

硬 X 線集光偏光計 XL-Calibur 計画の 2022 年フライト

高橋 弘充, Quin Abarr^A, 青柳 美緒^B, 朝倉 一統^B, 粟木 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}, Fabian Kislat^O, Mozsi Kiss^{M,N}, 亀谷 紀香^C, 鴨川 航^B, 北口 貴雄^G, David Kotsifakis^F, Henric Krawczynski^A, 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, 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, Brett Vincent^F, Andrew West^A, Eric Wulf^T, 米山 友景^L, 善本 真梨那^B

広大, WUSTLA, 阪大^B, 愛媛大^C, Rice U.^D, DG CIRCUITSE, 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, OKCN, 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 X(L)-Calibur

我々の X(L)-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。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 X(L)-Calibur 計画である (全体の様

子：図 1)。

前回 2018 年の南極フライトまでは、硬 X 線望遠鏡に NASA/GSFC と名古屋大学で製作した InFOCuS 望遠鏡を利用しており、ミッション名は X-Calibur であった。今回実施した 2022 年以降のフライトでは有効面積が大きな日本製の FFAST 望遠鏡を利用するため、XL-Calibur と呼んでいる。



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。今後も 2024 年の北極圏フライトや南極フライトを計画している。

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 線望遠鏡から構成される (Abarr et al. 2021、昨年度の集録も参照)。

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ため、バックグラウンドを増やすことなく、天体信号のみを 5 倍増やすことができる。また観測帯域も従来の 40 keV から 80 keV まで広げられる。有効面積や光軸測定などの較正実験まで日本で実施した後に、スウェーデンへ輸送した。

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、バックグラウンド低減のため、今回から 0.8 mm 厚 (80 keV で 8 割の硬 X 線を検出可能) と厚すぎないものを採用した。アクティブシールドは、シンチレータを阻止能の高い BGO にしたこと、10 kHz 以上の高レートを処理できるように改良した。荷電粒子による大信号からの復帰時間を短くするため、「すざく」衛星 HXD 検出器の光電子増倍管のブリーダー回路を利用した。

WASP では、秒角オーダーでの姿勢制御を実施する。従来から利用しているスタートラッカーに加え、6 月前後は「かに星雲が」が太陽方向にあるため、45° の広視野をカバーする太陽センサーも搭載した。

3. XL-Calibur 気球の 2022 年フライト

XL-Calibur 気球は 2022 年 7 月 12 日~18 日に北極圏をフライトした。以下では、準備を含めたタイムラインについて述べる。

当初は 2022 年 4 月中旬に、打ち上げ機材一式が打ち上げ場であるスウェーデン・キルナ市の Swedish Space Cooperation (SSC) の Esrange 気球実験場に到着する予定であった。しかし、コロナ禍で世界中に影響した船便の遅延により、船便のスケジュールが読めず、サイエンス機器のみは 5 月頭に米国から空輸された。望遠鏡を担当する日本チームもこの時期にスウェーデンに到着した。サイエンスチームは、5 月中旬までにゴンドラの組み上げおよび望遠鏡や偏光計の搭載を完了し、あとは NASA の気球本体やヘリウムの船便を待つ状況となった。結局 NASA の船便は 6 月中旬にやっと到着し、XL-Calibur がフライトレディとなったのは 6 月 23 日であった。

カナダまでの北極圏フライトを実施できる風向き期間は 5 月中旬から 7 月中旬まで（期間終盤の推定では 7 月 15 日まで）であり、ここからは天候にチャンスがあれば打ち上げに挑戦する状況となった。最終的には、7 回目の挑戦で 7 月 12 日に放球に成功した（図 2）。

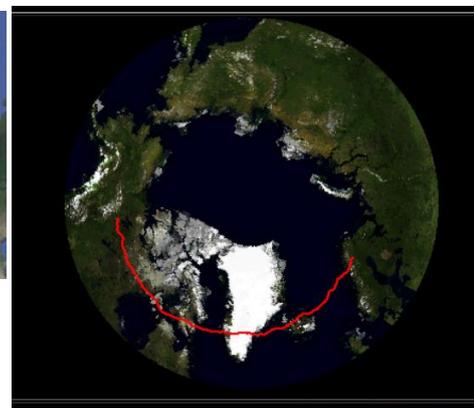
フライトはスウェーデンから 7 月 18 日にカナダで着陸するまでの 6 日間であった（図 3）。観測を実施した天体は、予定していた「かに星雲」と「はくちょう座 X-1」である。データ解析は現在進行中である。



図 2: 2022 年 7 月 12 日にスウェーデン SSC の Esrange 実験場から放球された XL-Calibur 気球の様子。



図 3: XL-Calibur 気球の 7 月 12 日~18 日のフライト軌跡。スウェーデンからカナダまで。(NASA/CSBF)。



気球の回収は、日本メンバー含む回収班により、着陸後に直ちに実施された。全ての機器がすでに米国に戻ってきている（図 4）。次回フライトへ向けた準備を開始できている。



図 4：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。全機器を無事に回収することに成功している。

4. まとめ

硬 X 線集光偏光計 XL-Calibur 気球実験は、前回 2018 年の南極フライトに続き、2022 年 7 月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。望遠鏡には日本製の世界最大の有効面積を持つ FFAST 硬 X 線望遠鏡を搭載した。偏光計や WASP 姿勢系にも改良を実施している。フライト後に、直ちに回収が実施され、すべての機器は米国に戻ってきている状況である。本フライトのデータ解析は現在実施中である。

次回は 2024 年にスウェーデンから再フライトを計画している。その後も、南極での集会フライトを実施する予定である。

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”