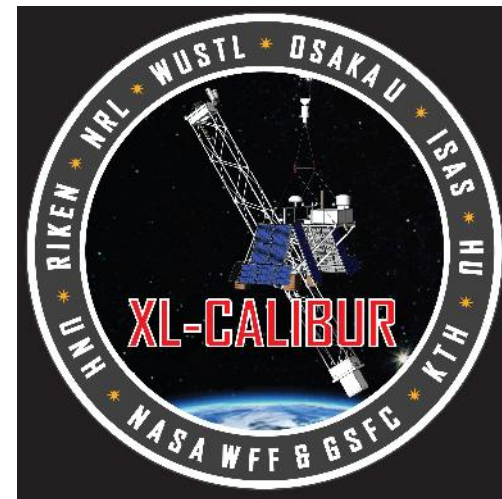


# 硬X線集光偏光計XL-Calibur 気球実験による ブラックホールX線連星Cyg X-1の観測結果

高橋弘充, 呉屋和保, 横田雅人 (広島大), 倉本春希, 袴田知宏, 宮本愛子, 村上海都, 白濱健太郎, 松本浩典 (大阪大), 宮本明日香, 伊師大貴, 内田悠介, 前田良知, 石田学 (ISAS), 善本真梨那, 粟木久光 (愛媛大), 林多佳由 (京大), Ephraim Gau, Kun Hu, Henric Krawczynski (WUSTL), Sean Spooner, Fabian Kislak (UNH), Mozsi Kiss, Mark Pearce (KTH), 田村啓輔, Takashi Okajima (NASA/GSFC), 他XL-Calibur チーム

**XL-Calibur Polarimetry of Cyg X-1 Further Constrains the Origin of Its Hard-state X-Ray Emission, XL-Calibur collaboration, ApJ, 994, 37, (2025)**





# XL-Calibur collaboration



次回フライトに向けた望遠鏡の較正  
3/5午後：V326a 倉本

## 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)

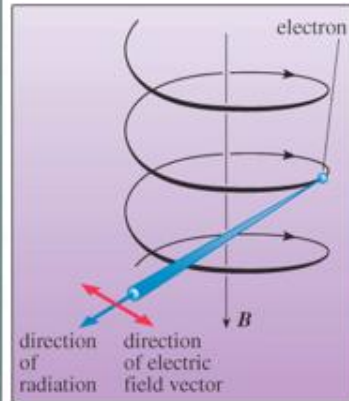
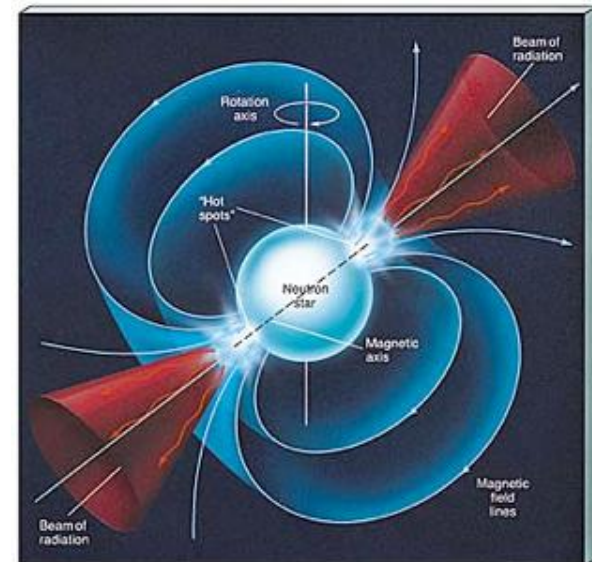
## Propagation in strong magnetic field:

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

Probe of magnetic field geometry

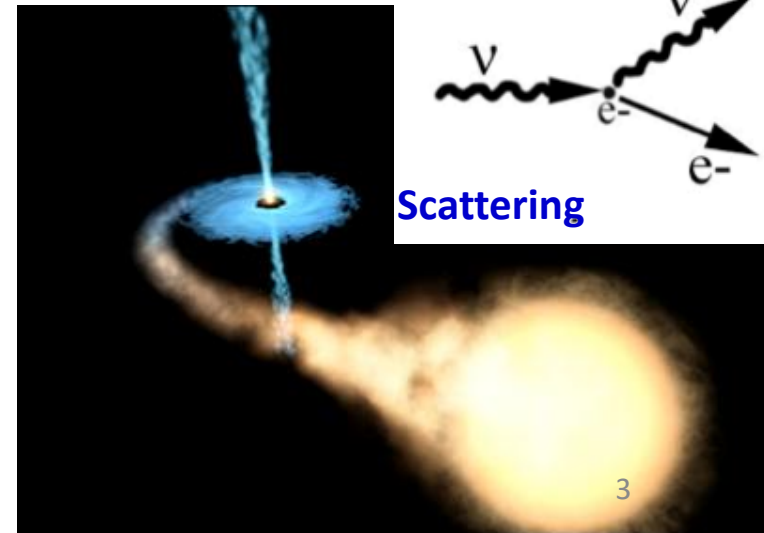
Probe of geometrical relation between the photon source and the scatterer

## Crab



Synchrotron emission

## Cygnus X-1





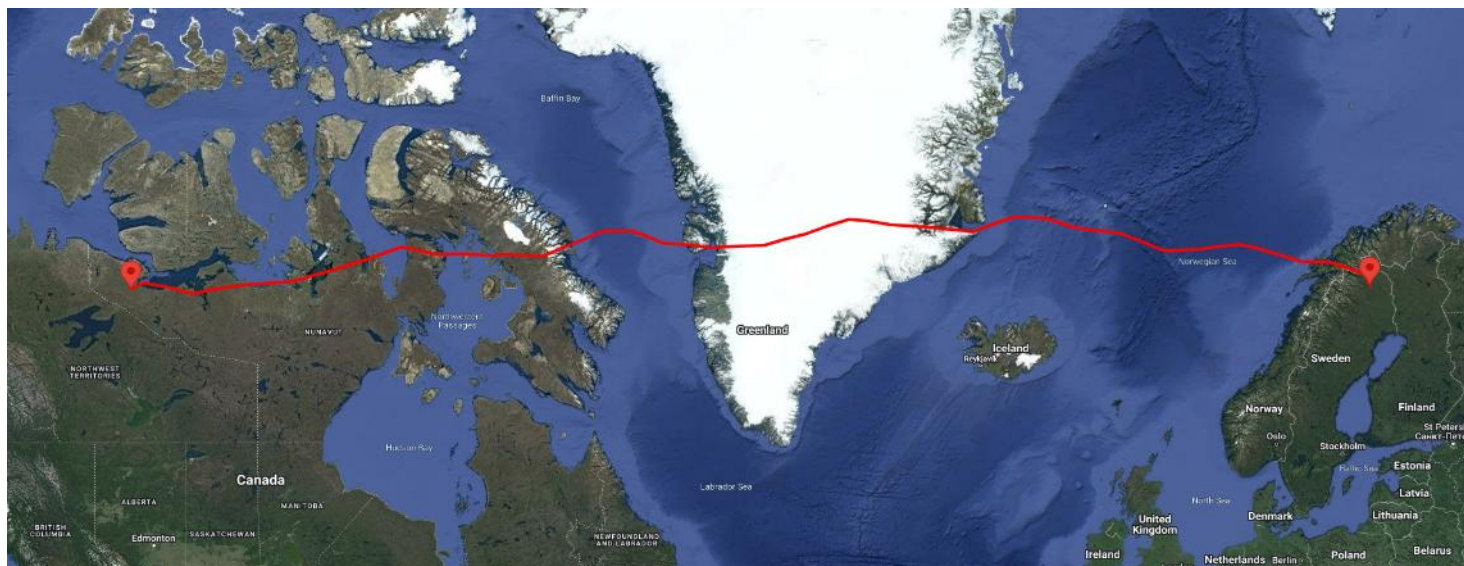
# XL-Calibur 打ち上げ(2024/07/09)

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)



- 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 (2005)



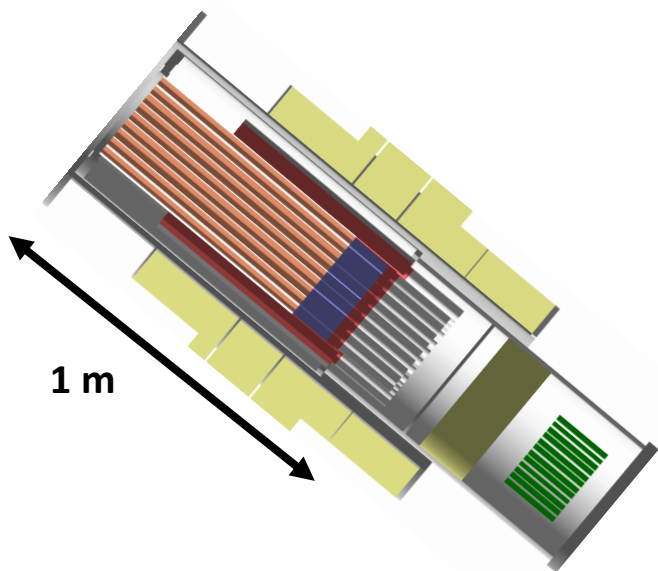
**カナダで回収  
⇒ 次回は南極フライト  
2027年12月**



# 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）

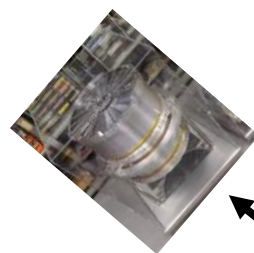
大型にすると検出器も大型  
=> 雑音が高い

## 今回：XL-Calibur

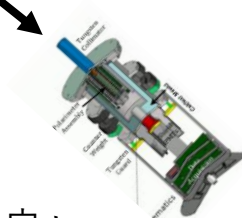
元々アメリカだけの実験

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

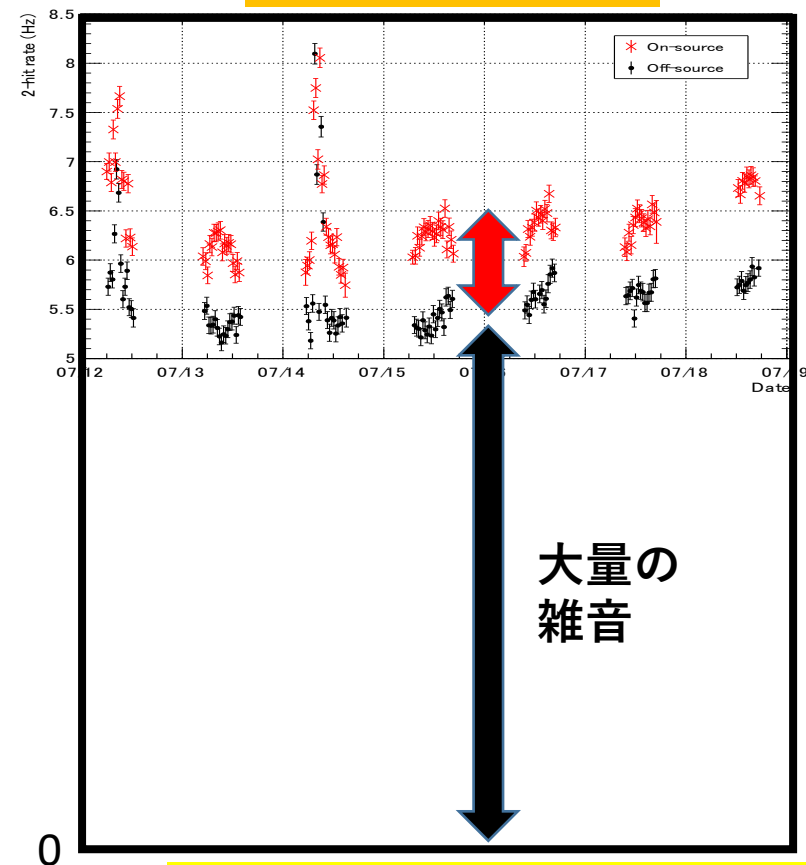


# X線集光ミラーの威力

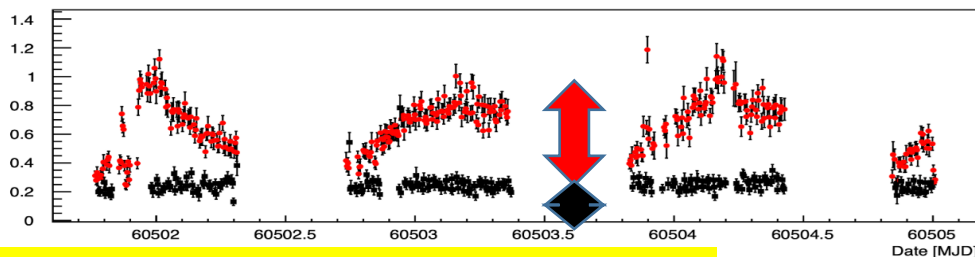
1日ごとの天体の明るさ（赤：天体を観測中、黒：天体から $1^\circ$  外した領域を観測中）  
=> 赤と黒の差分が正味の天体信号

従来：PoGO+

今回：XL-Calibur



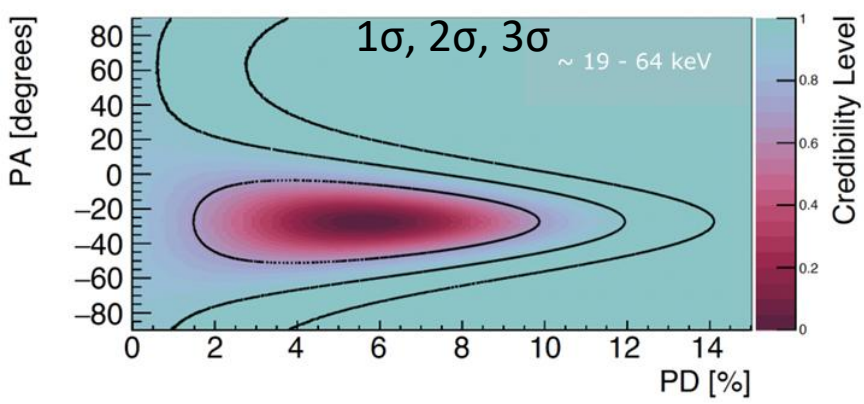
天体信号がはっきり



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

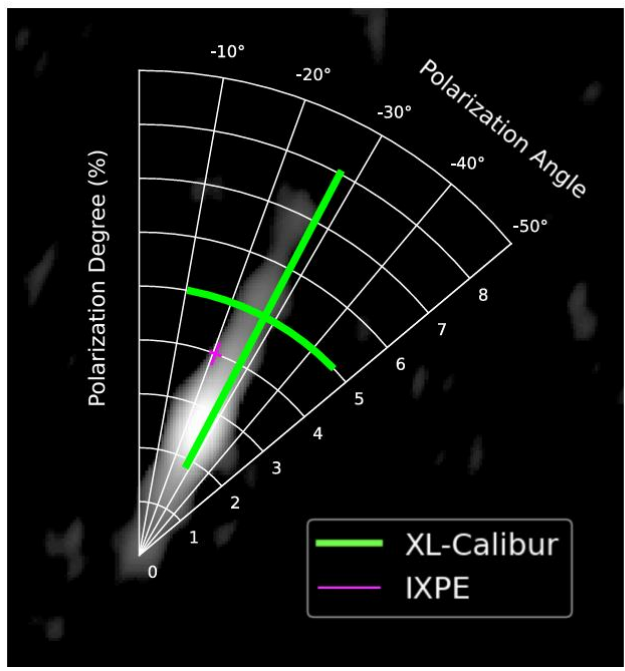
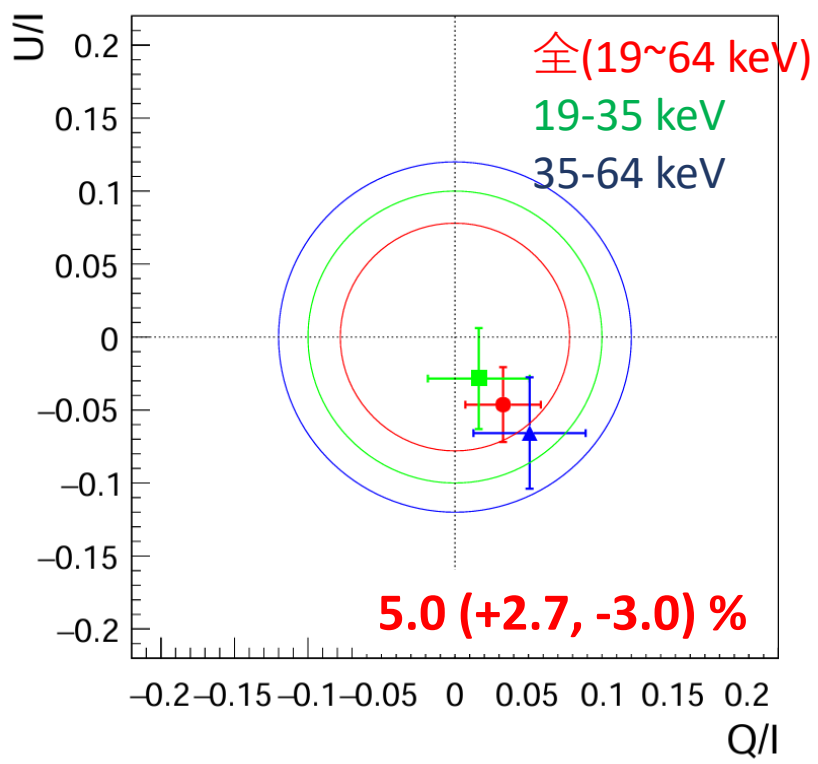


# 偏光観測の結果 (19-64 keV) Cyg X-1 (low/hard状態)



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%



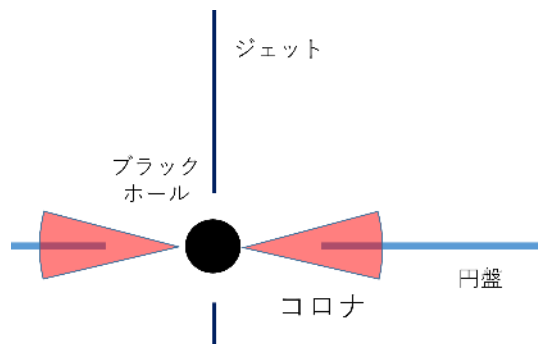
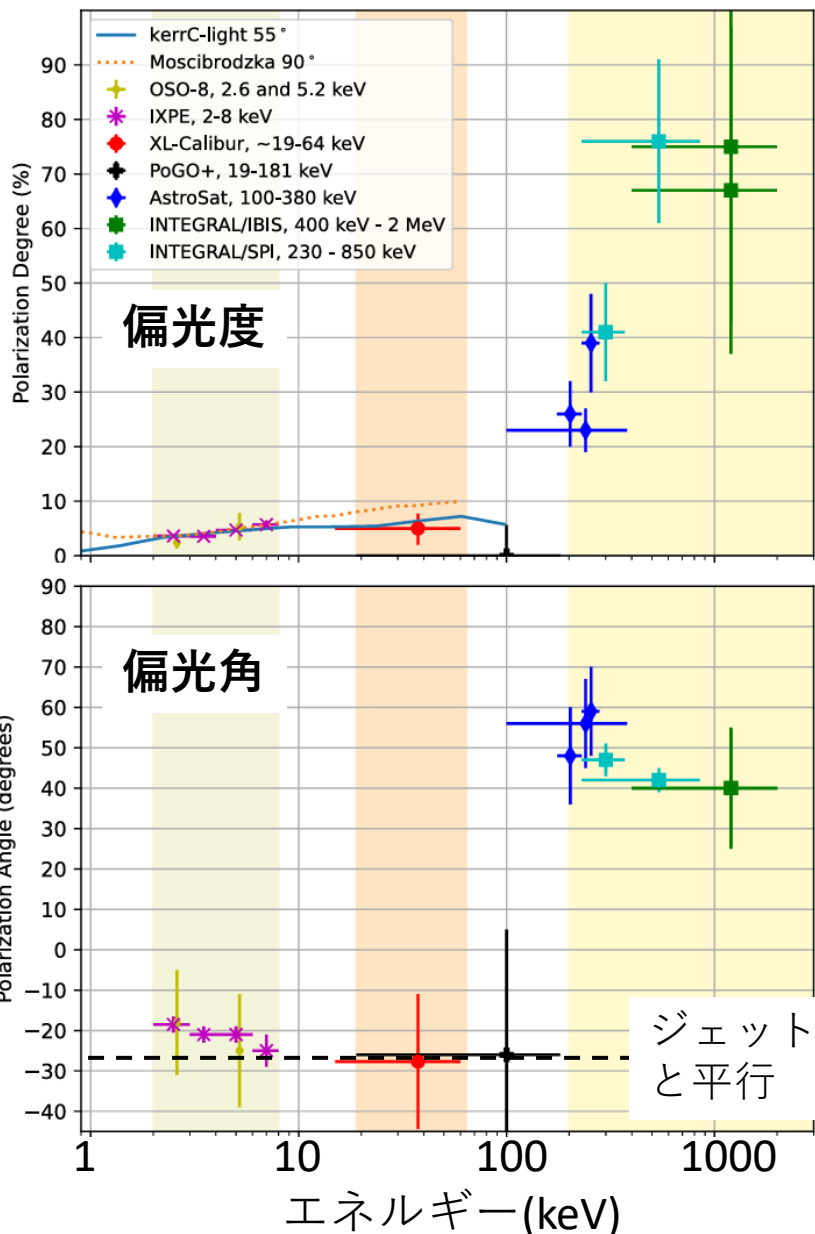
偏光角は電波ジェット方向と平行



# 軟X線～硬X線～軟ガンマ線の偏光

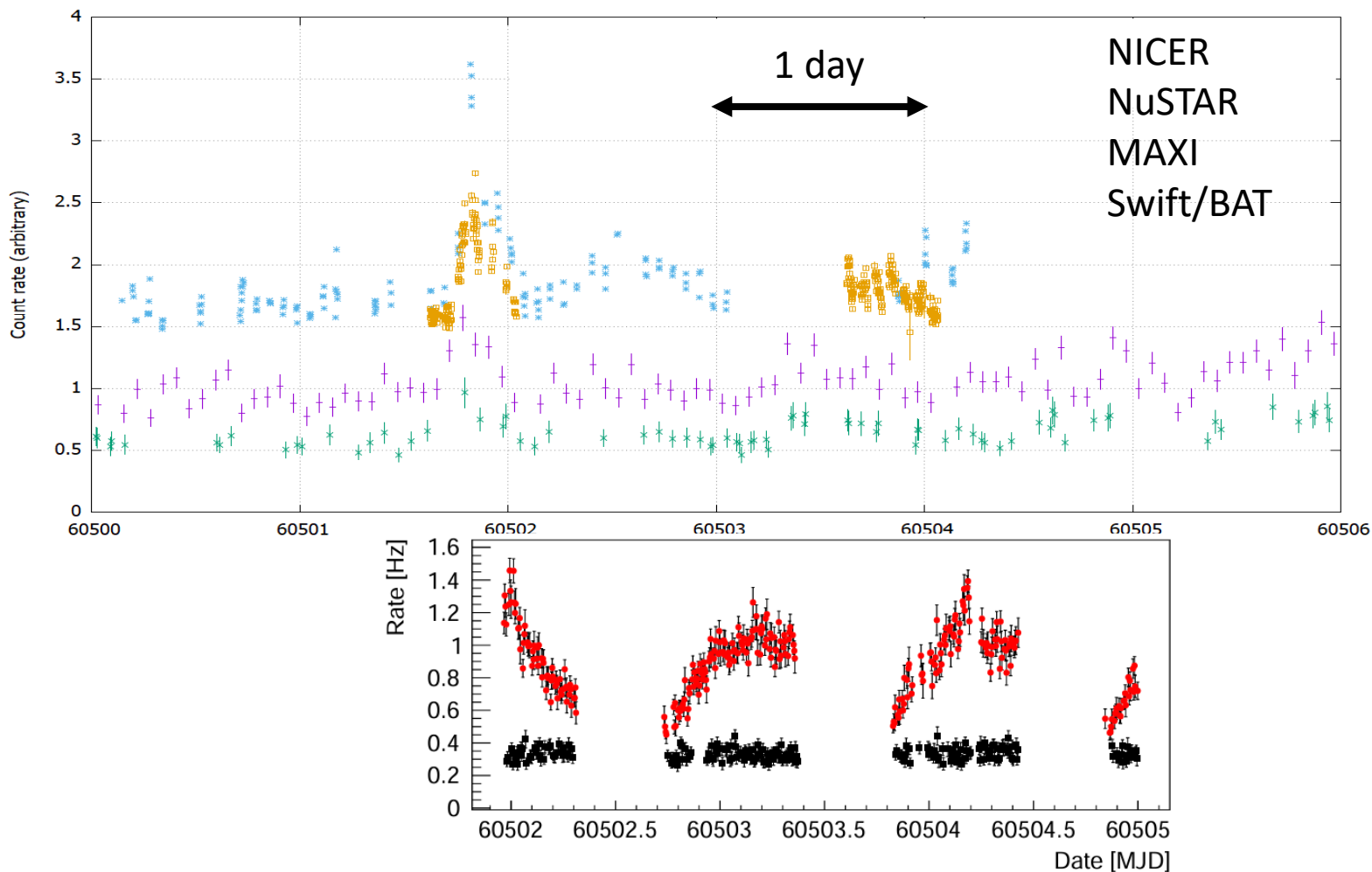
- ・ 軟X線 (OSO-8, IXPE)
  - ・ 硬X線 (PoGO+, XL-Calibur)
- ⇒ 偏光度も偏光角も一致：同じ起源  
 ⇒ 2 keVでもコロナ放射が寄与  
 コロナ形状は円盤に沿って平たい (Slab)
- ・ 軟ガンマ線 (INTEGRAL, AstroSat)
- ⇒ 偏光度：大、偏光角：90° 違う  
 ⇒ 別起源 (ジェット?)  
 ⇒ 次衛星COSI (200 keV-5 MeV) に期待

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？



# 他天体は？

南極の長期（～1ヶ月）フライトで、突発天体の観測



## まとめ、今後

- XL-Caliburによる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

**XL-Calibur Polarimetry of Cyg X-1 Further Constrains the Origin of Its Hard-state X-Ray Emission, XL-Calibur collaboration, ApJ, 994, 37, (2025)**

## 今後

- 数時間スケール変動の解析
- 南極での $\sim 1$ ヶ月の長期フライト @2027年12月で、他天体