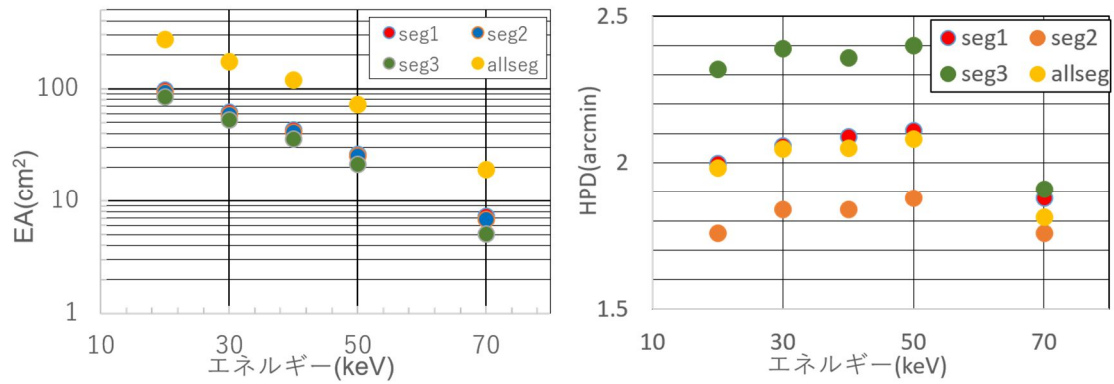


図 2 : FFAST 望遠鏡の 2022 年フライト前の有効面積 (左図) と角度分解能 (右図)。反射フォイルの位置を調整した後の最終結果。3 つの各セグメントについての結果と、望遠鏡全体の結果を載せている。

硬 X 線での測定後、成層圏での低温環境で温めるためのヒーターや温度計を設置し、望遠鏡の集光位置とスタートラッカーと視線方向を調整するための可視モニターカメラも設置した。こうしてフライト準備を整えた後、打ち上げ場のスウェーデンへ輸送した。

厚みを 2mm から 0.8mm に薄くした CZT 半導体検出器については、初期の素子について ^{152}Eu 線源を利用して、性能評価を行った (図 3)。その結果、高圧電源を問題なくかけることができ、40keV でのエネルギー分解能が 4keV 以下と従来から変化ないことが確認された。

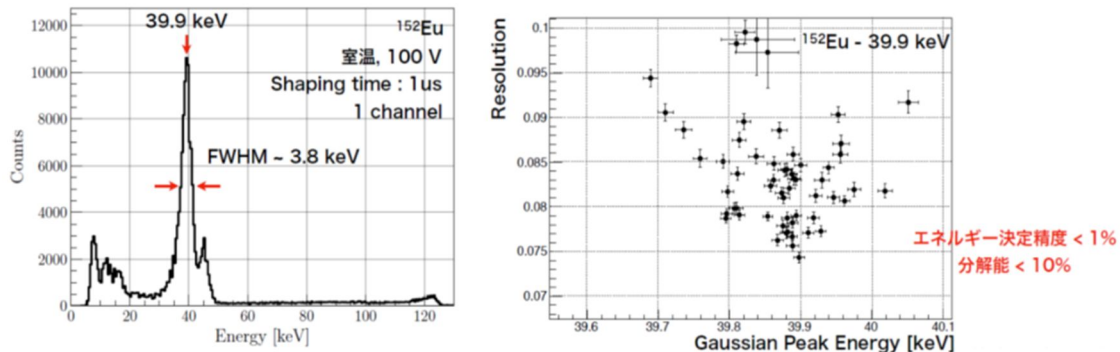


図 3 : 新規に製作された 0.8mm 厚と薄い CdZnTe (CZT) 半導体検出器の性能評価。左図 : ある 1 チャンネルの ^{152}Eu エネルギースペクトル。右図 : フライト用 ASIC を利用して 32 チャンネル同時読み出しをした結果。

アクティブシールド部については、光電子増倍管のプリーターにクランプダイオードを導入することで、大信号からの復帰を早め、後段の読み出し回路も高速化し、20kHz の信号レートに耐えられるようにした。エネルギー閾値を 60keV 以下とすることに成功した。

偏光計全体では、20mm 角の CZT 検出器が 17 枚、上下に分割された BGO アクティブシールド部が米国とスウェーデンで製作され、米国で組み上げや全体での性能確認が実施された。

(2) XL-Calibur 気球のフライト

フライト直前の XL-Calibur ゴンドラの全体像を図 4 に示す。横に細長いのは、望遠鏡の焦点距離 12m に対応している。2022 年 7 月 12 日の早朝に打ち上げられ、気球は上空 40km では予定通り直径 100m に膨らんだ。打ち上げ地スウェーデンから、着陸地カナダまでの 7 日間のフライト軌跡は図 5 である。着陸から 1 週間で全機器の回収が行われ、次回フライトに利用可能であることが分かっている。今回のフライトで、各機器は正常に動作していることは実証できた。しかし、気球高度を調整するバラスト運用に不具合があり、天体信号を検出することはできなかった。

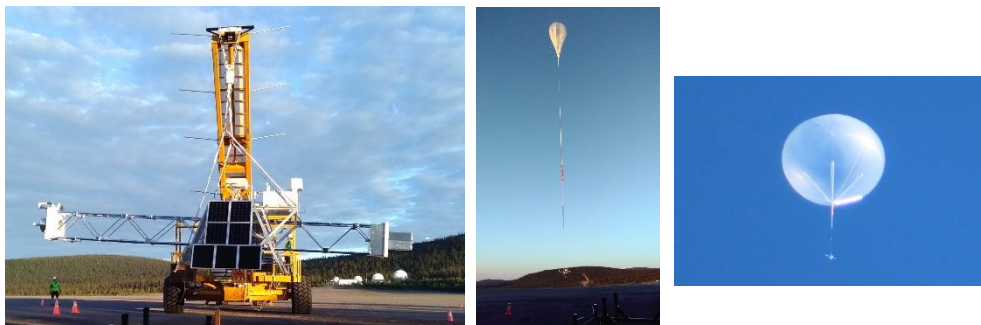


図 4 : Erange 気球実験場での XL-Calibur の様子。左図 : 左側に FFAST 望遠鏡、右側に偏光計がある。中図 : 打ち上げの様子。右図 : 上空 40km で気球は満膨張の直径 100m に達した。

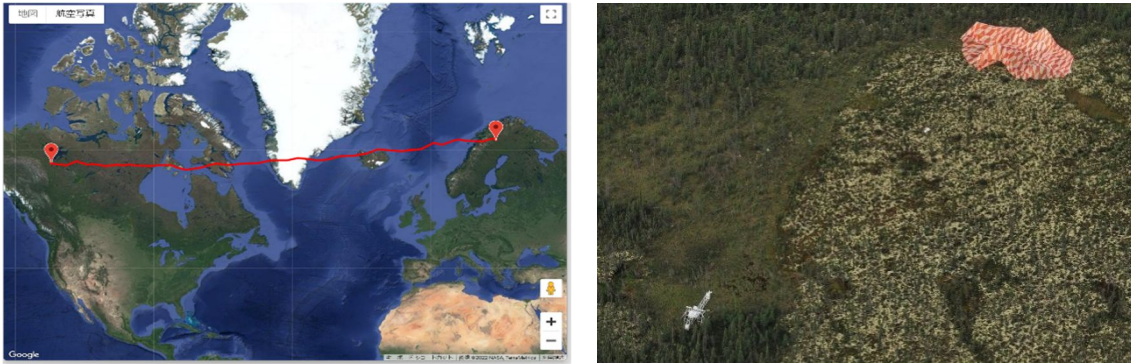


図 5：左図：XL-Calibur のフライト軌跡。スウェーデンからカナダまで 7 日間かけてフライトした。右図：着陸直後の様子。右上の赤い物体はパラシュート、左下で直立している白い物体が XL-Calibur ゴンドラ。(NASA/CSBF)

2022 年フライトの不具合原因が解明されていることから、NASA との協議により、XL-Calibur 気球の今後のフライトは 2024 年に再度スウェーデンから計画されている。この成功の後には、南極における南半球でのフライトも実施できる見込みである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Maeda Yoshitomo, Hayashida Kiyoshi, Kitaguchi Takao, Takahashi Hiromitsu et al.	4. 巻 11444
2. 論文標題 XL-Calibur: the next-generation balloon-borne hard x-ray polarimeter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SPIE proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560319	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hattori Kengo, Hayashida Kiyoshi, Kitaguchi Takao, Takahashi Hiromitsu et al.	4. 巻 11444
2. 論文標題 Current status of the x-ray mirror for the XL-Calibur experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560928	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Takahashi Hiromitsu, Hirade Naoyoshi, Uchida Nagomi, Hirose Kengo, Mizuno Tsunefumi, Fukazawa Yasushi, Yamaoka Kazutaka, Tajima Hiroyasu, Ohno Masanori	4. 巻 989
2. 論文標題 Silicon photomultiplier (Si-PM) comparisons for low-energy gamma ray readouts with BGO and CsI (TI) scintillators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164945 ~ 164945
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164945	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Abarr Q. Hayashida K., Kitaguchi T., Takahashi H. et al.	4. 巻 126
2. 論文標題 XL-Calibur - a second-generation balloon-borne hard X-ray polarimetry mission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102529 ~ 102529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2020.102529	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Uchida Nagomi, Takahashi Hiromitsu, Ohno Masanori, Mizuno Tsunefumi, Fukazawa Yasushi, Yoshino Masao, Kamada Kei, Yokota Yuui, Yoshikawa Akira	4. 巻 986
2. 論文標題 Attenuation characteristics of a Ce:Gd3Al2Ga3O12 scintillator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164725 ~ 164725
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164725	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Iyer N.K., Takahashi H., et al.	4. 巻 1048
2. 論文標題 The design and performance of the XL-Calibur anticoincidence shield	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 167975 ~ 167975
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2022.167975	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Abarr Q., Kitaguchi T., Takahashi H., et al.	4. 巻 143
2. 論文標題 Performance of the X-Calibur hard X-ray polarimetry mission during its 2018/19 long-duration balloon flight	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102749 ~ 102749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2022.102749	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kamogawa Wataru, Kitaguchi Takao, Takahashi Hiromitsu, et al.	4. 巻 12181
2. 論文標題 Optical performance of the x-ray telescope for the XL-Calibur experiment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SPIE proceedings	6. 最初と最後の頁 1218171 ~ 1218179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2626537	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Hiromitsu Takahashi
2. 発表標題 XL-Calibur, the next-generation balloon-borne hard X-ray polarimeter
3. 学会等名 COSPAR 2021 43rd COSPAR Scientific Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiromitsu Takahashi
2. 発表標題 Hard X-ray polarimetry in the stratosphere
3. 学会等名 COSPAR 2021 43rd COSPAR Scientific Assembly (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiromitsu Takahashi
2. 発表標題 XL-Calibur, the Next-generation Balloon-borne Hard X-ray Polarimeter
3. 学会等名 IAU symposium 360 Astronomical Polarimetry 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiromitsu Takahashi
2. 発表標題 Si-PM Performance Comparison for Readout of CsI/BGO Scintillators
3. 学会等名 SiPM workshop: from fundamental research to industrial applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromitsu Takahashi
2. 発表標題 Hard X-ray polarimetric observations of Cygnus X-1 by PoGO+
3. 学会等名 The Future of X-ray Timing (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	林田 清 (Hayashida Kiyoshi) (30222227)	大阪大学・理学研究科・准教授 (14401)	削除：2021年11月12日
研究分担者	北口 貴雄 (Kitaguchi Takao) (30620679)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員 (82401)	
研究分担者	川島 朋尚 (Kawashima Tomohisa) (90750464)	東京大学・宇宙線研究所・特任研究員 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	ワシントン大学	NASA/GSFC	ニューハンプシャー大学	
スウェーデン	王立工科大学			