

ガンマ線バースト用 ガンマ線偏光観測衛星SPHiNX計画



高橋弘充、内田和海、鳥越健斗、大野雅功、水野恒史、深沢泰司(広島大)、山岡和貴(名大理)、
ほかSPHiNXチーム(スウェーデン王立工科大学ほか)

PI: Mark Pearce (スウェーデン王立工科大学)

ガンマ線バースト(GRB)は、約1日に1回の頻度で数秒間に 10^{52} ergものガンマ線が突発的に観測され、ブラックホール・中性子星の合体や超新星爆発が起源と考えられている。しかし、そのジェットがどのように形成され、光速近くまで加速されるのかは不明である。エネルギースペクトルの研究からは、ジェットからガンマ線が放射されるメカニズムには2つのモデルが提唱されている。1つは、ジェット中で密度が高く光学的に厚い領域の表面から放射されているとする「光球面モデル」、もう一方は、物質が磁場に巻き付いてシンクロトロン放射をしていると考える「シンクロトロンモデル」である。偏光に着目すると、「光球面モデル」は無偏光に近いのに対し、「シンクロトロンモデル」では最大70%近い偏光が予想される。よって偏光度の頻度分布が、無偏光に近ければ「光球面モデル」、平均で40%近い偏光度があれば「シンクロトロンモデル」と区別できると期待される。

そこで我々は、日本とスウェーデン共同でSPHiNX(Segmented Polarimeter for High Energy X-rays)衛星を開発し、1年間で~10個のガンマ線バーストの偏光度を決定することで、そのガンマ線の偏光度の頻度分布から放射メカニズムを切り分けること計画している。これまでにGAP検出器により、数例のガンマ線偏光がすでに報告されているが、SPHiNXでは検出数を10倍程度に増やし、統計的な議論を目指す。ガンマ線偏光計にはコンプトン散乱を利用し、散乱体にプラスチックシンチレータ、吸収体にGAGGシンチレータを利用する。SPHiNX衛星は50kg級の小型衛星で、2021年の打ち上げを目指し、現在スウェーデン国内でPhase-A/B1の段階まで進んでいる。2017年末に、現在の3候補の中から最終1ミッションが選ばれるダウンセクションがある。

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)/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(X-Calibur, IXPE, XIPE, ...)。

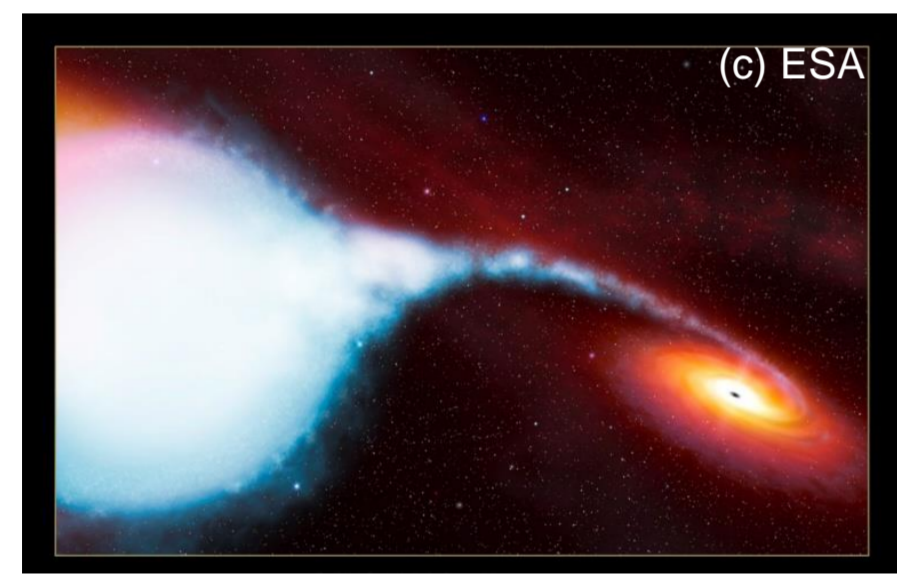
偏光情報は、イメージ、タイミング、スペクトルとは相補的

- ・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

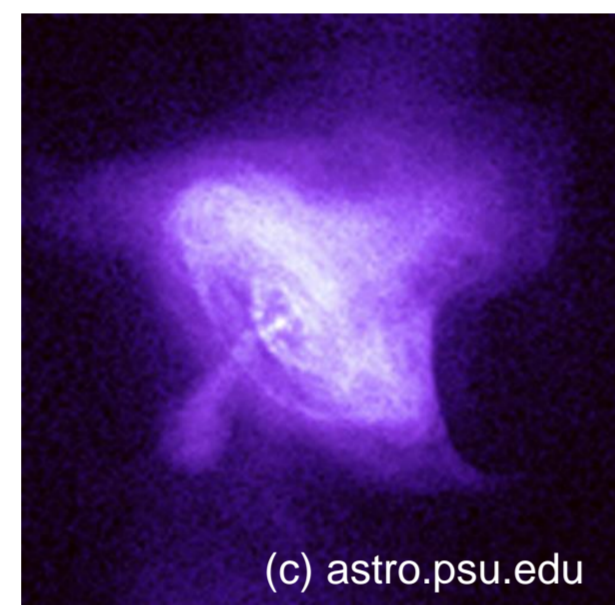
異なるエネルギー帯域 ⇔ 異なるエネルギーの粒子・場所を観測

- ・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

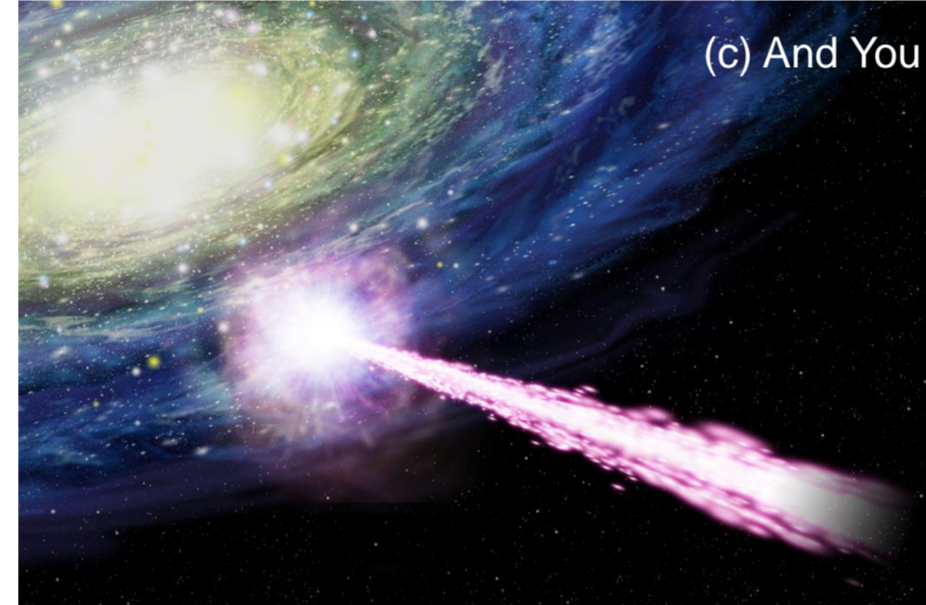
Cyg X-1 (ブラックホール連星系)



カニ星雲(パルサー)

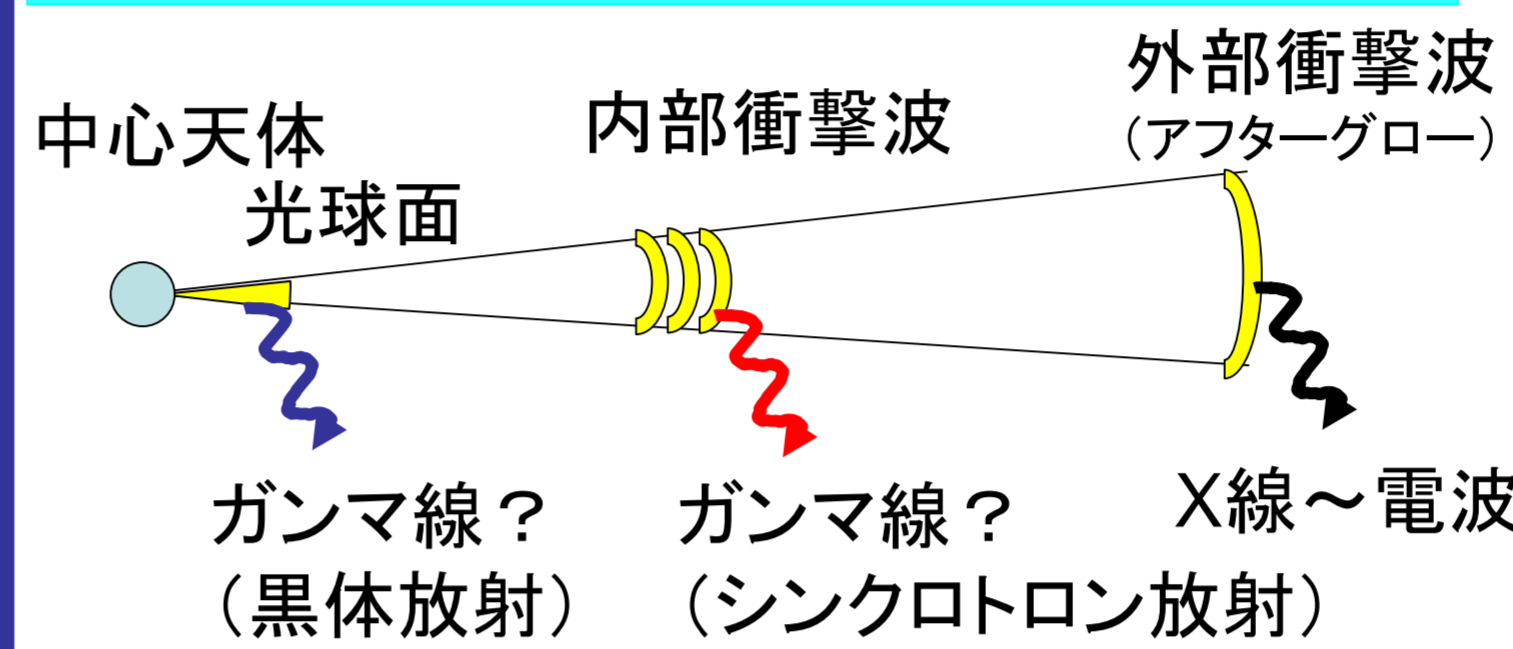


ガンマ線バースト

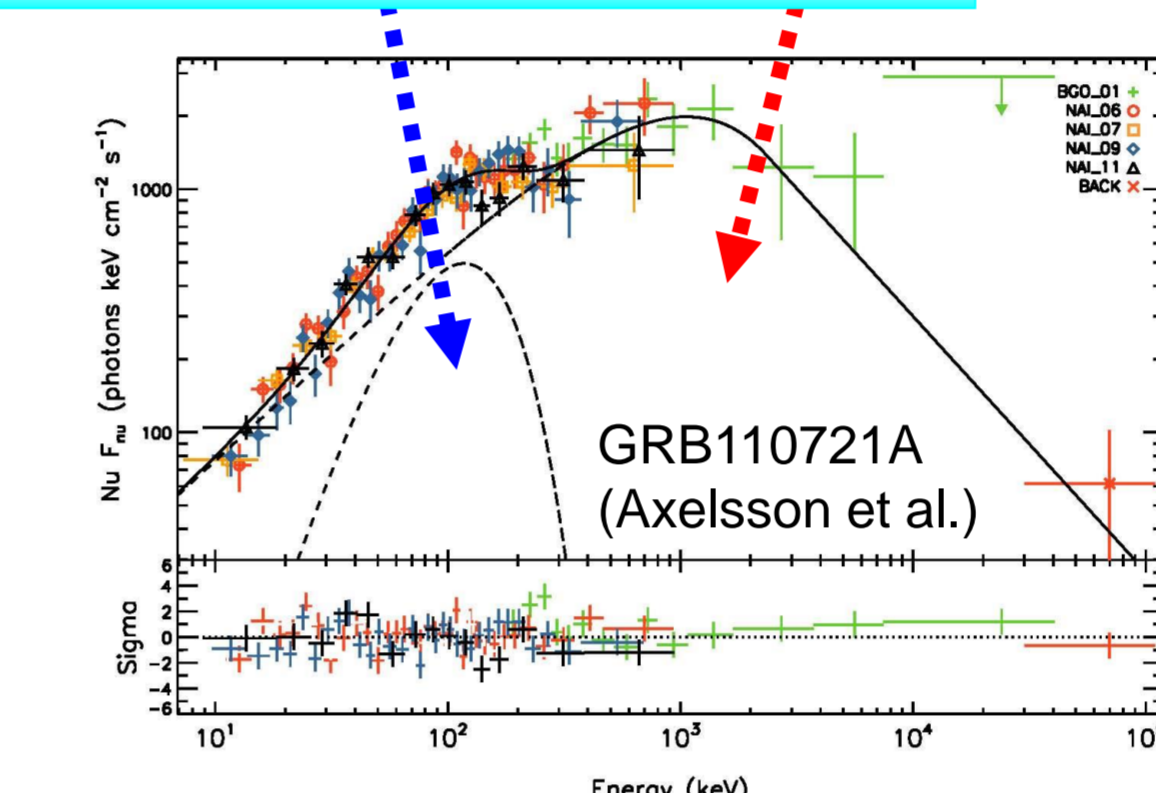


将来計画:SPHiNX衛星計画(2021年~)

GRB(相対論的ジェット)の模式図



エネルギースペクトル例



GRBジェットの放射メカニズム?

(基本)ガンマ線スペクトルはベキ型
数100 keVに折れ曲がり

- ただし、
- ・折れ曲がり急峻である(シンクロトロン放射の予想よりも)
 - ⇒ シンクロトロン放射かの検証が必要
 - ・2成分が観測されることがある
 - ⇒ 黒体放射成分の存在の検証が必要

偏光観測により、

- ・統計的に偏光度の分布を求める
シンクロトロン放射: 高い(~40%にピーク)
黒体放射: 低い(0%にピーク)
- 明るいGRBについて
- ・エネルギー依存性を調べる
数100 keV: シンクロトロン放射
数10 keV: 黒体放射 と2成分存在?
- ・時間変動を調べる
変化があれば、ジェットの構造に制限

GRB偏光検出器

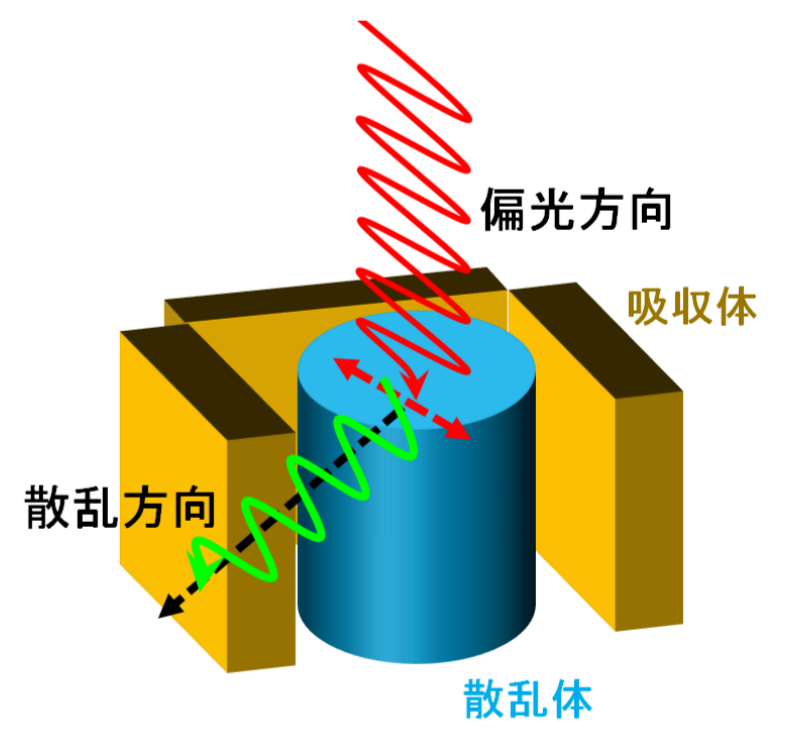
| 検出器 | 偏光観測に特化 | | | 偏光観測も可能 | |
|--------------|---------|--------|------------------|------------------------------------|----------|
| | GAP | POLAR | SPHiNX | INTEGRAL | ASTROSAT |
| 検出器重量(kg) | 4 | 30 | 15 そこそこ大 | 680 inc. Mask 188 Shield 193 | 50 |
| エネルギー帯域(keV) | 70-300 | 50-500 | 30-600 低Eをカバー | 200-800 | 100-300 |
| 偏光検出例 | 数 | 未報告 | 予想~10/年 | 数 | ~10 |

SPHiNX (Segmented Polarimeter for High eNergy X-rays)

- ・偏光に特化した対称性の良い検出器で、質の良いサンプルを増やす
=> 地上での較正実験が重要(シンクロトロン光@SPring-8を計画)
- ・検出器のセグメント化により
スレッシュホールドを低くし、数10 keVの低エネルギー側から偏光情報を取得
=> 黒体放射成分の有無を検証する
広視野(~120°)かつ自身で位置決め(精度~数°)
=> GRB偏光観測に加え、突発天体も探査(太陽フレア、重力波天体など)

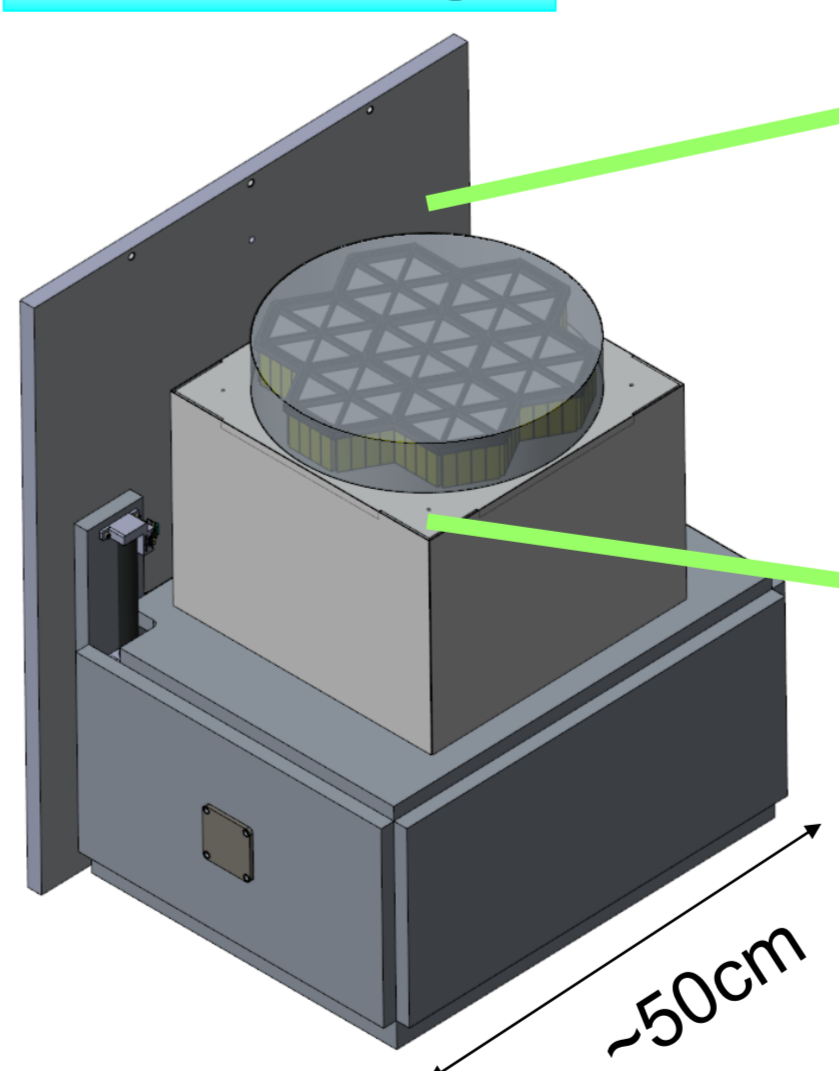
偏光検出の原理

コンプトン散乱の異方性を検出(偏光方向と垂直に散乱しやすい)

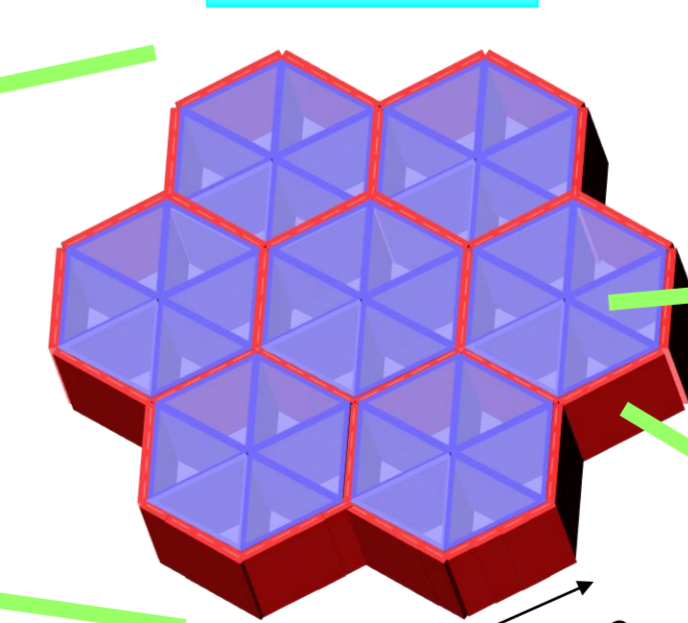


- ・日本スウェーデンの国際ミッション、50kg級小型衛星
- ・現在Phase-A/B1 => 2021年打ち上げ予定
2017年末に、現在の3候補から最終1ミッションが採択
- ・現在、日本が関わる唯一のコンプトン散乱型偏光計
=> PoGO+、「ひとみ」SGDのノウハウの継承・発展

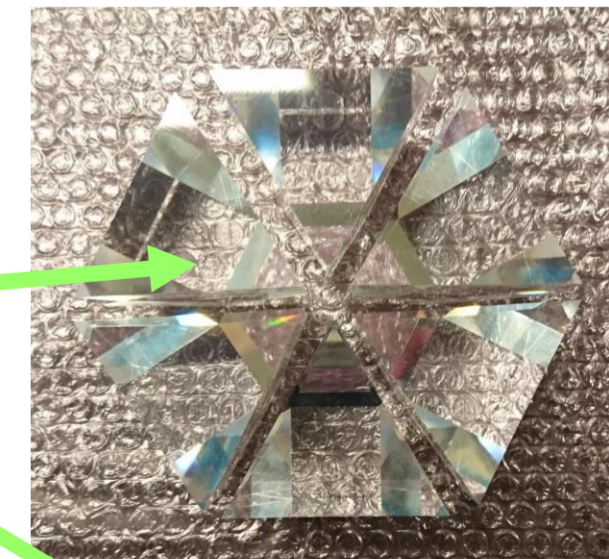
衛星(50kg)



偏光計

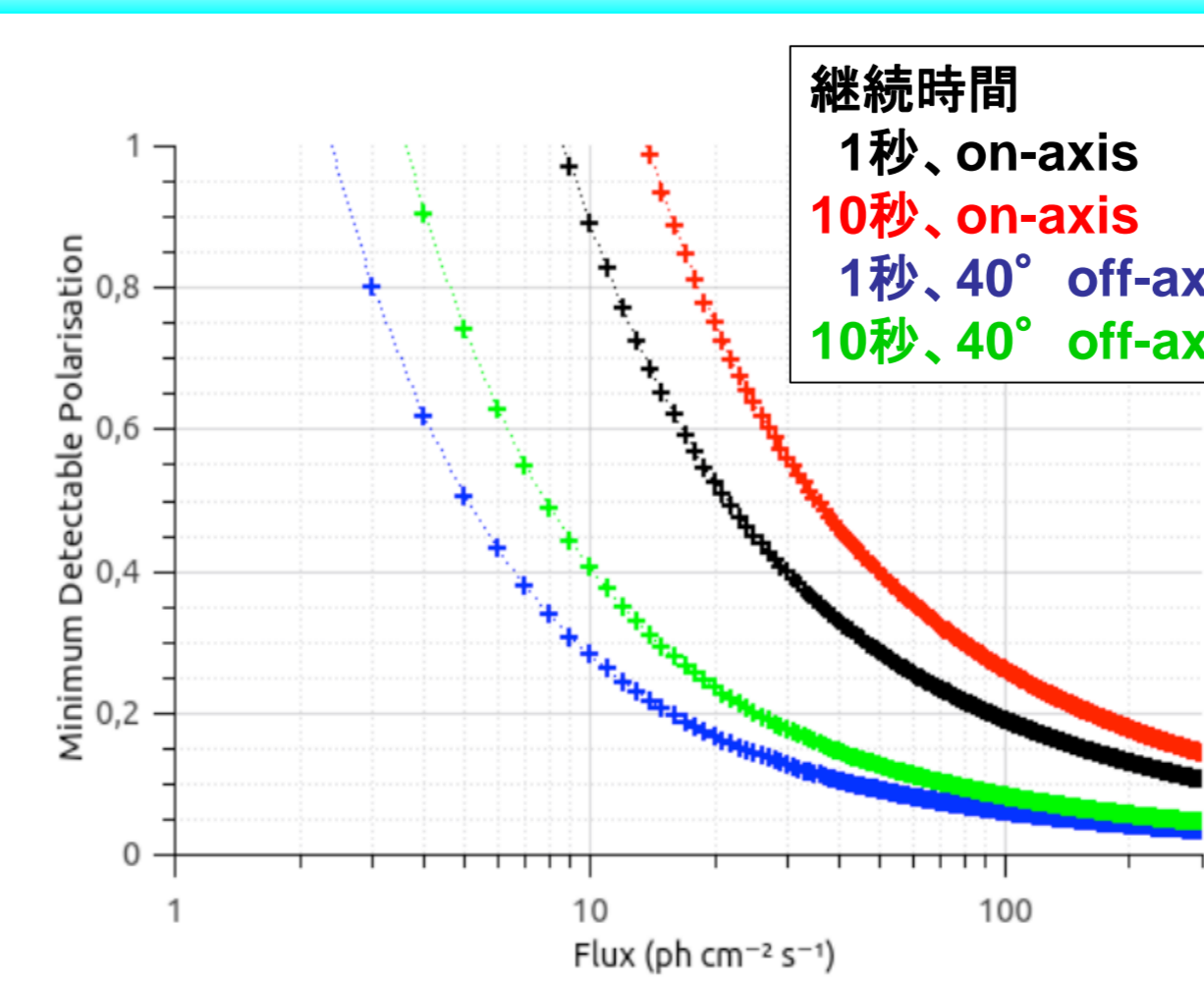


散乱体: プラスチックシンチレータ: 42個
光電子増倍管で読み出し
吸収体: GAGGシンチレータ: 120個
MPPCで読み出し



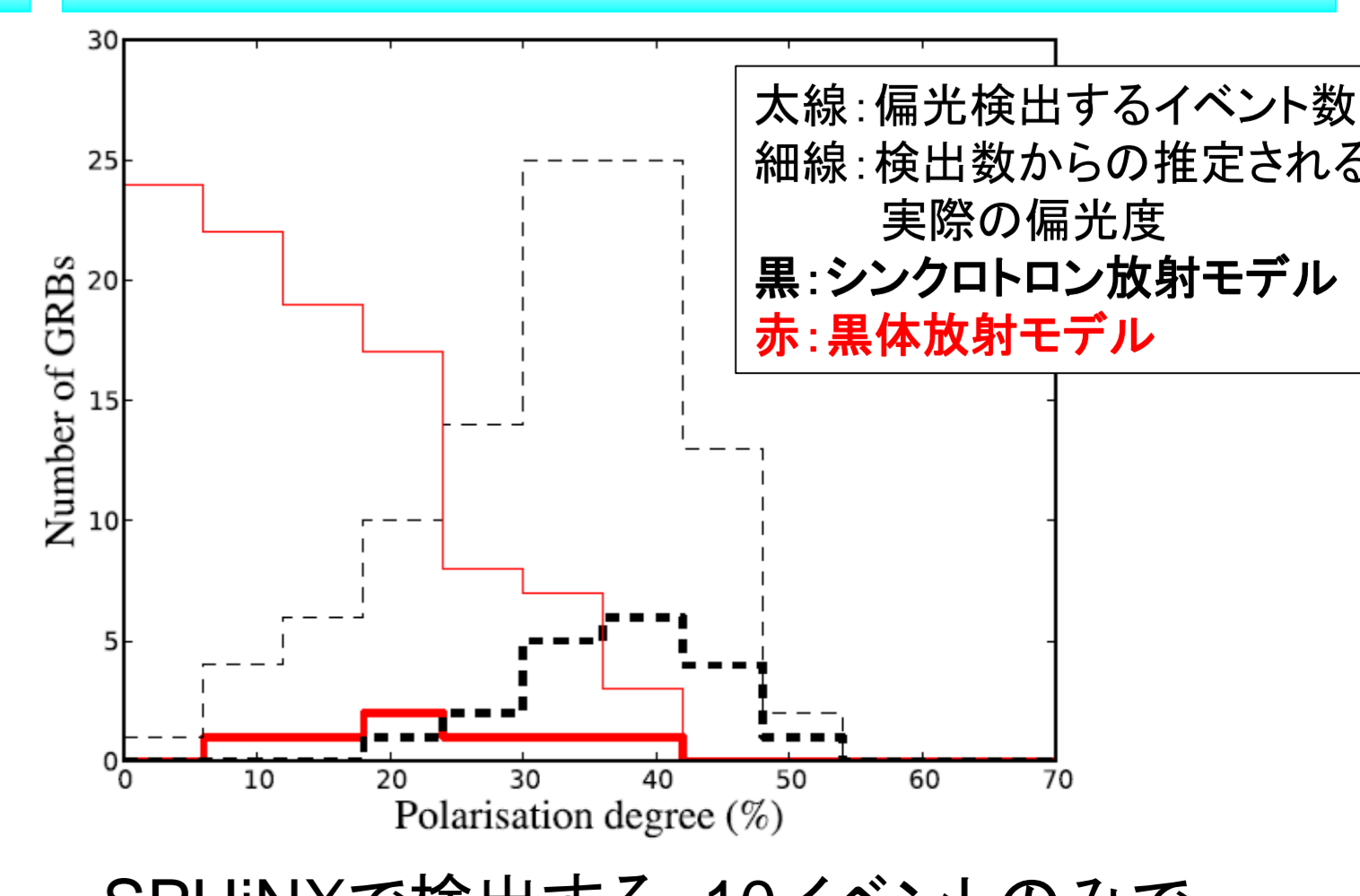
プラスチック
原子番号: 小
=> 散乱体に最適
GAGG($Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$)
光量大: 60000光子/MeV
密度大: 6.63 g/cm³
=> 吸収体に向いている

最低検出可能偏光度(MDP)予想



明るいGRBでは~10%の偏光を検出

偏光度の頻度分布(1年間)予想



SPHiNXで検出する~10イベントのみでモデルの判定が可能と見積もっている

我々の最新成果:硬X線偏光検出器PoGO+気球

硬X線による偏光観測に世界で初めて成功(20-160 keV)
かに星雲でのシンクロトロン放射 (Chauvin et al. 2017)
Cyg X-1 (low/hard状態)での反射成分=> 解析中

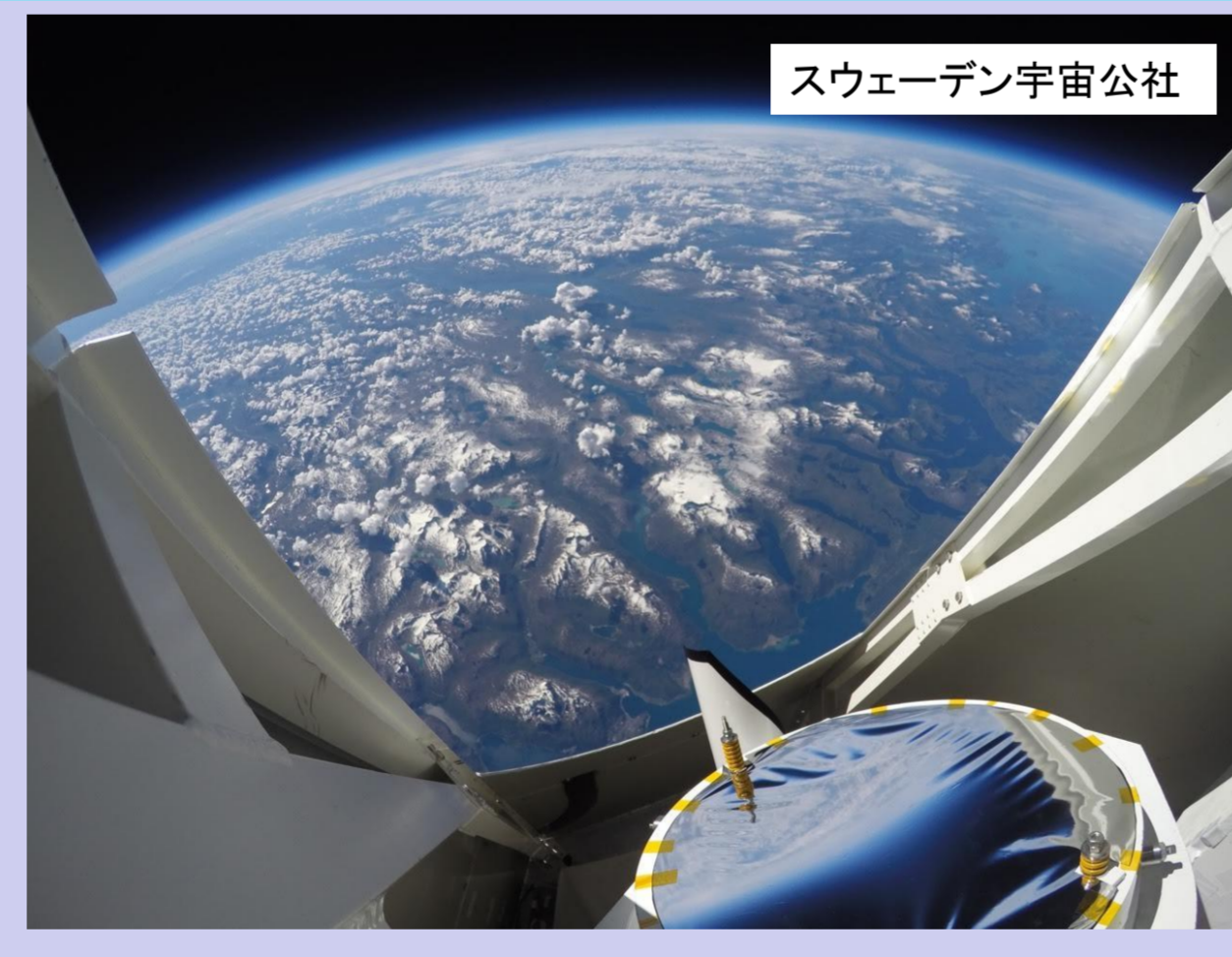
2016年7月12日~18日に7日間のフライトを実施し、上空40kmからカニ星雲とCyg X-1を観測した。

放球の様子@YouTube: PoGO+ Balloon Launch

PoGO+放球直前のゴンドラ

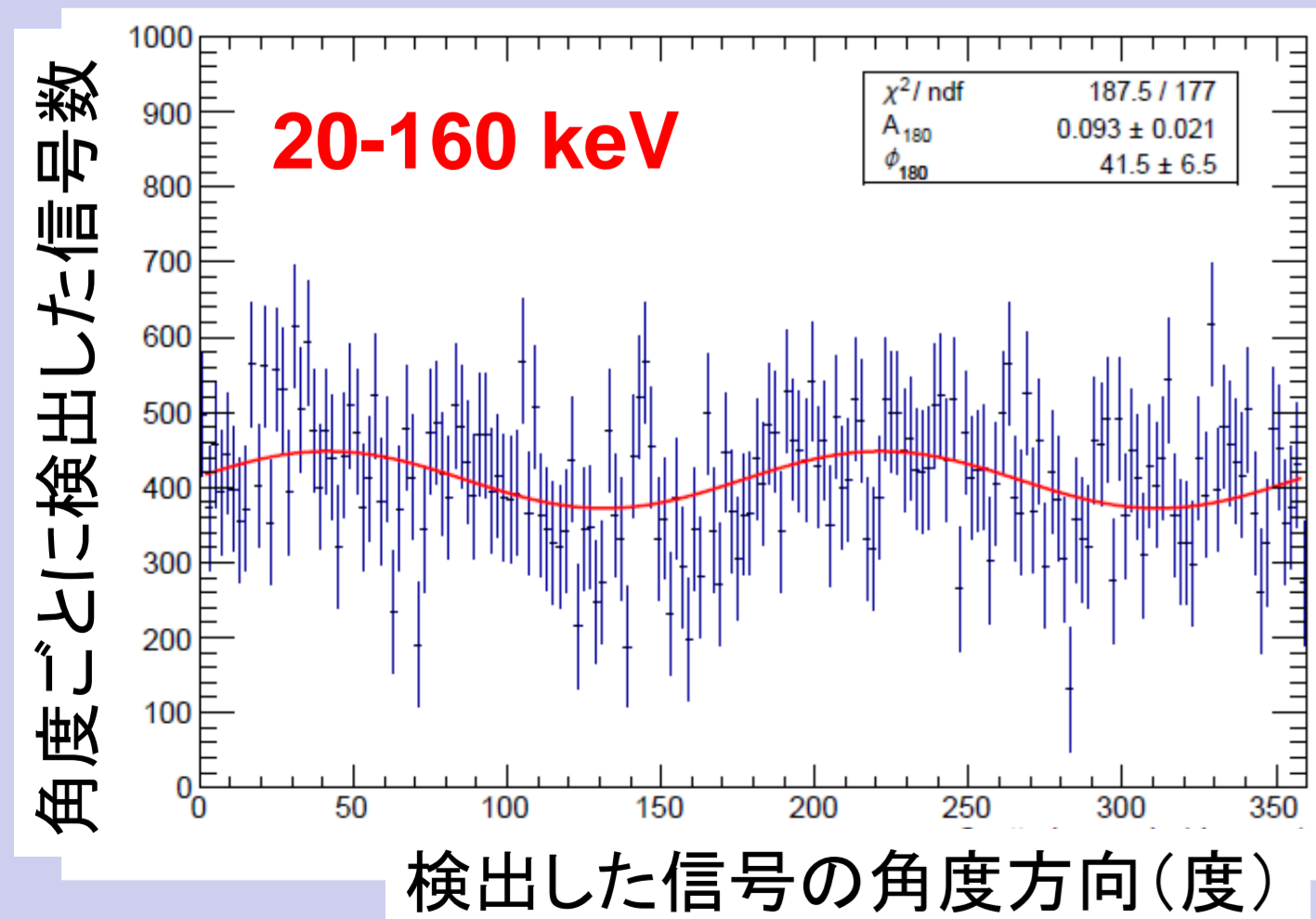


フライト中(高度40km)のカメラ撮影



2016年のフライトで得られたカニ星雲の偏光情報

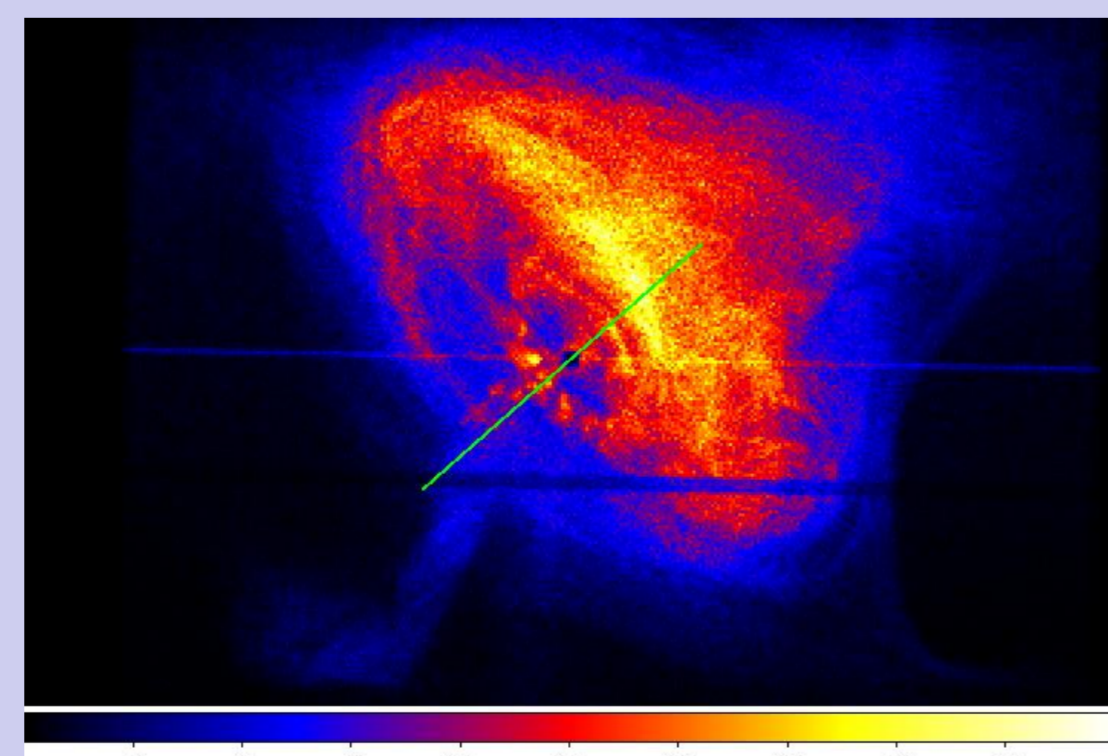
15分おきに観測したバックグラウンドを差し引いてある



偏光度: $(20.9 \pm 5.0)\%$
偏光方位角: $(131.3 \pm 6.8)^\circ$

2013年のフライトで得た上限値とも一致 (Chauvin et al. 2016)
=> 磁場構造に大きな変化は起こっていない

X線イメージ(Chandra衛星)
硬X線の偏光方位角(緑線)



- ・硬X線の偏光方位角: ジェットに平行
⇔ 磁場はトロイダル方向(が支配的)
- ・偏光度は、X線(OSO-8衛星)の結果と一致
X線データ:
磁場はトロイダル成分だけではなく、ランダムな成分の寄与が報告されている。
今回の硬X線データ(寿命の短い):
より加速現場に近い場所で、すでに磁場が乱れていることが分かった。
・今後、理論研究との比較が重要。