

硬X線集光観測実験XL-Calibur気球実験の2022年フライトへ向けた準備状況

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

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



日米瑞の国際協力

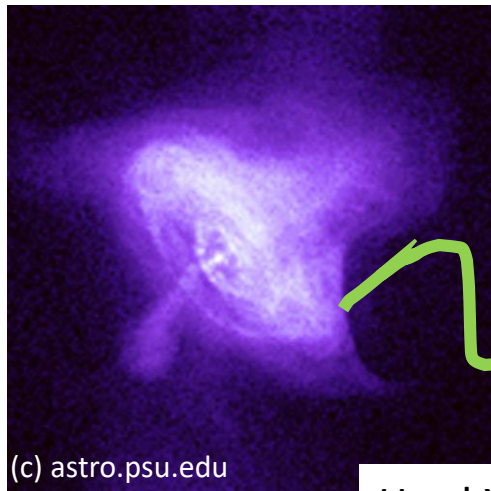
PI: Henric Krawczynski
(ワシントン大学)





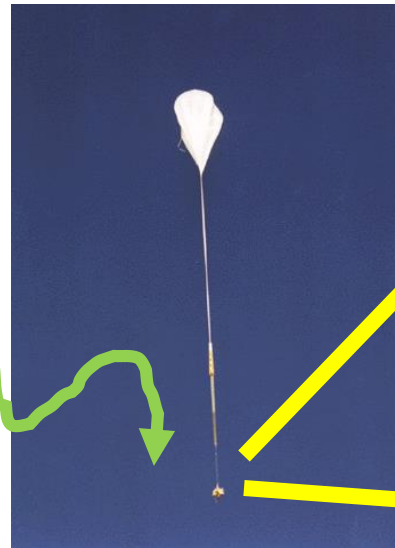
X線・ガンマ線 偏光観測

- **偏光**測定（イメージ、タイミング、スペクトルとは異なる情報）
=> パルサーやブラックホール、活動銀河核、ガンマ線バーストなどにおける高エネルギー現象の研究で重要
- しかしながら、**X線・ガンマ線の偏光が検出された天体は、ガンマ線バースト、かに星雲**（2.6/5.2 keV と 200 keV 以上）と **Cyg X-1** (600 keV 以上)のみ
- 他のエネルギー帯域、他の天体の偏光観測が必要不可欠
PoGO+, 「ひとみ」SGD, AstroSat, X(L)-Calibur, IXPE, XPP...

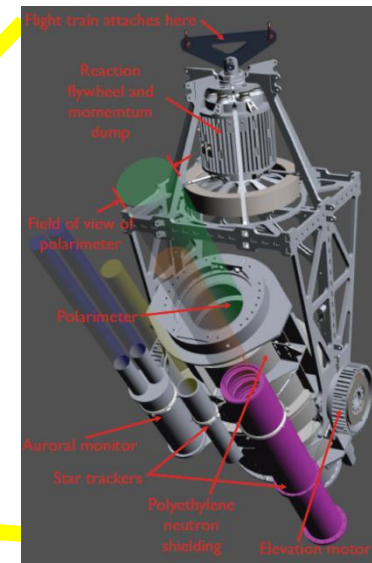


(c) astro.psu.edu

Hard X-ray
(>20 keV)



~40 km



Weight (wo ballast) : ~2000 kg



高エネルギー偏光観測の歴史と今後

1970年代

2000

現在

X線

OSO-8

IXPE(2021 -)

XPP
計画

硬X線

PoGO+ (2013, 2016)

X(L)-Calibur(2018, 2022, 2023, ...)

日本+スウェーデン

元々アメリカのみ

日本+スウェーデンも参加

ガンマ線

ひとみSGD (2015)

もともと2021年フライトを目指していたが、
COVID-19の影響により、**1年遅れ**

INTEGRAL (2003 -)

AstroSat (2015 -)

偏光結果を報告しているが、
偏光観測に特化しておらず
系統誤差が大きい

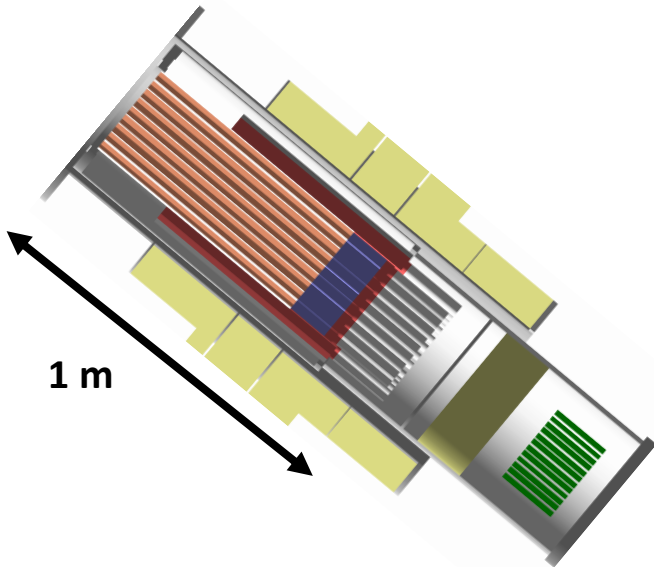
ガンマ線バースト観測用の小型検出器 (GAP, POLAR) は除く



コリメータ型から集光型へ

従来：PoGO Lite/PoGO+

日本、スウェーデン



コリメータ型

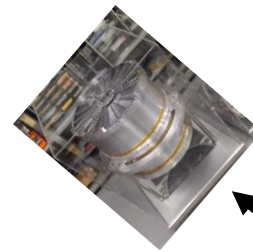
Crab, Cyg X-1を観測
大型にすると検出器も大型
=>バックグラウンドが高い

今後：X(L)-Calibur

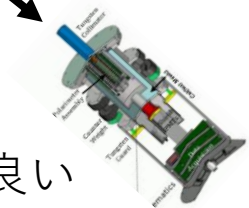
元々アメリカだけの実験

現在、PoGO+（日本、スウェーデン）
日本のX線望遠鏡チーム

が参加



8~12 m



硬X線望遠鏡で集光

検出器はコンパクトで良い
=>低バックグラウンド

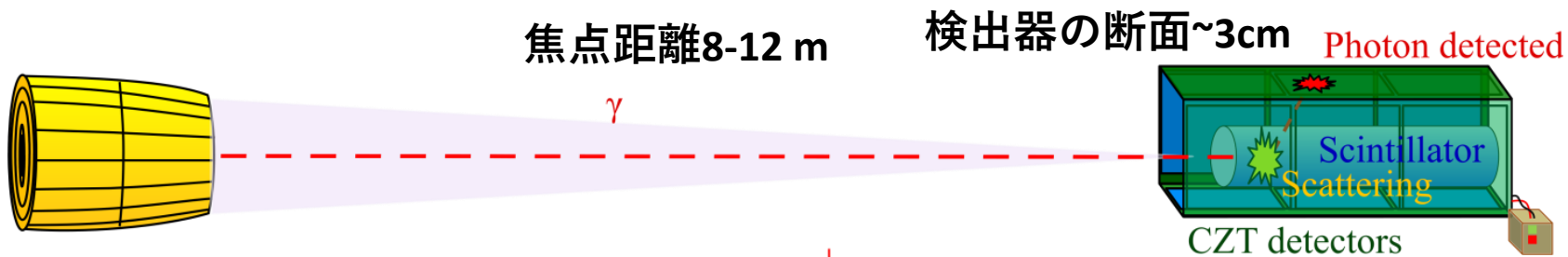
宇宙研：小規模計画で支援



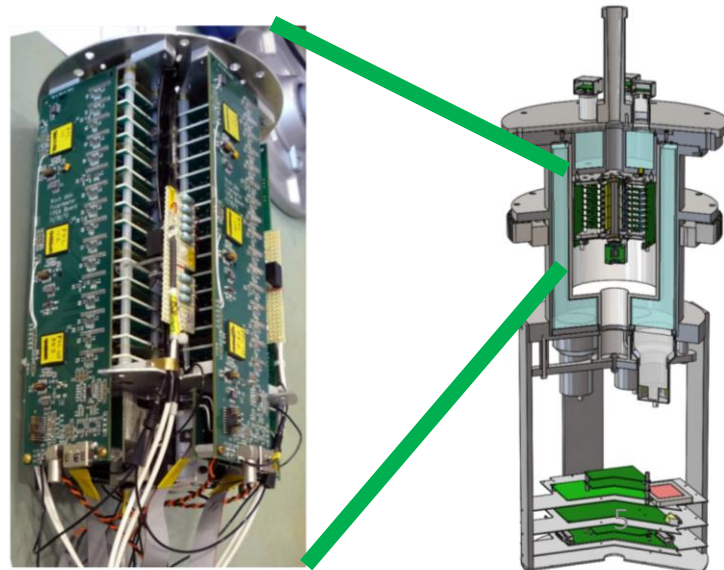
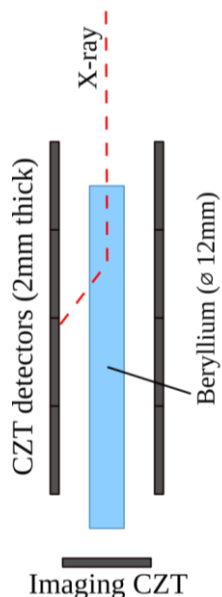
X-Calibur偏光計(集光型)

20-80 keV

- X-Caliburでもコンプトン散乱を検出し、その散乱角の異方性から偏光を検出
硬X線望遠鏡により集光 => 検出器はコンパクト・バックグラウンド低減
主検出部: Beで散乱、CZT x 256ピクセル x 4面、周囲にCsIシールド
最下面に CZT x 64ピクセルで(簡易)イメージング
- 検出器自身の系統誤差をキャンセルするため、検出器が20秒で1回転する。

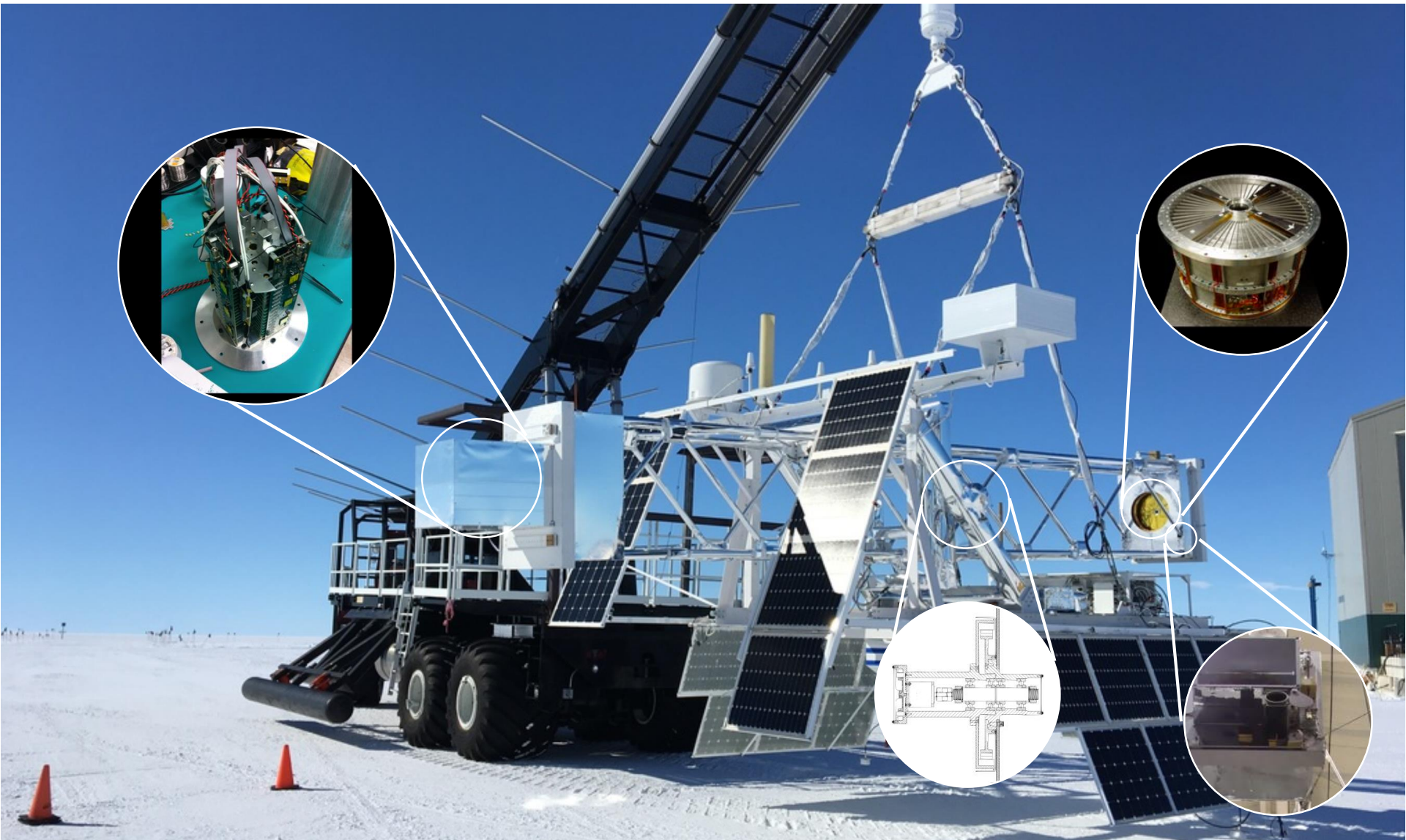


2018年: InFOCuS望遠鏡 (NASA+日本)
2022年以降: FFAST望遠鏡 (日本)





2018年X-Calibur 全体像 (~2トン)





2018年X-Caliburフライト履歴

放球：12/30 9:15AM (LT)

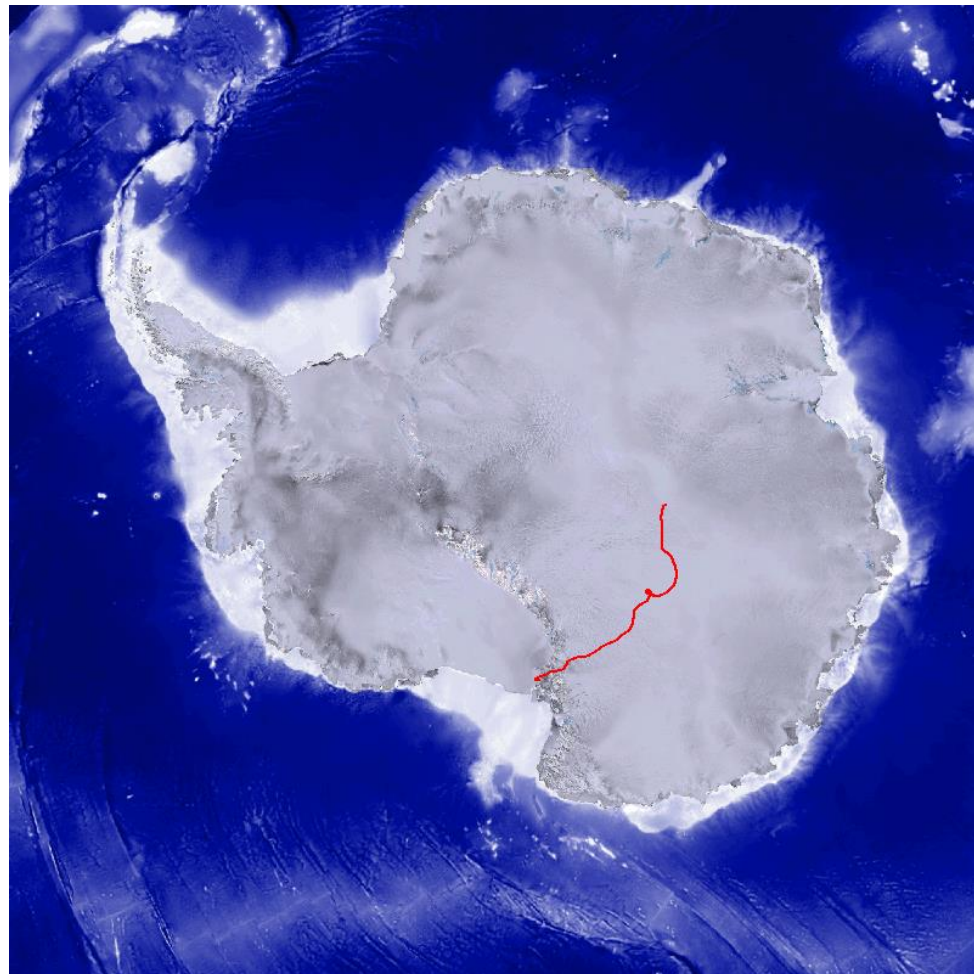
高度：40 kmに到達

観測天体：質量降着型パルサー
GX 301-2, Vela X-1 (南天)
GX 301-2 は 600 mCrab

姿勢制御：1秒角以下の高精度

着陸：1/2 11:40AM (LT)
He漏れのため

⇒ データ解析 (上限値 Abarr+2020)
次回フライトを目指す

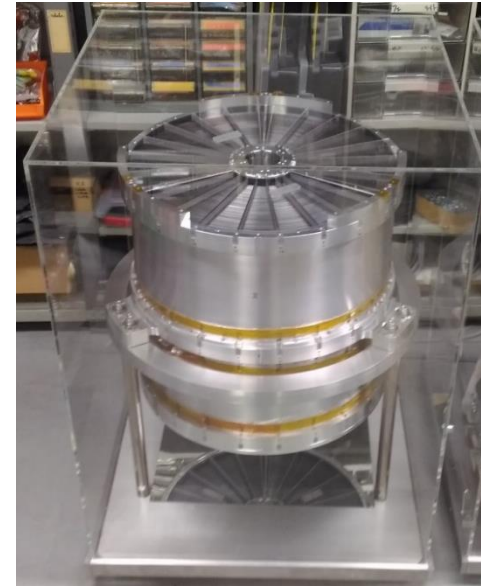
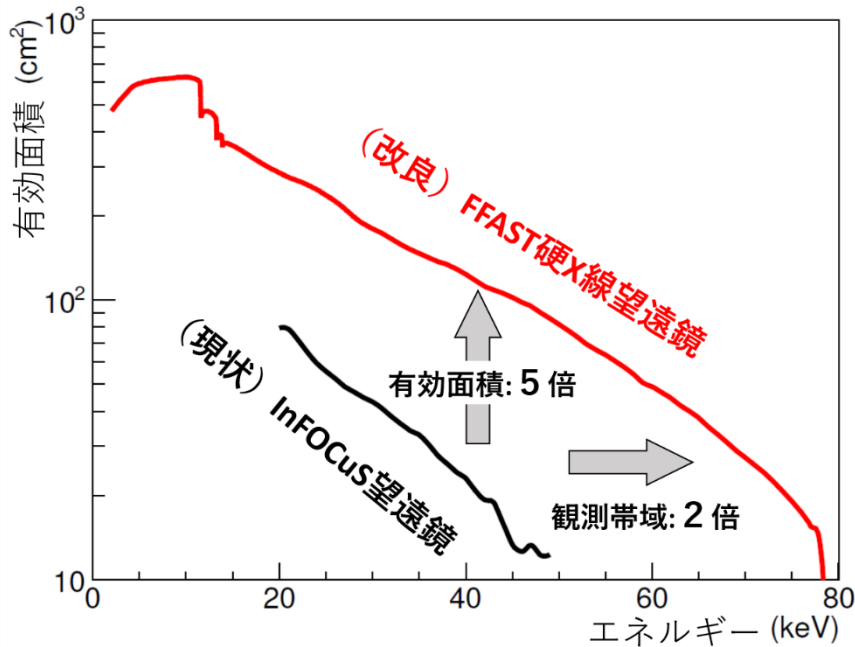




次回フライトXL-Calibur(2022,2023,...)

(1) FFAST望遠鏡 (すでに製作済み) を利用

ひとみHXT望遠鏡と同性能 => 天体信号を5倍以上増やせる



(2) CZT半導体検出器

2018年2mm厚を0.8mm厚に薄くする => バックグラウンド 1/2.5低減

(3) アクティブシールド

読み出し回路を高速化 => より低い閾値、デッドタイム低減

(CsI(Na) を BGO シンチレータにして、阻止能を向上)

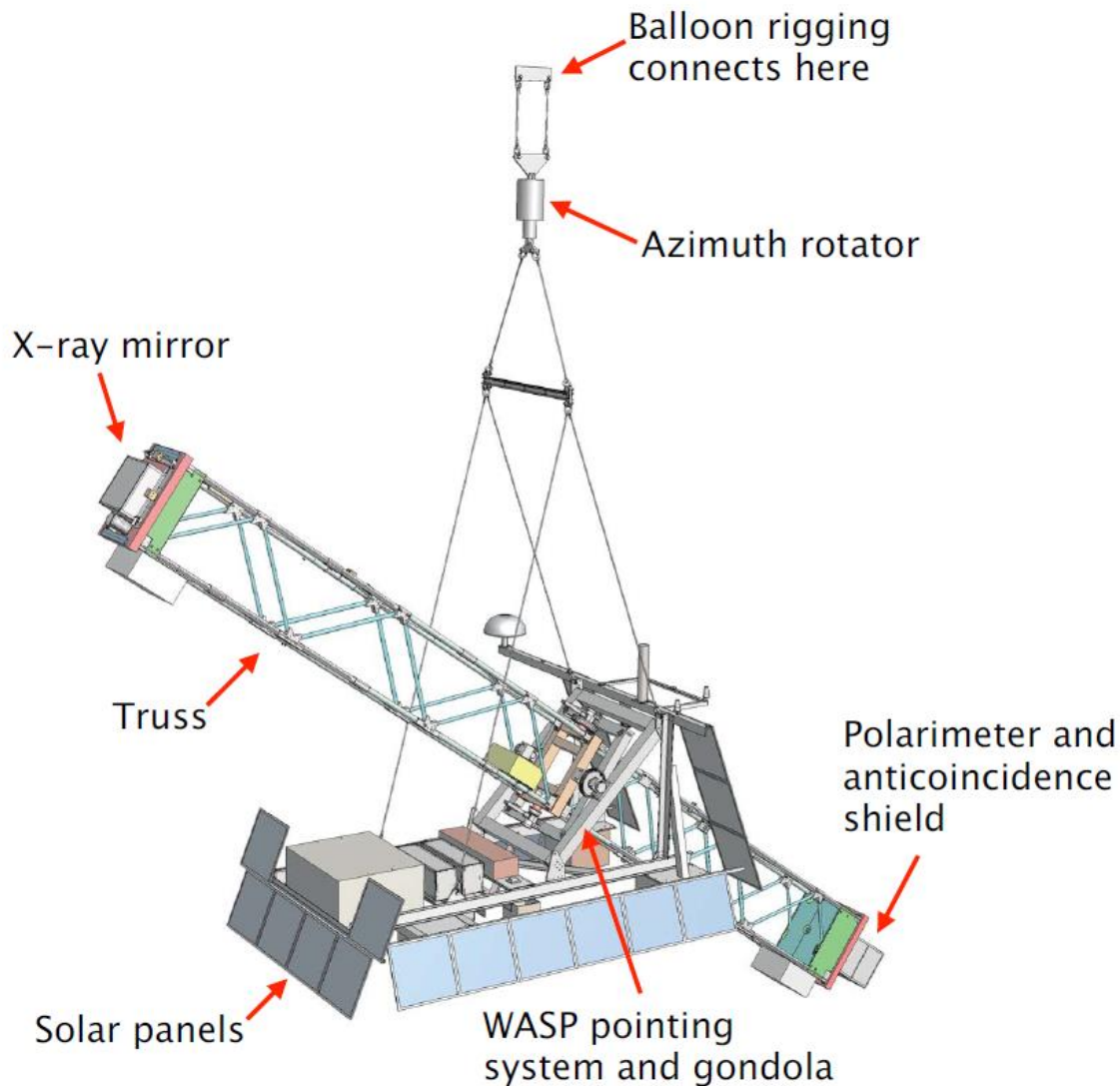
前年会で講演 (16pSM-8)

S/N比を10倍向上させ、スウェーデン/南極でのフライトを計画



2022年XL-Calibur 予想図

検出器デザイン論文
(Abarr+2021)



2018年までと同じ設計

- ・トラスは8m→12mに
 - ・ゴンドラを最適化して重量は同程度
- ⇒ 高度38 km以上
姿勢制御 1秒角
を目指す

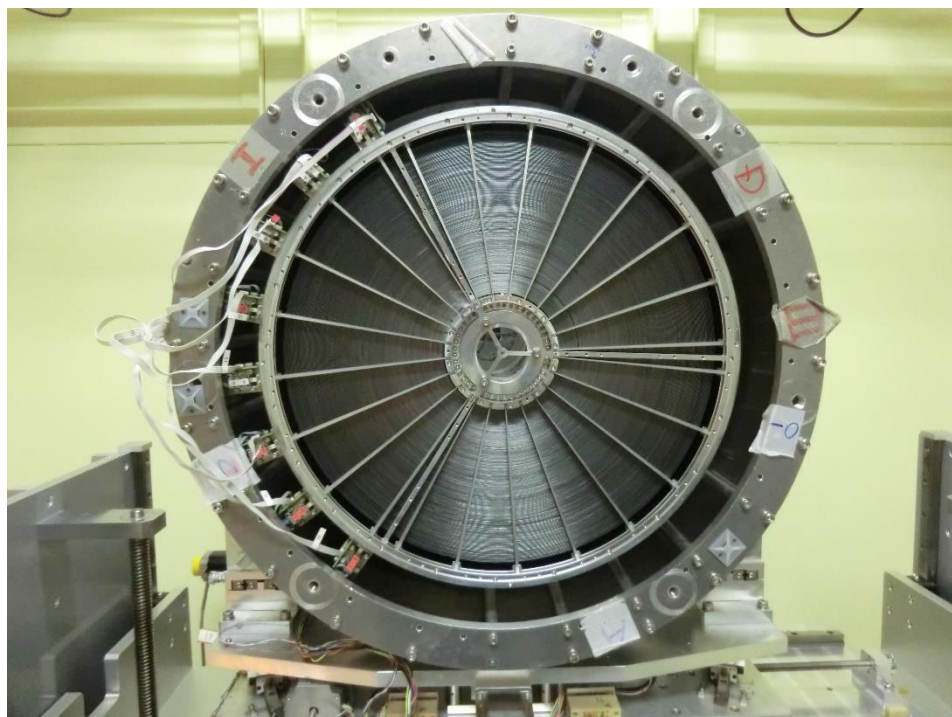
追加機能

- ・スターカメラを2方向
 - 太陽センサーも追加
- ⇒ 太陽方向 (Crab)
仰角60度以上 も
観測可能

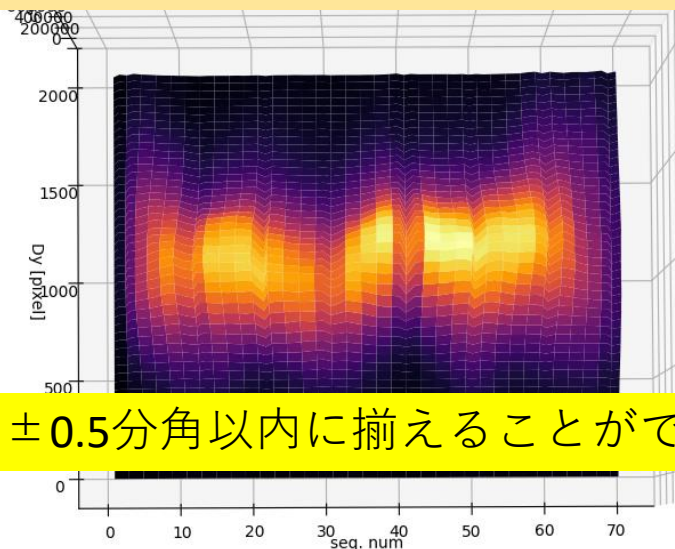
FFAST望遠鏡の進捗

2,3回目のSPring-8実験を実施（2020年7月と12月）

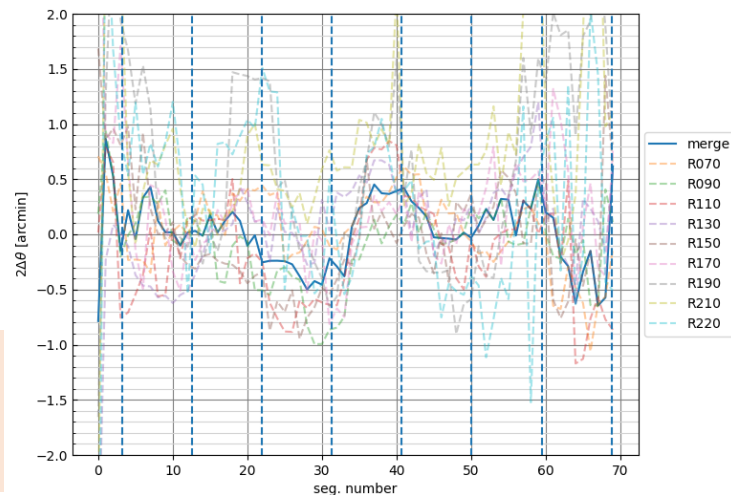
- ・ 30 keVの硬X線を照射しながら、アライメントバーの位置を微調し、BottomとTopのフォイルの位置を調整した。



最終調整後の焦点位置
(理想：水平に一直線に並ぶ)



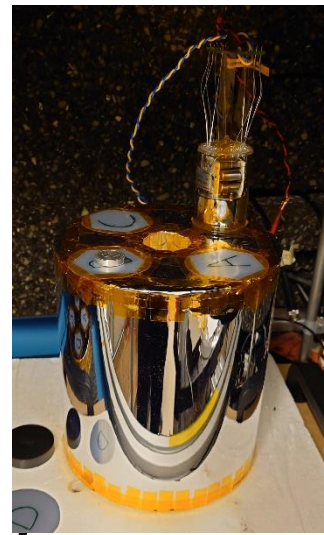
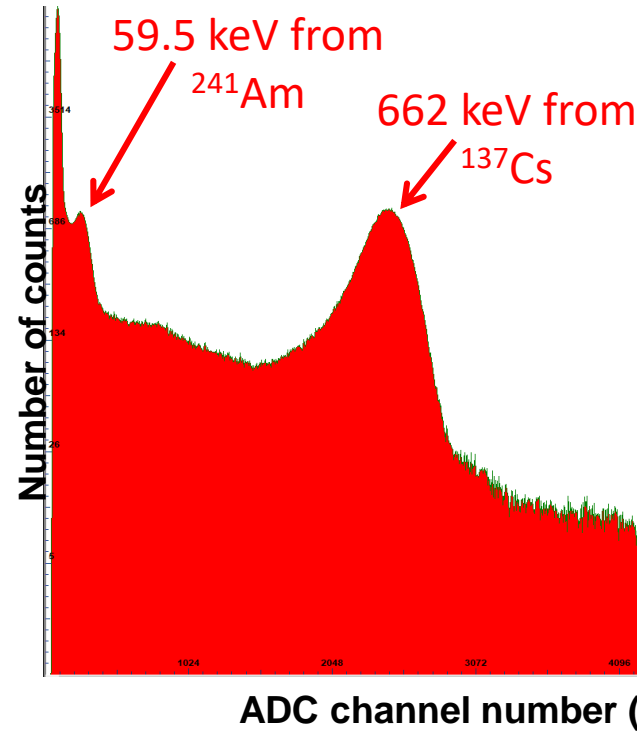
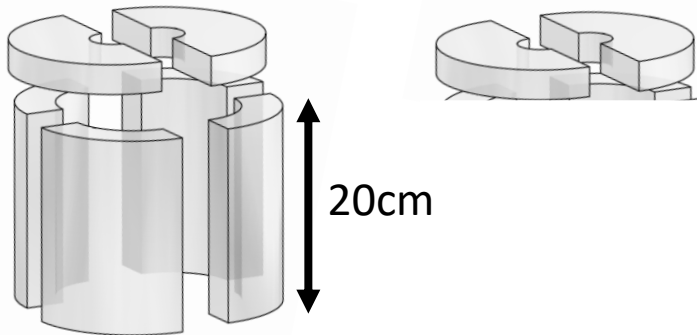
±0.5分角以内に揃えることができた



4回目のSPring-8実験（2021年6月）

- ・ 望遠鏡全体を較正

BGOアクティブシールドの進捗@スウェーデン



Clamped region

- **BGO**: 3 cm厚で $\sim 4\pi$ を覆う => 以前のCsI(Na)より高Zで阻止能向上
- 2インチPMT (R6231) 4本ずつ (計8本) => 閾値は < 60 keVを確認
#PMT 1本だけでも、一番遠い場所での60 keVを検出可能
- 大信号はPMT **ブリーダーでクランプ** => デッドタイム削減 (以前は未実装)
- 現在、熱真空試験中



XL-Caliburの予想感度 (15-80 keV)

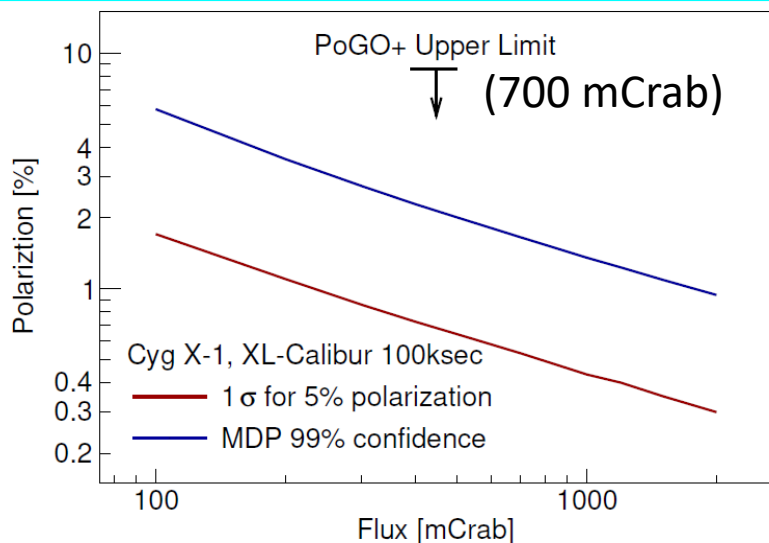
2022年：北極圏（スウェーデン～カナダ）、1週間フライト

Crabで軌道較正、Cyg X-1（ブラックホール連星） => コロナの幾何構造

2023年：南極、1カ月フライト

Vela X-1, GX 301-2（大質量X線連星） => 放射機構（Fan/Pencilビーム？）

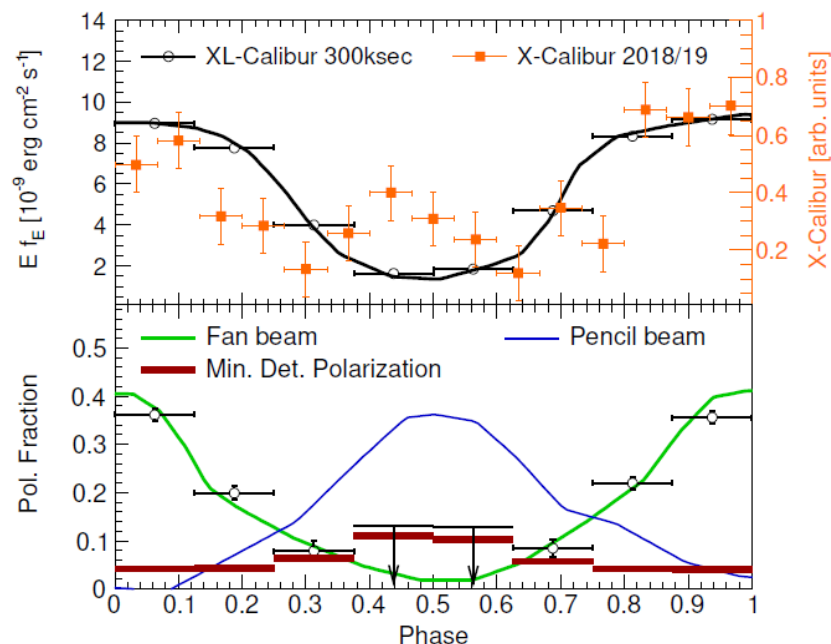
Cyg X-1（ブラックホール連星）



Low/hard状態なら1%レベルで検出可能
High/soft状態でも数%の上限値

IXPE衛星とも同時観測を提案中

GX 301-2（大質量X線連星）



2018年フラックス（700 mCrab）なら、
有意な偏光検出から放射機構を決定



まとめ

- X(L)-Caliburは、日米欧の国際協力による硬X線偏光計である。
- 硬X線望遠鏡で15-80 keVを集光することにより、コンパクトな偏光計で低バックグラウンドで高感度な観測を実現する。
- 2018年12月の南極フライトの検出器・姿勢制御の実績を元に、2022年7月の北極圏（スウェーデン～カナダ）2023年以降もスウェーデン・南極フライトを計画している。
- 次回フライトは、FFAST望遠鏡を利用、CZT検出器を薄くする、アクティブシールドの性能向上により、S/N比を10倍向上させる。

