

# 硬X線集光偏光計XL-Calibur気球実験 の次回フライト

高橋弘充, Karina Abraham<sup>A</sup>, Filip af Malmberg<sup>B</sup>, 栗木久光<sup>C</sup>, Matthew G. Baring<sup>D</sup>, Richard Bose<sup>E</sup>, Dana Braun<sup>E</sup>, Caitlin Burth<sup>A</sup>, Jacob Casey<sup>F</sup>, Sohee Chun<sup>E</sup>, Gianluigi de Geronimo<sup>G</sup>, 榎戸輝揚<sup>H</sup>, Manel Errando<sup>E</sup>, 深沢泰司, 古澤彰浩<sup>I</sup>, Thomas Gadson<sup>A</sup>, Pavel Galchenko<sup>A</sup>, Ephraim Gau<sup>E</sup>, 呉屋和保, Victor Guarino<sup>J</sup>, 郡司修一<sup>K</sup>, 袴田知宏<sup>L</sup>, 林多佳由<sup>H</sup>, Scott Heatwole<sup>A</sup>, Arman Hossen<sup>E</sup>, Kun Hu<sup>E</sup>, 今村竜太<sup>C</sup>, 伊師大貴<sup>N</sup>, 石橋和紀<sup>O</sup>, 石田学<sup>N</sup>, Nirmal Kumar Iyer<sup>B</sup>, Keon Harmon<sup>A</sup>, 河村穂登<sup>L</sup>, Fabian Kislak<sup>F</sup>, Mozsi Kiss<sup>B</sup>, 北口貴雄<sup>P</sup>, Kassi Klepper<sup>B</sup>, Merlin Kole<sup>F</sup>, Henric Krawczynski<sup>E</sup>, 倉本春希<sup>L</sup>, James Lanzi<sup>A</sup>, Lindsey Lisalda<sup>E</sup>, 前田良知<sup>N</sup>, 松本浩典<sup>L</sup>, Shravan Menon<sup>E</sup>, 宮本愛子<sup>L</sup>, 宮本明日香<sup>Q</sup>, 宮澤拓也<sup>R</sup>, 水野恒史, 村上海都<sup>L</sup>, 長尾梓生<sup>L</sup>, 小高裕和<sup>L</sup>, Takashi Okajima<sup>M</sup>, Mark Pearce<sup>B</sup>, Zachary Peterson<sup>A</sup>, Mehrnoosh Rahbardar Mojaver<sup>E</sup>, Brian Rauch<sup>E</sup>, Nicole Rodriguez Caverro<sup>E</sup>, Felix Ryde<sup>B</sup>, 斎藤芳隆<sup>N</sup>, 島耕平<sup>L</sup>, 白濱健太郎<sup>L</sup>, Garry Simburger<sup>E</sup>, Sean Spooner<sup>F</sup>, Theodor-Adrian Stana<sup>B</sup>, David Stuchlik<sup>A</sup>, 高塚紗弥菜<sup>L</sup>, 武尾舞<sup>S</sup>, 玉川徹<sup>P</sup>, 田村啓輔<sup>M</sup>, 田中虎次郎<sup>Q</sup>, 常深博<sup>L</sup>, 内田賢佑<sup>L</sup>, 内田和海<sup>N</sup>, 内田悠介<sup>N</sup>, Edward Udinski<sup>A</sup>, Brett Vincent<sup>A</sup>, Andrew West<sup>E</sup>, Kasun Wimalasena<sup>F</sup>, Eric A Wulf<sup>T</sup>, 横田雅人, 善本真梨那<sup>C</sup>, XL-Caliburチーム

広大, WFF<sup>A</sup>, KTH, OKC<sup>B</sup>, 愛媛大<sup>C</sup>, Rice Univ.<sup>D</sup>, Wash. Univ.<sup>E</sup>, UNH<sup>F</sup>, Stony Brook, DG Circuits<sup>G</sup>, 京大<sup>H</sup>, 藤田医大<sup>I</sup>, Guarino Eng.<sup>J</sup>, 山形大<sup>K</sup>, 阪大<sup>L</sup>, GSFC<sup>M</sup>, ISAS<sup>N</sup>, 名大<sup>O</sup>, 理研<sup>P</sup>, 都立大<sup>Q</sup>, OIST<sup>R</sup>, 富山大<sup>S</sup>, NRL<sup>T</sup>





# XL-Calibur collaboration



## US

- Polarimeter (Be-CZT)
- 12m truss
- WASP pointing system

## Sweden

- BGO active shield

## 日本

- 硬X線望遠鏡
- 世界最大の有効面積



# Polarized Sources

## Synchrotron emission:

- 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:

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

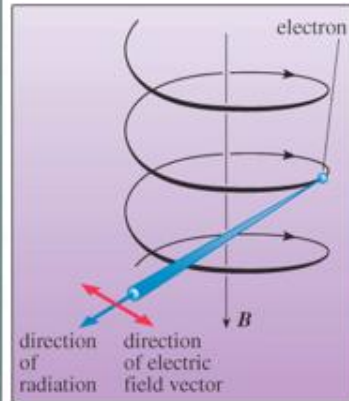
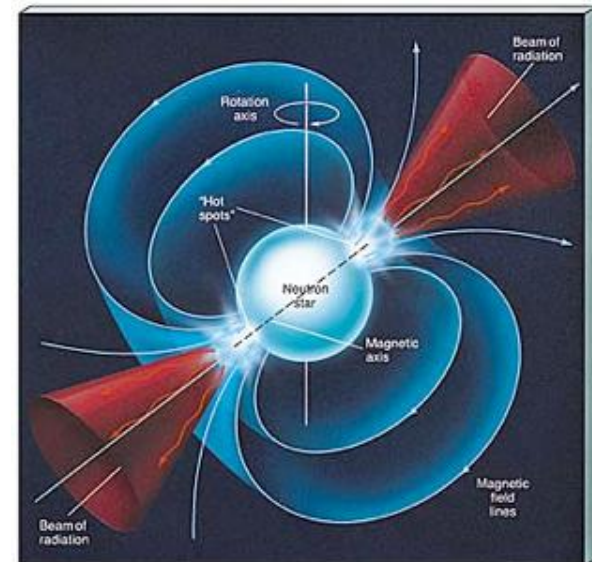
## Propagation in strong magnetic field:

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

Probe of magnetic field geometry

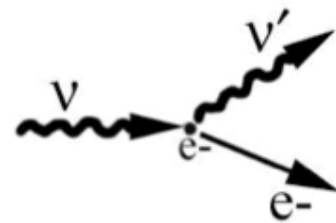
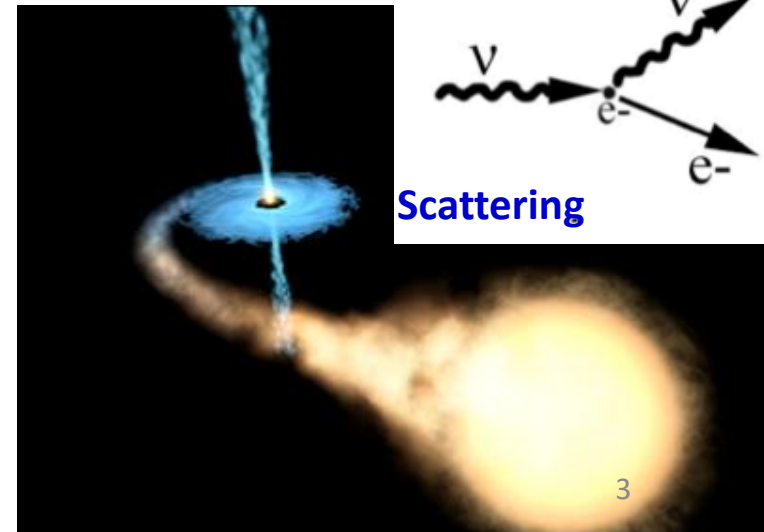
Probe of geometrical relation between the photon source and the scatterer

## Crab



Synchrotron emission

## Cygnus X-1



Scattering



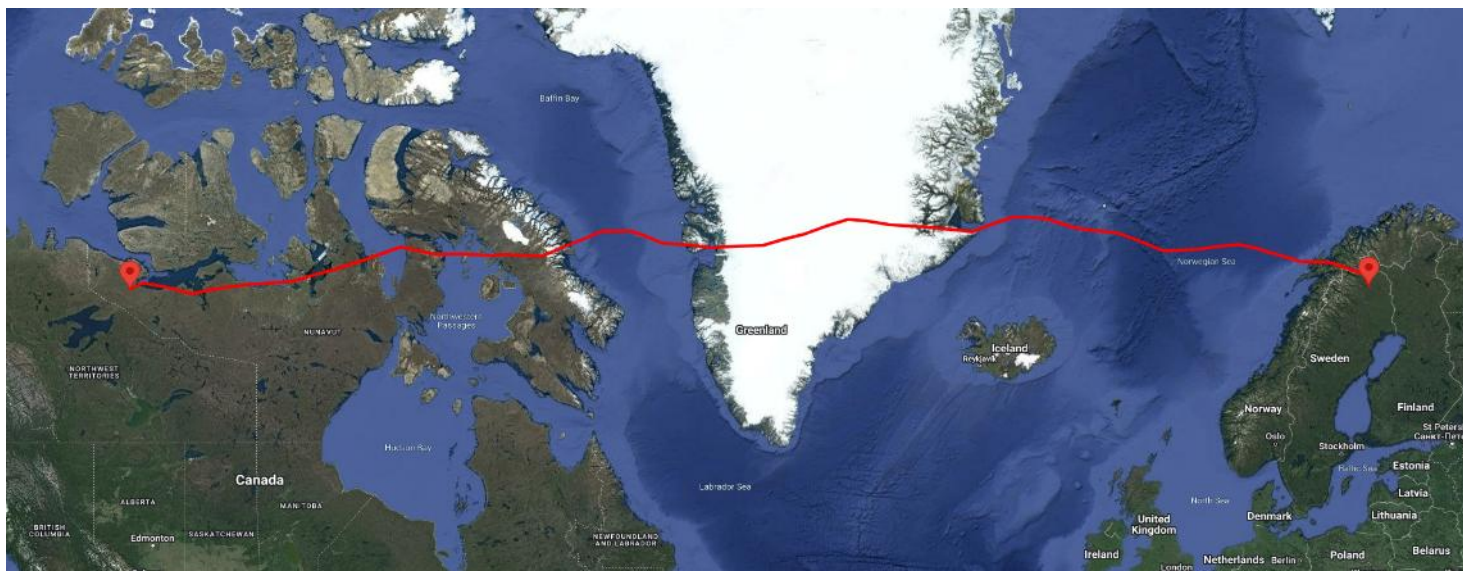
# XL-Calibur 打ち上げ(2024/07/09)@北天

スウェーデン、キルナ市  
NASA/CSBFにより打ち上げ





# XL-Caliburフライト軌跡 (2024/07/09~14)@北天



- フライト時間：5日15時間49分間
- WASP姿勢制御：4日16時間51分間
- Crab観測：4回 (= 4日間)
- Cyg X-1観測 low/hard状態  
：4回 (= 4日間)

Crab論文：MNRAS 540, L40 (2025)

Cyg X-1論文：ApJ, 994, 37, (2025)



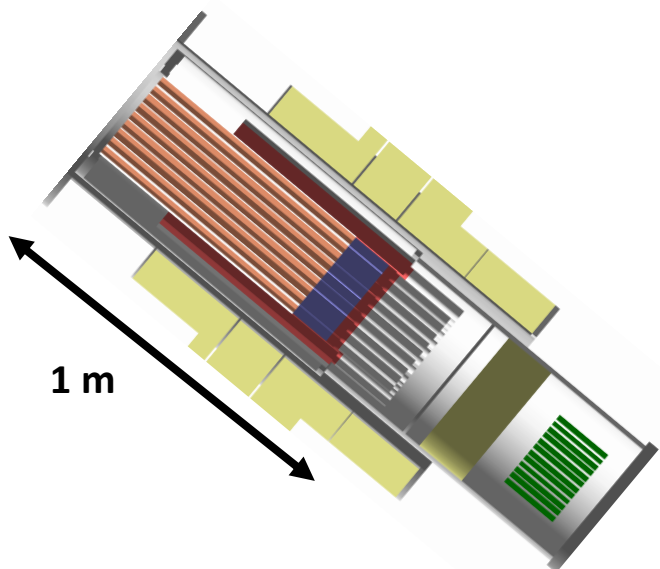
**カナダで回収**  
⇒ 次回は南極フライト  
2027年12月



# X線集光ミラーなし、あり

## 従来：PoGO+

日本、スウェーデン



### 集光ミラーなし（コリメータ型）

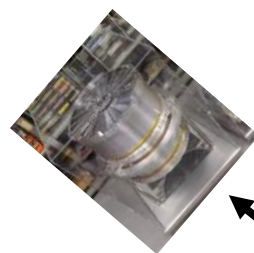
大型にすると検出器も大型  
=> 雑音が高い

## 今回：XL-Calibur

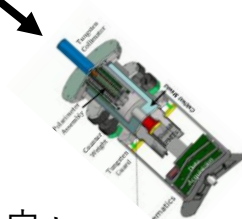
元々アメリカだけの実験

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



12 m



### 硬X線ミラーで集光

検出器はコンパクトで良い  
=> 雑音が低い

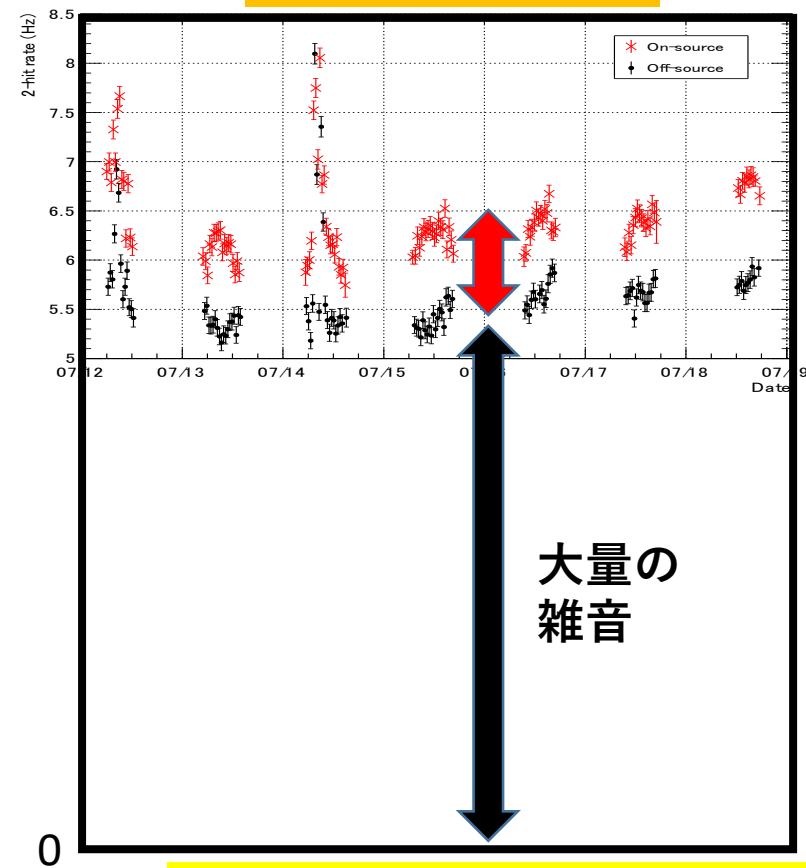


# X線集光ミラーの威力

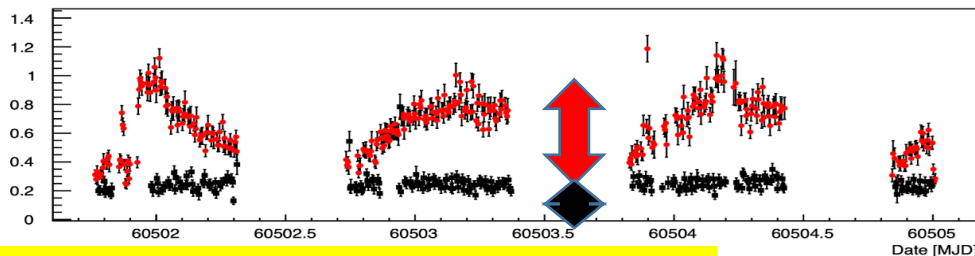
1日ごとの天体の明るさ（赤：天体を観測中、黒：天体から $1^\circ$ 外した領域を観測中）  
=> 赤と黒の差分が正味の天体信号

従来：PoGO+

今回：XL-Calibur



天体信号がはっきり

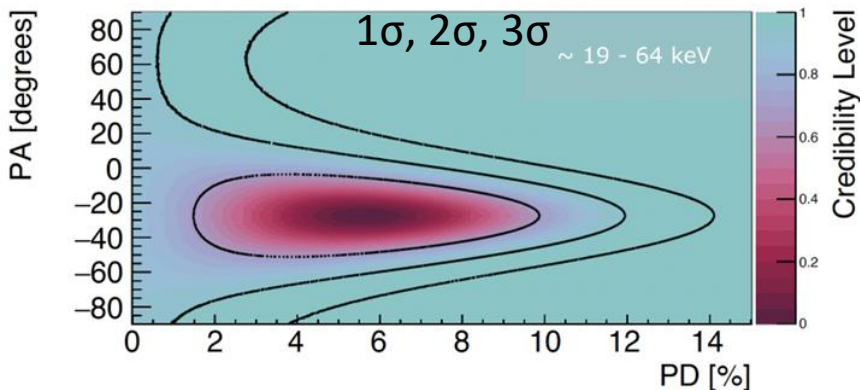


世界最大の有効面積：天体信号は同じ強度で観測  
集光：雑音を1/20に削減 => 感度が20倍向上



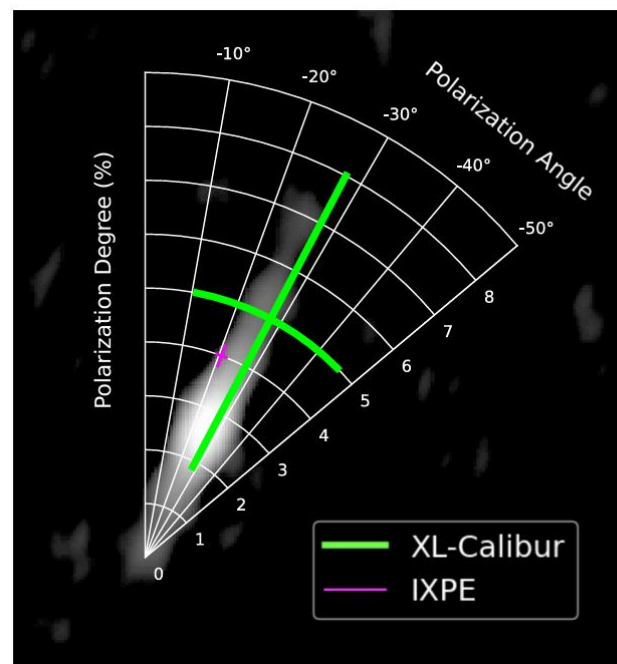
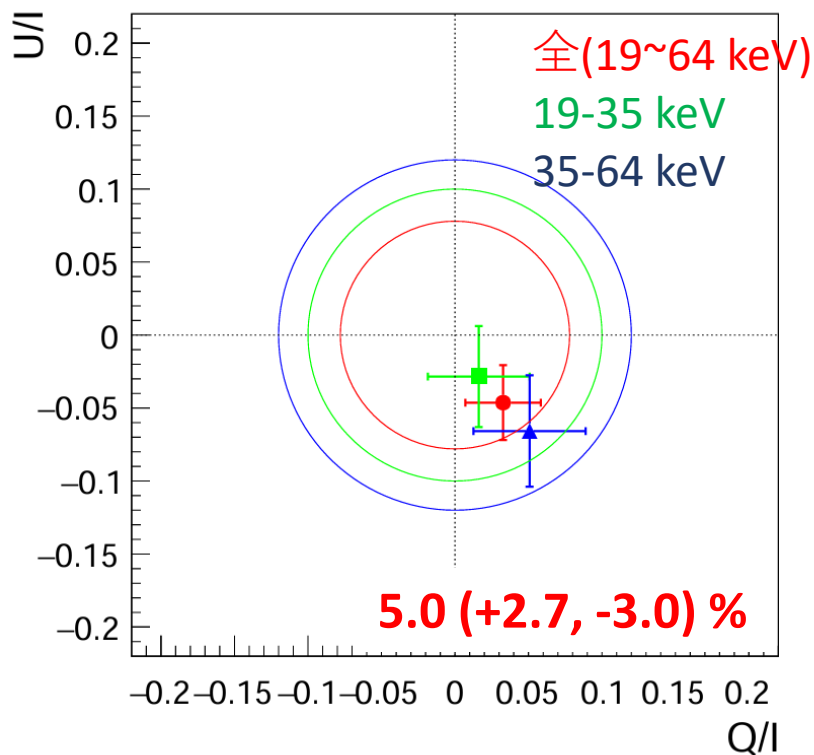
# 偏光観測の結果 (19-64 keV)

Cyg X-1 (low/hard状態)



Energy (keV)	$Q/I$	$U/I$	PD (%)	PA(°)	$MDP_{99}$ (%)
~ 19-64	$0.033 \pm 0.026$	$-0.046 \pm 0.026$	$5.0^{+2.7}_{-3.0}$	$-28 \pm 17$	7.8
~ 19-35	$0.016 \pm 0.035$	$-0.028 \pm 0.035$	$0.2^{+4.4}_{-0.2}$	$-31 \pm 40.$	10.
~ 35-64	$0.051 \pm 0.038$	$-0.066 \pm 0.038$	$7.2^{+4.0}_{-4.4}$	$-26 \pm 17$	12

無偏光がこのデータを生じる  
偶然確率：8.7%



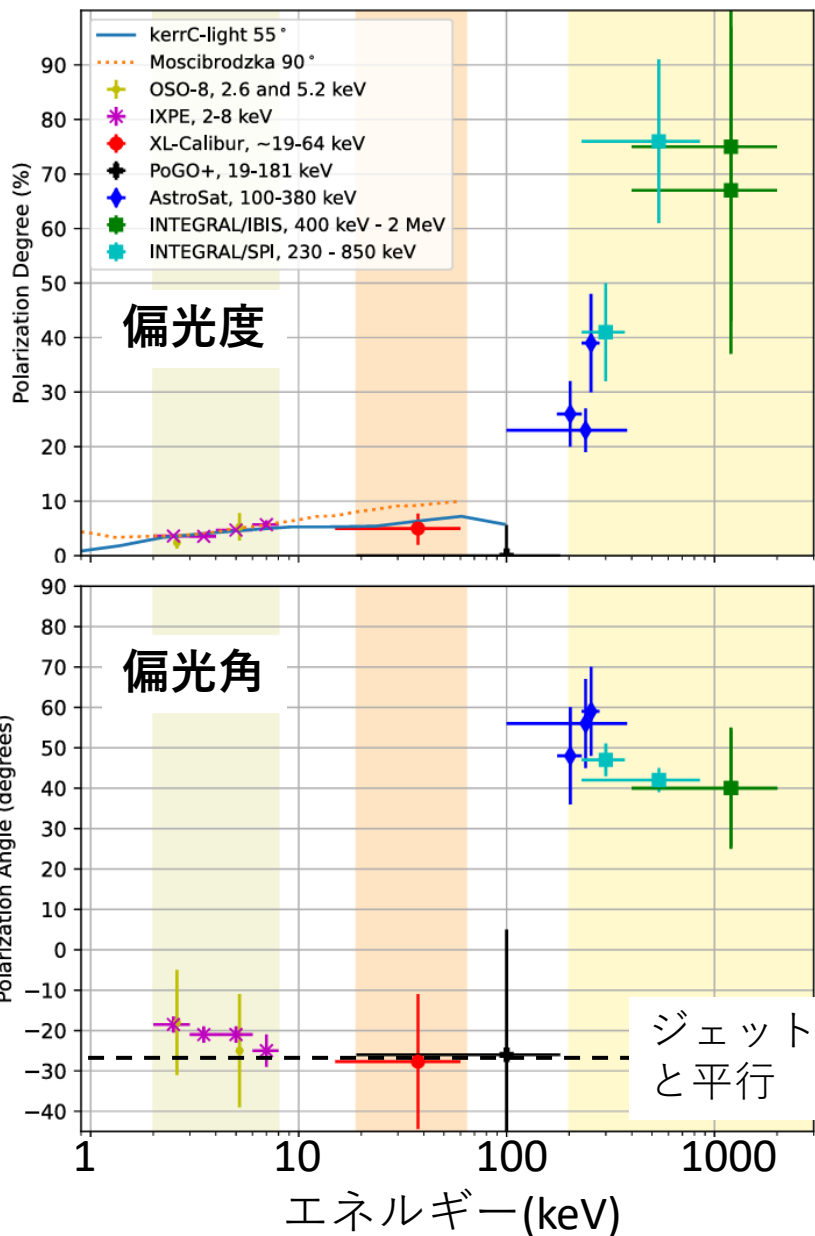
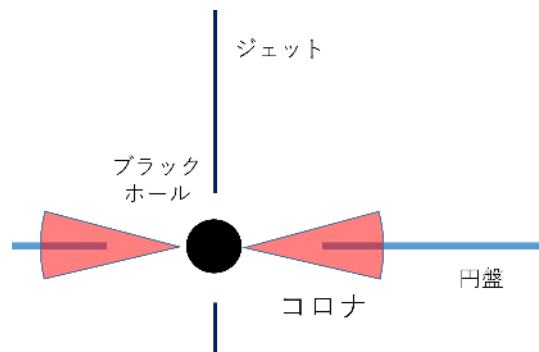
偏光角は電波ジェット方向と平行



# 軟X線～硬X線～軟ガンマ線の偏光

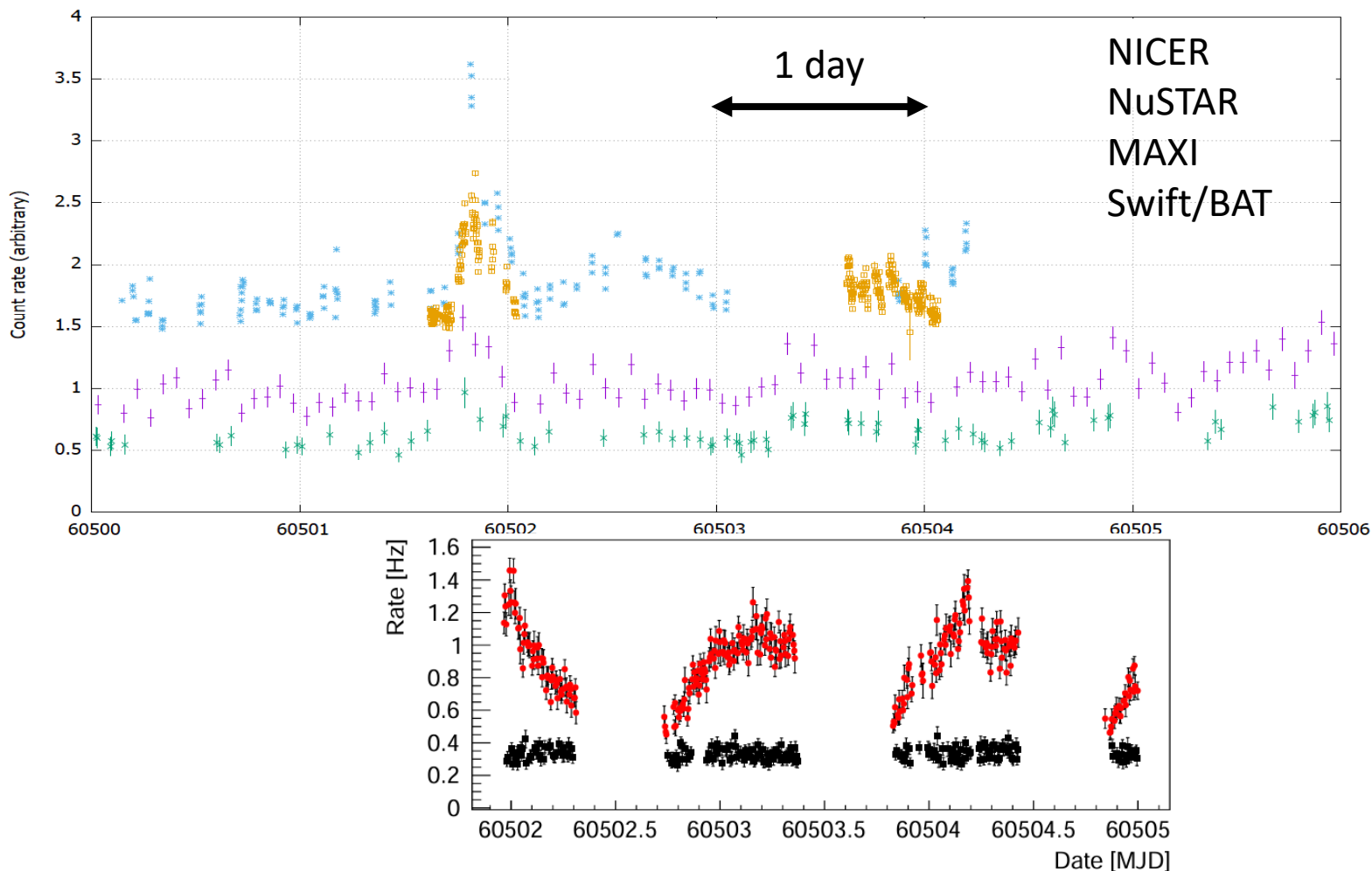
- ・ 軟X線 (OSO-8, IXPE)
  - ・ 硬X線 (PoGO+, XL-Calibur)
- ⇒ 偏光度も偏光角も一致：同じ起源  
 ⇒ 2 keVでもコロナ放射が寄与  
 コロナ形状は円盤に沿って平たい (Slab)
- ・ 軟ガンマ線 (INTEGRAL, AstroSat)
- ⇒ 偏光度：大、偏光角：90° 違う  
 ⇒ 別起源 (ジェット?)  
 ⇒ 次衛星COSI (200 keV-5 MeV) に期待

偏光度が5%以上ある  
 ⇔ 軌道傾斜角 $\sim 27^\circ$  (face-onに近い) では  
 slabコロナだと、偏光度は $< 2\%$   
 ⇔ 観測データを再現するには $\sim 55^\circ$  が必要





# 数時間スケールでの変動は？



## 他種族、他天体(ブラックホールX線連星)は？

南極の長期 (~1ヶ月) フライトで、突発天体の観測

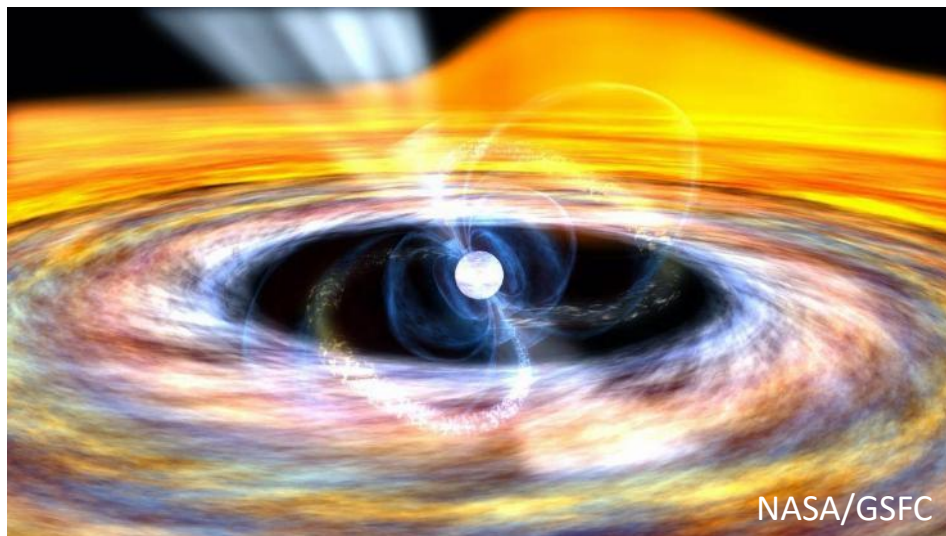


# 南極(南天)での観測計画

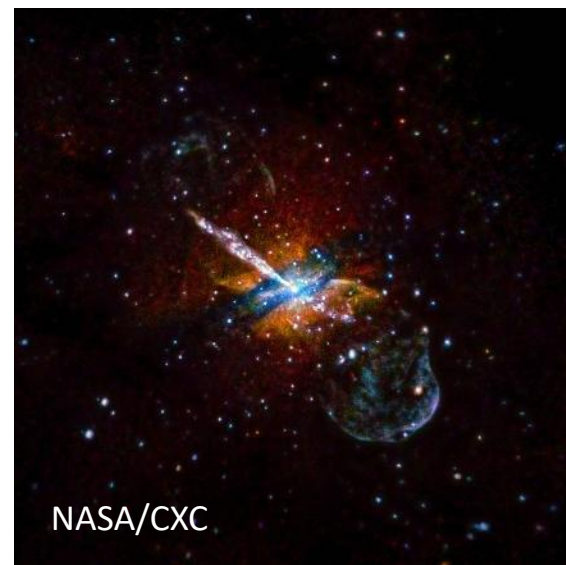
南極の長期 (~1ヶ月) フライト

- ・ 強磁場の中性子星 (質量降着型) : サイクロトロン吸収線  
Vela X-1 (25 keV), GX 301-2 (35 keV), ...
- ・ 活動銀河核 : ジェット、コロナ  
Cen A (電波~TeV), IC 4329A, ...
- ・ 突発天体 (2-3天体が期待) : Cyg X-1との比較

## 質量降着型X線パルサー



## Cen A (X-ray)





# 南極(南天)フライトへの準備状況



2027年12月フライトに向け、  
着実に準備を進めている

## US

- Polarimeter (Be-CZT)  
もう1台製作中
- 12m truss  
✓ 強度試験
- WASP pointing system  
今夏から噛み合わせ

## Sweden

- BGO active shield  
✓ PMT高圧回路の改良

## 日本

- 硬X線望遠鏡  
世界最大の有効面積  
✓ SPring-8でX線校正



## まとめ、今後

- XL-Caliburは2024年に北天（Crab, Cyg X-1）を約1週間観測
- low/hard状態にあったCyg X-1の偏光解析
  - 19-64 keVにおいて、偏光度は5.0 (+2.7, -3.0) %  
偏光角は電波ジェットと平行
- 軟X線（2-8 keV）の結果と一致 => 2-60 keVまでコロナ放射
- 高い偏光度は、slab形状コロナを仮定すると、edge-onを要求  
しかし、軌道傾斜角の $\sim 27^\circ$  とは一致しない

**Crab論文：MNRAS 540, L40 (2005)**

**Cyg X-1論文：ApJ, 994, 37, (2025)**

追加論文：Crab観測のイベント数を増やす  
Cyg X-1の数時間スケール変動の解析

## 今後

- 南極での $\sim 1$ ヶ月の長期フライト@2027年12月で、他天体  
強磁場の中性子星、活動銀河核、突発天体