

# 硬X線偏光観測XL-Calibur気球実験の2022年フライト準備状況

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

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



## 日米瑞の国際協力

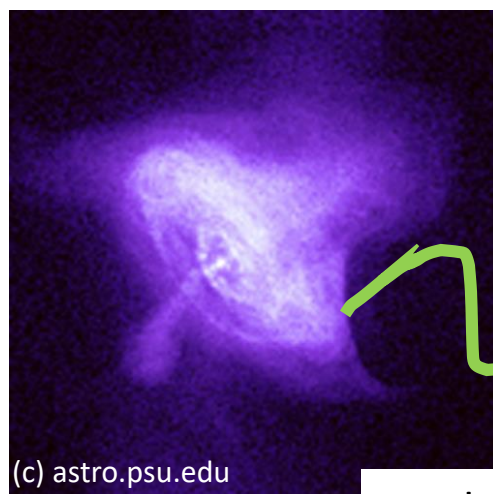
PI: Henric Krawczynski  
(ワシントン大学)





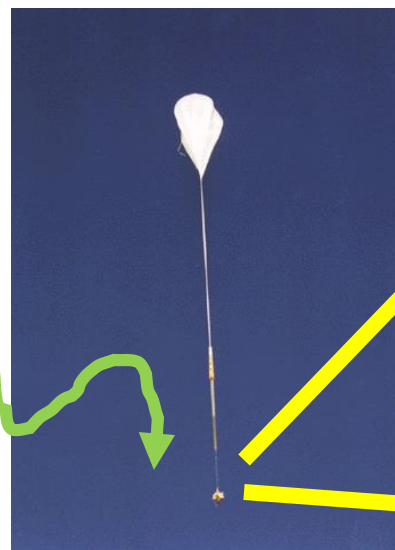
# X線・ガンマ線 偏光観測

- **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、ブラックホールX線連星Cyg X-1のみ**
- より高感度、他のエネルギー帯域、他の天体の偏光観測が必要不可欠  
XL-Calibur, IXPE, XPP, eXTP...

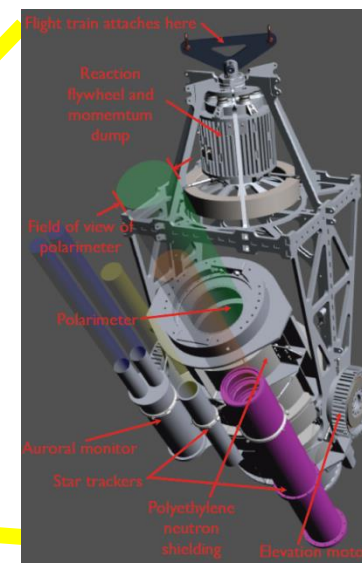


(c) astro.psu.edu

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(2021.12 -)

XPP  
計画

硬X線

PoGO+ (2013, 2016)

日本+スウェーデン

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

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)

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

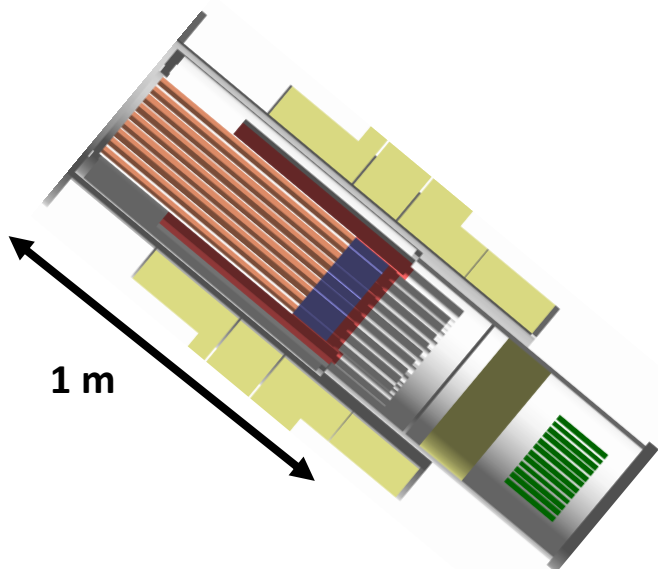
ガンマ線バースト用の検出器：GAP, POLAR, POLAR2



# 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**

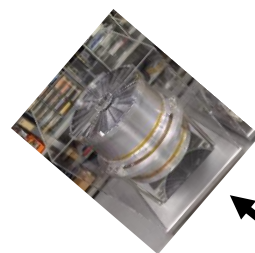
Crab, Cyg X-1を観測  
大型にすると検出器も大型  
=>バックグラウンドが高い

今後：X(L)-Calibur

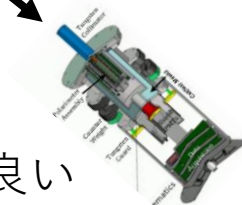
元々アメリカだけの実験

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

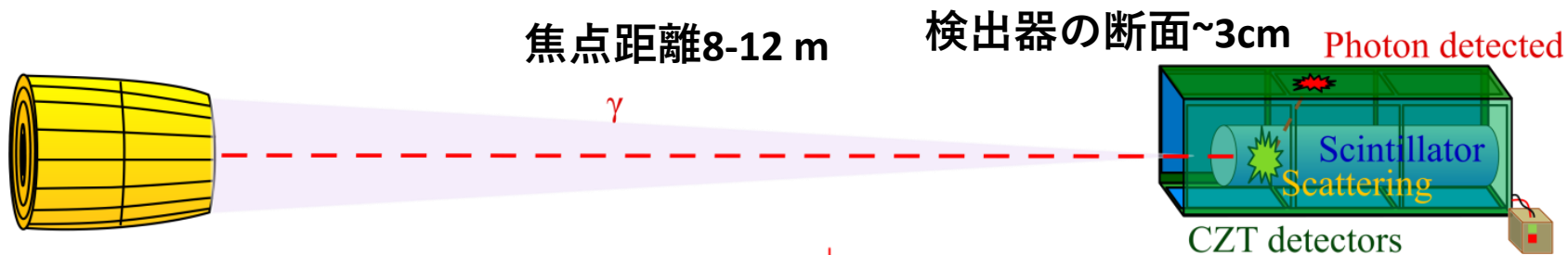




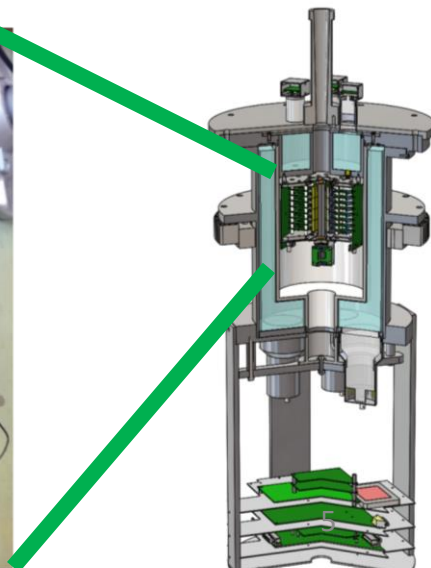
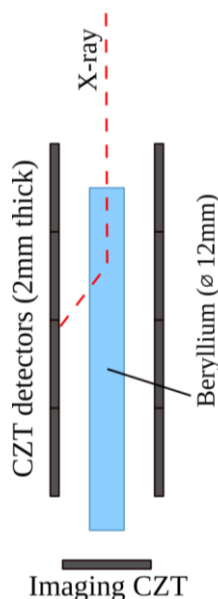
# X(L)-Calibur偏光計(集光型)

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、周囲にアクティブシールド  
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。

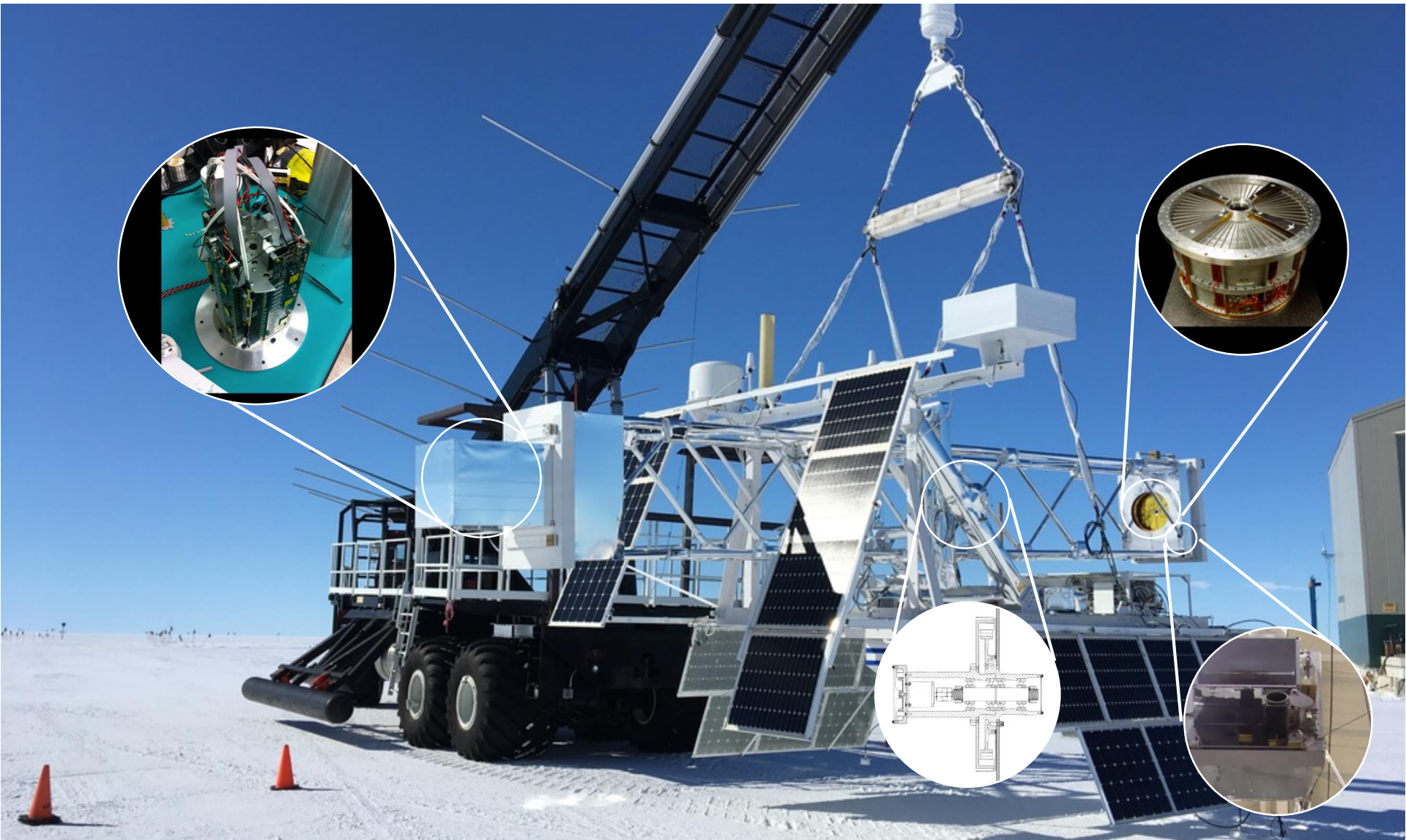


2018年: InFOCuS望遠鏡 (NASA+日本)  
2022年以降: FFAST望遠鏡 (日本)





# 2018年X-Calibur 全体像 (~2トン)

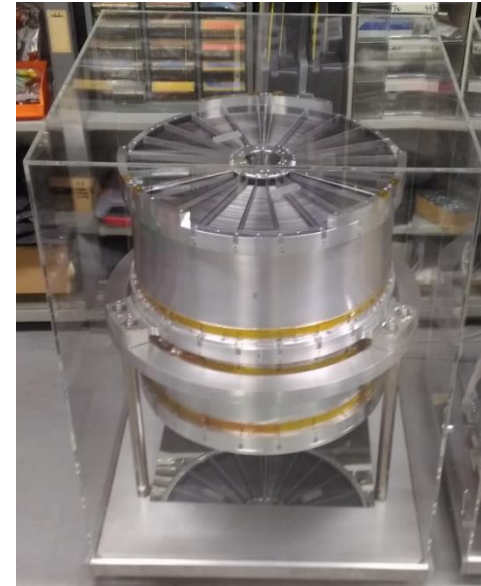
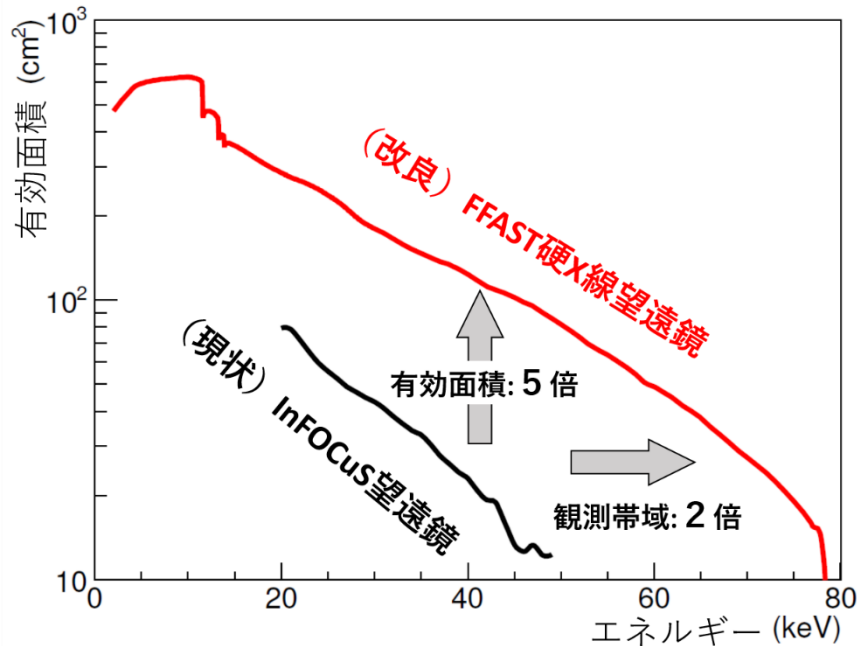




# 次回フライトXL-Calibur(2022,2023,...)

(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 => 阻止能を向上

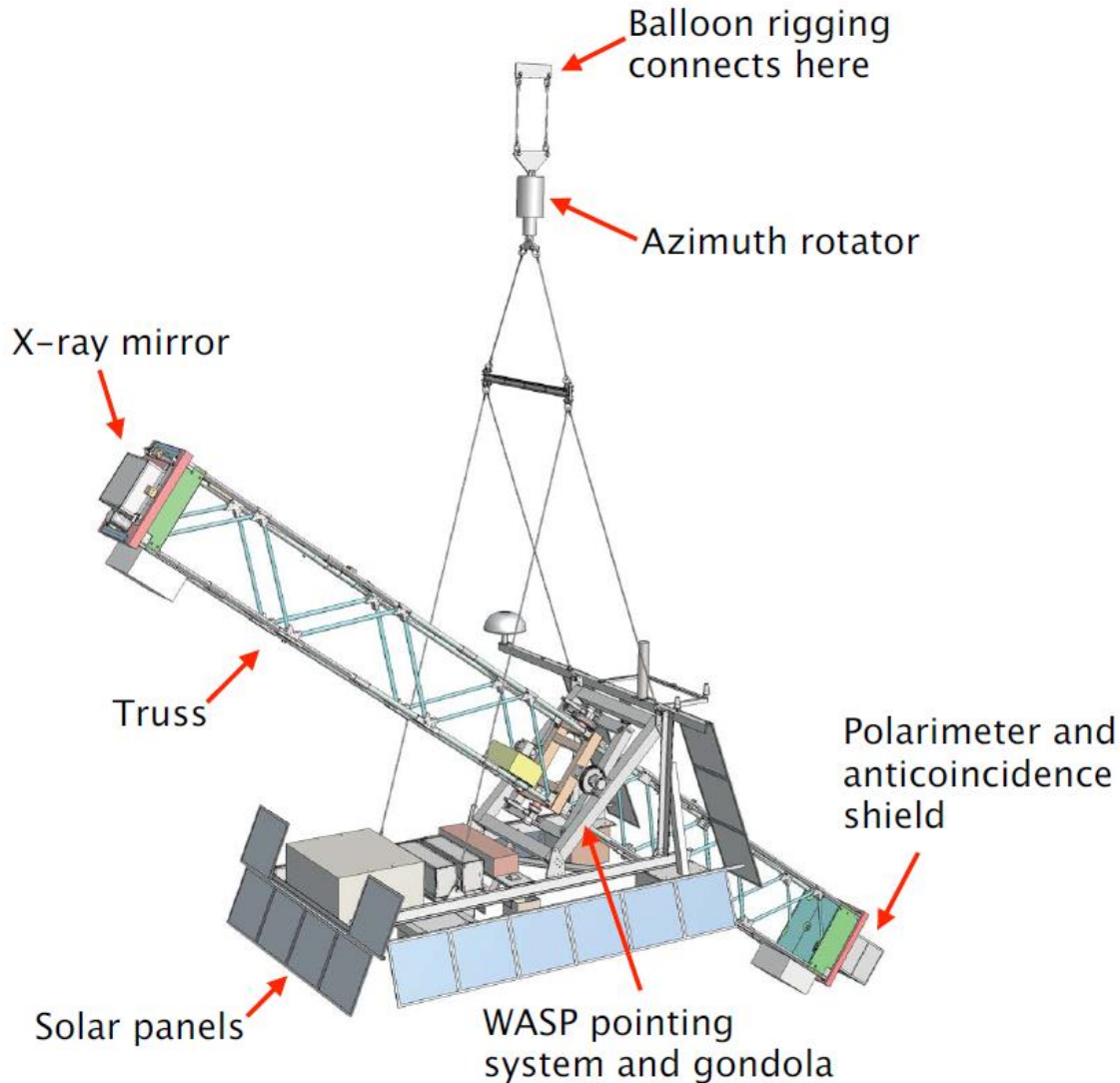
S/N比を10倍向上させ、スウェーデン/南極でのフライトを計画





# 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

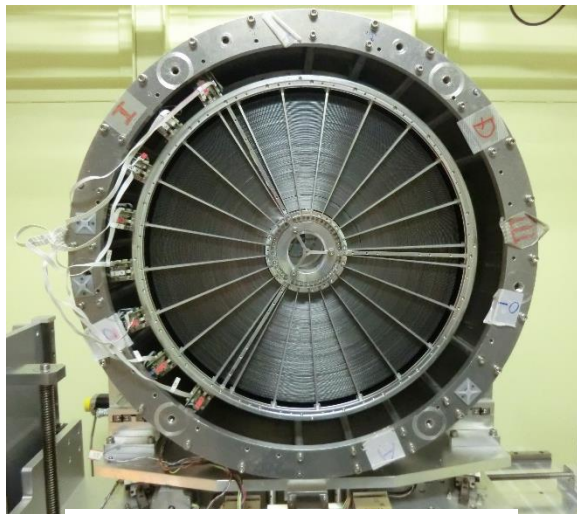
- ・スターカメラを2方向
  - 太陽センサーも追加
- ⇒ 太陽方向 (Crab)  
仰角60度以上 も  
観測可能



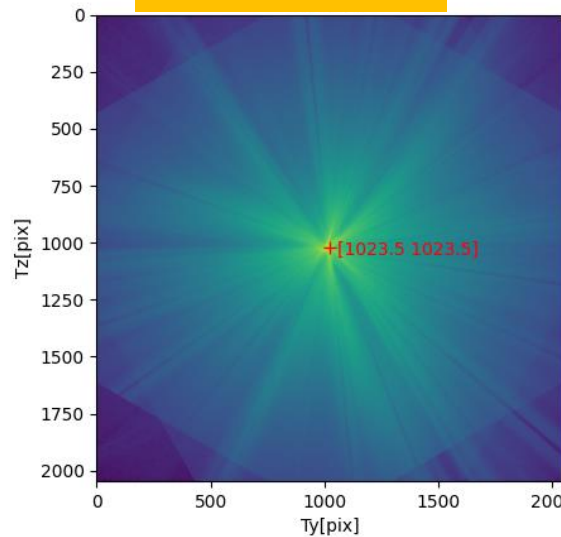
# FFAST望遠鏡の較正

4回目のSPring-8実験を較正を実施（2021年6月）

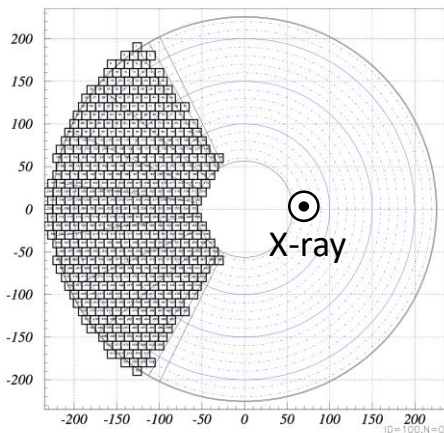
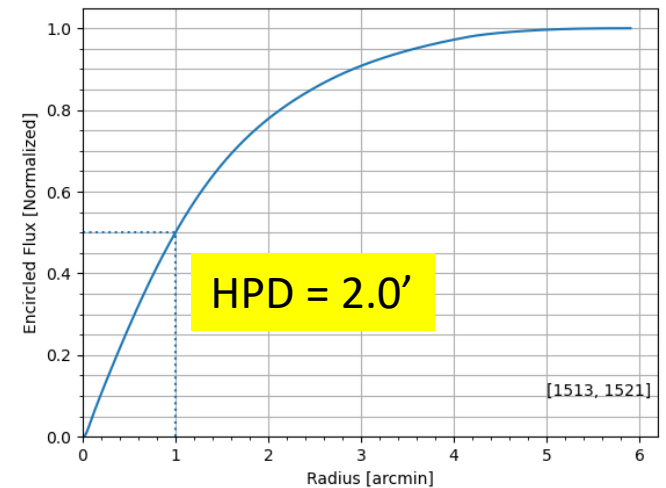
- ・ 光軸測定@50 keV
- ・ 有効面積、角度分解能 測定@20, 30, 40, 50, 70 keV
- ・ 角度依存 測定@30 keV



画像@20 keV



角度分解能@20 keV



全面scan (522点)

30, 50 keVでの測定結果（要求を満たす）

- ・ 有効面積：175 cm<sup>2</sup>, 73 cm<sup>2</sup>
- ・ 角度分解能 HPD：2.0', 2.1'

=> 「ひとみ」衛星と同程度を達成

熱計装、可視モニターカメラを設置

2022年3月：スウェーデンへ発送（4月中旬に到着）

# ゴンドラ噛み合わせ@WFF

ゴンドラ噛み合わせ試験@Wallops Flight Facility (2021年11月)

- ・ **質量ダミー**を用い、取り付け位置、可視光カメラとの噛み合わせを完了
- ・ アライメント調整方法の確認、仰角によるトラス歪み測定
- ・ 太陽（日中）、星（夜間）の姿勢制御の実証





# ゴンドラ噛み合わせ@WFF

ゴンドラ噛み合わせ試験@Wallops Flight Facility (2021年11月)

- ・質量ダミーを用い、取り付け位置、可視光カメラとの噛み合わせを完了
- ・アライメント調整方法の確認、仰角によるトラス歪み測定
- ・太陽（日中）、星（夜間）の姿勢制御の実証





# 全体噛み合わせ@NASA/CSBF

NASA/CSBFで最終噛み合わせ試験を完了@2022/2







# XL-Caliburの予想感度 (15-80 keV)

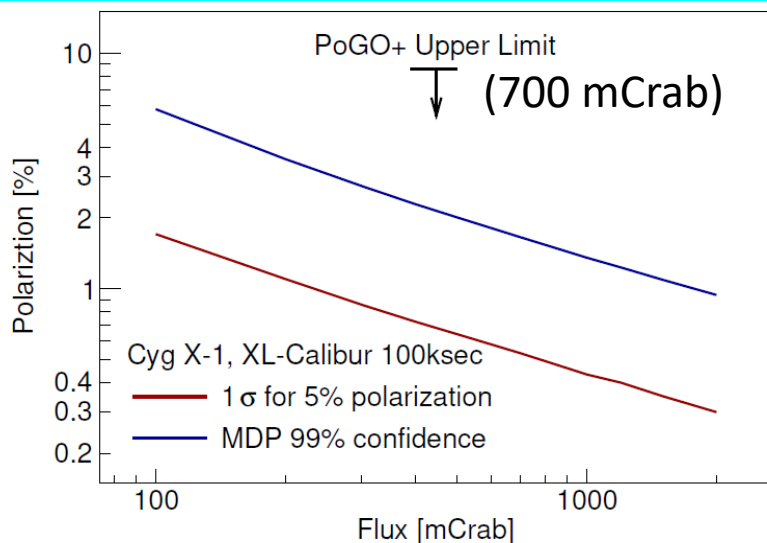
**2022年：北極圏（スウェーデン～カナダ）、1週間フライト**

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？）

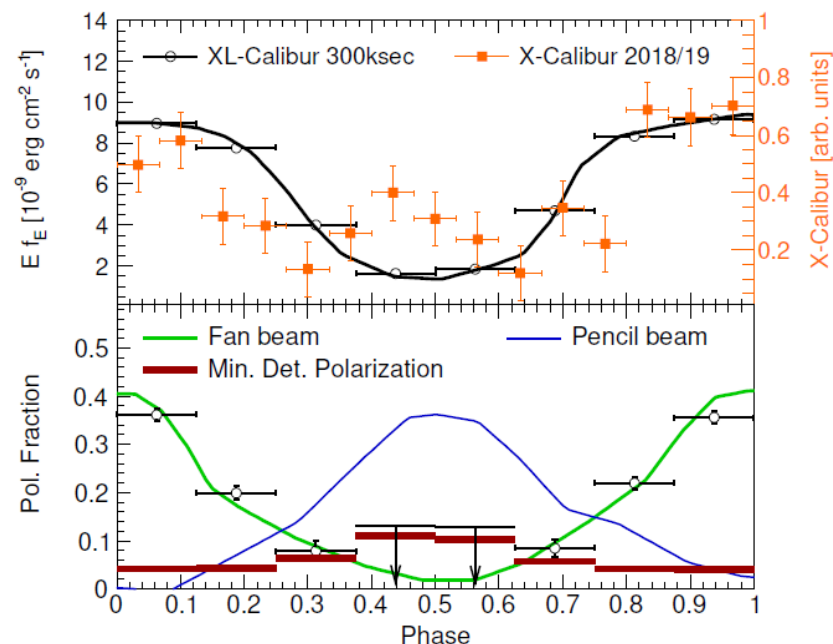
## Cyg X-1（ブラックホール連星）



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, NICER, NuSTAR, AstroSat と同時観測

## 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5-7月の北極圏（スウェーデン～カナダ）2023年末の南極フライト  
その後も複数フライト  
軟X線IXPE衛星との同時観測を実施予定である。 を計画している。
- 2022年フライトに向け、各機器の準備が完了し、スウェーデンへ装置の輸送中である。

