

硬X線集光偏光計XL-Calibur 気球実験の2024年フライトへ向けた準備状況

高橋弘充, Filip af Malmberg^{A, B}, 青柳美緒^C, 粟木久光^D, Richard Bose^E, Dana Braun^E, Sohee Chun^E, Gianluigi de Geronimo^F, 榎戸輝揚^G, Manel Errando^A, 深沢泰司, 古澤彰浩^I, Thomas Gadson^H, Epharaim Gau^E, Victor Guarino^J, 郡司修一^K, 袴田知宏^C, 林多佳由^P, Scott Heatwole^H, Arman Hossen^E, Kun Hu^E, 今村竜太^D, 今澤遼, 伊師大貴^M, 石橋和紀^L, 石田学^M, 石渡幸太^C, Nirmal Kumar Iyer^{A, B}, Keon Harmon^H, 鴨川航^C, Fabian Kislak^N, Mozsi Kiss^{A, B}, 北口貴雄^G, Kassi Klepper^{A, B}, Henric Krawczynski^E, 倉本春希^C, James Lanzi^H, Lindsey Lisalda^E, 前田良知^M, 眞武寛人, 松本浩典^C, 松本岳人^Q, 宮本明日香^Q, 宮澤拓也^O, 水野恒史, 岡島崇^P, Mark Pearce^{A, B}, Zachary Peterson^H, Mehrnossh Rahbardar Mojaver^E, Brian Rauch^E, Nicole Rodriguez Caverio^E, Felix Ryde^{A, B}, 斎藤芳隆^M, 阪本菜月, 島耕平^C, 白濱健太郎^C, Garry Simburger^E, Sean Spooner^N, Theodor-Adrian Stana^{A, B}, David Stuchlik^H, 武尾舞^R, 玉川徹^G, 田村啓輔^T, 田中虎次郎^Q, 常深博^C, 内田和海^M, 内田悠介^S, Andrew West^E, Eric Wulf^U, 善本真梨那^C, XL-Caliburチーム

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

日米瑞の国際協力

PI: Henric Krawczynski
(ワシントン大学)



(高エネルギー)偏光天体

Synchrotron emission: シンクロトロン放射

- Rotation-powered neutron stars (e.g. Crab pulsar)
- Pulsar wind nebulae (e.g. Crab nebula)
- Jets in active galactic nuclei (e.g. Mkn 501, 1E1959+65)
- Gamma-ray bursts

Compton scattering: 散乱 (コンプトン)

- Accretion disk around black holes (e.g. Cygnus X-1)

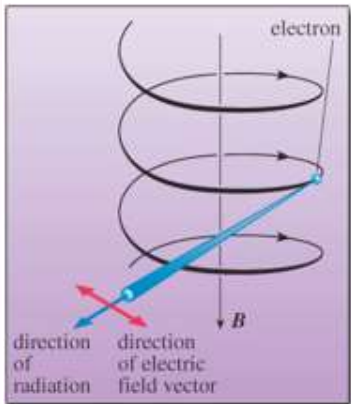
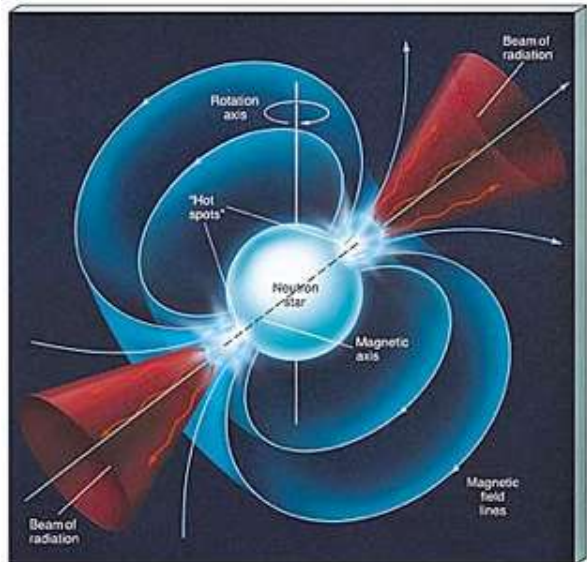
Propagation in strong magnetic field: 強磁場

- Highly magnetized neutron stars (e.g. Hercules X-1, Magnetars)

Probe of magnetic field geometry

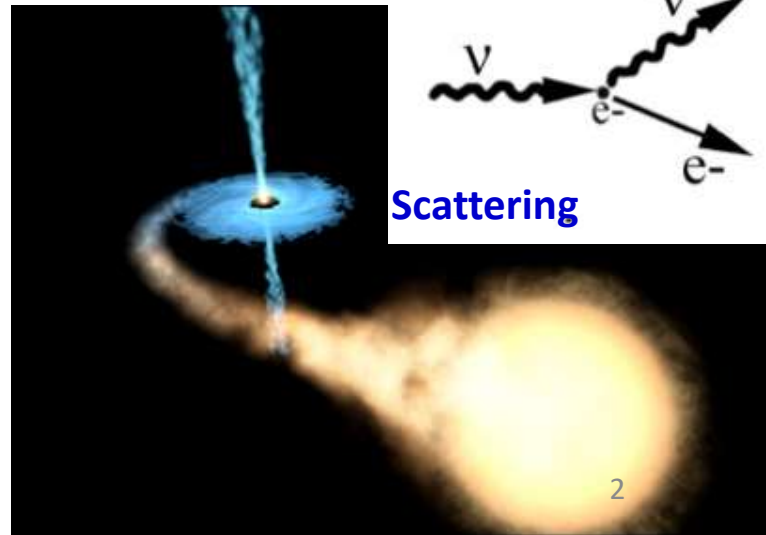
Probe of geometrical relation between the photon source and the scatterer

Crab



Synchrotron emission

Cygnus X-1





高エネルギー偏光観測の歴史と今後

1970年代

2000

現在

軟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, 2024, ...)

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

広帯域での偏光観測が重要と考え、**硬X線**偏光観測を推進



コリメータ型から集光型へ

従来：PoGO Lite/PoGO+

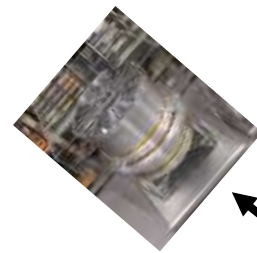
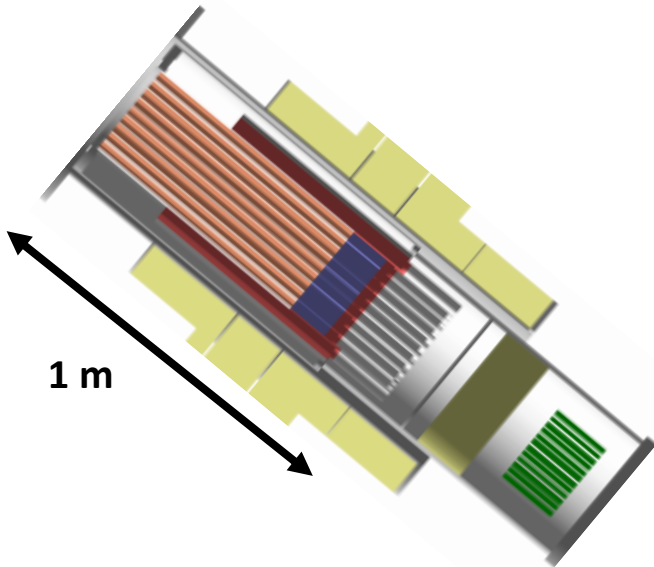
今後：X(L)-Calibur

日本、スウェーデン

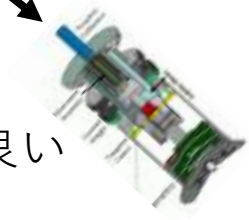
元々アメリカだけの実験

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



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

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

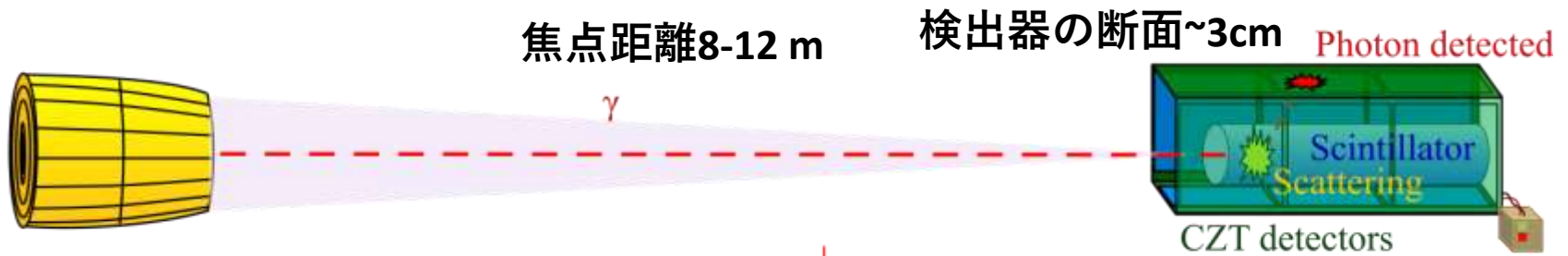
天体指向：姿勢を秒角での制御
Wallops Arc Second Pointer (WASP)



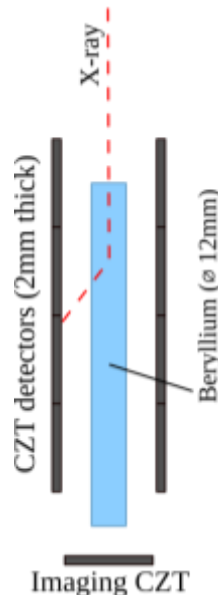
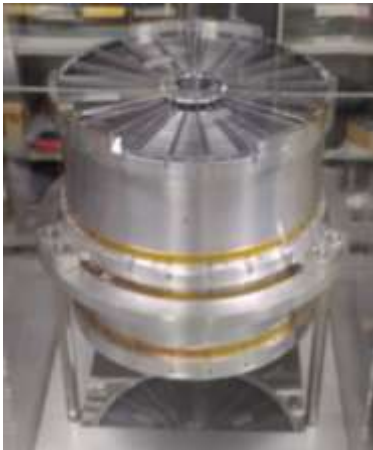
X(L)-Calibur偏光計(集光型)

15-80 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30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)



XL-Calibur 全体像 (12m, ~2トン)

前回2022年の放球時



前回フライトの不具合(バラスト運用のミス)



7/12 (打ち上げ~24時間後)
バラスト運用のミスにより
片側のバランスを全てドロップ
=> 仰角の制御が不能に

バラストは2個用意 <= 左右のバランスを取りやすいように

残念ながら、十分な観測時間が得られなかった。
各機器の動作は実証された。上空バックグラウンド (Iyer+2023)
=> 次回フライトを2024年(今年)夏に実施

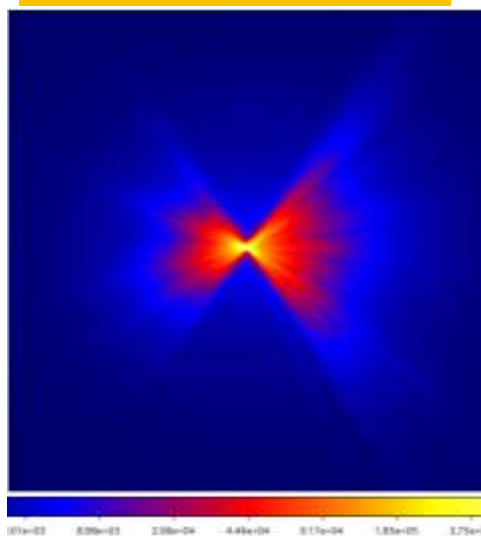
次回フライトに向けて(1): X線性能@SPring-8

SPring-8実験においてX線性能の較正を実施 (2023年1月, 4月)

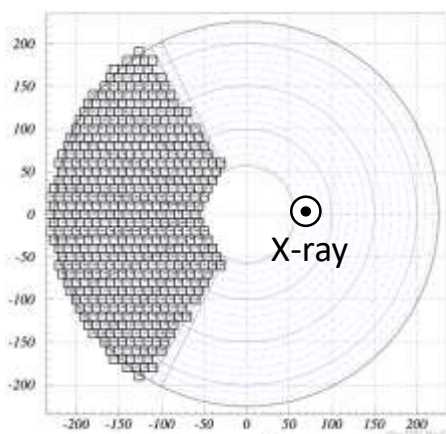
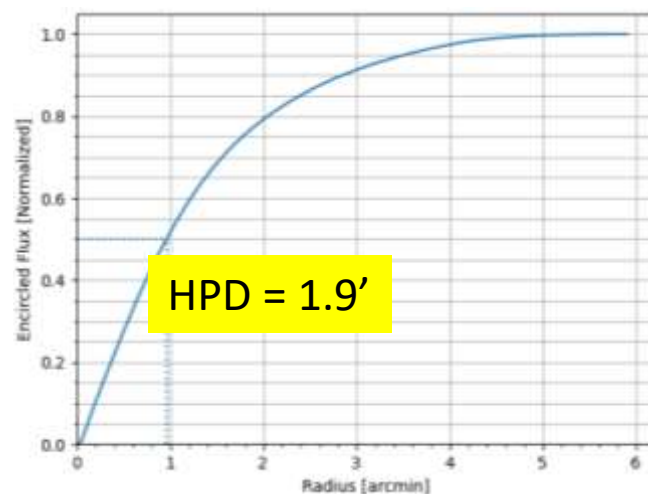
- ・ 光軸測定@30, 50 keV
- ・ 有効面積、角度分解能 測定@20,30,40, 50, 70 keV



画像@50 keV(1seg)



角度分解能@50 keV(1seg)



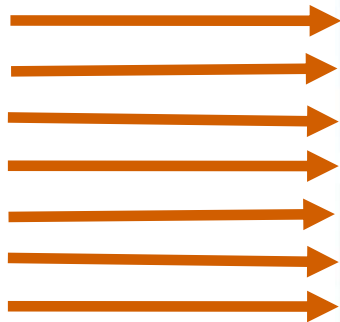
全面scan (522点)

フライト前後での明らかな変化 (劣化) は見られず
=> そのまま次回フライトへ

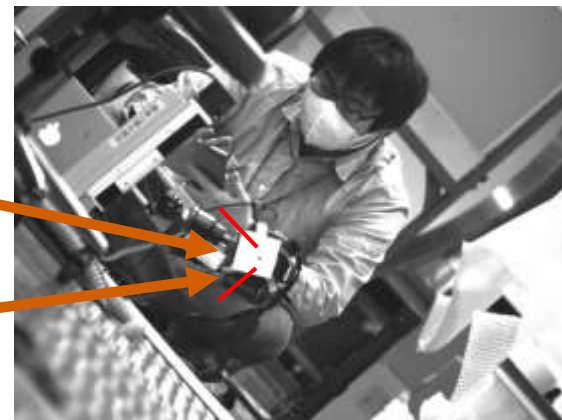
次回フライトに向けて(2): 光軸測定(可視光) @宇宙研

可視光測定でも、X線測定の時と同様に光軸 + 集光位置をトレースできることを確認

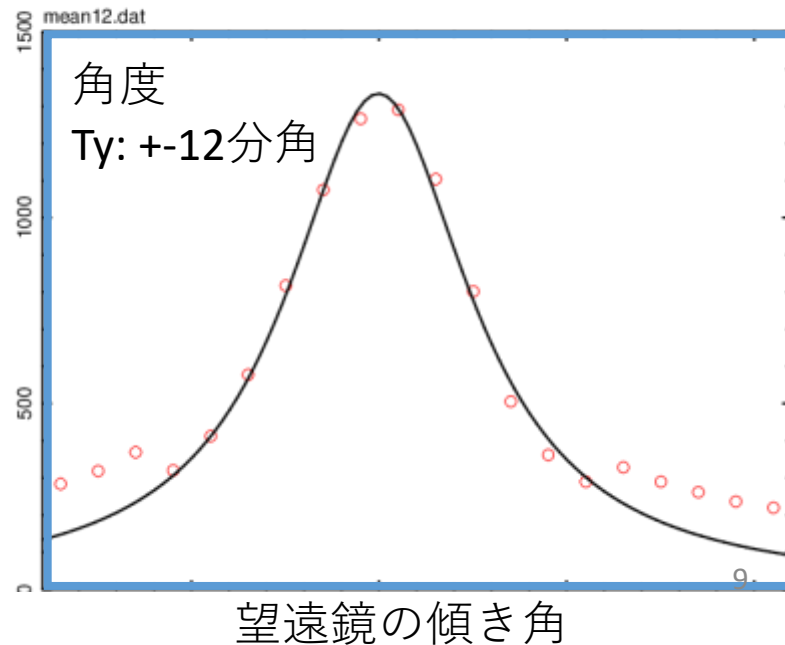
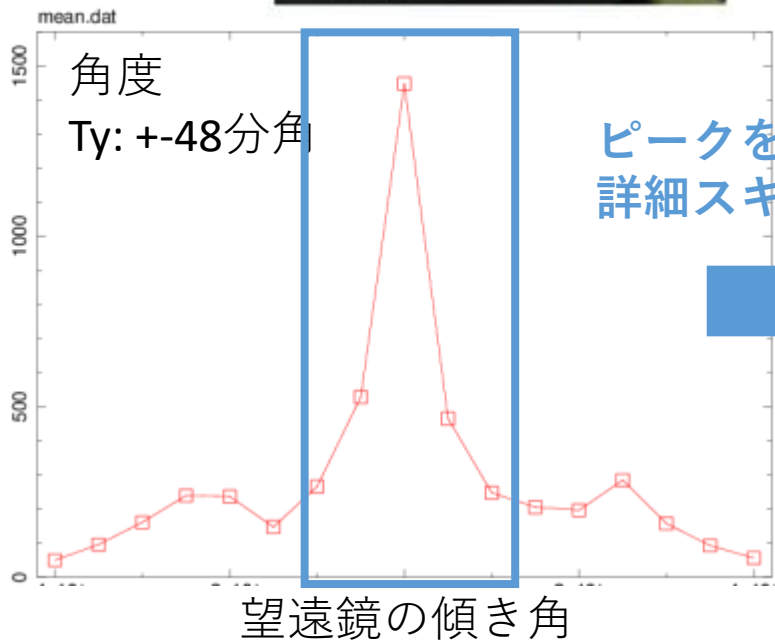
可視光の平行光
(ハロゲンランプ
+ 逆望遠鏡)



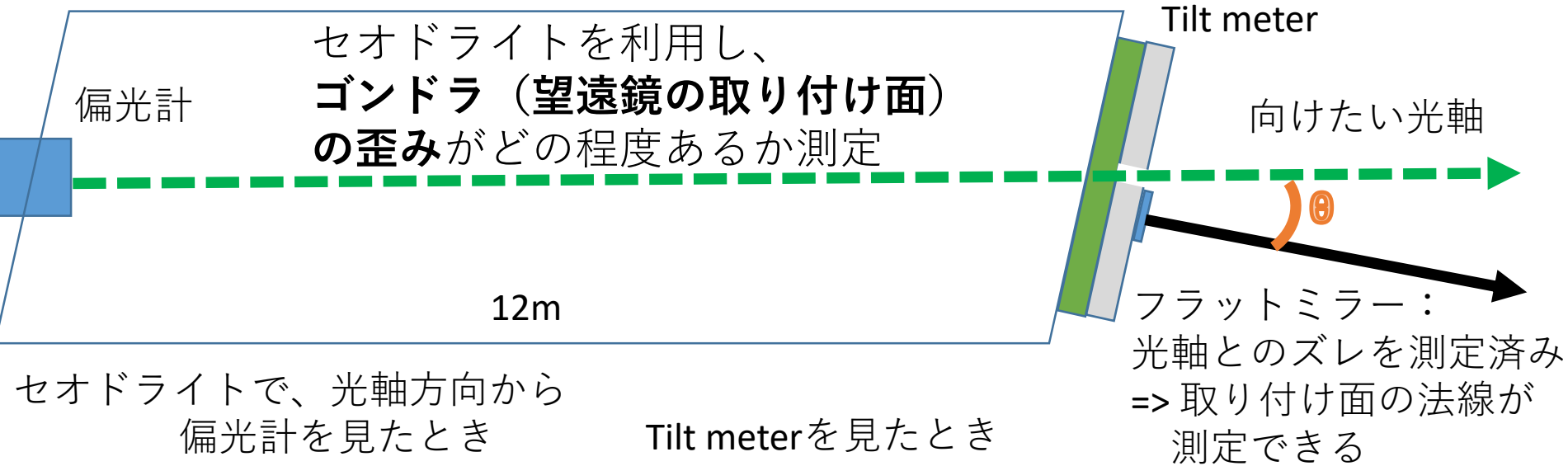
集光された
可視光の
強度測定



集光された可視光強度



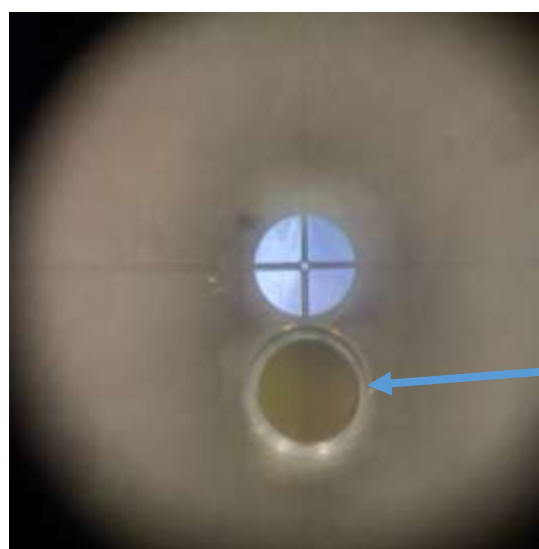
次回フライトへ向けて(3):ゴンドラ歪み測定



セオドライトで、光軸方向から
偏光計を見たとき



Tilt meterを見たとき



フラットミラー
(tilt meterの溝に糊付け)

Tilt meterの測定原理の確認@宇宙研 (2023/7)
=>実際にゴンドラの歪み測定@WFF (2023/11)

XL-Calibur 全体像 (12m, ~2トン)

今回2023年の仰角試験(0~80°)@WFF



今回2024年に向けた最終噛み合わせ試験@CSBF

地上アンテナ、Iridium衛星、TDRSS衛星



現在は物品をスウェーデンへ輸送中
4月から組み上げ開始
5月(~7月)に打ち上げ

- Crab
- Cyg X-1 (IXPE衛星とも同時観測)

次回(以降)フライト予定

- 2024年5~7月 @ スウェーデン
- 2025年11月~2026年1月 @ 南極

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。
- 2022年7月12日-18日に北極圏（スウェーデン～カナダ）をフライトした。再フライトに向け準備完了。
- 次回フライトは2024年夏に北極圏から再フライト、その後も南極などで複数フライトを計画している。軟X線IXPE衛星との同時観測を実施予定である。