

硬X線集光偏光計XL-Calibur気球実験の2024年フライトと今後

高橋 弘充, Karina Abraham^A, Filip af Malmborg^B, 栗木 久光^C, Matthew G. Baring^D, Richard Bose^E, Dana Braun^E, Caitlin Burth^A, Jacob Casey^F, Sohee Chun^E, Gianluigi de Geronimo^G, 榎戸 輝揚^H, Manel Errando^E, 深沢 泰司, 古澤 彰浩^I, Thomas Gadson^A, Pavel Galchenko^A, Ephraim Gau^E, 呉屋 和保, Victor Guarino^J, 郡司 修一^K, 袴田 知宏^L, 林 多佳由^M, Scott Heatwole^A, Arman Hossen^E, Kun Hu^E, 今村 竜太^C, 今澤 遼, 伊師 大貴^N, 石橋 和紀^O, 石田 学^N, Nirmal Kumar Iyer^B, Keon Harmon^A, 河村 穂登^L, Fabian Kislak^F, Mozsi Kiss^B, 北口 貴雄^P, Kassi Klepper^B, Merlin Kole^F, Henric Krawczynski^E, 倉本 春希^L, James Lanzi^A, Lindsey Lisalda^E, 前田 良知^N, 松本 浩典^L, Shravan Menon^E, 宮本 愛子^L, 宮本 明日香^Q, 宮澤 拓也^R, 水野 恒史, 村上海都^L, 長尾 梓生^L, 小高 裕和^L, Takashi Okajima^M, Mark Pearce^B, Zachary Peterson^A, Mehrnoosh Rahbardar Mojaver^E, Brian Rauch^E, Nicole Rodriguez Caverro^E, Felix Ryde^B, 斎藤 芳隆^N, 島 耕平^L, 白濱 健太郎^L, Garry Simburger^E, Sean Spooner^F, Theodor-Adrian Stana^B, David Stuchlik^A, 高塚 紗弥菜^L, 武尾 舞^S, 玉川 徹^P, 田村 啓輔^M, 田中 虎次郎^Q, 常深 博^L, 内田 賢佑^L, 内田 和海^N, 内田 悠介^T, Edward Udinski^A, Brett Vincent^A, Andrew West^E, Kasun Wimalasena^F, Eric A Wulf^U, 横田 雅人, 善本 真梨那^L, XL-Caliburチーム

広大, WFF^A, KTH, OKC^B, 愛媛大^C, Rice U.^D, Wash. U.^E, UNH^F, Stony Brook, DG Circuits^G, 京大^H, 藤田医大^I, Guarino Engineering^J, 山形大^K, 阪大^L, GSFC^M, ISAS^N, 名大^O, 理研^P, 都立大^Q, OIST^R, 埼玉大^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)





(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)

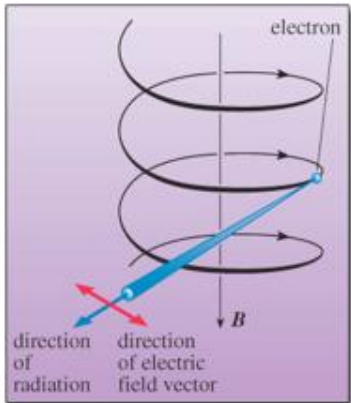
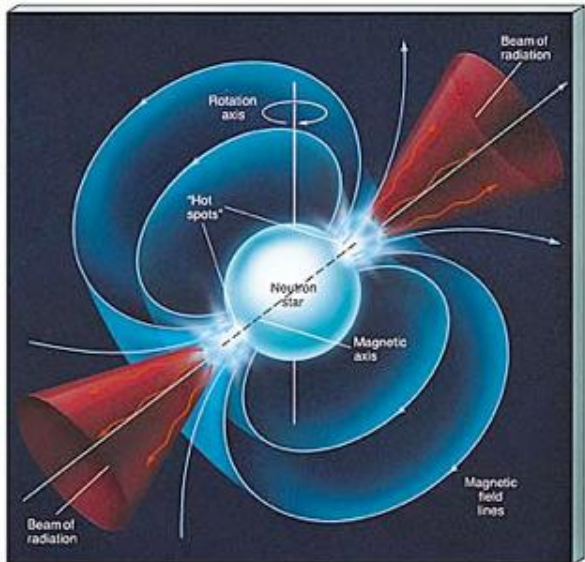
Propagation in strong magnetic field: 強磁場

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

Probe of magnetic field geometry

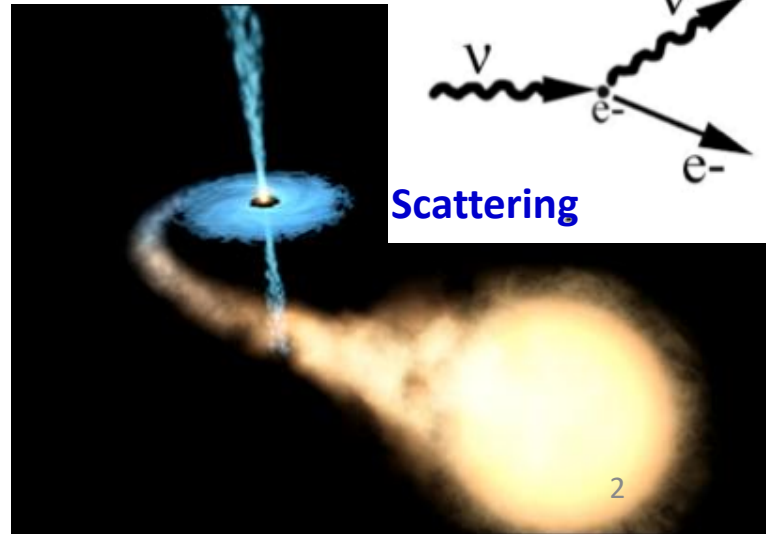
Probe of geometrical relation between the photon source and the scatterer

Crab



Synchrotron emission

Cygnus X-1



Scattering



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 - 2025)

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

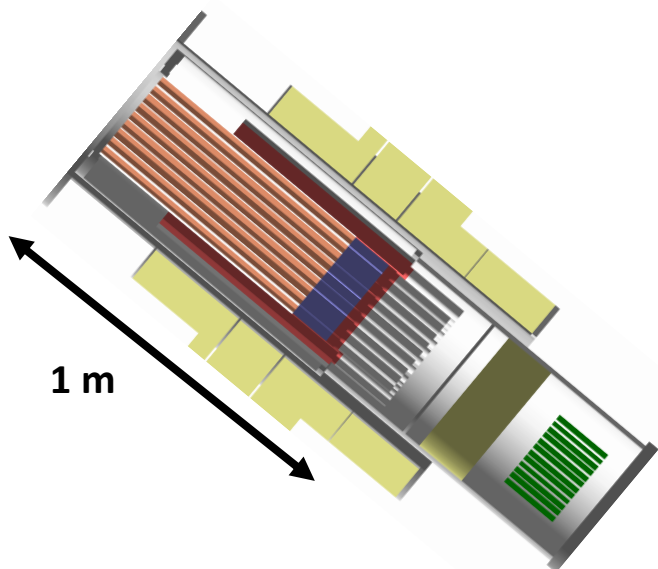
広帯域での偏光観測が重要と考え、**硬X線**偏光観測を推進



コリメータ型から集光型へ

従来：PoGO Lite/PoGO+

日本、スウェーデン



コリメータ型

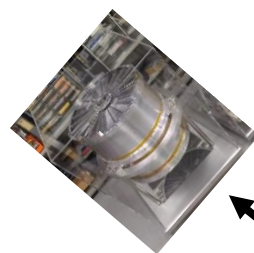
Crab, Cyg X-1を観測
大型にすると検出器も大型
=>バックグラウンドが高い

今後：X(L)-Calibur

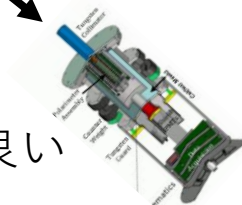
元々アメリカだけの実験

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

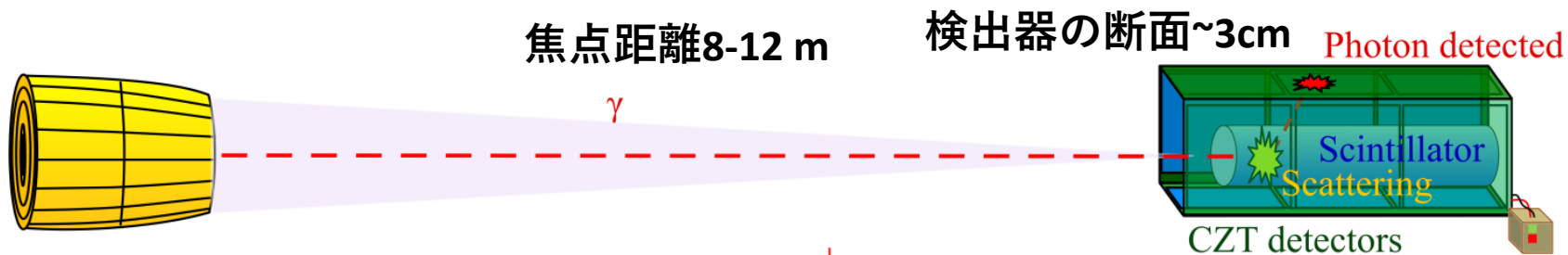
天体指向：姿勢を**秒角**での制御
Wallops Arc Second Pointer (WASP)



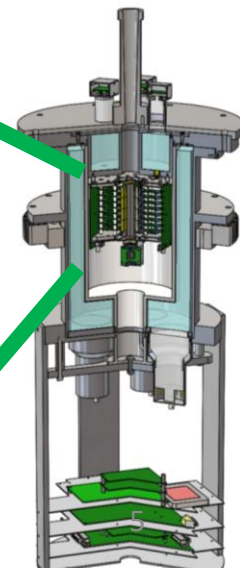
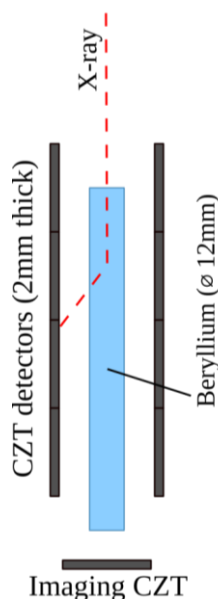
X(L)-Calibur偏光計(集光型)

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。



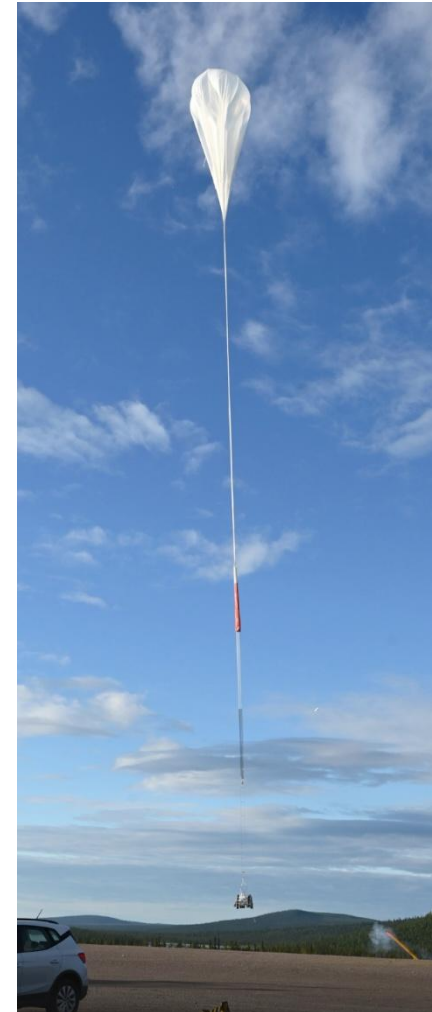
2018年: InFOCuS望遠鏡 (NASA+日本)
2022年以降: FFAST望遠鏡 (日本)





今回2024年のフライト

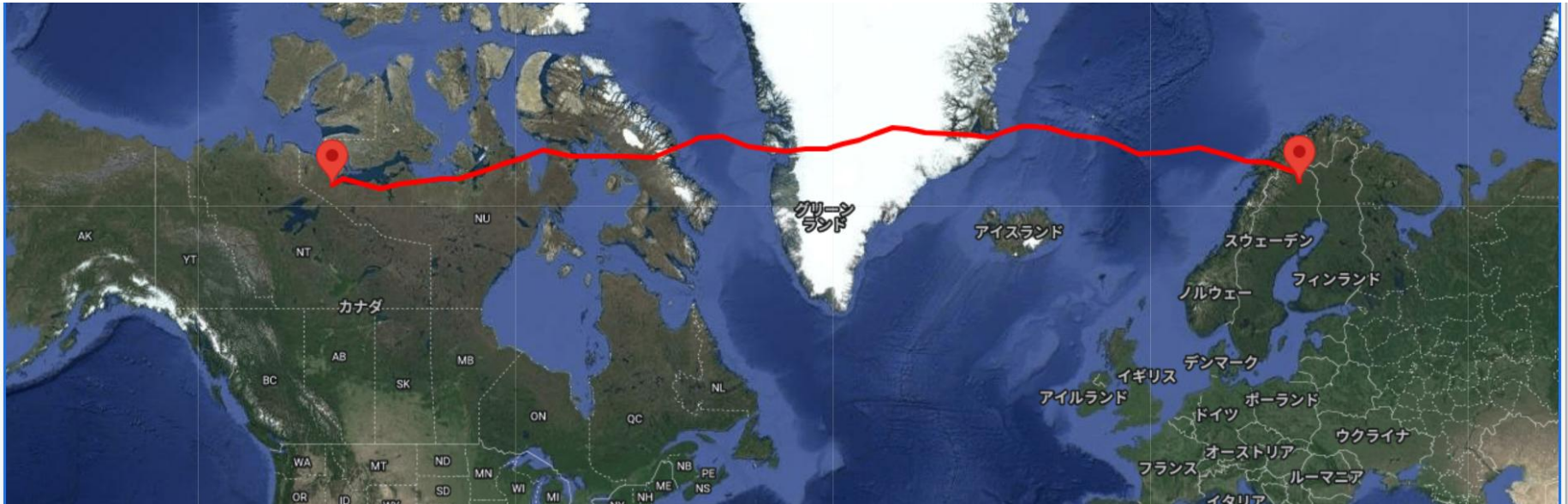
- 4/11：スウェーデン Esrange で準備開始
- 5/11：フライト準備が完了
- 5月：上空の風が整うのを待つ
- 6月：CNESの打ち上げ
- 7/9：14回目の打ち上げ挑戦でフライト！





今回2024年のフライト

2024/7/9 ~ 7/14



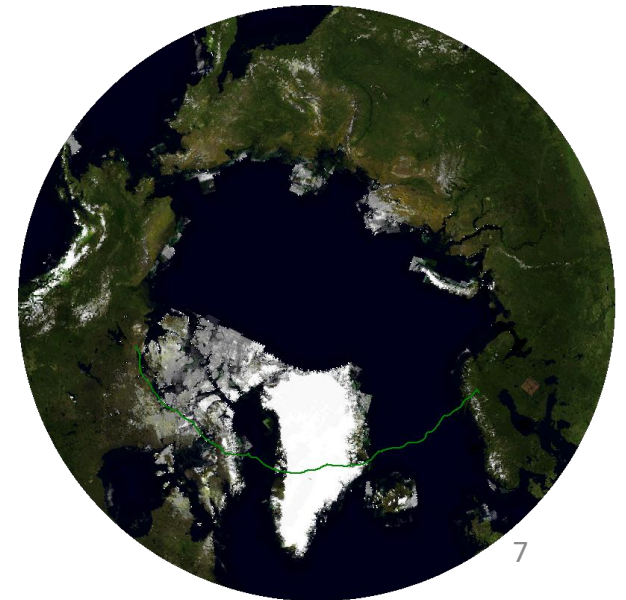
フライト時間

5 days, 15 hours, 49 minutes

姿勢制御の時間 (WASPシステムによる)

4 days, 16 hours, 51 minutes

=> CrabとCyg X-1を4回ずつ観測



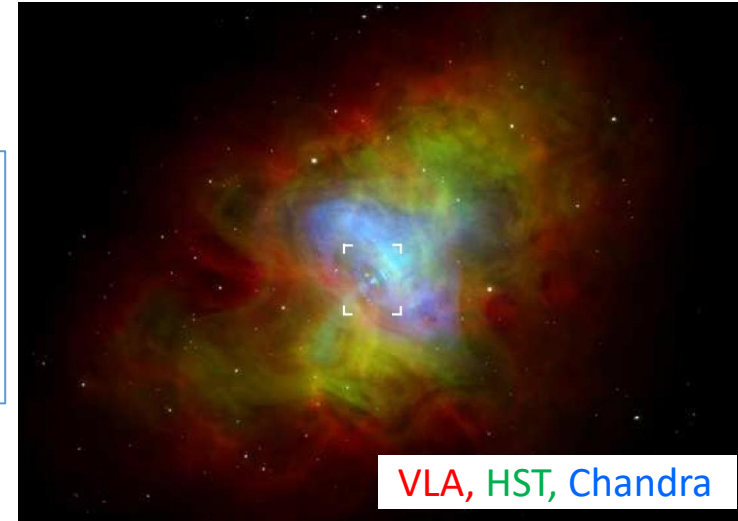


観測結果(2024年フライト)

観測天体

- Crab (pulsar-wind nebula) => **第1論文 (Awaki+ MNRAS Letter) 受理**
Cyg X-1 (black-hole X-ray binary)

CRAB	On-source	Off-source
Time	50 ks	17 ks
Events	56k events	6.2k events



CYG X-1	On-source	Off-source
Time	69 ks	48 ks
Events	62k events	16k events



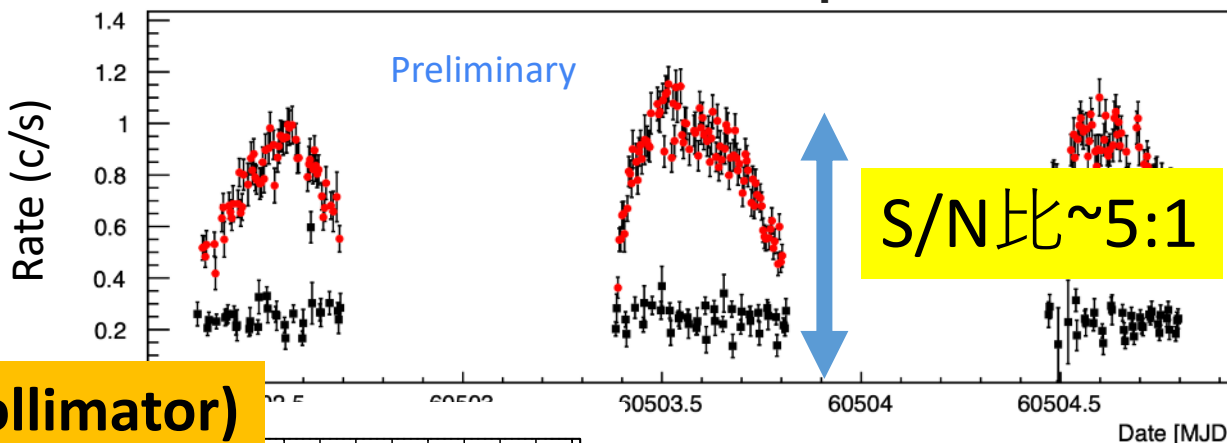


ライトカーブ (Preliminary)

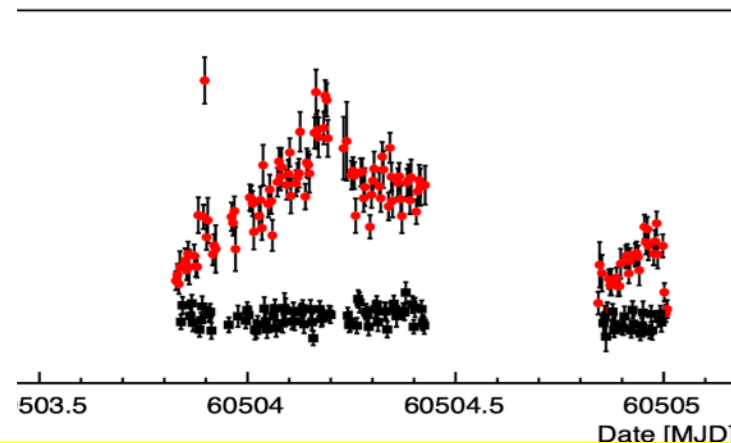
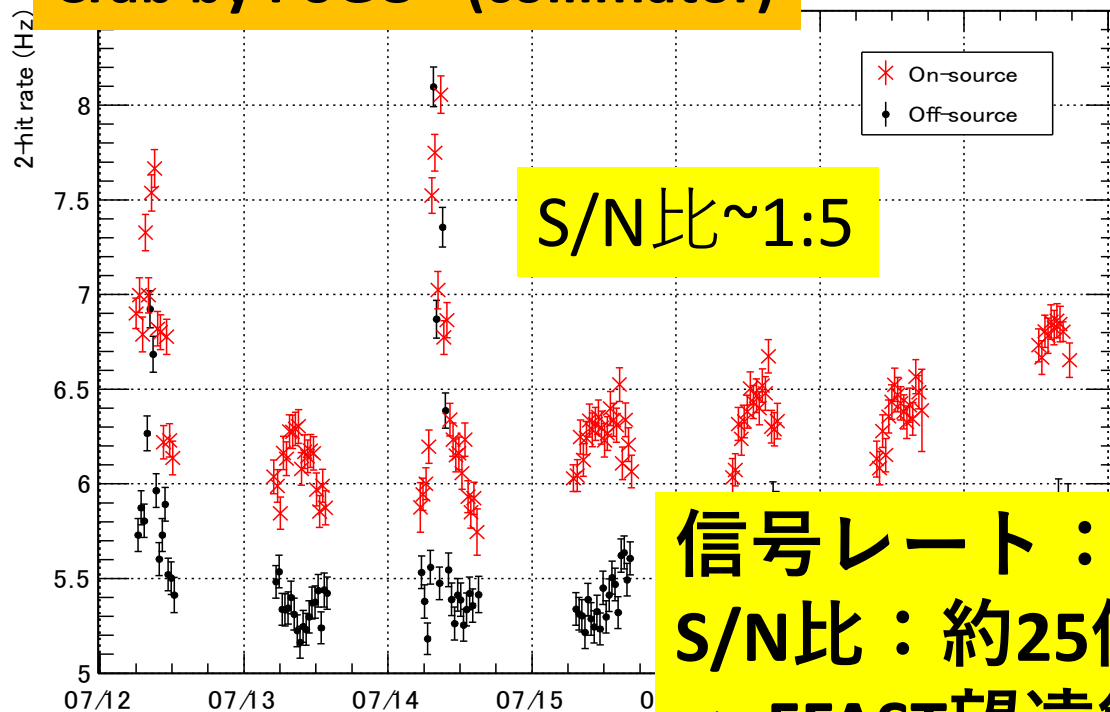
Ephraim Gau et al. 2024

On-source
Off-source

Crab



Crab by PoGO+ (collimator)

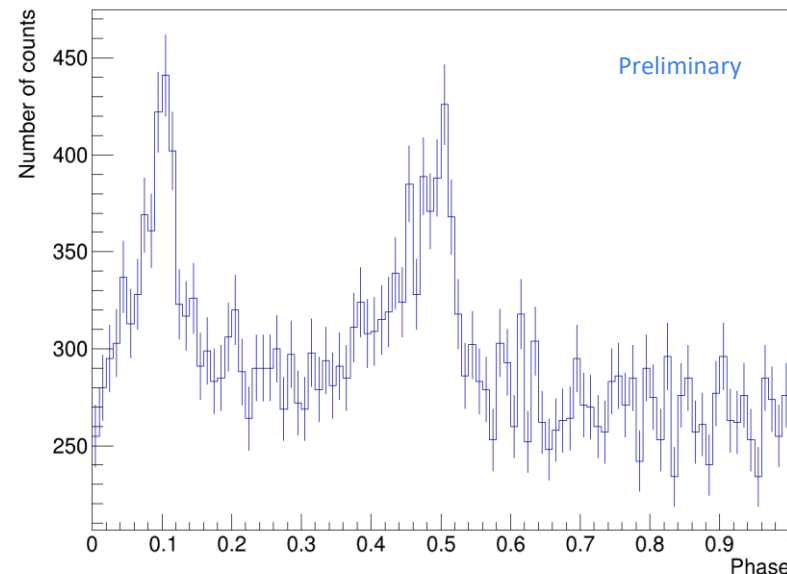
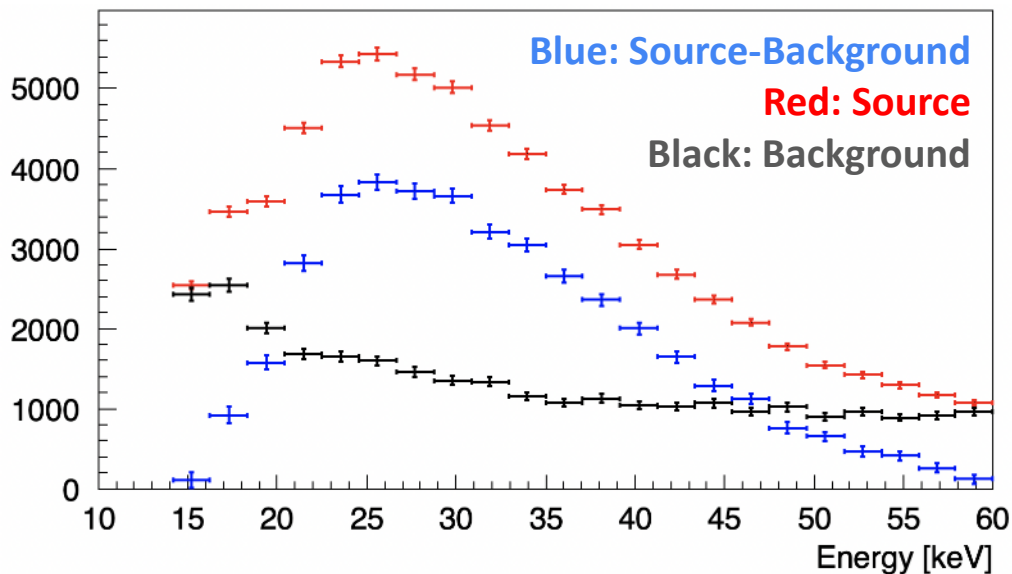


信号レート：~1 Hz 同程度
S/N比：約25倍も向上!
=> FFAST望遠鏡の有効面積の成果!!!



Crabエネルギースペクトル、パルス

Mozsi Kiss et al. 2024



大気吸収

Cyg X-1も同様

望遠鏡の有効面積
+ 天体信号の減少

Minimum Detectable Polarization (MDP)

$$MDP = \frac{4.29}{\mu R_S} \sqrt{\frac{R_{BG} + f_{off} R_S}{(1 - f_{off}) f_{off} T}}$$

MDP99
Crab (phase averaged): ~9%
Cyg X-1 (hard state): ~8%

Modulation factor ~ 0.43
 Aoyagi et al. 2024



Crab

第1論文が3/18に受理されました (Awaki+, MNRAS Letter)

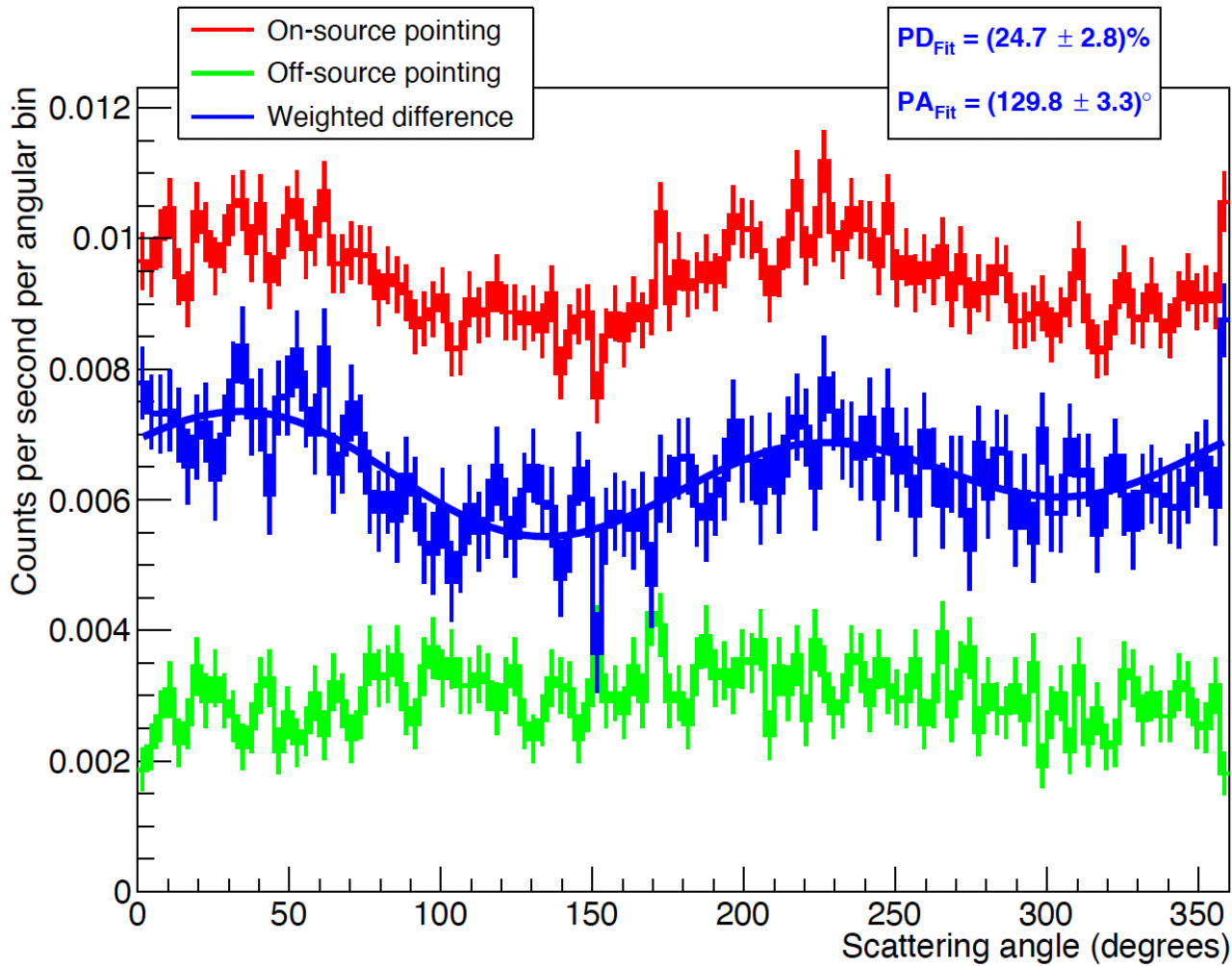
[\[2503.14307\] XL-Calibur measurements of polarised hard X-ray emission from the Crab](#)





Crab: Modulation Curve (Polarization)

Awaki+ accepted



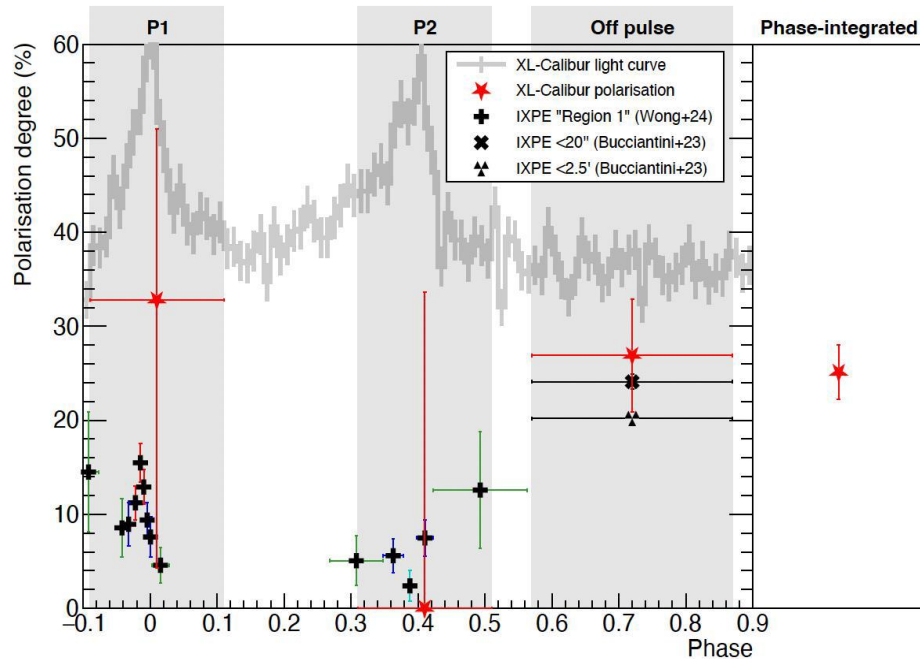
Polarization degree (**pulse phase averaged**): $24.7 \pm 2.8 \%$
<= 過去最高の精度で検出に成功@硬X線



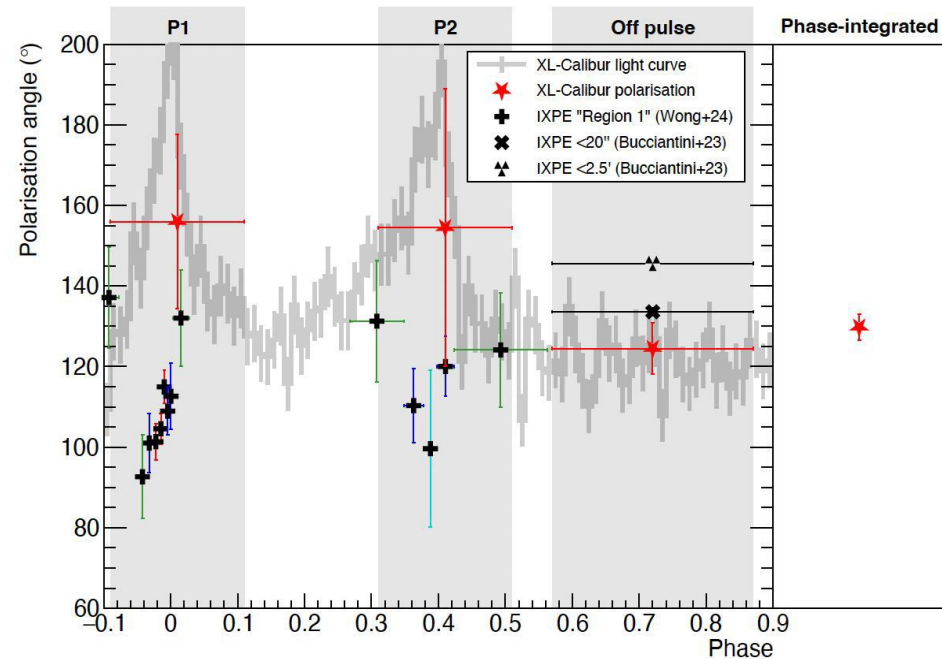
Crab: pulse phase

Awaki+ accepted

偏光度



偏光方位角



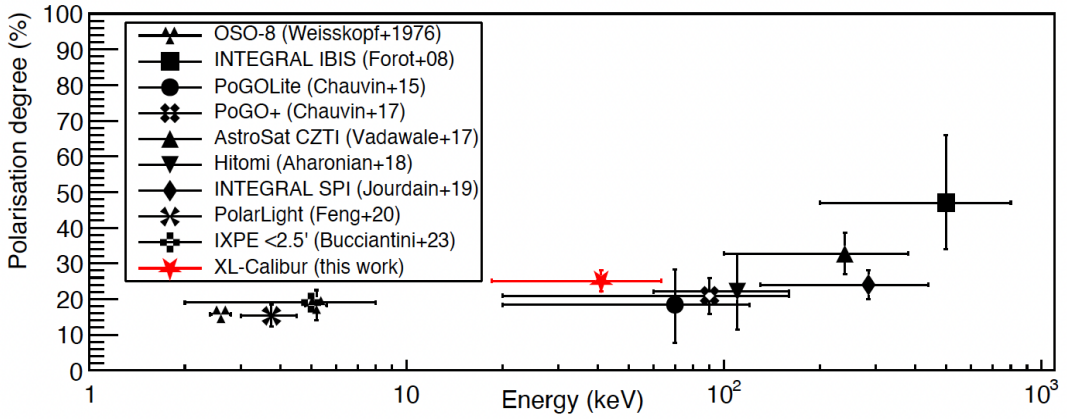
パルスピークでは、偏光度は有意に検出できていない

IXPE (2-8 keV軟X線) の長期観測から推定すると、
偏光方位角が急激に変化 (スweep) か？

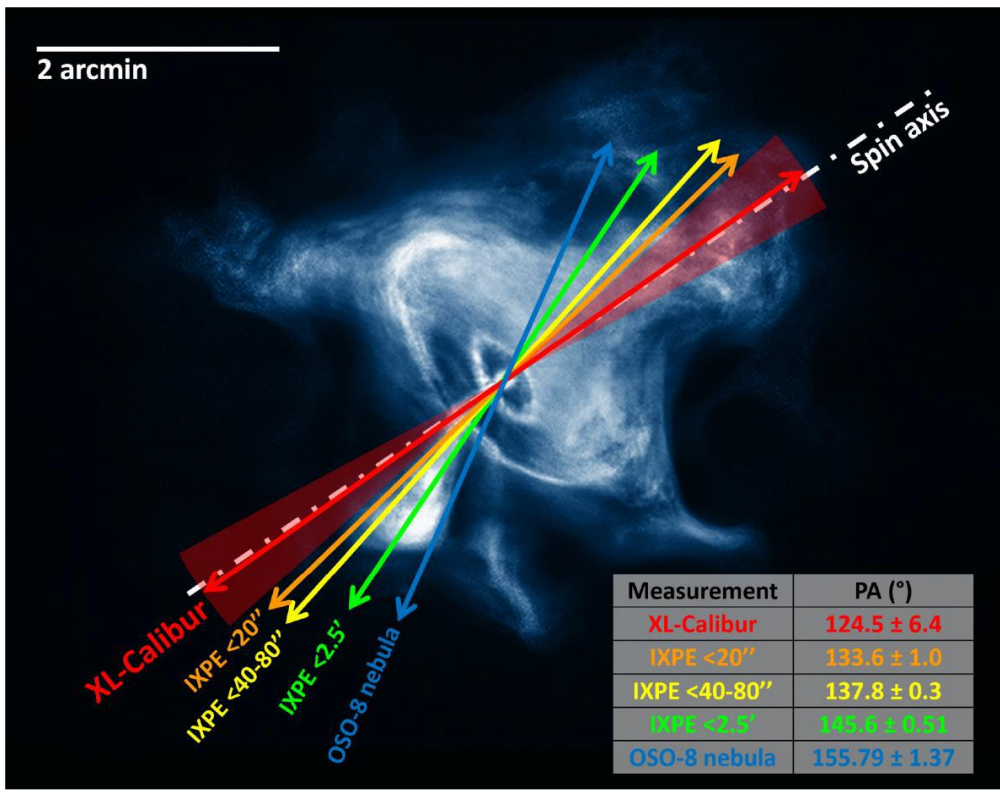


Crab: energy dependence

Awaki+ accepted



偏光度：
 XL-Calibur (15-60 keV)の方が
 IXPE (2-8 keV)より高い傾向



偏光方位角：
 XL-Calibur (高エネルギー)の方が
 よりジェット方向に沿う

高エネルギー放射は
 より中心（パルサー）に
 集中していると思われる

今後
 - IXPEと領域を比較
 - パルス解析（追加信号）

まとめ&今後

- 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できた。
- 2024年7月9日-14日に北極圏（スウェーデン～カナダ）をフライトした。
- Crab観測の第1論文が受理 => ぜひ議論させて下さい。
- 他のデータ解析は進行中。
- **カナダで無事に回収済み。望遠鏡は、すでに日本に戻っている。**
- **次回の南極でのフライトに向け、準備を進めている。**

