

日米欧の国際協力で推進する硬 X 線集光偏光計 X-Calibur 計画

高橋 弘充、内田 和海、深沢 泰司、水野 恒史 (広島大学)、北口 貴雄、玉川 徹 (理化学研究所)、周 圓輝、堤 まりな、内山 慶祐 (東京理科大学)、林田 清、松本 浩典、常深 博 (大阪大学)、榎戸 輝揚 (京都大学)、田村 啓輔 (名古屋大学)、前田 良知、石田 学、斎藤 芳隆 (宇宙科学研究所)、宮澤 拓也 (沖縄科学技術大学院大学)、栗木 久光 (愛媛大学)、郡司 修一 (山形大学)、Henric Krawczynski、Paul Dowkontt、Quin Abarr、Manel Errando、Brian Rauch、Richard Bose (Washington University in St. Louis)、Fabian Kislak (University of New Hampshire)、岡島 崇、James Lanzi、David Stuchlik、Scott Heatwole (NASA)、Shaorui Li (Brookhaven National Laboratory)、Gialuigi de Geronimo (Stony Brook University)、Mark Pearce、Mózsi Kiss、Rakhee Kushwah、Nirmal Kumar Iyer (Royal Institute of Technology)

1. 硬 X 線集光偏光計 X-Calibur

我々の X-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向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-Calibur 計画である (全体の様子: 図 1)。



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。左上: 硬 X 線望遠鏡、右下: 偏光計。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. X-Calibur 気球のフライト計画と検出器（望遠鏡、偏光計）

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、NASA/GSFC と名古屋大学で製作した 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、今年 2018 年 12 月に南極のアメリカ McMurdo 基地から約 2 週間（南極を 1 周）以上の科学観測フライトを計画している。7 月にアメリカ国内での最終動作確認を完了し、現在は検出器やゴンドラは南極へ輸送中である。11 月から南極で組み上げを行い、12 月にフライトレディーとなり、1 月末までが放球ウインドウとなっている。

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、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。今年 12 月のフライトでは、全天で硬 X 線で最も明るい質量降着型パルサー「Vela X-1」の観測を計画している。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観測結果から明らかにすることができると期待している。

ただし現在の 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、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、次回 2021 年のフライトに搭載する計画である。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（望遠鏡の比較については図 2 参照）。

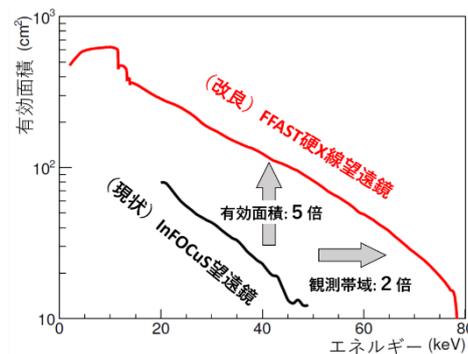
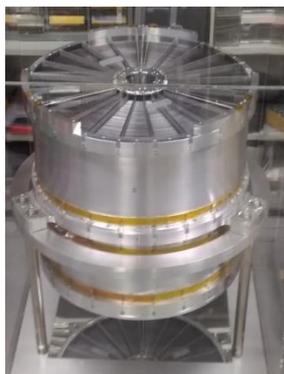


図 2: 次回 2021 年フライトに搭載する FFAST 望遠鏡。現在の InFOCuS 望遠鏡よりも有効面積を増し、エネルギー帯域を広げることができる。

日本からは PoGO+ や PolariS 計画に向けての経験を活かし、望遠鏡だけでなく、偏光計についても改良を提案している。X-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）。図 3 に示すように、X-Calibur の偏光計は断面が 1 辺約 3cm 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。CZT 検出器は 2.5mm 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。

ただしベリリウムはパッシブな物質であり、本当にベリリウムで散乱した光子が CZT で検出されたのかは判定できない。X-Calibur でも、望遠鏡で集光しているとは言え、CsI アクティブシールドを通過した宇宙線による外来バックグラウンドがまだまだ支配的である。そこで日本では、ベリリウムの下半分をアクティブなプラスチックシンチレータに置き換えることで、プラスチックシンチレータと CZT の両方で反応した信号のみを天体信号と見なし（同時計測する）、バックグラウンドを 1 桁低減することを提案している。

こうした望遠鏡および偏光計の改良により、次回 2021 年のフライトでは偏光検出感度を約 5 倍も向上できると考えている。

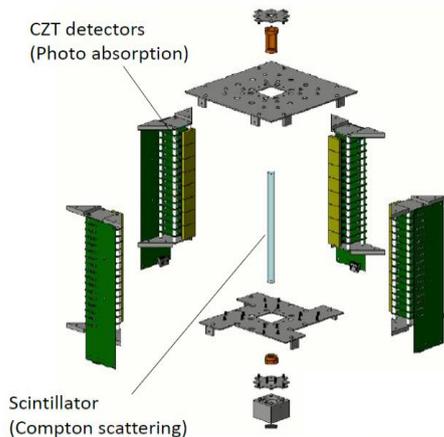


図 3 : X-Calibur 偏光計の解体図。上方から入射した硬 X 線は、中心の散乱体で散乱され、周囲 4 辺を囲う CZT 半導体検出器で検出される。これにより散乱角が測定でき、その垂直方向が入射光子の偏光方向であると分かる。散乱体は、現在はパッシブなベリリウム単体であるが、次回 2021 年のフライトでは上方：ベリリウム、下方：アクティブなプラスチックシンチレータの 2 段構成にすることを計画している。

3. 日米欧の協力関係

X-Calibur 計画は、もともとはアメリカの機関だけが参加していた。しかし、望遠鏡の有効面積が小さいという課題や、また南極の 2 週間のフライトの際に 24 時間体制で長期運用を行うマンパワーが足りていないという問題があった。そのため、日本から世界最大の FFAST 硬 X 線望遠鏡を提供してもらえること、また日本の研究者の参加は、アメリカ側にとっても喜ばしいことであり、日米対等の関係で共同研究を 2018 年 1 月から開始することができた。日本からは PoGO+ のメンバーが参加するため、PoGO+ のスウェーデン側メンバーにも声をかけたところ、24 時間を日米欧の 3 局でカバーできること、PoGO+ の検出器開発・運用・データ解析の経験もあって、スウェーデンからの参加も決定したところである。

2018 年 7 月には偏光計を 2 週間にわたって実験室で連続動作させる模擬試験を行った。この際には、日米欧で 24 時間体制でインターネット経由で検出器を運用し、南極での本番フライトへの経験を積むことができた。今後も日米欧の国際協力により X-Calibur 計画を推進していく予定である。

参考文献

- [1] M. Beilicke et al., 2014 IEEE Aerospace Conference, “Design and tests of the hard X-ray polarimeter X-Calibur”
- [2] F. Kislat et al., J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 4 (1) 011004, “Optimization of the design of X-Calibur for a long-duration balloon flight and results from a one-day test flight”