

硬 X 線集光偏光計 XL-Calibur 気球実験の 2024 年フライトへ向け た準備状況

高橋 弘充, Quin Abarr^A, 青柳 美緒^B, 朝倉 一統^B, 栗木 久光^C, Matthew G. Baring^D, Richard Bose^A, Dana Braun^A, Gianluigi de Geronimo^E, Paul Dowkontt^A, John Elliot^F, 榎戸 輝揚^G, Manel Errando^A, 深沢 泰司, 古澤 彰浩^H, Thomas Gadson^F, Epharaim Gau^A, Victor Guarino^I, 郡司 修一^J, 袴田 知宏^B, 萩原 涼太^B, Kenny Hall^F, 花岡 真帆^B, Keon Harmon^F, 服部 憲吾^B, 林田 清^{B,L}, Scott Heatwole^F, Arman Hossen^A, 井出 峻太郎^B, 今村 竜太^C, 今里 郁弥, 今澤 遼, 石橋 和紀^K, 石田 学^L, 石倉 彩美^B, 石渡 幸太^B, Nirmal Kumar Iyer^{M,N}, 亀谷 紀香^C, 鴨川 航^B, Fabian Kislat^O, Mozi Kiss^{M,N}, 北口 貴雄^G, David Kotsifakis^F, Henric Krawczynski^A, 倉本 春希^B, James Lanzi^F, Lindsey Lisalda^A, 前田 良知^L, 松下 友亮^B, 眞武 寛人, 松本 浩典^B, 峯田 大晴^B, 宮本 明日香^R, 宮澤 拓也^P, 水野 恒史, 中庭 望^R, 野田 博文^B, 大出 優一^B, 岡島 崇^Q, 岡崎 貴樹^B, Izabella Pastrani^A, Mark Pearce^{M,N}, Zachary Peterson^F, Chris Purdy^F, Brian Rauch^A, Felix Ryde^{M,N}, 斎藤 芳隆^L, 阪本 菜月, 佐久間 翔太郎^B, 佐藤 淳矢^B, 澤上 拳明^B, Chris Shreeves^F, Garry Simburger^A, Carl Snow^F, Sean Spooner^O, Theodor-Adrian Stana^{M,N}, David Stuchlik^F, 鈴木 瞳^R, 武尾 舞^R, 玉川 徹^G, 田村 啓輔^Q, 常深 博^B, 内田 和海^L, 内田 悠介^S, Edward Udinski^F, Brett Vincent^F, Andrew West^A, Eric Wulf^T, 米山 友景^L, 善本 真梨那^B, XL-Calibur チーム

広大, WUSTLA, 阪大^B, 愛媛大^C, Rice U.^D, DG CIRCUITS^E, NASA WFF^F, 理研^G, 藤田 医大^H, Guarino Engineering Services^I, 山形大^J, 名大^K, ISAS/JAXA^L, KTH^M, OKC^N, UNH^O, OIST^P, NASA GSFC^Q, 都立大^R, 東理大^S, NRL^T

1. 硬 X 線集光偏光計 XL-Calibur 気球実験

我々の XL-Calibur 計画 (PI: Henric Krawczynski ワシントン大学) は、日米瑞の国際協力により 20~80 keV の硬 X 線帯域で天体の偏光度と偏光方位角を測定することを目的としている (Abarr et al. 2021)。偏光は、シンクロトロン放射や散乱プロセスによって生じるため、X 線・ガンマ線の高エネルギー帯域においても、中性子星やブラックホール、超新星残骸、活動銀河核などにおける高エネルギー放射機構を研究する上で非常に強力な観測手法と考えられている。2~8 keV の軟 X 線については、IXPE 衛星により 2021 年から本格的な偏光観測が始まった。硬 X 線については、これまでに日本とスウェーデンの国際共同ミッション PoGO+や「ひとみ」衛星 SGD 検出器により、全天で定常的に硬 X 線で最も明るい「かに星雲」(パルサー星雲)と「はくちょう座 X-1」(ブラックホール連星系)から、精度の良い硬 X 線偏光観測の結果が得られた。しかし、これらはコリメータ型の検出器で

あり、検出器を大きくするとその分バックグラウンドも増加するため、感度が制限されている。そこで、硬 X 線望遠鏡により天体信号を集光することで、天体信号は損なわずに、検出器を小型化することでバックグラウンドを低減し、感度を向上させるのが XL-Calibur 計画である（全体の様子：図 1）。IXPE 衛星との同時観測により、広帯域での偏光観測を実現し、天体の物理現象の解明が進められると考えている。

前回 2022 年 7 月のフライトは、スウェーデン・キルナの Esrange 実験場から打ち上げられ、カナダまで 6 日間のフライトを実施した。しかし、2 個あるバラストのうち片方を落とす運用をしてしまったため、ゴンドラの左右のバランスが崩れてしまった。このため望遠鏡が指向する仰角を変化させることができず、有効な天体観測を実施することができなかった。上空 40km で検出器が実現した性能については、成果がまとめられている (Iyer et al. 2023)。こうした状況を踏まえ、我々は次回フライトを 2024 年に再度スウェーデンから実施する計画である。



図 1：XL-Calibur 気球の全体写真。2022 年 7 月にスウェーデンから放球し、カナダまで 6 日間のフライトを実施した。全長~12m。左：硬 X 線望遠鏡、右：偏光計。2024 年の北極圏フライトも、同じ構成で実施する。

2. XL-Calibur 検出器の構成

XL-Calibur 気球は、NASA/Wallops の製作した姿勢制御系 (Wallops Arc Second Pointer: WASP) と、ワシントン大学を中心に開発した偏光計と 12m トラス、日本チームが製作した FFAST 硬 X 望遠鏡から構成される。2022 年フライト時と構成は変わっていない。

偏光計は、コンプトン散乱の散乱角の異方性を検出する主検出部（偏光方向と垂直方向に散乱光子が飛びやすい）と、周囲からのバックグラウンドを除去するためのアクティブシールド部から成る。主検出部の CZT 半導体検出器は、0.8 mm 厚（80 keV で 8 割の硬 X 線を検出可能）である。アクティブシールドは、シンチレータを阻止能の高い BGO で、10 kHz 以上の高レートのバックグラウンドも処理できる。

WASP では、スタートラッカーに加え、6 月前後は観測天体「かに星雲が」が太陽方向にあるため、45° 広視野をカバーする太陽センサーも搭載する。

FFAST 硬 X 線望遠鏡は、「ひとみ」衛星の HXT 望遠鏡と同型で世界最大の有効面積を持つ。2022 年フライト後、カナダで回収され、NASA/GSFC の 100m ビームラインで簡易検査、日本に送り戻し SPring-8 において有効面積や光軸測定などの詳細な較正実験を再度実施した。現在は、NASA/GSFC に送付済みであり、X 線と可視光カメラの光軸が一致していることを確認後、2023 年 4 月にスウェーデンへ輸送予定である。

3. FFAST 望遠鏡の再較正

XL-Calibur 気球は 2022 年 7 月 12 日にスウェーデンを離れ、7 月 18 日にカナダの湿地帯に着陸した (図 2)。その後、数名の限られた人員であったが 1 週間の短期間でゴンドラ全体の回収を完了することができた。回収までの間に降雨があり、望遠鏡の内部まで浸水が危惧されたが、外装の SLI がシールドとして働き (図 3)、浸水は免れた。



図 2：カナダでの着陸地点の様子。7 月 19 日 (着陸 1 日後) の撮影 (NASA/CSBF)。正立した状態であった。1 週間で全機器を無事に回収することに成功した。



図 3：熱環境のため望遠鏡の周囲に巻いた SLI。背面も同様。隙間なく配置したことで、着陸後の降雨でも望遠鏡内部への浸水は見られなかった。

着陸や輸送に伴い望遠鏡の反射フォイルの位置が変化し、有効面積や光軸に変化が生じた可能性があった。そのため SPring-8 において、20-70 keV 硬 X 線を照射し、フライト前後での有効面積および光軸の比較を行った。結果として、観測に影響するような有効面積の低減や光軸の変化は見られず、次回フライトにそのまま利用する (Kuramoto et al. 2023)。

スウェーデンや南極の気球打ち上げ場では、X線の平行光を用意することができない。そのため、可視光を利用して望遠鏡の光軸方向を確認する必要がある。今回は宇宙研 D 棟にある可視平行光を利用して、FFAST 望遠鏡の光軸方向が求められること (図 4)、その集光位置の絶対値が SPring-8 において X 線で求めた位置と一致することを確認した。これにより、来年スウェーデンにおいても、望遠鏡の設置に問題がない (集光位置が偏光計と一致している) ことを、可視平行光を用いて確認することができる。

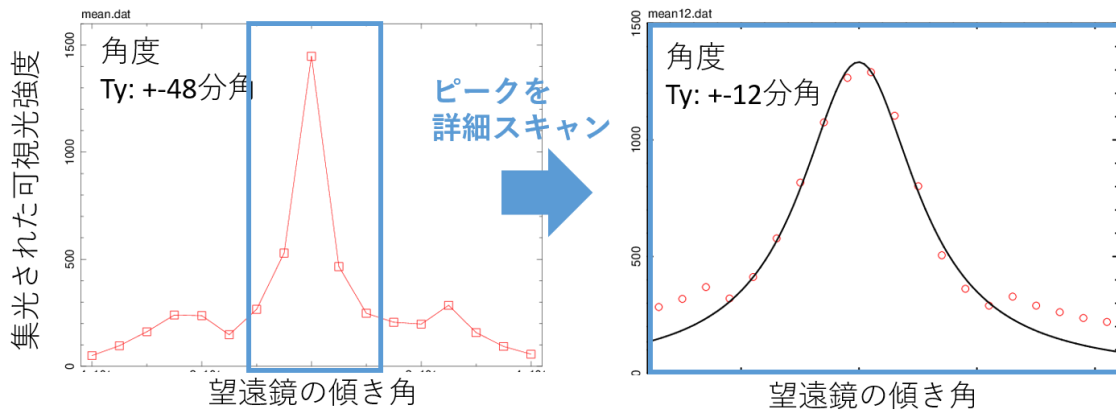


図 4 : FFAST 望遠鏡に可視平行光を照射し、望遠鏡の傾きに応じて集光された可視光強度の変化を測定した結果。ピークが望遠鏡の光軸に対応する。左右にある小さいサブピークは、プリコリメータがないため目立っている迷光成分である。可視光による集光位置は、別に X 線で求めた位置と一致することも確認された。

4. まとめ

硬 X 線集光偏光計 XL-Calibur 気球実験は、2018 年の南極フライトに続き、2022 年にスウェーデンからカナダまで 6 日間の北極圏フライトを実施した。次回は、2024 年に再度スウェーデンからの北極圏フライトを計画している。望遠鏡、偏光計、姿勢制御系は 2022 年フライト時から大きな変更はない。望遠鏡は、SPring-8 での硬 X 線を用いた詳細な較正実験が完了し、フライト準備が整っている。

参考文献

- [1] Q. Abarr et al., 2021 Astroparticle physics 126, 102529, “XL-Calibur – a second-generation balloon-borne hard X-ray polarimetry mission”
- [2] N.K. Iyer et al. 2023 NIM-A 1048, 167975, “The design and performance of the XL-Calibur anticoincidence shield”
- [3] H. Kuramoto et al. 2023 Proc. of SPIE, 126791B, “Characterization of the x-ray telescope after the first flight of XL-Calibur”