

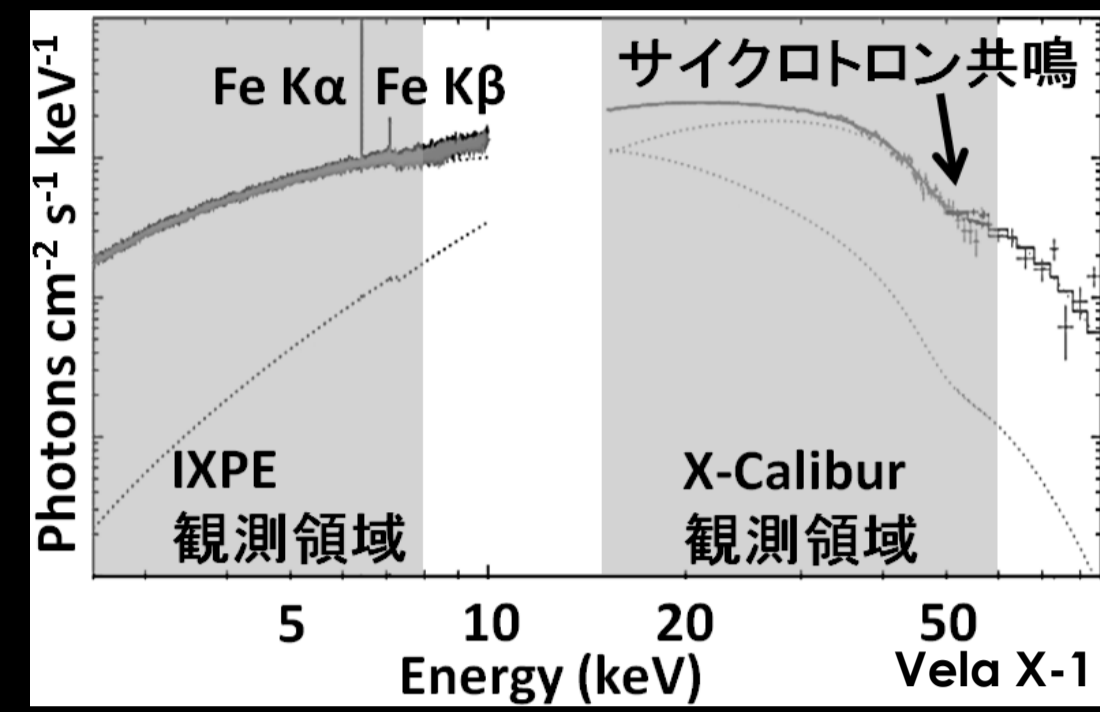
# 南極周回気球による硬X線偏光観測ミッションX-Caliburの現状と今後

○内田和海<sup>1</sup>, 高橋弘充<sup>1</sup>, 深澤泰司<sup>1</sup>, 水野恒史<sup>1</sup>, 北口貴雄<sup>2</sup>, 玉川徹<sup>2</sup>, 周圓輝<sup>3</sup>, 堤まりな<sup>3</sup>, 内山慶祐<sup>3</sup>, 林田清<sup>4</sup>, 松本浩典<sup>4</sup>, 常深博<sup>4</sup>, 榎戸輝揚<sup>5</sup>, 田村啓輔<sup>6</sup>, 前田良知<sup>7</sup>, 石田学<sup>7</sup>, 斎藤芳隆<sup>7</sup>, 宮澤拓也<sup>8</sup>, 栗木久光<sup>9</sup>, 郡司修一<sup>10</sup>, H. Krawczynski<sup>11</sup>, P. Dowkontt<sup>11</sup>, F. Kislak<sup>11</sup>, 岡島崇<sup>12</sup>, J. Lanzi<sup>12</sup>, D. Stuchlik<sup>12</sup>, S. Li<sup>13</sup>, G. de Geronimo<sup>14</sup>, 他X-Caliburチーム  
 1:広島大 2:理研 3:東理大/理研 4:阪大理 5:京大理 6:名大理 7:ISAS/JAXA 8:OIST 9:愛媛大理 10:山形大理 11:WUSTL 12:NASA 13:BNL 14:Stony Brook Univ.

X線偏光観測は、コンパクト天体などの磁場・幾何構造を探る強力な手段となる。しかし、X線帯域で高感度な偏光計を作成することは難しく、これまで精度の良い偏光観測はほとんどなされていない。そこで現在、Washington大学主導のもと、X線望遠鏡で集光することにより感度を向上させた、気球搭載硬X線(15-40 keV)偏光計X-Caliburの開発が行われている。2018年に南極で予定しているフライトでは、大質量X線連星Vela X-1を観測予定であり、長年の謎であった磁力線に対するX線の放射方向の特定が期待される。さらに、2021年に再フライトを計画しており、日本が開発を行ってきたFFAST衛星の望遠鏡を搭載することで、日本からも大きく貢献する。2021年フライトに向けて、検出器の材質や望遠鏡を変えることで、検出器の性能がどの程度向上するか考察した。

## 1. Introduction

- ☆ブラックホールや中性子星などのコンパクト天体
- † X線・ガンマ線帯域で明るいことが多い
- † 放射メカニズム・周辺物質の分布などは未解決
- † X線放射は、ブラックホールや中性子星付近の物質・強磁場環境・重力場によって
- シクロトロン・コンプトン散乱・相対論・量子論的效果を受ける
- † 周辺環境を反映した偏光情報



X線・ガンマ線帯域での偏光観測は技術的に難しく、検出例が少ない

- ☆X線でブラックホールや中性子星を有意に偏光観測した例
- OSO-8衛星(Crab nebula) / 気球実験PoGO+(Crab nebula, Cyg X-1)
- AstroSat(Crab nebula, GRBs) / ひとみ衛星(Crab nebula) / GAP(GRBs)

もっと検出器感度を上げて、もう少し暗い天体も統計的に有意に観測したい。

気球搭載型硬X線偏光計 X-Calibur

## 2. 気球搭載:X-Calibur

- ☆硬X線(20-60 keV)で偏光観測
- ☆望遠鏡で集光 → 高いS/N
- ☆撮像も可能

☆PI: Henric Krawczynski (WUSTL)

☆2016年打ち上げ(@Fort Sumner, U.S)

- ・姿勢制御(秒角の精度) OK!
- ・偏光系の動作確認 OK!

☆2018年12月~翌1月(2 or 4週間)

- ・打ち上げ@南極
- ・大質量X線連星: Vela X-1を集中的に観測予定
- ・気球搭載X線撮像ミッションInFOCuSで使われていた望遠鏡
- ・Washington Univ. in St. Louis, NASAが主導。日本は運用とデータ解析で貢献。

☆2021年にもフライト予定(南極?もしくは北極?)

- ・日本が開発を行ったFFAST衛星(ひとみ衛星HXIのスペア)の望遠鏡を搭載
- 日本からも大きく貢献
- ・有効面積5倍、エネルギー帯域2倍を目指す。
- ・同時期に打ち上げ予定の、軟X線(2-8keV)で偏光撮像を行うIXPE衛星と協力し、同一天体の広帯域での同時観測を行う。



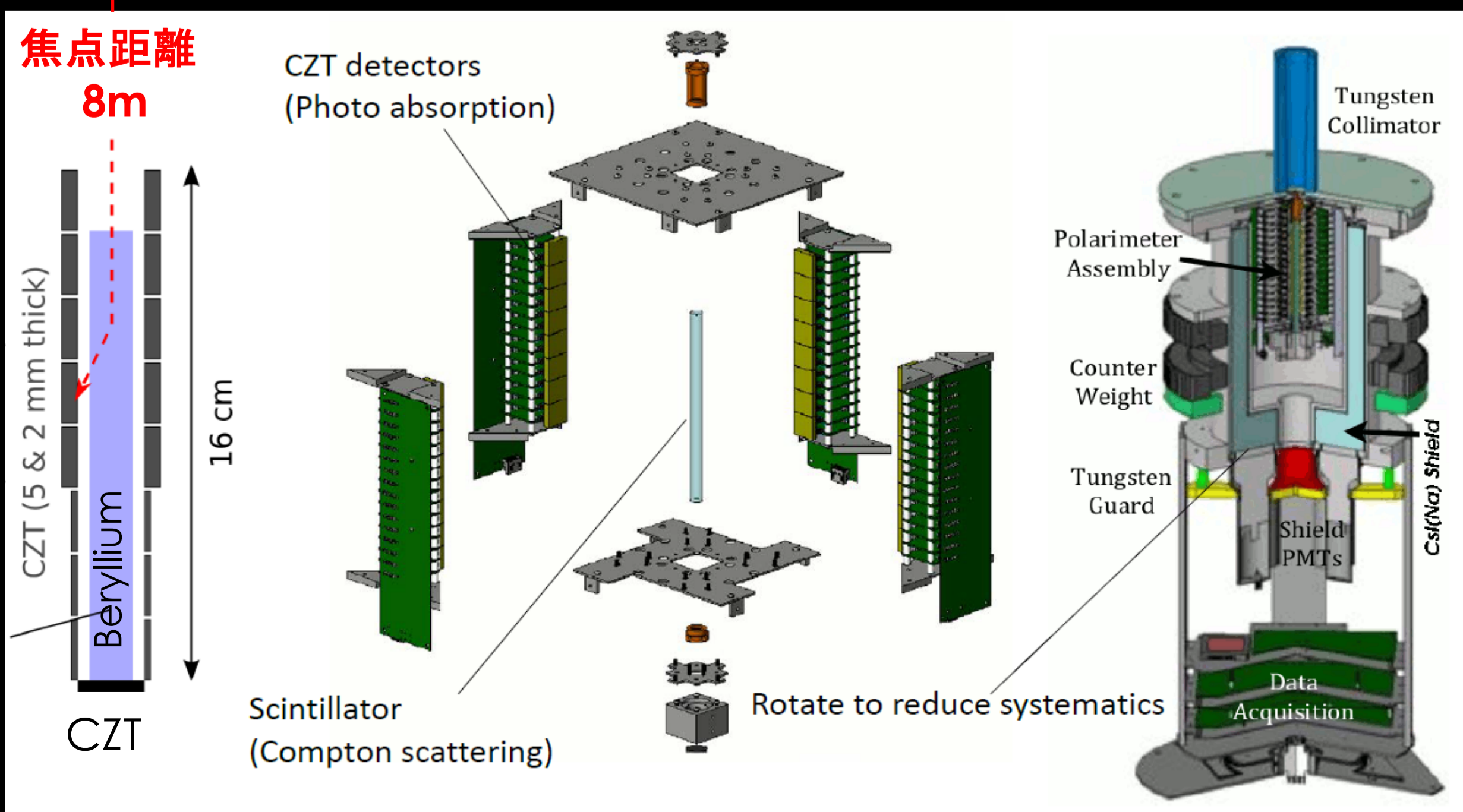
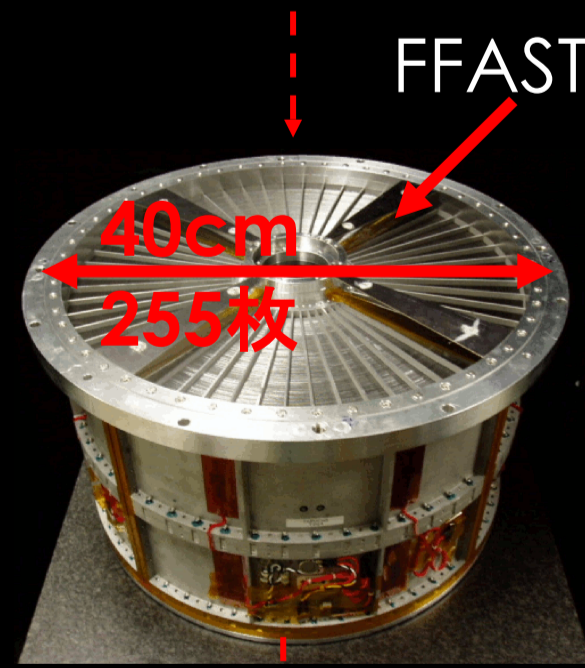
## 3. X-Calibur検出器 2018年ver.

偏光X線の散乱方向の異方性を用いる(Klein-Nishinaの式)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2 k^2}{2 k_0^2} \left[ \frac{k_0}{k} + \frac{k}{k_0} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right]$$

→偏光方向と垂直に散乱されやすい

原子番号Zが小さいベリリウムで散乱させ、散乱X線をその周りに配置したCZT検出器で吸収・検出する。プラスチックシンチレータを使えば、コインシデンス法によりバックグラウンドを減らすことができるが、散乱確率が減る。



## 4. 2021年フライトに向けてのアップグレード(予定)

◎望遠鏡: InFOCuS → FFAST

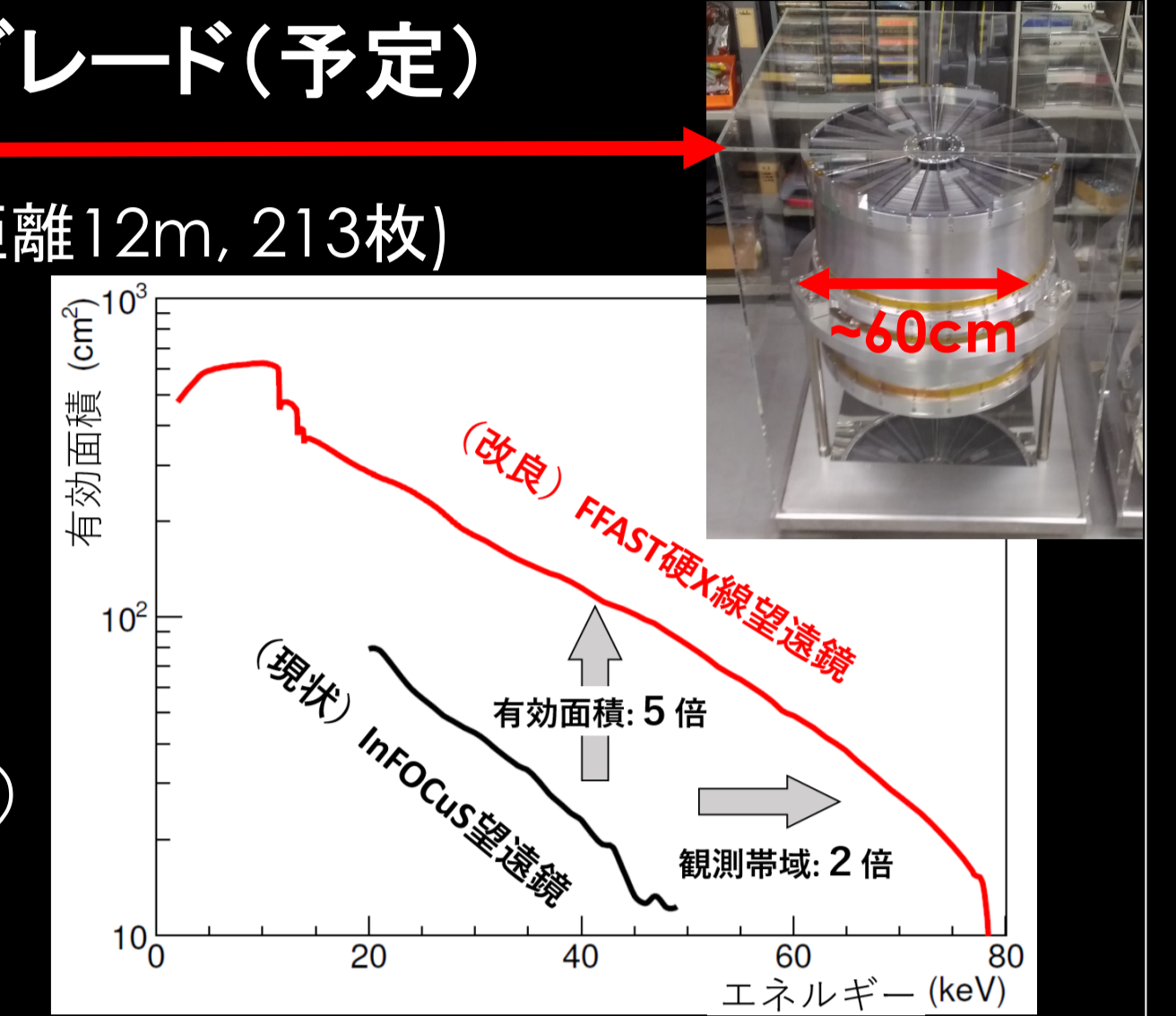
- ・有効面積5倍、観測帯域2倍に。(焦点距離12m, 213枚)

◎散乱体: Be → プラスチックシンチレータ

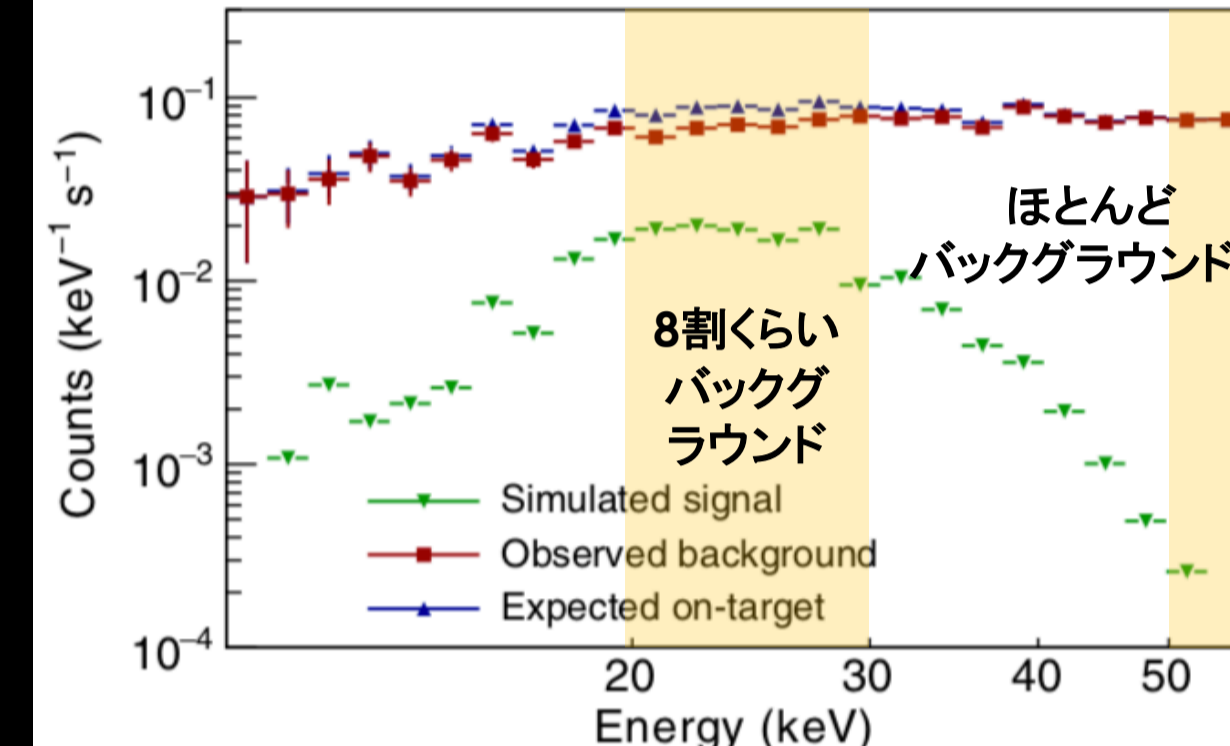
- ・メリット: コインシデンス法により、バックグラウンドを約1/10にできる。
- ・デメリット: 散乱確率が減る。=Signalが減る。

◎打ち上げ場所: 未定

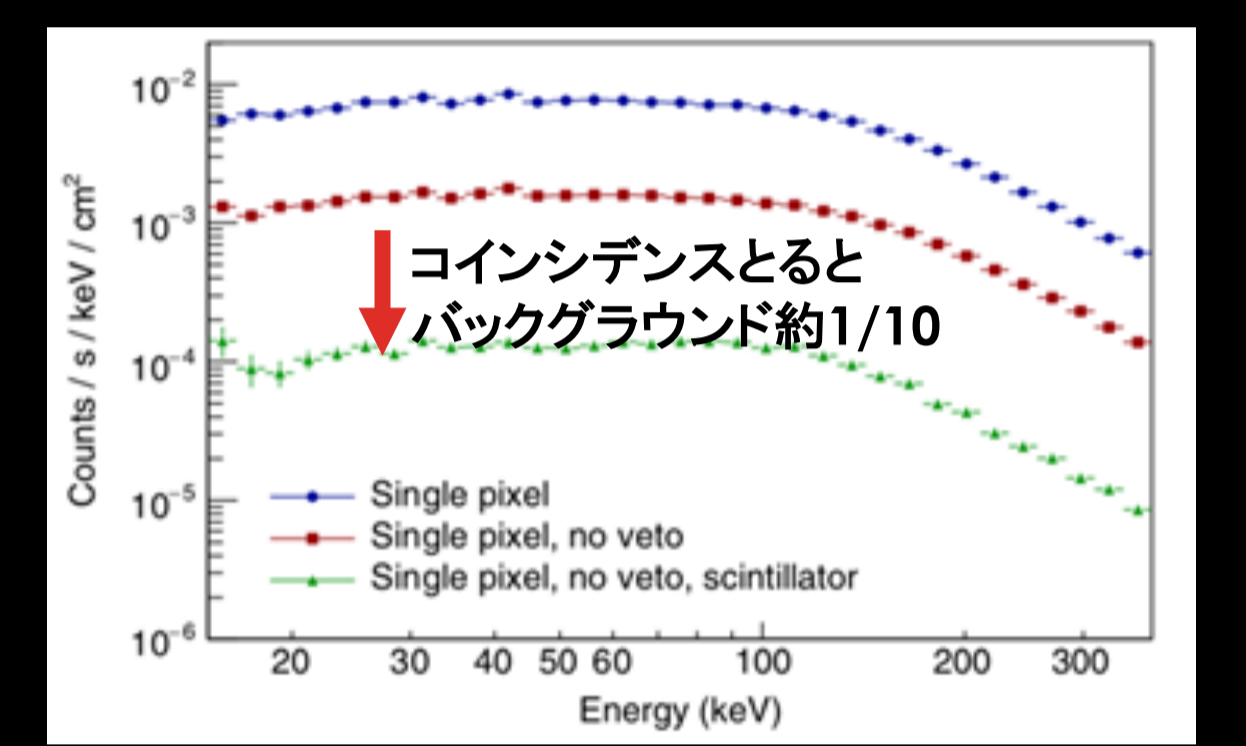
(→どの程度の天体まで観測可能か調査する)



望遠鏡と散乱体を変えることにより、どの程度の性能の向上が見込まれるかを調べた。



2016年フライトで得られたバックグラウンドと、予想されるVela X-1のカウントレート



テストフライトで得られたバックグラウンドスペクトル

## 5. 調べる条件

- ・望遠鏡: InFOCuS望遠鏡 / FFAST望遠鏡
- ・散乱体: Be / プラスチックシンチレータ
- ・エネルギー帯域: 低エネルギー(20~30keV) / 高エネルギー側(50~60keV)
- ・Exposure: 1週間 or 2週間 or 4週間

99%の信頼度で検出可能な偏光度の最小値 (小さいほど良い検出器)

$$MDP = \frac{4.29}{M \times R_s} \sqrt{\frac{R_s + R_b}{T}}$$

M: モジュールファクター X-Calibur(2018ver)では~0.55

R<sub>s</sub>: ソースのカウントレート

R<sub>b</sub>: バックグラウンドのカウントレート

※MDP ≥ 1 (=100%偏光): 観測できない  
 ※実際のところ、MDP < 20%は欲しい。

条件を変えると。。

- ◎InFOCuS望遠鏡 → FFAST望遠鏡: 有効面積約5倍+観測帯域が約2倍。
- ◎20~30keV → 50~60keV: Vela X-1のスペクトルと検出効率から、S/N悪化する。
- ◎Be → プラスチックシンチレータ: 1.5倍程度散乱イベントが減る  
 :20-30keVでは、散乱イベントのほとんどがスレッシュホールドを超えない  
 :50-60keVでは、半分程度はスレッシュホールドを超える
- ◎Exp. 1週間 → 2週間 → 4週間: MDPの式のTが大きくなるので、MDPが良くなる

以上のそれぞれの条件に対して、MDPの理論値を算出した。

Vela X-1	Be	プラスチックシンチレータ									
		R <sub>s</sub>	R <sub>b</sub>	MDP(1w)	MDP(2w)	MDP(4w)	R <sub>s</sub>	R <sub>b</sub>	MDP(1w)	MDP(2w)	MDP(4w)
20-30keV	InFOCuS	0.150	0.714	0.062	0.044	0.031	0.100	0.714	0.091	0.064	0.045
	FFAST	0.750	0.714	0.016	0.011	0.008	0.500	0.714	0.022	0.016	0.011
50-60keV	InFOCuS	0.001	0.639	6.261	4.427	3.130	0.000	0.064	5.953	4.210	2.977
	FFAST	0.006	0.639	1.257	0.889	0.629	0.002	0.064	1.206	0.853	0.603
Crab nebula											
20-30keV	InFOCuS	0.321	0.714	0.032	0.022	0.016	0.214	0.714	0.045	0.032	0.023
	FFAST	1.604	0.714	0.010	0.007	0.005	1.069	0.714	0.013	0.009	0.006
50-60keV	InFOCuS	0.015	0.639	0.544	0.384	0.272	0.005	0.064	0.529	0.374	0.265
	FFAST	0.075	0.639	0.114	0.080	0.057	0.025	0.064	0.120	0.085	0.060

## 6. 結果・考察

- ◎Vela X-1の高エネルギー側だと、どの条件でもMDPが100%に近い。(=FFAST望遠鏡にしても偏光は観測できない。)
- ◎Vela X-1の観測の場合、プラスチックシンチレータよりもBeの方がMDPが良い。(散乱確率を増やし、Rsを稼いだほうが良い。)
- ◎高エネルギー側だと、FFAST望遠鏡の力が顕著に現れる。Crab観測だと、FFAST望遠鏡であれば有意な偏光情報を検出できる。
- ◎プラスチックシンチレータで、コインシデンス法を用いてRbを減らしても、Rsも減ってしまう効果と相殺され、あまり効果がない。→もっとスレッシュホールドを下げてRs増、コインシデンスのタイミングを最適化し、バックグラウンド除去率アップが必要

## スケジュール

2018.12 - 2019.1: 長期フライト@南極 日本でも運用とデータ解析  
 2020: : 新筐体の開発、テスト  
 2021: : 組み上げ  
 2021.12 - 2022.1: LDB Flight 1: IXPE衛星との同時観測予定  
 その後も複数のフライトを目指す