

日米欧の国際協力で推進する硬 X 線集光偏光計 XL-Calibur 計画

高橋 弘充, Abarr Quin^A, 栗木 久光^B, Baring Matthew^C, Bose Richard^A, Braun Dana^A, de Geronimo Gianluigi^D, Dowkontt Paul^A, Elliot John^E, 榎戸 輝揚^F, Errando Manel^A, 深沢 泰司, 古澤 彰浩^G, Gadson Thomas^E, Gau Epharaim^A, Guarino Victor^A, 郡司 修一^H, Hall Kenny^E, Harmon Keon^E, 服部 兼吾^I, 林田 清^I, Heatwole Scott^E, Hossen Arman^A, 今里 郁弥, 石橋 和紀^J, 石田 学^K, Iyer Nirmal Kumar^L, Kislak Fabian^M, Mozsi Kiss^L, 北口 貴雄^F, Kotsifakis David^E, Krawczynski Henric^A, Lanzi James^E, Lisalda Lindsey^A, 前田 良知^K, 眞武 寛人, 松本 浩典^I, 峯田 大晴^I, 宮澤 拓也^N, 水野 恒史, 岡島 崇^E, Pastrani Izabella^A, Pearce Mark^L, Peterson Zachary^E, Purdy Chris^E, Rauch Brian^A, Ryde Felix^L, 斎藤 芳隆^K, Shreeves Chris^E, Simburger Garry^A, Snow Carl^E, Spooner Sean^M, Stana Theodor-Adrian^L, Stuchlik David^E, 武田 朋志^O, 武尾 舞^P, 玉川 徹^F, 田村 啓輔^E, 常深 博^I, 内田 和海, 内田 悠介, 内山 慶祐^O, Vincent Brett^E, West Andrew^A, Wulf Eric^Q, 山本 龍哉, 吉田 勇登^O

広島大, WUSTLA, 愛媛大^B, Rice Univ.^C, SUNY^D, NASA^E, 理研^F, 藤田医学大^G, 山形大^H, 阪大^I, 名大^J, ISAS/JAXA^K, KTH^L, UNH^M, 沖縄科技大^N, 東京理科大^O, 東京都立大学^P, NRL^Q

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、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。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 X(L)-Calibur 計画である (全体の様子: 図 1)。

2018 年フライトまでは、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。次回 2022 年以降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 : X-Calibur 気球の全体写真。
2018 年 12 月の南極フライトで利用。全長~8m。

左 : 偏光計、右 : 硬 X 線望遠鏡。
次回 2021 年のフライトでは日本から FFAST 衛星用の硬 X 線望遠鏡を提供する。焦点距離が 12m なので、ゴンドラも長くなる。

2. XL-Calibur 気球のフライト計画と検出器の改良

X-Calibur 気球は、これまでにアメリカ国内で 2 度の試験フライトを実施し（それぞれフライト時間は約 1 日）、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、InFOCuS 硬 X 望遠鏡の動作実証に成功している。これを踏まえて、2018 年 12 月 30 日~2019 年 1 月 2 日に南極のアメリカ McMurdo 基地で科学観測フライトを実施した。当初は 8 日以上フライト計画であったが、気球からヘリウムガスが漏れたため、3 日間のフライトとなった。次回のフライトにそのまま利用予定の偏光計はすでに回収され、米国において正常な動作が確認済みである。InFOCuS 望遠鏡を含むその他の構造体（次回フライトでは利用予定はない）は、南極の荒野で越冬して 1 年後に回収済みである。

これまでの PoGO+ や「ひとみ」SGD では、北天の 2 天体しか観測されておらず、X(L)-Calibur によって南天の天体を硬 X 線偏光観測するのは世界初の試みである。2018 年フライトでは観測時間は 3 日間に限られたが、定常天体の中では全天で硬 X 線で最も明るい質量降着型パルサー「Vela X-1」とアウトバーストして 600 mCrab の光度に達した質量降着型パルサー「GX 301-2」の観測を実施した。今回も WASP により、秒角オーダーでの姿勢制御に成功しており、GX 301-2 からはパルサーからの周期的な信号の検出に成功している。統計不足により、偏光情報については上限値のみが得られ、磁場の強い中性子星の極付近において放射の形状がペンシルビーム型なのかファンビーム型なのかは決定できておらず、次回以降への観測へと持ち越しとなった (Abarr et al. 2020)。

今回のフライトが予想より短時間で終わってしまったため、我々は次回のフライトを 2022 年にスウェーデンから実施する計画である（当初は 2021 年のフライトを計画していたが、新型コロナウイルスの感染拡大に伴い、1 年の延期となった）。科学目標は、「かにパルサー」（回転駆動型パルサー）と「はくちょう座 X-1」からの偏光の検出である（PoGO+ や「ひとみ」SGD では統計不足のため、偏光情報の上限値の制限しかかけられていない）。その後も、2023 年にスウェーデン、2025 年に南極でのフライトを計画している。2-8 keV の軟 X 線偏光を観測する IXPE 衛星も 2021 年度に打ち上げ予定であり、広帯域での同時観測を計画している。

我々は次回以降のフライトに向け、大きく以下の 4 点の改良を実施する。米国および日本、スウェーデンでの研究予算が獲得できたため、準備が始まっている (Abarr et al. 2021)。

(1 望遠鏡) X-Calibur で利用した InFOCuS 望遠鏡は 15 年前に製作されたものであり有効面積が小さい。そこで 2022 年以降の XL-Calibur では、日本の FFAST チームが小型衛星のために製作した FFAST 望遠鏡を搭載する。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。また観測帯域も現状の 40 keV から 80 keV まで広げられる (望遠鏡の比較: 図 2 参照)。焦点距離が 8 m から 12 m へ伸びるため、トラスは米国で設計・製作される。日本では、FFAST 望遠鏡の全パーツを搭載部品に置換した後、SPring-8 のシンクロトロン光を用いて有効面積と角度分解能の較正を行っている。

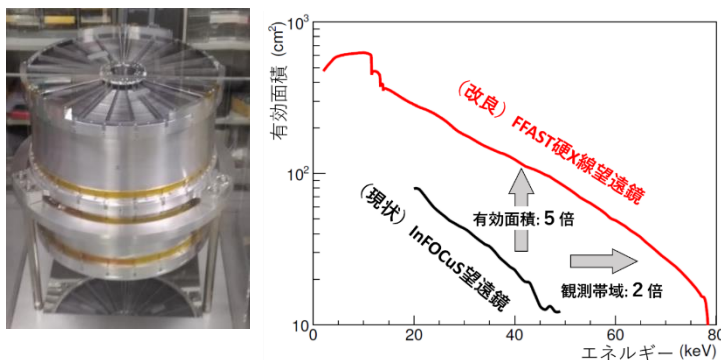


図 2 : 次回 2022 年以降のフライトに搭載する FFAST 望遠鏡。現在の InFOCuS 望遠鏡よりも有効面積を増し、エネルギー帯域を広げられる。

(2 偏光計) X(L)-Calibur では、硬 X 線の偏光を検出するために、コンプトン散乱の散乱角の異方性を利用する (偏光方向と垂直方向に散乱光子が飛びやすい)。偏光計は断面が 1 辺約 3 cm とコンパクトで、中心に散乱体ベリリウムを置き、周囲の 4 辺を吸収体 CdZnTe (CZT) 半導体が囲っている (図 3 参照)。CZT 検出器は 2.5 mm ピクセルの位置分解能を持ち、CZT で検出された信号によって、中心のベリリウムからの散乱角を測定する。

これまでは CZT の厚みが 2 mm あり、望遠鏡が集光できる 80 keV 以上の信号まで検出できる状態であった。しかし厚すぎると、検出器の体積に比例してバックグラウンドが増えてしまう。そこで、次回からは 0.8 mm 厚 (80 keV で 8 割の硬 X 線を検出可能) にすることで、バックグラウンドを 1/2.5 に低減する。アメリカで動作実証が行われている。

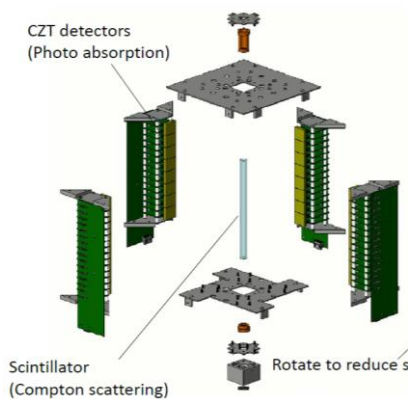


図 3 : X(L)-Calibur 偏光計の解体図。上方から入射した硬 X 線は、中心の散乱体で散乱され、周囲 4 辺を囲う CZT 半導体検出器で検出される。これにより散乱角が測定でき、その垂直方向が入射光子の偏光方向であると分かる。散乱体は、パッシブなベリリウム単体である。次回以降フライトでは、CZT 検出器の厚みを 2 mm から 0.8 mm に薄くし、バックグラウンドを低減させる。

(3) **アクティブシールド** 偏光計の周囲は、ほぼ 4π を CsI(Na)シンチレータのアクティブシールドで囲っている。この読み出し回路は、SuperTIGER 気球実験（宇宙線の重イオン観測をする低レート用）のものを利用したため、2018年フライトでは宇宙線の陽子やガンマ線に起因する数 kHz の高レートを十分に処理しきれなかった。

そこでスウェーデンにおいて、読み出し回路を改良するとともに、光電子増倍管のブリダーも「すぎく」衛星 HXD 検出器と PoGO+気球実験で利用した宇宙線の信号に対応したものを再製作した。さらにシンチレータも、より有効原子番号の大きく、減衰時定数が速い BGO に置換する準備を進めている。

(4) **姿勢制御系** スウェーデンから「かに星雲」を夏季に観測すると、太陽方向を指向することになる。X-Calibur では、WASP 姿勢制御系は硬 X 線望遠鏡と同じ視野の恒星をスタートラッカーで補足して姿勢を制御していたため、従来のセットアップだけでは太陽方向の観測時には制御できない。そのため、WASP チームによって、X 線望遠鏡と同じ方向には太陽センサーを、X 線望遠鏡と別の視野方向にはもう 1 台スタートラッカーを追加する計画を進めている。両者は太陽方向を観測するための冗長系であるが、2 台目スタートラッカーにより、1 台目が気球の陰に入ってしまう仰角の高い観測にも対応できるようになる。これにより、とくに南極で 1 ヶ月の長期フライトを実施した際には、数個発生すると予想される突発天体を観測できる可能性（観測できる領域）が 1.5 倍ほど増える。

3. まとめ

硬 X 線集光偏光計 X-Calibur 気球実験は、2018 年に南極において科学観測を実施した。フライトは 3 日間の短時間に終わってしまったものの、姿勢制御や検出器を正常に動作させ、質量降着型パルサーの観測に成功した。次回以降は、日本製 FFAST 望遠鏡に置き換えるなど改良を加えた XL-Calibur として、2022 年にスウェーデンから放球し、「かにパルサー」と「はくちょう座 X-1」からの偏光検出を目指している。その後も、スウェーデンや南極での複数フライトを計画している。

参考文献

[1] Q. Abarr et al., 2020 ApJ 891, 70, “Observations of a GX 301–2 Apastron Flare with the X-Calibur Hard X-Ray Polarimeter Supported by NICER, the Swift XRT and BAT, and Fermi GBM”

[2] Q. Abarr et al., 2021 Astroparticle physics 126, 102529, “XL-Calibur – a second-generation balloon-borne hard X-ray polarimetry mission”