

# 硬X線集光偏光計X-Calibur気球実験の2018年フライトと将来計画

高橋 弘充 (広大) , Quin Abarr<sup>A</sup>, 栗木 久光<sup>B</sup>, Richard Bose<sup>A</sup>, Dana Braun<sup>A</sup>, Gialuigi de Geronimo<sup>C</sup>, Paul Dowkontt<sup>A</sup>, 榎戸 輝揚<sup>D</sup>, Manel Errando<sup>A</sup>, 深沢 泰司<sup>E</sup>, Tom Gadson<sup>F</sup>, Victor Guarino<sup>A</sup>, 郡司 修一<sup>G</sup>, 林田 清<sup>H</sup>, 早藤 麻美<sup>I</sup>, Scott Heatwole<sup>F</sup>, 石田 学<sup>J</sup>, Fabian Kislak<sup>K</sup>, Mozsi Kiss<sup>L</sup>, 北口 貴雄<sup>I</sup>, Henric Krawczynski<sup>A</sup>, Nirmal Kumar Iyer<sup>L</sup>, Rakhee Kushwah<sup>L</sup>, James Lanzi<sup>F</sup>, Shaorui Li<sup>M</sup>, Lindsey Lisalda<sup>A</sup>, 前田 良知<sup>J</sup>, 松本 浩典<sup>H</sup>, Joe McGee<sup>F</sup>, 宮澤 拓也<sup>N</sup>, 水野 恒史<sup>E</sup>, 岡島 崇<sup>O</sup>, Mark Pearce<sup>L</sup>, Zachary Peterson<sup>F</sup>, Brian Rauch<sup>A</sup>, Felix Ryde<sup>L</sup>, 斎藤 芳隆<sup>J</sup>, Garry Simburger<sup>A</sup>, David Stuchlik<sup>F</sup>, 玉川 徹<sup>I</sup>, 田村 啓輔<sup>P</sup>, 常深 博<sup>H</sup>, 堤 まりな<sup>Q</sup>, 内田 和海<sup>E</sup>, 内山 慶祐<sup>Q</sup>, Andrew West<sup>A</sup>, 周 圓輝<sup>Q</sup>, X-Caliburチーム

A: WUSTL, B: 愛媛大, C: SUNY, D: 京大, E: 広大, F: Wallops/NASA, G: 山形大, H: 阪大, I: 理研, J: ISAS/JAXA, K: UNH, L: KTH, M: BNL, N: OIST, O: GSFC/NASA, P: 名大, Q: 東京理科大



## 日米瑞の国際協力

PI: Henric Krawczynski  
(ワシントン大学)





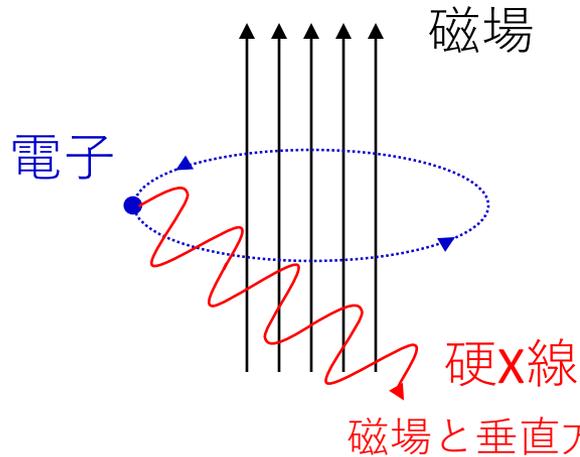
# 目次：お伝えしたいこと

- 気球やロケット実験でも**科学的な成果**は出せる（こともある）  
=> 装置は回収して性能向上できる
- X-Caliburの紹介  
日本は2018年1月から参加
- 次回XL-Caliburでは、日本は**FFAST望遠鏡を提供**して大きく貢献

今後ご支援よろしく申し上げます

# 偏光から分かること(1): 磁場

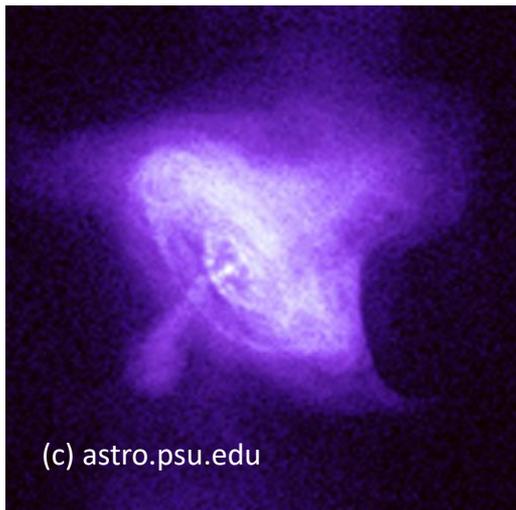
## 電子 + 磁場 => シンクロトロン放射



高エネルギー粒子が磁場に巻き付いて放射  
⇒ 放射の偏光の方向は、磁場と垂直

粒子加速の現場、ジェットなど

## パルサー星雲 「かに星雲」



粒子を高エネルギーに加速するためには、  
磁場が重要な役割を担っている  
磁場は、イメージ、時間変動、エネルギーでは  
測定できない

⇒ 偏光情報なら、磁場の向きと揃い具合を  
調べられる

PoGO+の結果： Chauvin et al. 2017

# 偏光から分かること(2):反射

反射・散乱した光 (水面、大気、その他なんでも)



左：普通に撮影  
右：偏光フィルターで  
偏光した光をカット  
反射光がなくなり、  
川底からの光のみになる  
=> 偏光情報から  
反射体の配置が分かる

ブラックホール連星系「はくちょう座X-1 (Cyg X-1)」



相手の恒星からの放射がどのように  
ブラックホールに吸い込まれているのか？  
=> ブラックホール近傍 ~100 kmは  
イメージでは構造が識別できない  
=> 偏光なら、(ミクロな) 反射体の  
配置が分かる

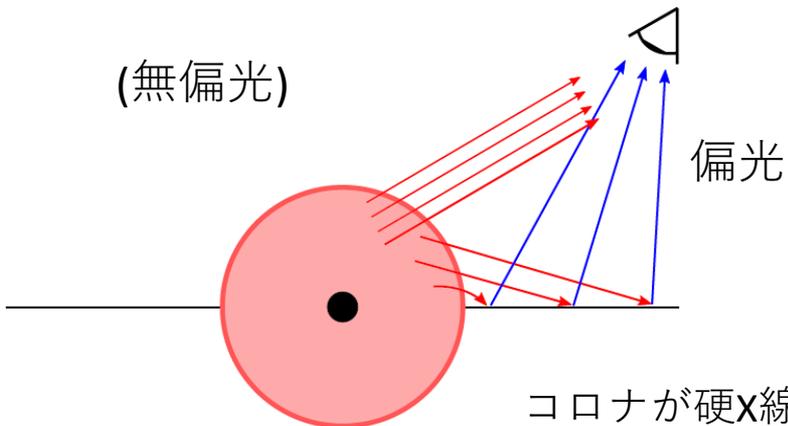
PoGO+の結果：Chauvin et al. 2018



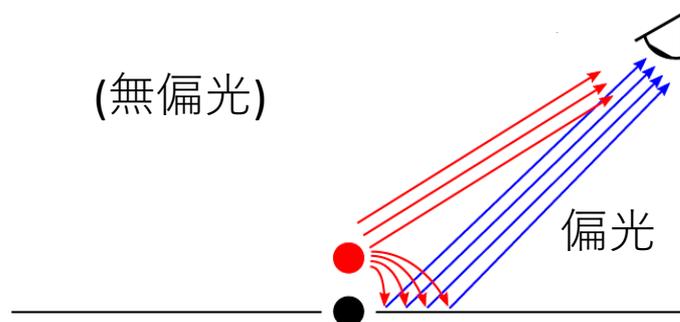
# コロナモデルの2モデル@Hard状態

Chauvin et al. 2018

### a) 広がったコロナ



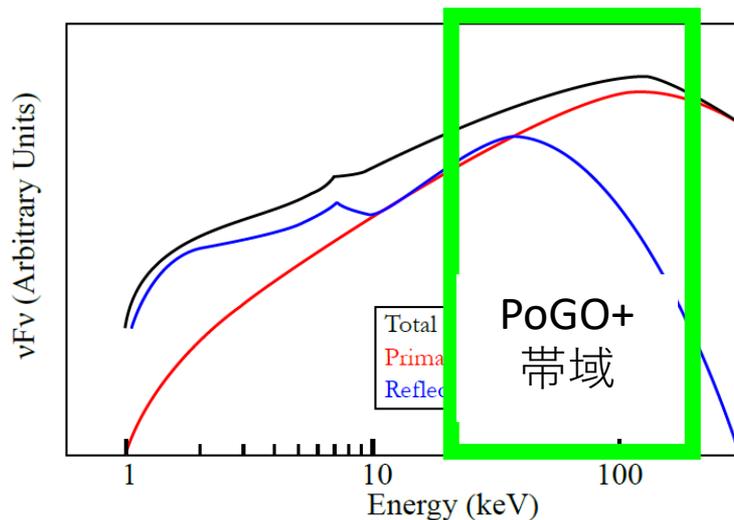
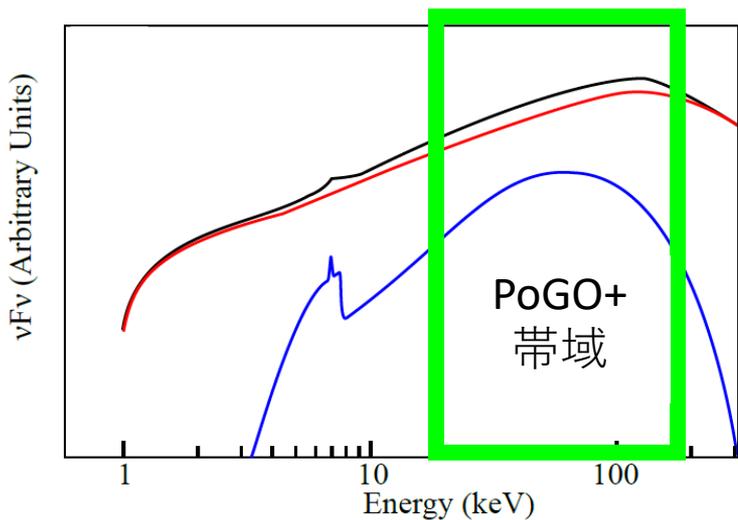
### b) ランプポスト型コロナ



コロナが硬X線を放射

赤：1次直接観測される（ほぼ無偏光）

青：2次反射・散乱された放射 => 偏光する

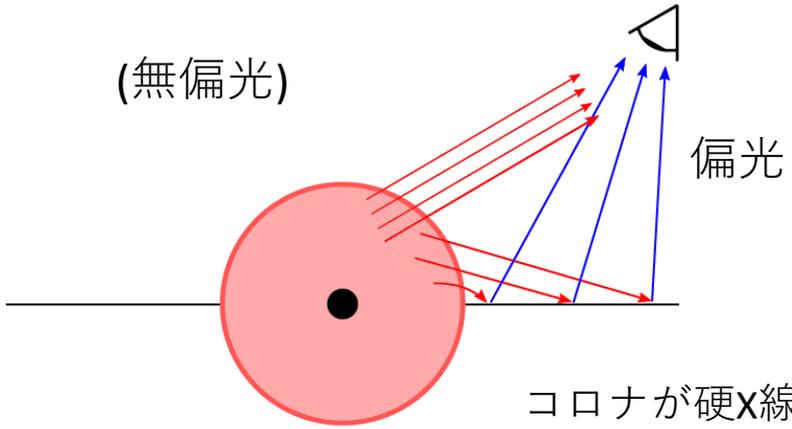




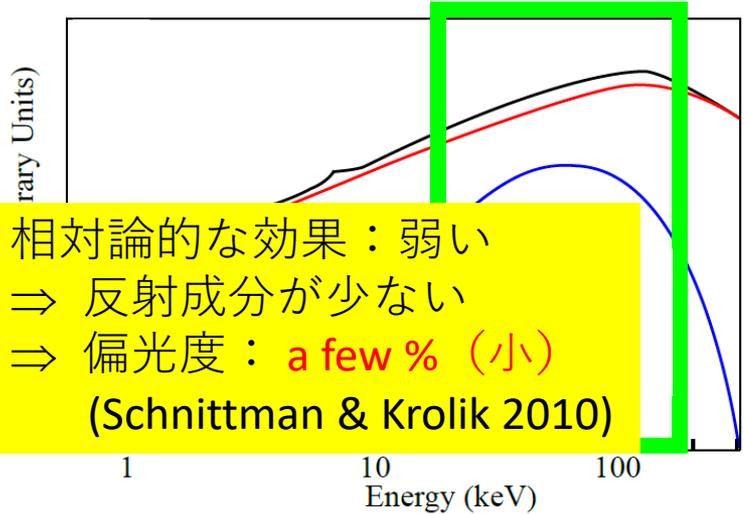
# コロナモデルの2モデル@Hard状態

Chauvin et al. 2018

## a) 広がったコロナ

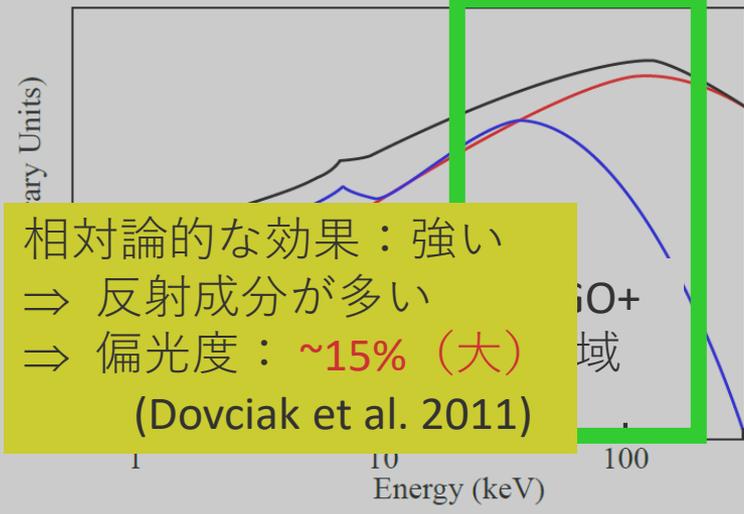
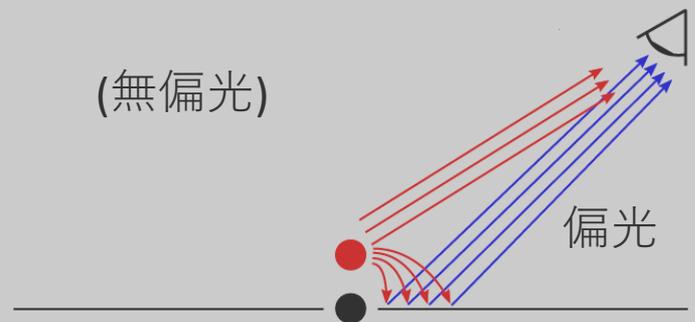


コロナが硬X線を放射  
**赤**：1次直接観測される（ほぼ無偏光）  
**青**：2次反射・散乱された放射 => 偏光する



相対論的な効果：弱い  
 => 反射成分が少ない  
 => 偏光度：a few % (小)  
 (Schnittman & Krolik 2010)

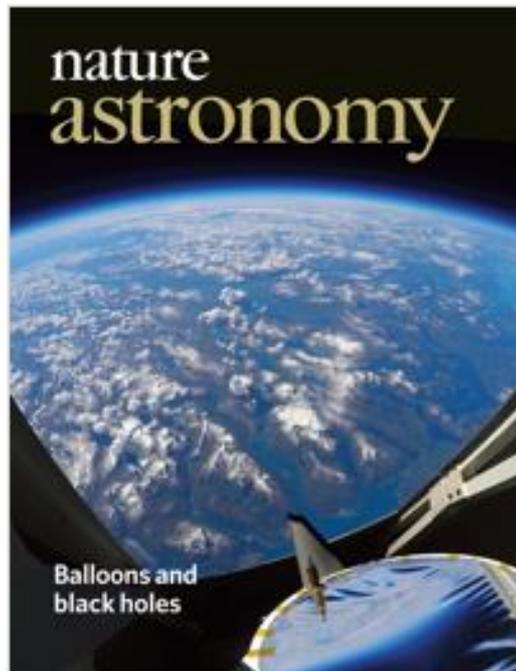
## b) ランプポスト型コロナ



相対論的な効果：強い  
 => 反射成分が多い  
 => 偏光度：~15% (大) 領域  
 (Dovciak et al. 2011)



## Volume 2 Issue 8, August 2018



### **Balloons and black holes**

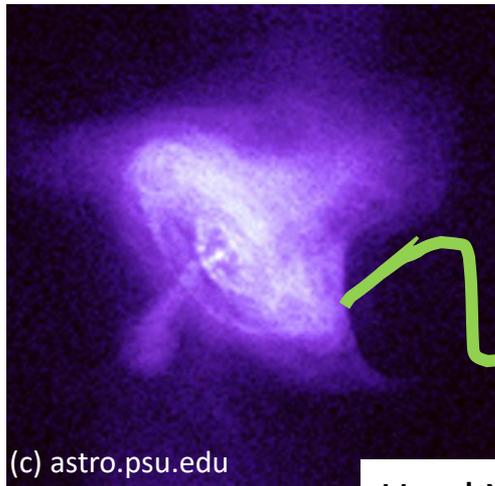
X-ray polarization observations of the stellar black hole in Cygnus X-1 by a balloon-borne telescope revealed weak polarization, whose angle is aligned with the jet axis. Together with previous data, these findings point to an accretion disk corona that is either extended or located far from the black hole.

See [Chauvin et al.](#)



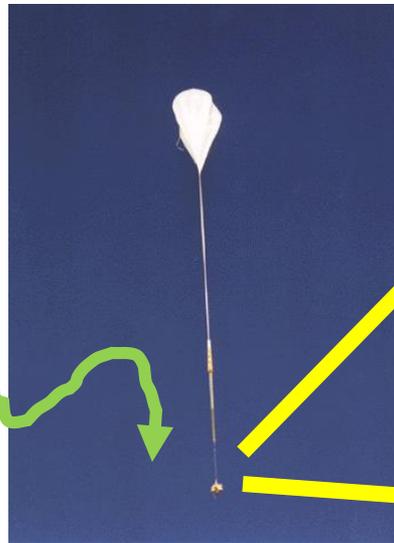
# X線・ガンマ線 偏光観測

- **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** (2.6/5.2 keV と 200 keV 以上) と **Cyg X-1** (600 keV 以上)のみ
- 他のエネルギー帯域、他の天体の偏光観測が必要不可欠  
PoGO+, X-Calibur, 「ひとみ」SGD, AstroSat, IXPE, XPP...

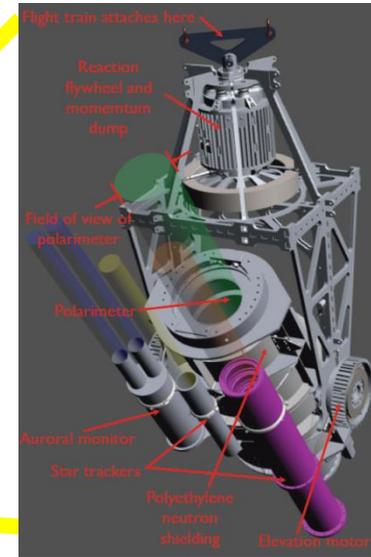


(c) astro.psu.edu

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 -)

XPP  
計画

硬X線

PoGO+ (2013, 2016)

**X(L)-Calibur(2018, 2021, 2022, ...)**

日本+スウェーデン

元々アメリカ+名大のみ  
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

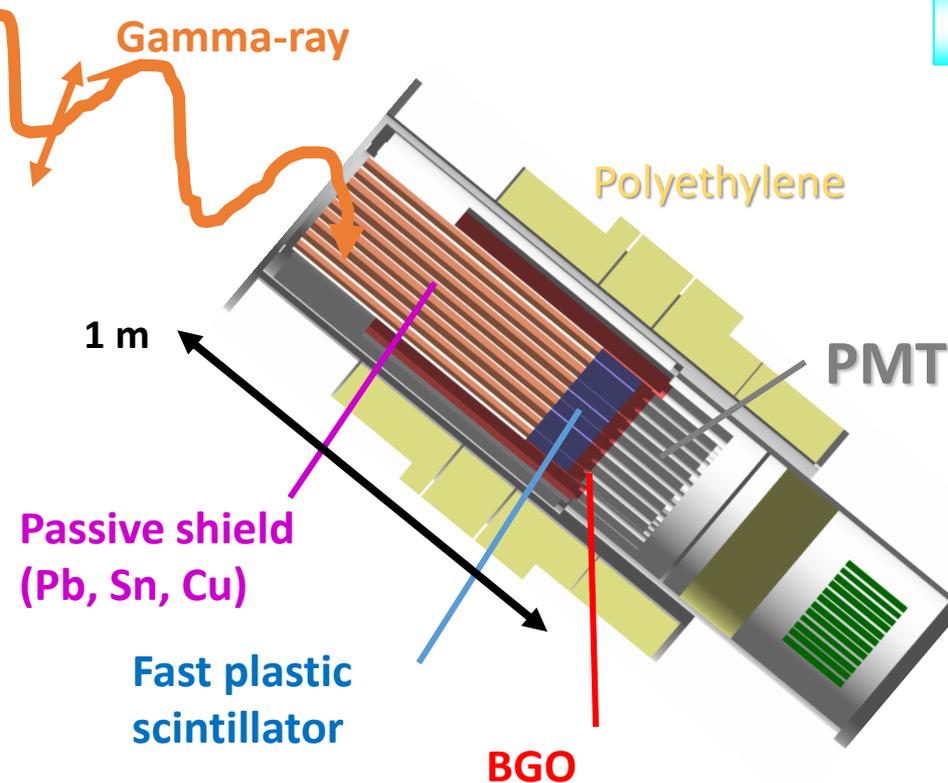
ガンマ線バースト観測用の小型検出器 (GAP, POLAR) は除く



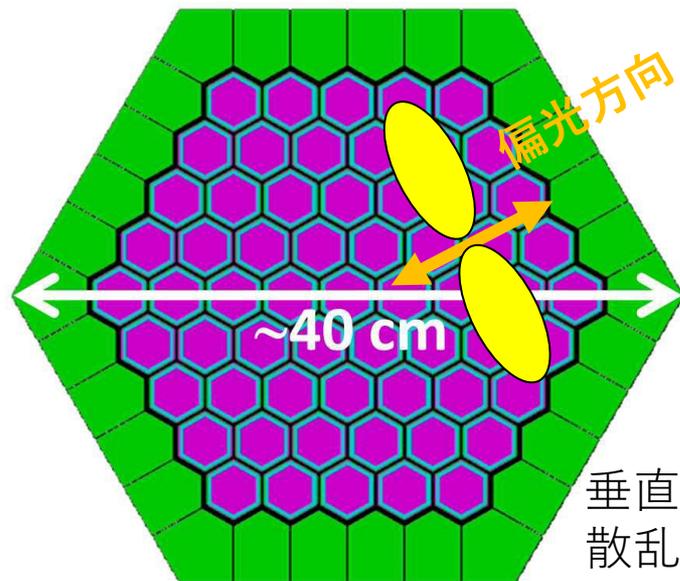
# PoGO+偏光計(コリメータ型)

20-180 keV

- **PoGOLite** では**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**  
 主検出部: プラスチック x 61ユニット、周囲にBGOシールド:30ユニット  
 熱中性子シンチレータ:2ユニット
- 検出器自身の系統誤差、大気中性子フラックスの異方性をキャンセルするため、観測中は検出器が6分で1回転する。



Top view



偏光方位角と直交方向に多くのイベントが検出される



# PoGO+偏光計(コリメータ型)

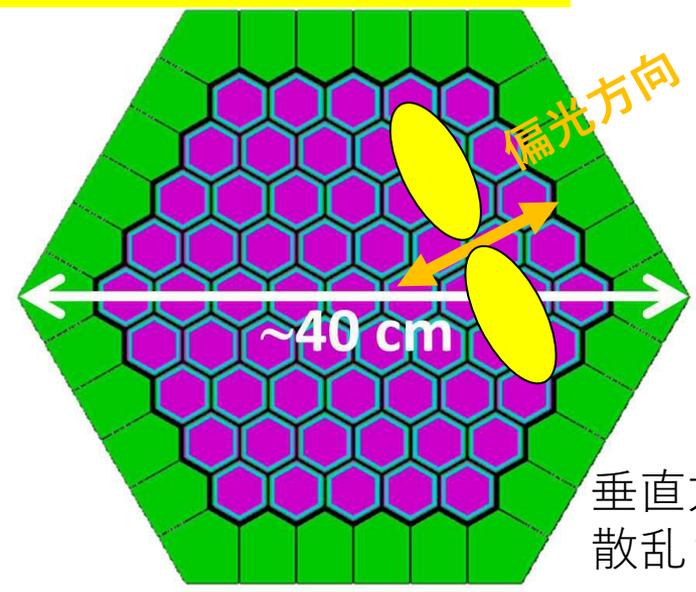
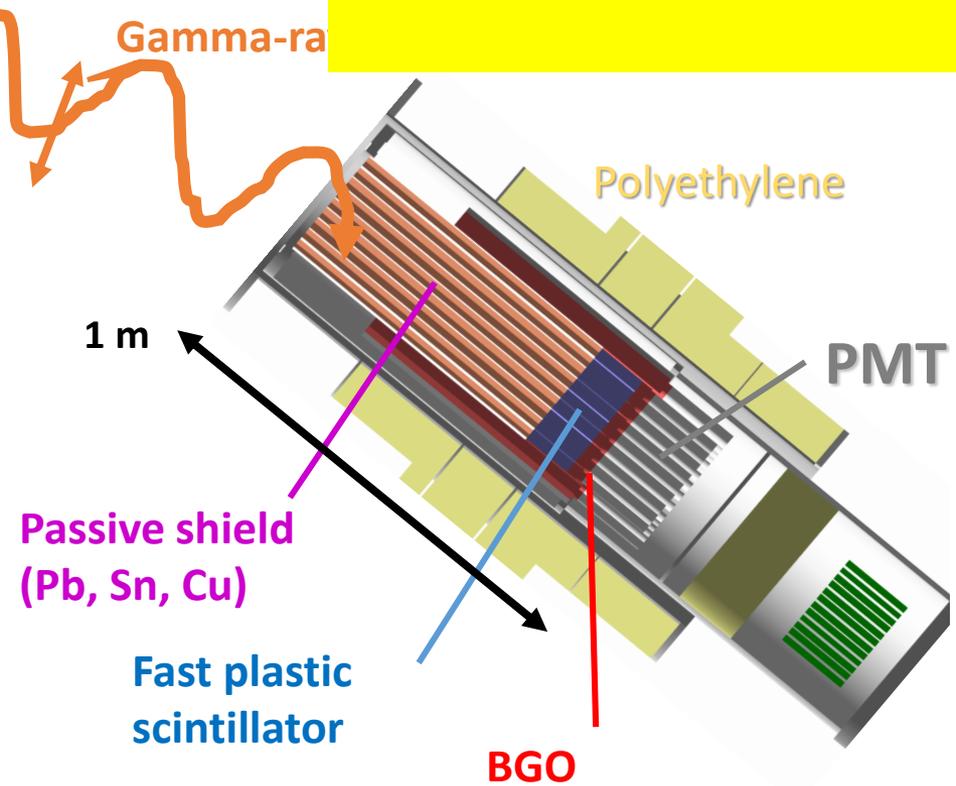
20-180 keV

- PoGO Lite では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

主検出部:  
熱中性子シ  
- 検出器自身  
観測中は検

1 Crabより暗い天体の観測は難しい  
これ以上の感度向上は難しい  
⇒ PoGO+の次のフライト計画は未定

ト  
セルするため、



偏光方位角と直交方向に  
多くのイベントが検出される



# X-Calibur偏光計(集光型)

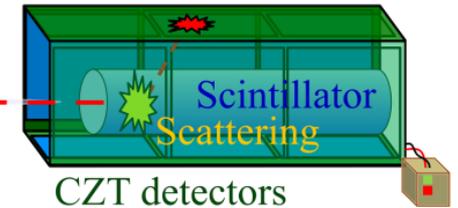
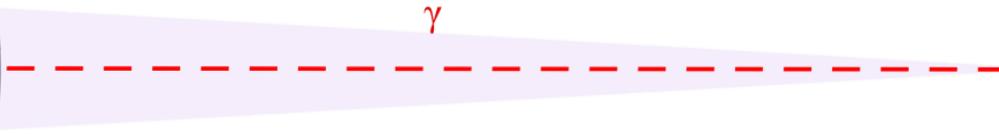
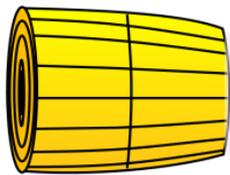
20-80 keV

- 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CsI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。

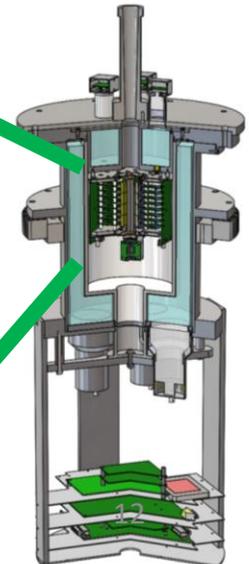
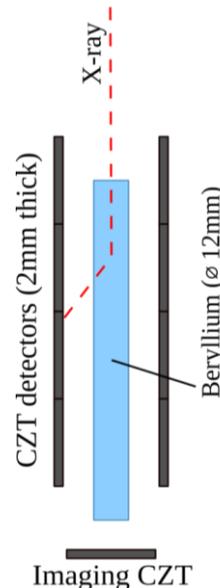
焦点距離8-12 m

検出器の断面~3cm

Photon detected



2018年: InFOCuS望遠鏡 (NASA+日本)  
2021年以降: FFAST望遠鏡 (日本)





# X-Calibur偏光計(集光型)

20-80 keV

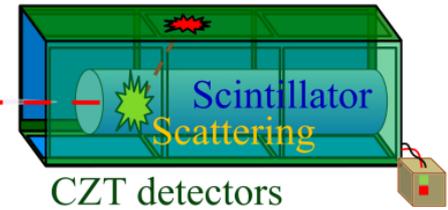
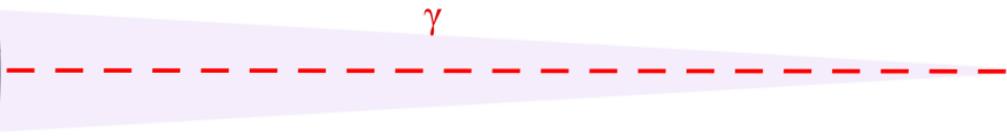
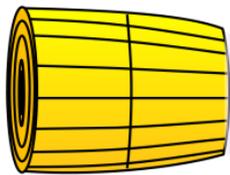
- X-Caliburでもコンプトン散乱を検出し、その散乱角の異方性から偏光を検出
- 硬X線望遠鏡
- 主検出部: 低減
- 最下面にCZT
- 検出器自身は回転する。

数100 mCrabの天体からも偏光検出

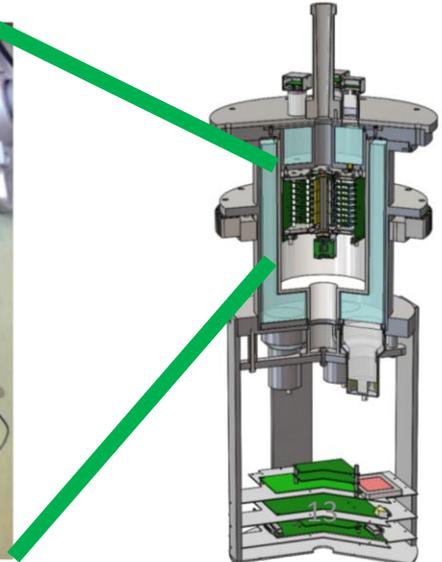
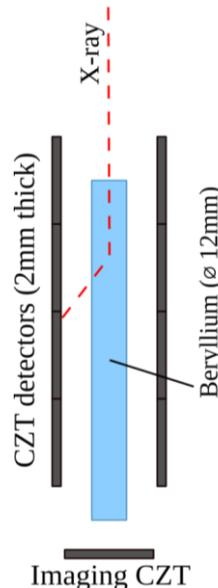
焦点距離8-12 m

検出器の断面~3cm

Photon detected



2018年: InFOCuS望遠鏡 (NASA+日本)  
 2021年以降: FFAST望遠鏡 (日本)





# X-Calibur 全体像 (~2トン)





# X-Calibur放球@南極(2018/12/30)



YouTube : X-Calibur Launch



# X-Caliburフライト履歴

放球：12/30 9:15AM (LT)

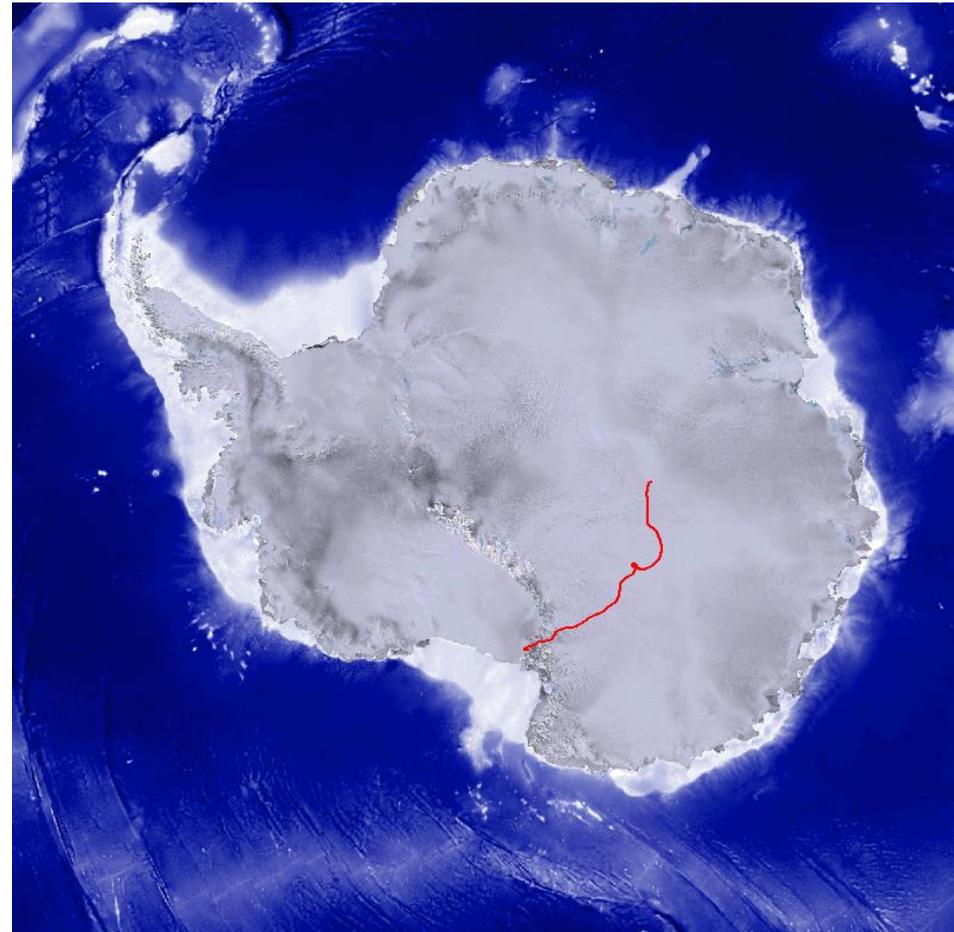
高度：40 kmに到達

観測天体：質量降着型パルサー  
**GX 301-2, Vela X-1** (南天)  
# GX 301-2 は 600 mCrab

姿勢制御：1秒角以下の高精度

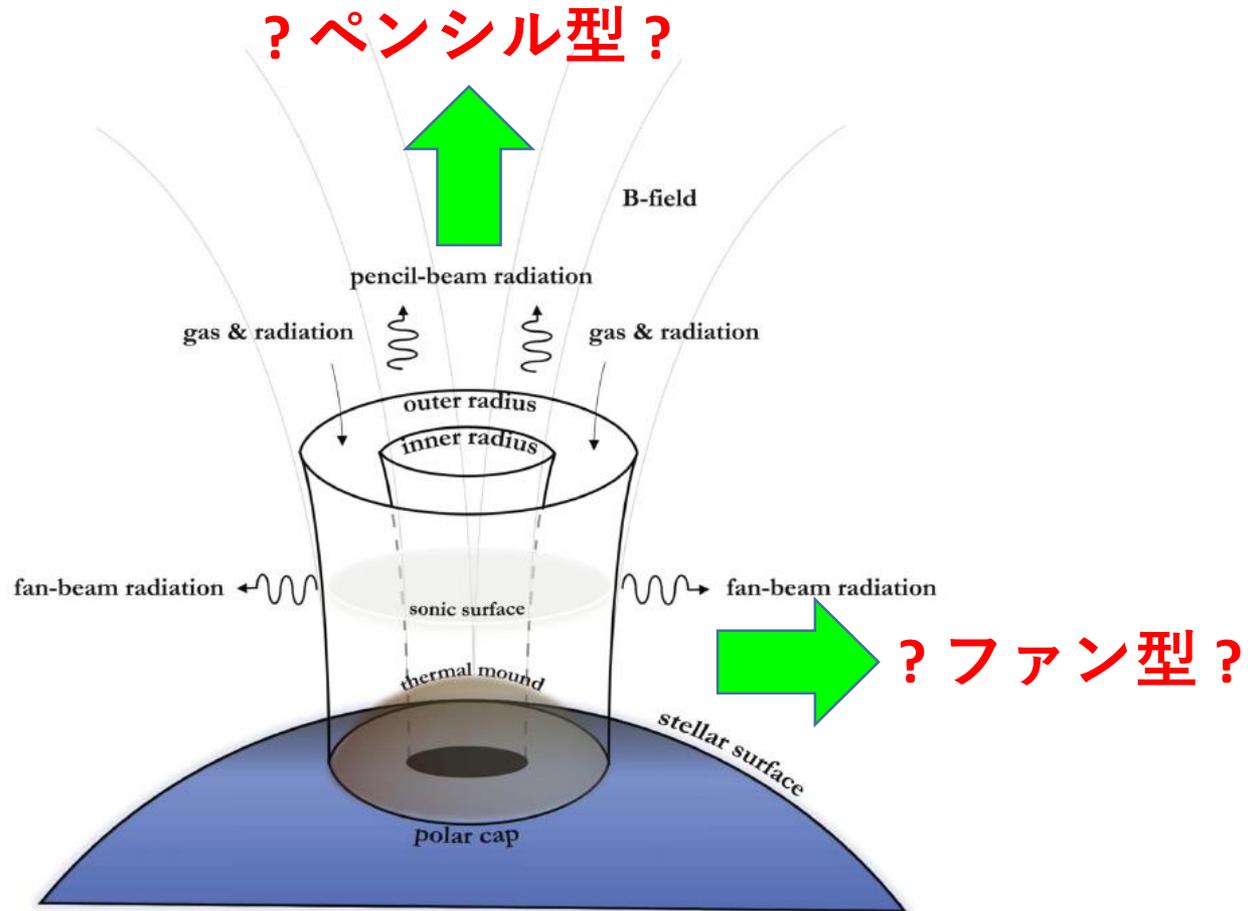
着陸：1/2 11:40AM (LT)  
# He漏れのため

⇒ 現在データ解析が進行中  
次回フライトを目指す



# 質量降着型パルサーの放射モデルの識別

West, Wolfram, & Becker



**Figure 1.** Accretion column formation in the two-fluid model. Ions and electrons enter at the top of the column as coupled and interacting fluids. X-ray photons are produced in the column and escape through the top and the sides as pencil and fan-beam components, respectively. Also indicated are the thermal mound surface (where the absorption optical depth in the parallel direction equals unity,  $\tau_{\parallel}^{\text{abs}} = 1$ ), and the radiation sonic surface, where the radiation Mach number  $\mathcal{M}_r = 1$ .



# QED効果@強磁場中性子星の表面付近

強磁場中で、E-mode偏光は透過しやすい ⇔ O-mode偏光は吸収されてしまう

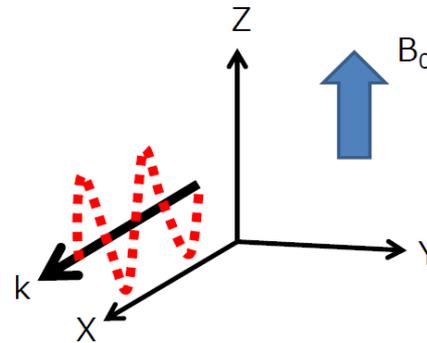
Pavlov et al. 2000

Yatabe et al. 2017

## Polarization Eigenmodes

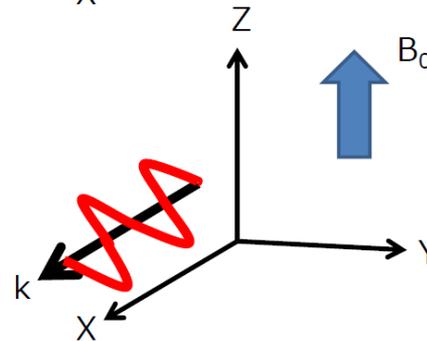
Ordinary Mode  
(O-mode)

$E // k - B_0$  plane



Extraordinary Mode  
(E-mode)

$E \perp k - B_0$  plane



判別には、IXPE衛星（X線）とのエネルギー依存性が重要



# X-Calibur着陸後



Scott Battaion / CSBF

今回：偏光計のみ回収 => 次回フライトへ利用

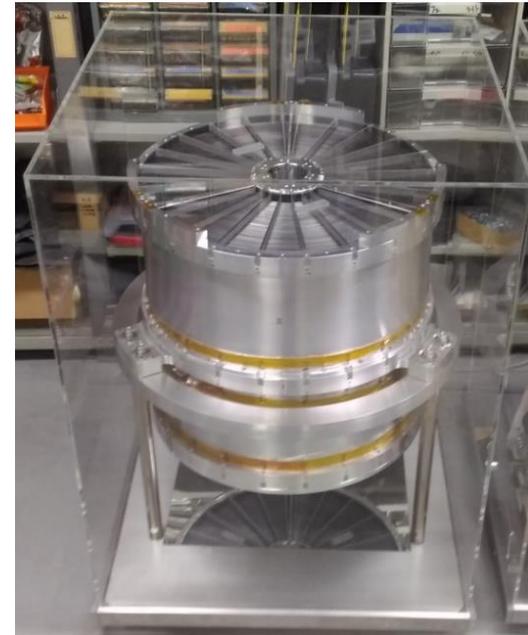
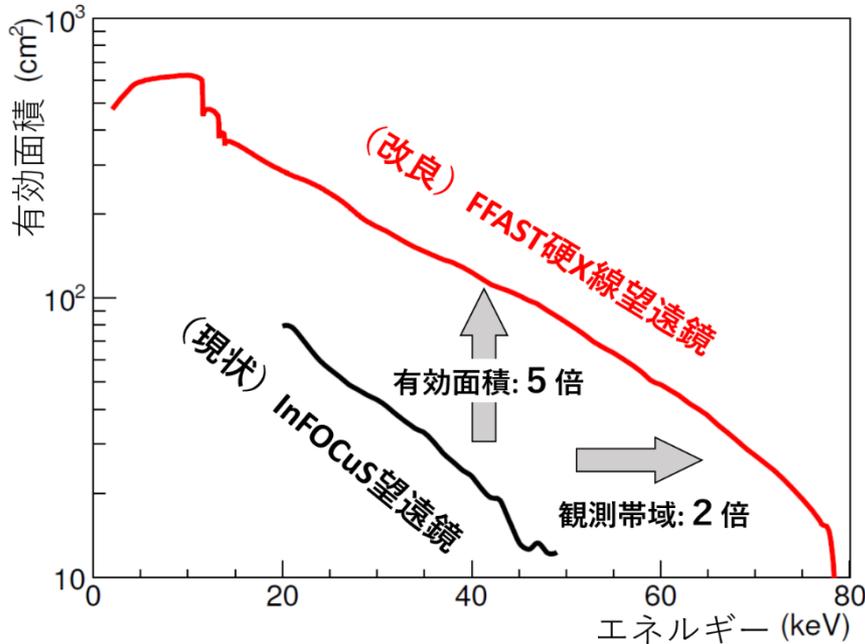
来年：その他（望遠鏡、トラス）を回収 => 次回フライトは**FFAST望遠鏡**



# 次回フライトXL-Calibur(2021,2022, 2024, ...)

(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

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

- かに星雲 : パルス周期に分割
- Cyg X-1 : 偏光度の検出
- 質量降着型パルサー (Her X-1, Vela X-1, GX 301-2)



# 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月の南極フライトでは、偏光観測にとっては新しい天体種族（質量降着型パルサー）を観測した。
- フライトは3日間であったが、現在データ解析が進行中。
- 次回フライトは、2021, 2022, 2024年にスウェーデンと南極から計画しており、FFAST望遠鏡を利用、CZT検出器を薄くすることで、S/N比を10倍向上させる。

