

# 日米欧の国際協力で推進する硬X線集光偏光計XL-Calibur気球計画



高橋 弘充（広島大）, Q. Abarr, 朝倉一統, 栗木久光, M. Baring, R. Bose, D. Braun, G. de Geronimo, P. Dowkontt, J. Elliot, 榎戸輝場, M. Errando, 深沢泰司, 古澤彰浩, T. Gadson, E. Gau, V. Guarino, 郡司修一, 袴田知宏, K. Hall, 花岡真帆, K. Harmon, 服部兼吾, 林田清, S. Heatwole, A. Hossen, 井出峻太郎, 今里郁弥, 今澤遼, 石橋和紀, 石田学, 石倉彩美, N. Kumar Iyer, F. Kislak, M. Kiss, 鴨川航, 北口貴雄, D. Kotsifakis, H. Krawczynski, J. Lanzi, L. Lisalda, 前田良知, 松下友亮, 眞武寛人, 松本浩典, 峯田大晴, 宮本明日香, 宮澤拓也, 水野恒史, 中庭望, 野田博文, 大出優一, 岡島崇, 岡崎貴樹, I. Pastrani, M. Pearce, Z. Peterson, H. Poon, C. Purdy, B. Rauch, F. Ryde, 斎藤芳隆, 佐久間翔太郎, 澤上拳明, C. Shreeves, G. Simburger, C. Snow, S. Spooner, T. Stana, D. Stuchlik, 鈴木瞳, 武田朋志, 武尾舞, 玉川徹, 田村啓輔, 常深博, 内田和海, 内田悠介, 内山慶祐, B. Vincent, A. West, E.A. Wulf, 山本龍哉, 楊冲, 米山友景, 吉田勇登, 善本真梨那, XL-Caliburチーム

WUSTL, 阪大, 愛媛大, RU, SUNY, 理研, 広大, 藤田医大, NASA, 山形大, 名大, ISAS/JAXA, KTH, UNH, OIST, 東京理科大, 都立大, NRL

偏光観測は、撮像、測光、分光とは独立な物理量（磁場や幾何構造など）が得られる強力な観測手段である。電波や可視光では広く利用されているが、X線やガンマ線など高エネルギー帯域では、いまだ観測天体は数天体に限られている。そこで我々は日米欧の国際協力で、X(L)-Calibur気球実験を推進している（PI：Henric Krawczynski、ワシントン大学）。X(L)-Caliburは、硬X線望遠鏡によって天体信号を集光することで、従来のコリメータ型の偏光計よりも小型な検出器で低バックグラウンドを達成し、高感度な偏光観測を実現させる。偏光計は、コンプトン散乱の際に光子は偏光方向と垂直に散乱されやすい（クライン-仁科関係）ことを利用する。X-Caliburとして2018年12月に南極でのフライトを実施し、質量降着型パルサーGX 301-2とVela X-1を観測することに成功した。これにより、パルサーの磁極からのX線放射機構のより詳細な理解を目指している。我々はさらなる性能改善を目指しており、FFAST衛星用に開発された硬X線望遠鏡を利用した次期観測をXL-Caliburとして2022年に計画している。FFAST望遠鏡は、「ひとみ」用に開発された望遠鏡と同型であり、現行のInFOCuS望遠鏡と比較して、大きな有効面積、広いエネルギー域、高い空間分解能を持つ。次期以降の観測では、活動銀河核など新しい種族の硬X線偏光観測も目指す。

## 高エネルギー偏光観測：現状と利点

強い磁場や散乱によって生じる偏光は、X線・ガンマ線帯域においても、中性子星やブラックホール、超新星残骸、活動銀河核などにおける高エネルギー放射機構を研究する上で非常に強力な観測手法と考えられている。しかしながら、現在までに有意な偏光の検出が報告されている事例は、GAP検出器/ASTROSAT衛星による明るいガンマ線バースト、OSO-8衛星（数keV）/PoGO+気球実験（20-180 keV）/「ひとみ」衛星SGD検出器（60-160 keV）/INTEGRAL衛星（数100 keV）によるカニ星雲とCyg X-1の観測のみに限られている。こうした中で、最近になって本格的なX線・ガンマ線偏光検出器の開発が世界中で進められている（XL-Calibur気球, IXPE衛星, ...）。

偏光情報は、イメージ、タイミング、スペクトルとは相補的

- ・シンクロトロン放射 => 磁場
- ・反射・散乱 => 幾何学構造
- ・QED効果？などが観測できる

異なるエネルギー帯域 ⇔ 異なるエネルギーの粒子・場所を観測

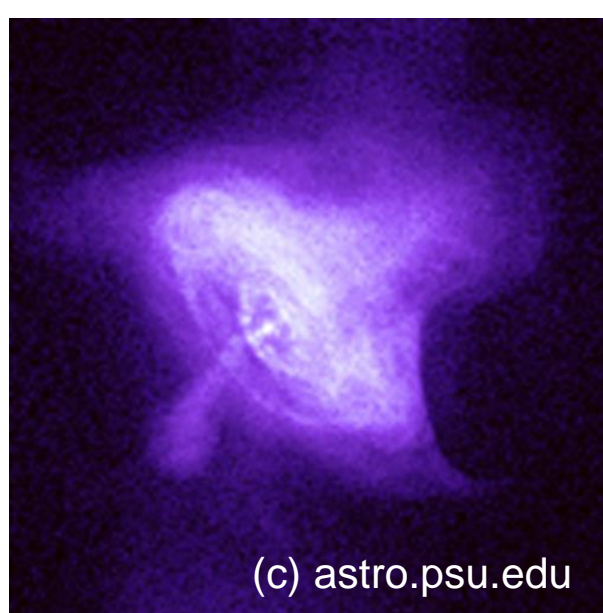
- ・シンクロトロン放射：高エネルギー電子ほど寿命短い  
=> 高エネルギー放射を観測すると、粒子加速の現場により近い磁場情報
- ・降着円盤：硬X線では反射成分（コロナからの放射が円盤で反射）が寄与  
=> コロナの形状、円盤とコロナの位置関係

XL-Calibur  
検出器論文

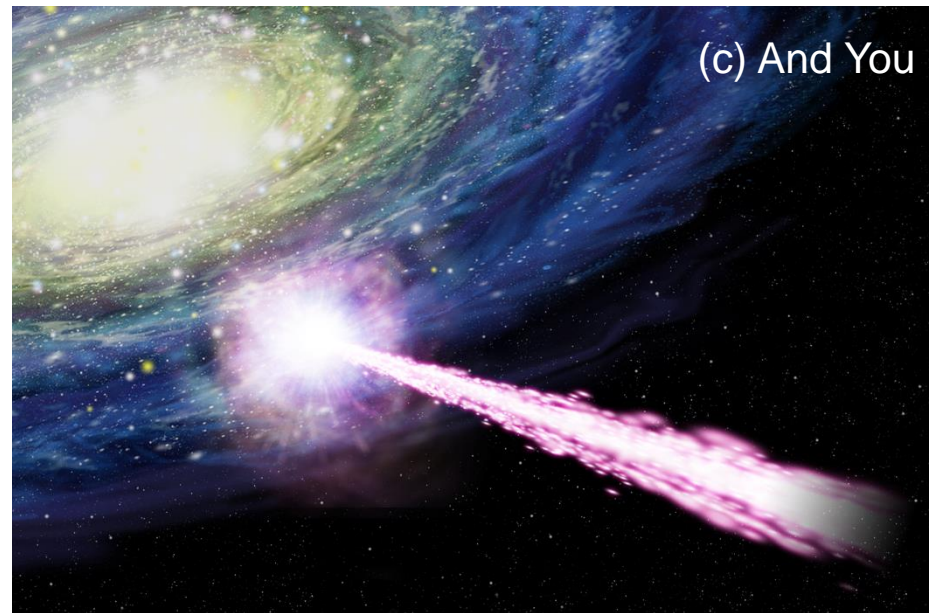
Cyg X-1（ブラックホール連星系）



カニ星雲（パルサー）



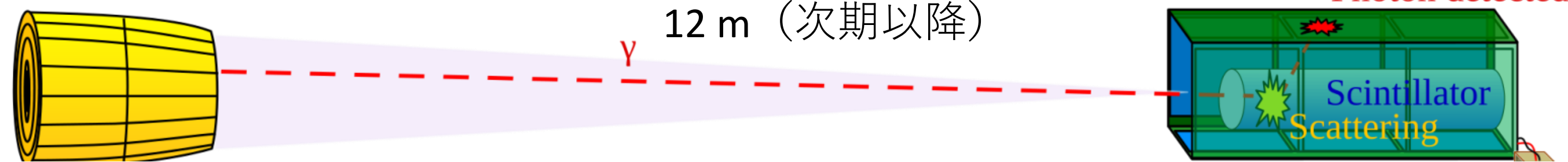
ガンマ線バースト



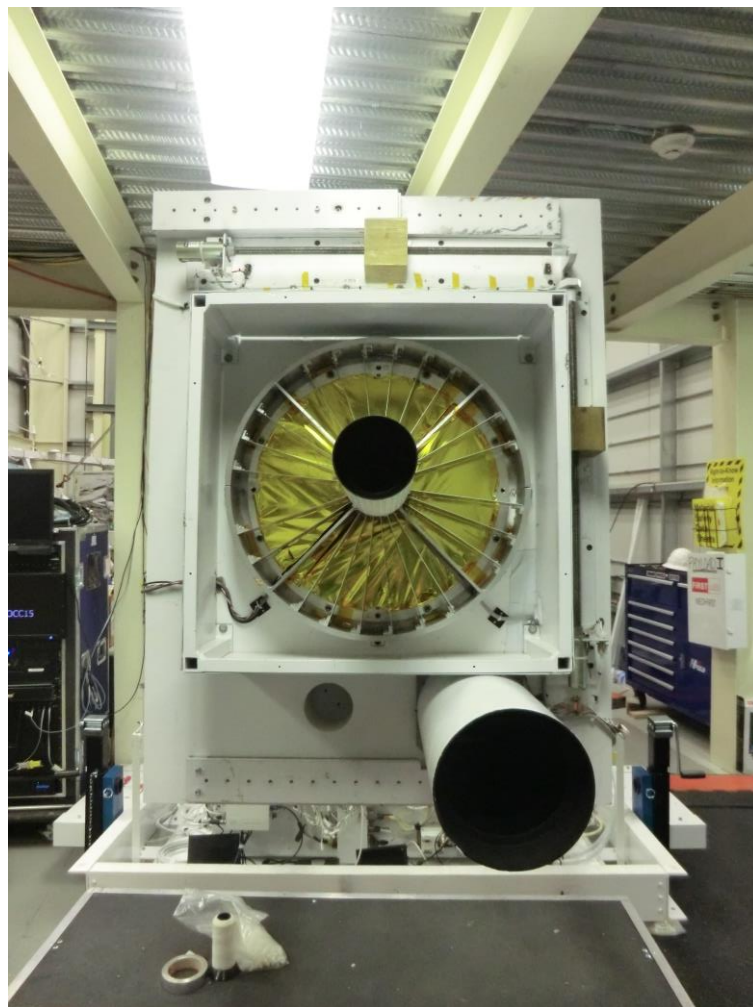
## 硬X線集光偏光計 X(L)-Calibur 気球

- ・上空40kmから硬X線（15-80 keV）を観測
- ・望遠鏡によって集光することにより、高感度な偏光観測を実現
- ・2016年に米国でテスト放球 => 姿勢制御（秒角）と偏光計の動作実証済み
- ・日本の貢献：2018年フライトは運用+データ解析、将来計画ではFFAST望遠鏡を搭載

焦点距離：8 m（2018年フライトまで）  
12 m（次期以降）

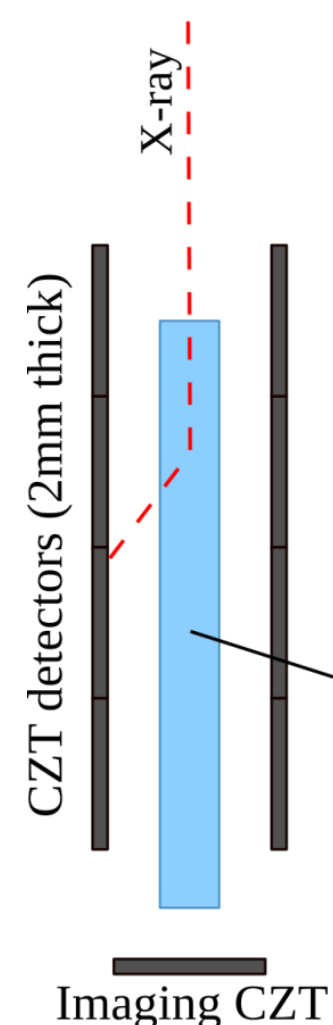


硬X線望遠鏡

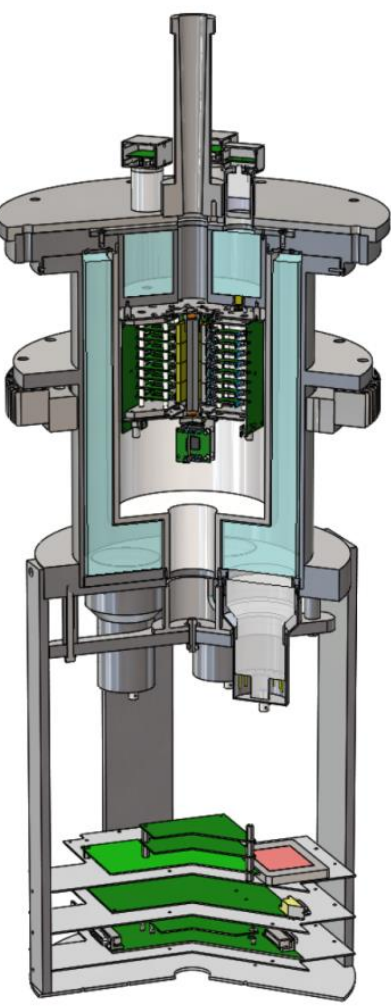


InFOCuS硬X線望遠鏡（中央）  
スターカメラ（右下）  
（2018年 gondola 取り付け後）

偏光計（コンプトン散乱型）



偏光計（左：断面図）、（右：実物）  
Be（散乱体）、CZT半導体（吸収体）

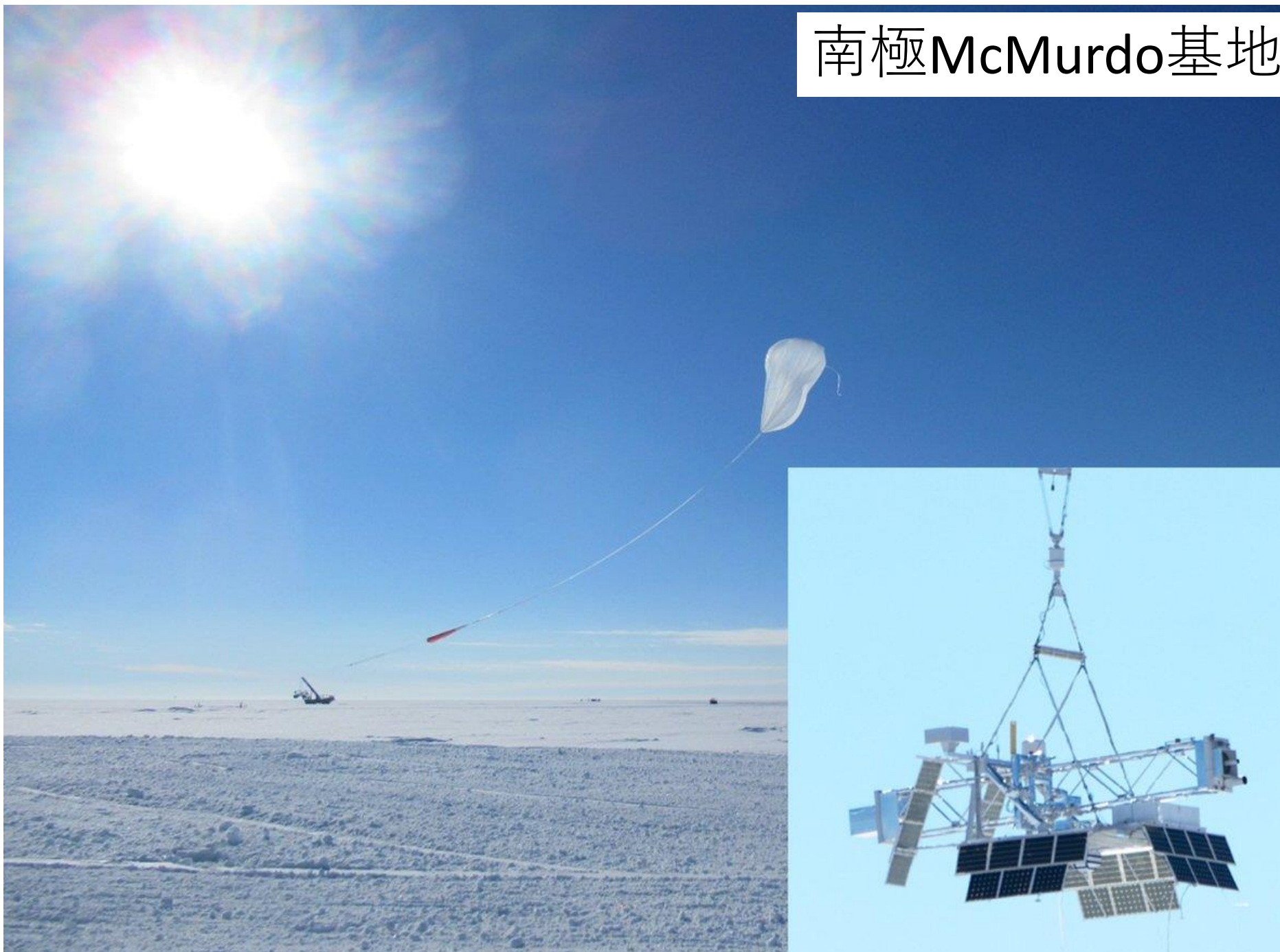


コリメータ  
CsIシールド

## 南極フライト：2018/12/30 - 2019/1/1

- ・南極の米国McMurdo基地より放球、上空40 kmに到達
- ・質量降着型パルサーGX301-2とVela X-1の観測成功

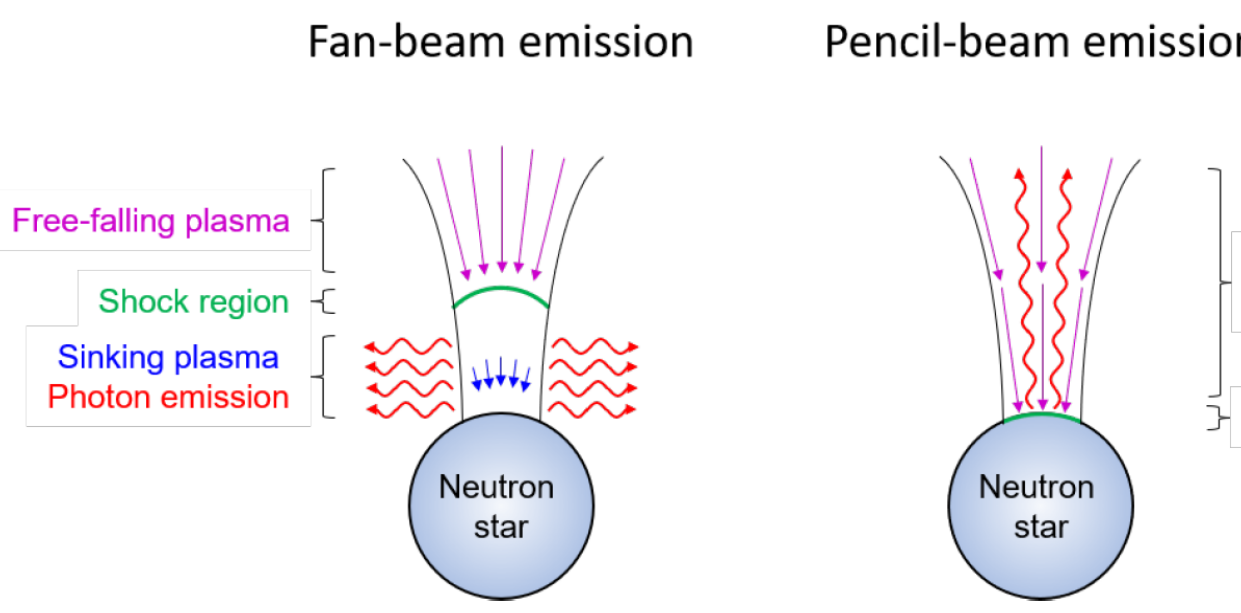
YouTube  
"X-Calibur Launch"



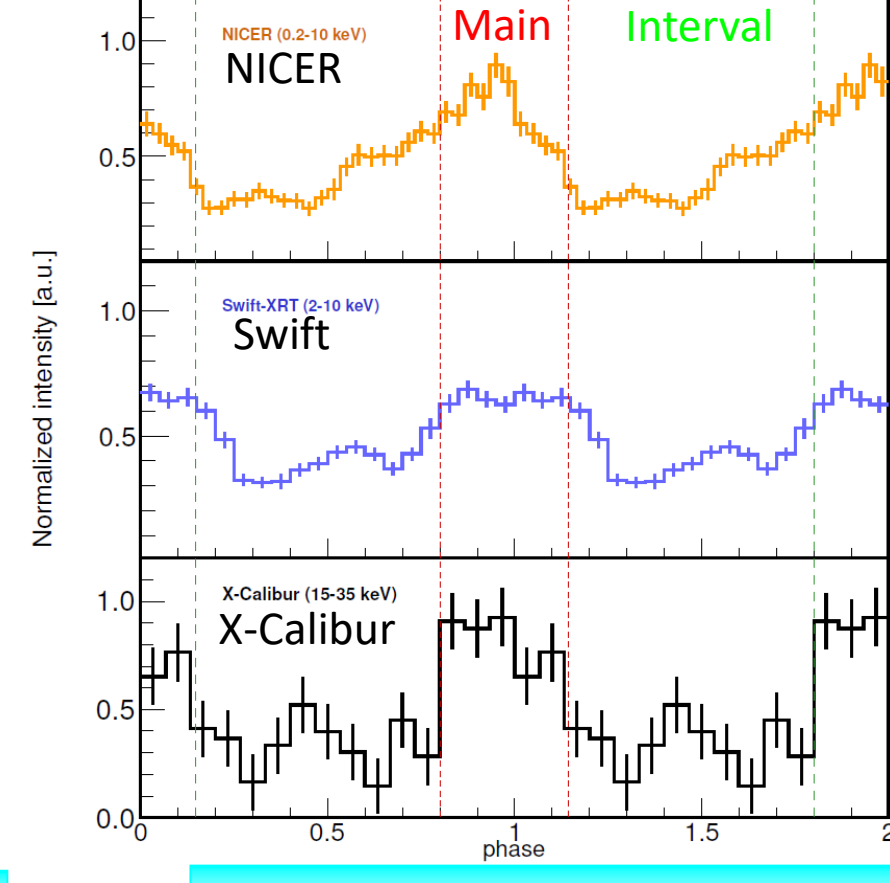
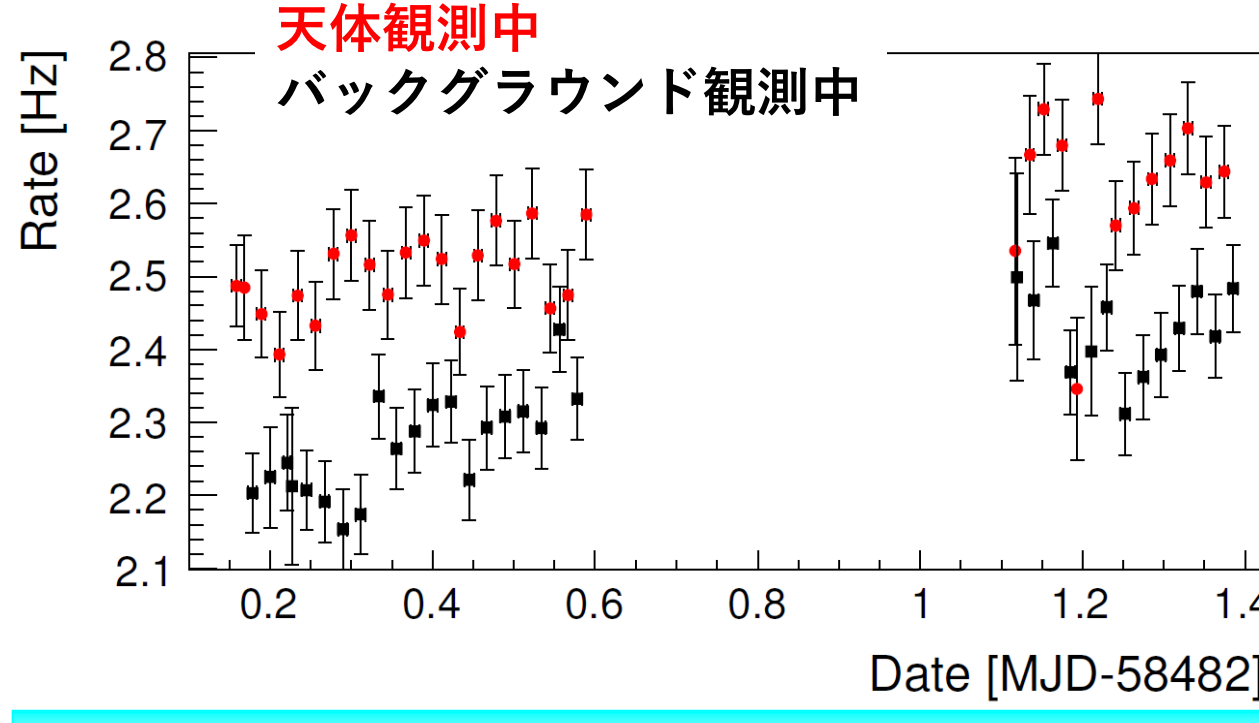
## 質量降着型パルサー GX 301-2 観測結果

ApJ論文

- ・質量降着型パルサー：  
大質量星から中性子星に質量降着し、磁極に形成された降着柱からX線放射
- ・放射方向が未解決：  
ファン型とペンシル型の2モデル
- ・偏光観測でモデルが決定できる  
ファン型：明るい位相で偏光度が高い  
ペンシル型：明るい位相で偏光度が低い



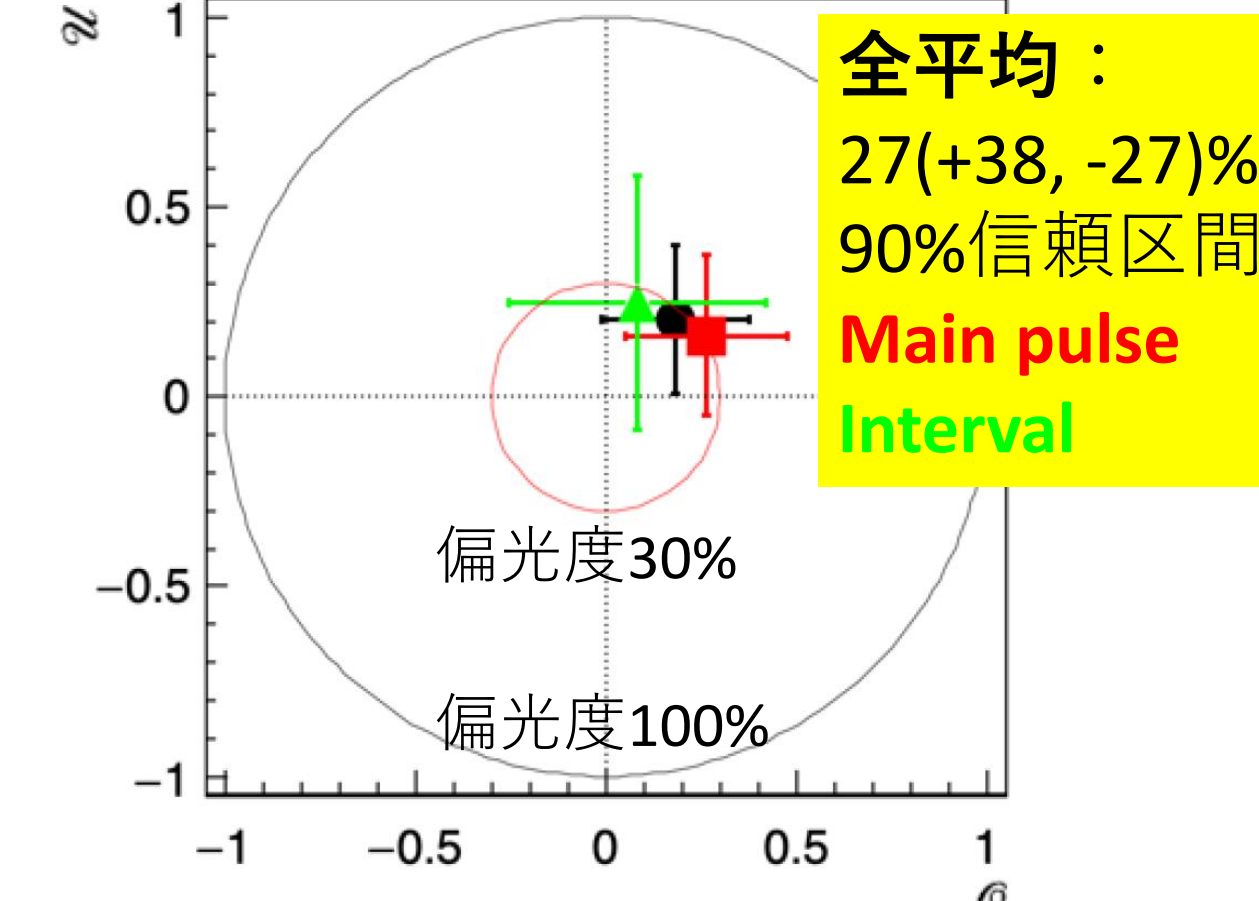
天体信号の検出に成功



左：ライトカーブ  
天体観測時の上乗せがGX 301-2の天体信号

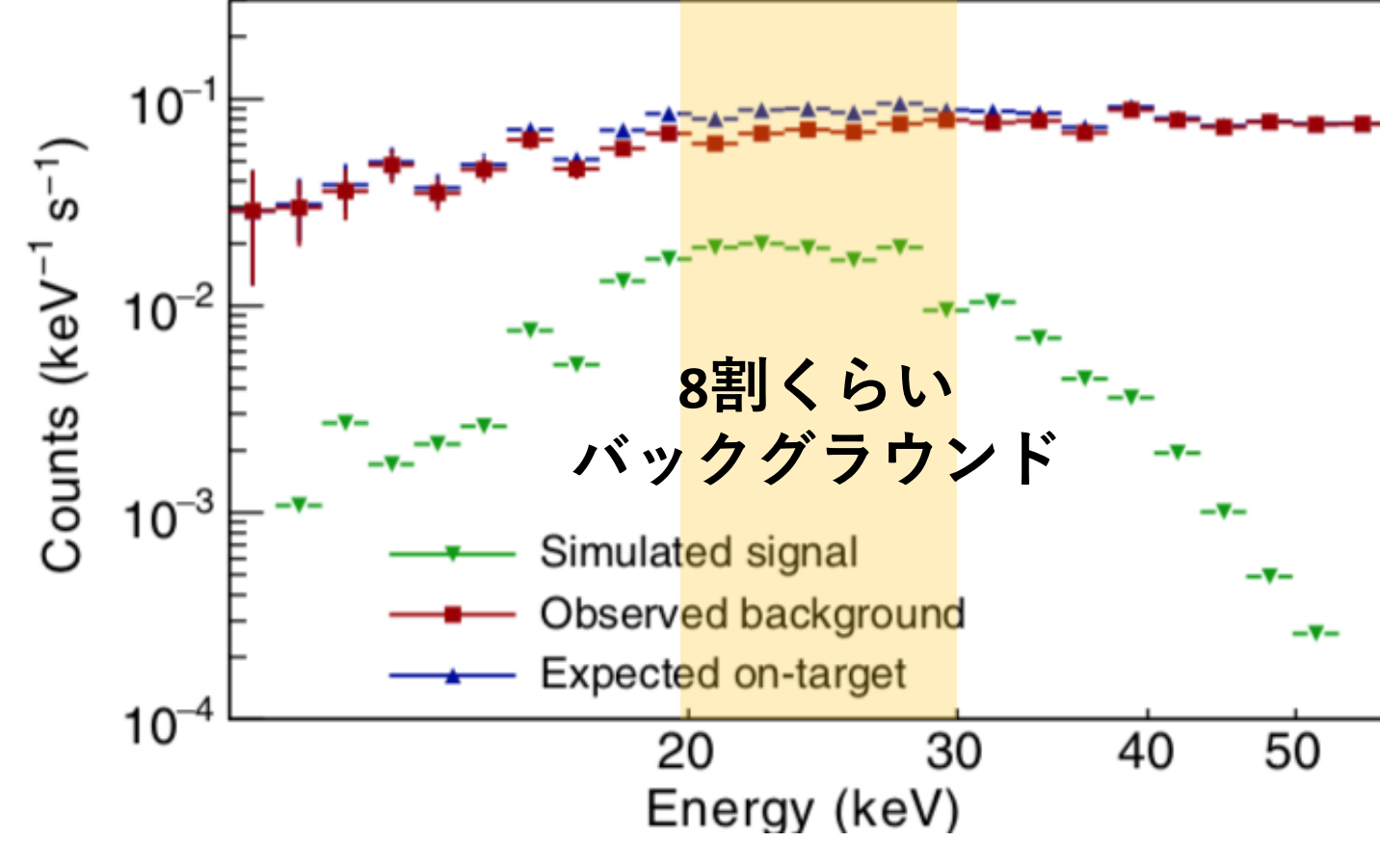
右：パルス周期  
軟X線と同期したパルスを検出

偏光信号は上限値（統計不足）



2018年フライトでは、He漏れにより観測時間が短く統計不足であった。  
またバックグラウンドが天体信号よりも支配的な状況

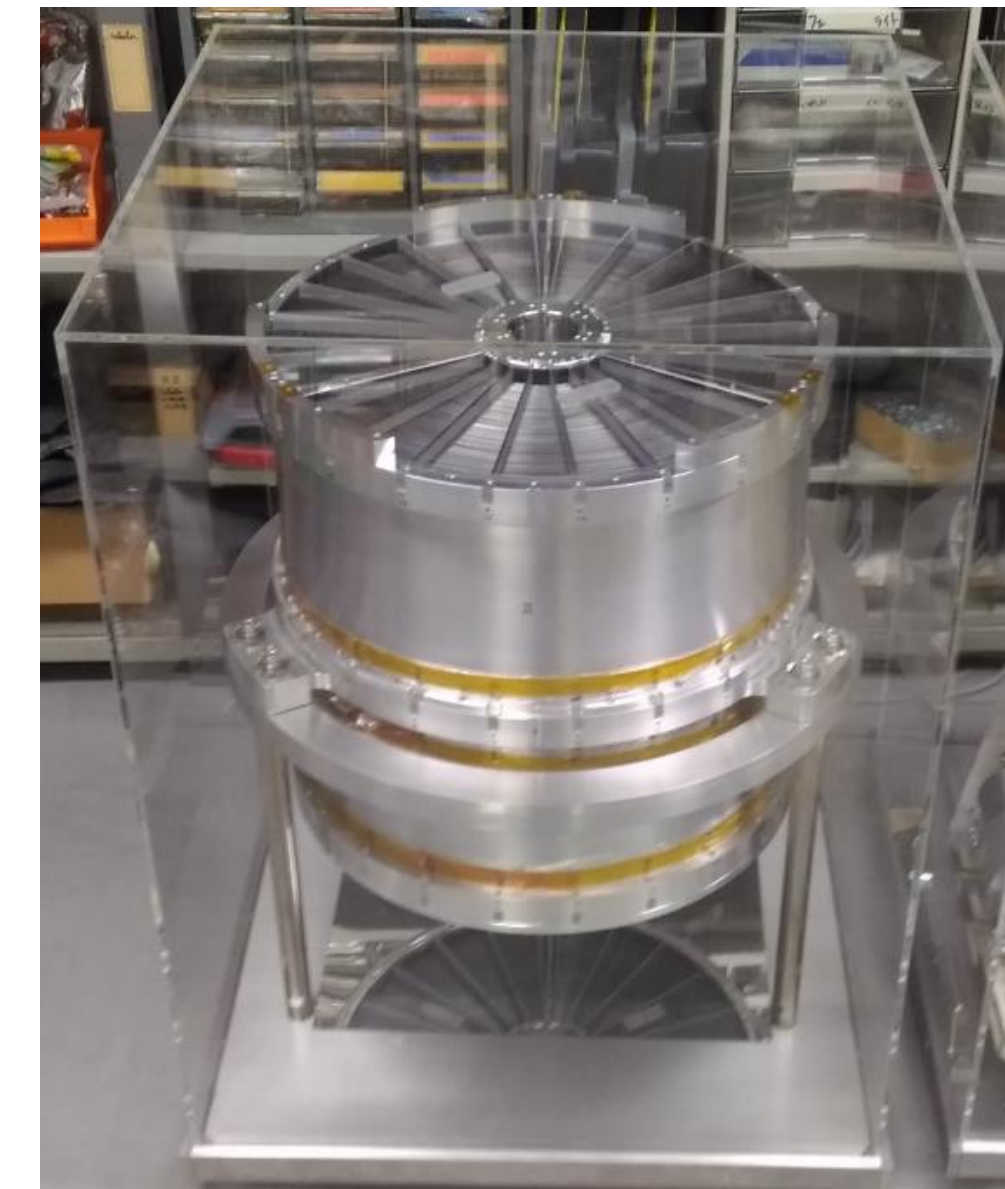
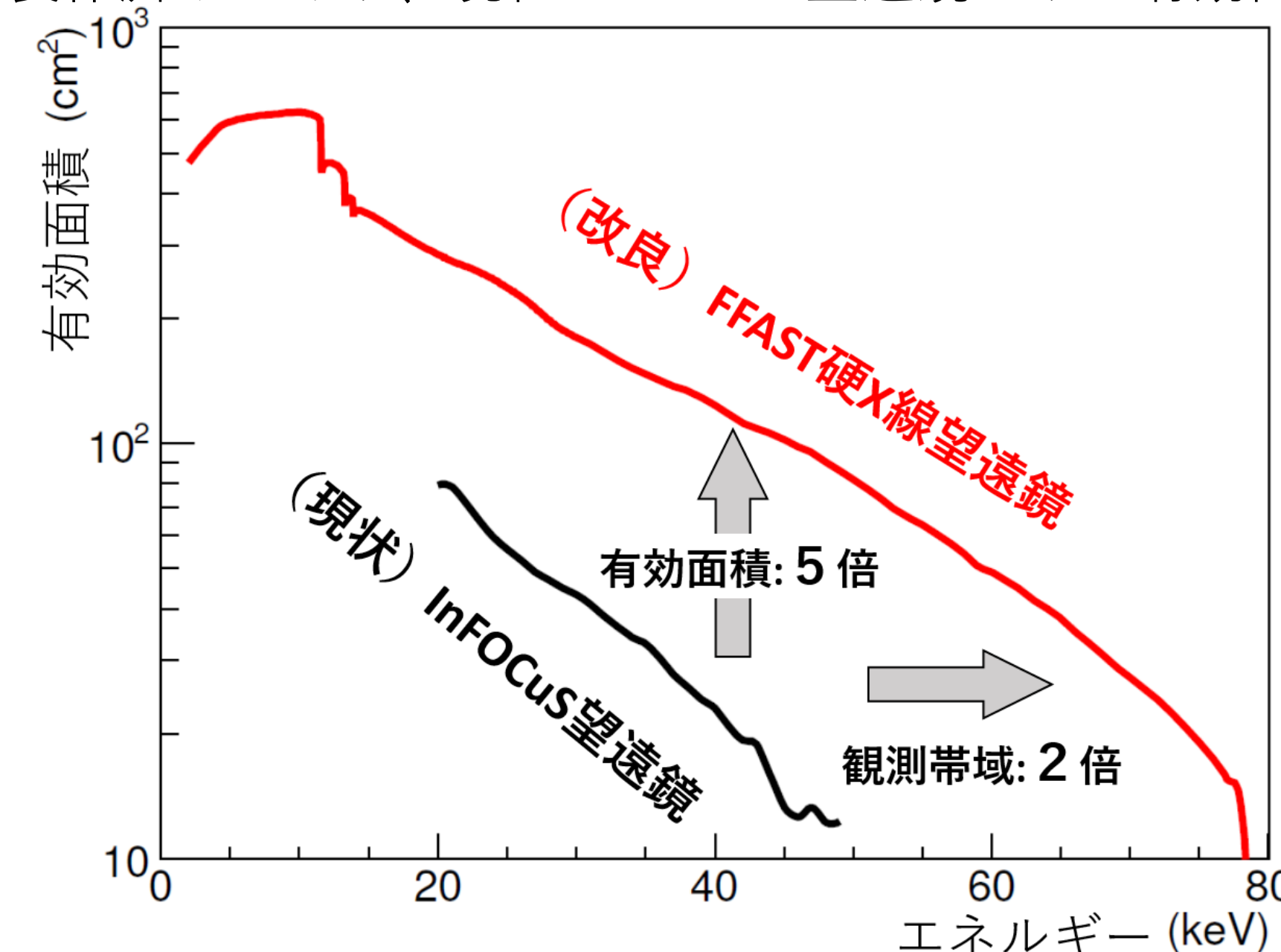
推定感度（信号200 mCrabを仮定）



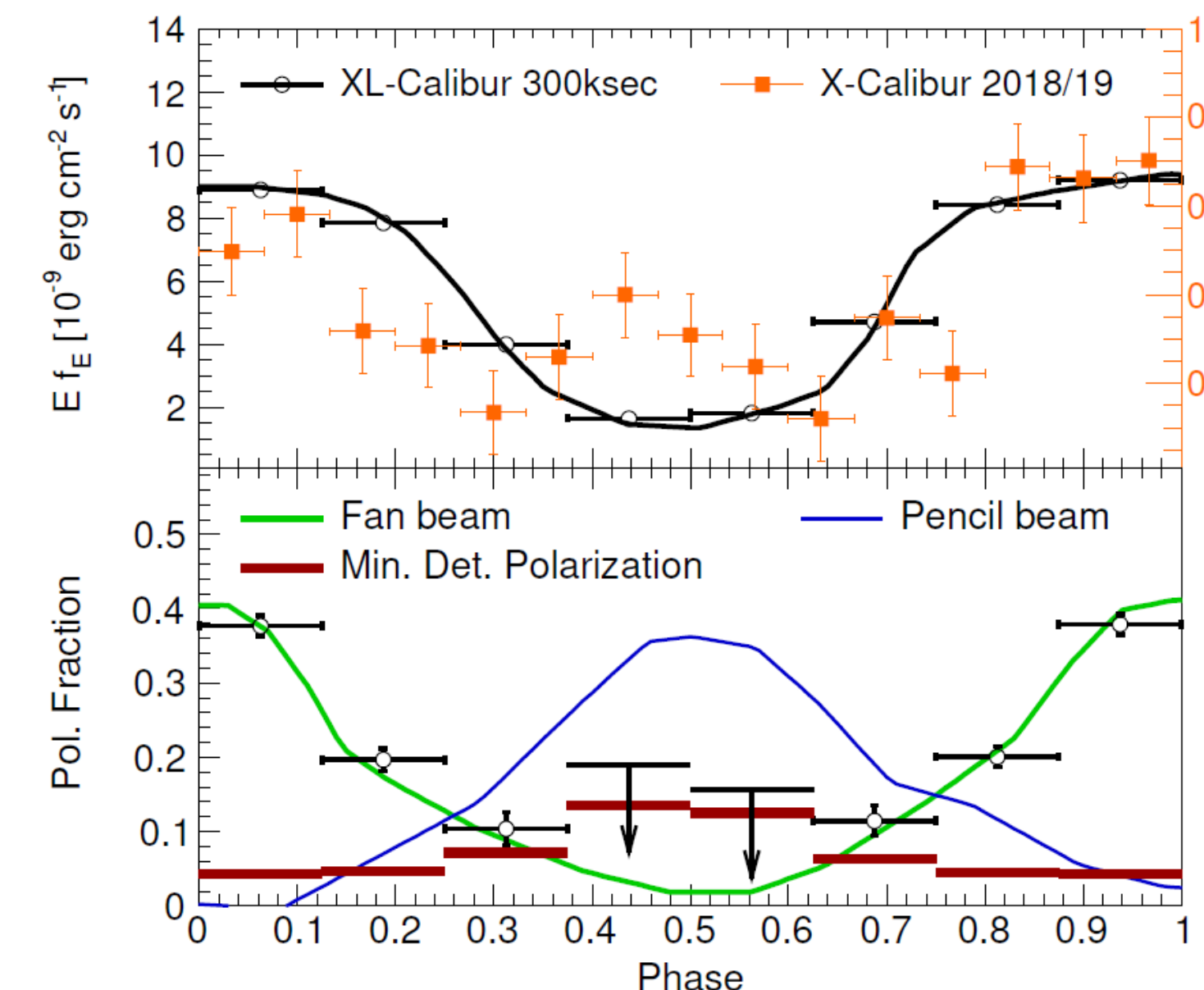
## 将来の長期フライト計画：スウェーデン/南極

次回XL-Caliburからは、FFAST硬X線望遠鏡（日本製）を搭載

製作済みであり、現在のInFOCuS望遠鏡よりも有効面積を5倍、帯域を2倍広げられる



次回XL-CaliburでGX 301-2を観測した予想（偏光の位相分割が可能）



- ・日本製の大型FFAST硬X線望遠鏡により天体信号が増加させる  
（焦点距離が8mから12mに伸びることの対応は検討済み）
- ・偏光計をコンパクト、アクティブシールドの改善により、低バックグラウンド化も進める  
⇒ 2022年に次回フライト@スウェーデン XL-Caliburを計画  
（その先も複数フライト）

数10 mCrabの天体からの硬X線偏光観測を実現させる

観測天体

- ・スウェーデン～カナダ（1週間）：全天で硬X線で最も明るい2天体  
カニ星雲（回転駆動型パルサー）とCyg X-1（ブラックホール連星系）の詳細観測
- ・南極（2~4週間）：GX 301-2, Vela X-1（質量降着型パルサー）の追観測  
Cen A（活動銀河核）
- ・突発天体