

X線ガンマ線 偏光観測 小型衛星 Polaris

林田清、穴吹直久、常深博(阪大)、村上敏夫、米徳大輔(金沢大)、
郡司修一、門叶冬樹、櫻井敬久、柴田晋平(山形大)、三原建弘、玉川徹(理研)、
堂谷忠靖、斎藤芳隆、田村啓輔、小浜光洋(JAXA)、小賀坂康志(JST)、
古澤彰浩、桜井郁也(名大)、水野恒史、高橋弘充(広島大)、片岡淳(早大)、
谷津陽一(東工大)、北本俊二(立教大)、谷森達、窪秀利、身内賢太郎(京大)、
川口俊宏(つくば大)
+定本真明(阪大)

*) total 27 members in Polaris WG from 13 institutes in Japan, with international collaboration

Polaris (Polarimetry Satellite)

X線ガンマ線偏光観測専用小型衛星

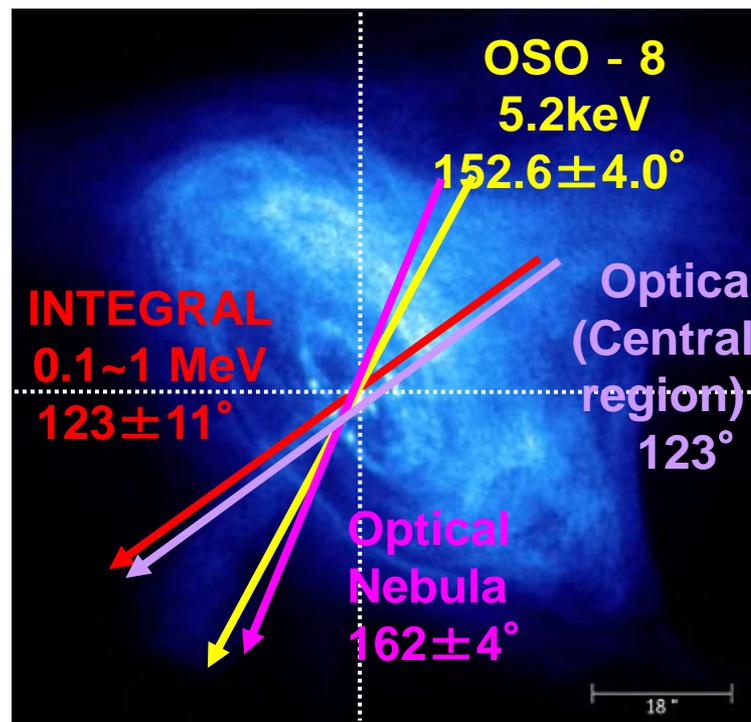
- **>10mCrab天体のワイドバンド (2 -80keV) 偏光観測**
 - 偏光のエネルギー依存性は天体の幾何学と輻射機構の解明に必要な情報
 - 特に多数の天体に関して10-80keVのバンドでの初めて偏光検出を目指す
 - 1台のX線反射鏡(6m F.L.) + ガス撮像偏光計
 - 2台のX線多層膜反射鏡(6m F.L.) + 散乱撮像偏光計
 - X線(多層膜)反射鏡はX線集光によって実効的なバックグラウンドを削減し、10mCrabの天体に対する感度を実現するために必要。
- 広視野散乱偏光計によるガンマ線バースト(GRB)の偏光観測 ~10bursts/year
 - 運用中のIKAROS搭載GAPの発展系

X線天文学の現状と偏光観測

- 1970'年代にかに星雲のX線偏光検出
(~19% @ 2.6keV, 5.2keV)
 - 他の天体では有意な偏光は検出されていない
 - c.f. カタログ化されているX線天体は数十万個
- INTEGRAL衛星が軟ガンマ領域(0.1-1MeV)で、かに星雲(2008)、CygX-1(2011)からの偏光検出
- IKAROS GAPがガンマ線バーストの偏光検出(2011)
- 軟X線(<10keV)偏光観測小型衛星GEMSが2014年打ち上げ予定

かに星雲

(背景はChandra衛星X線画像)

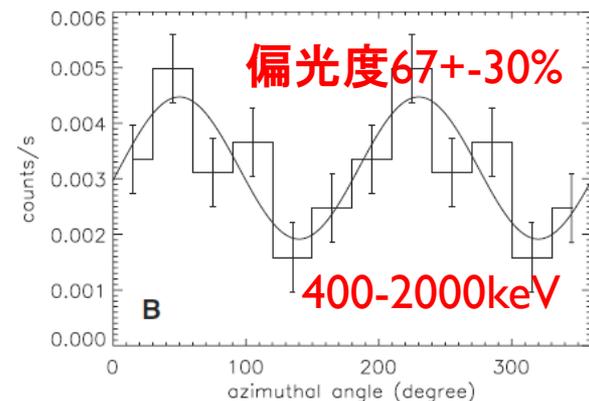
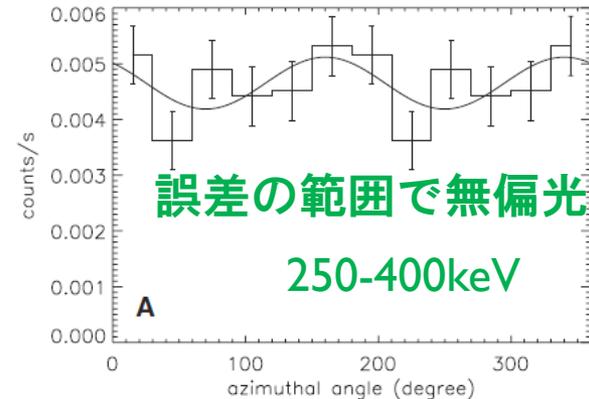
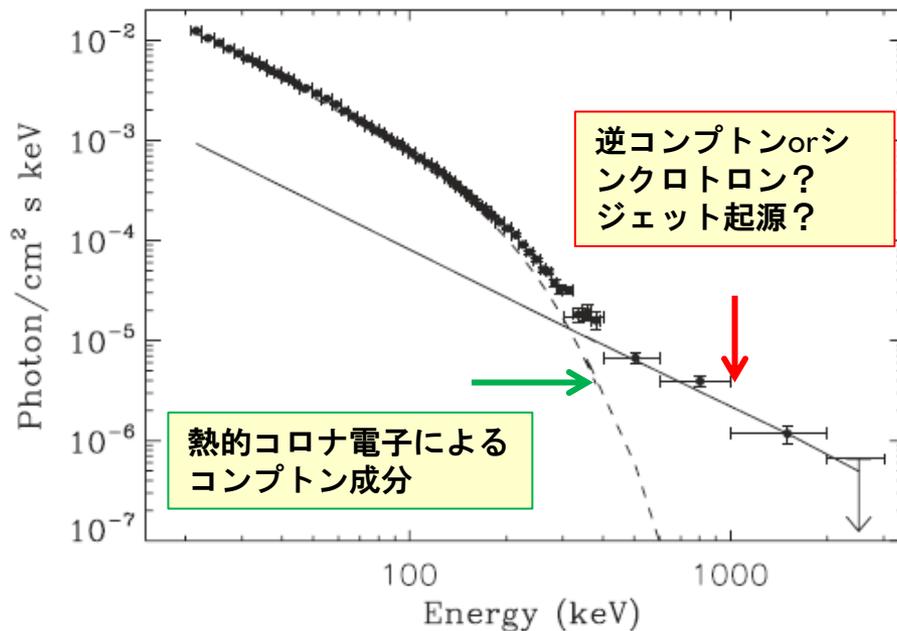


- シンクロトロン放射: 偏光方向は磁場に垂直
- 硬X線領域では?

Polarized Gamma-Ray Emission from the Galactic Black Hole Cygnus X-1

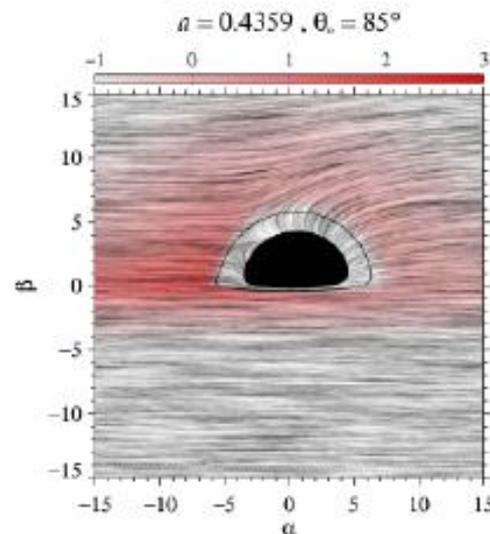
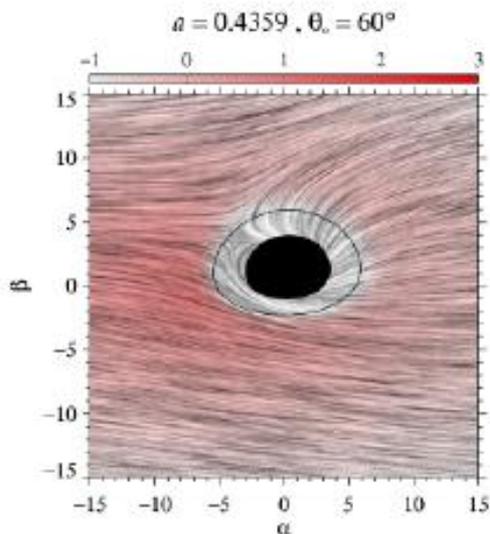
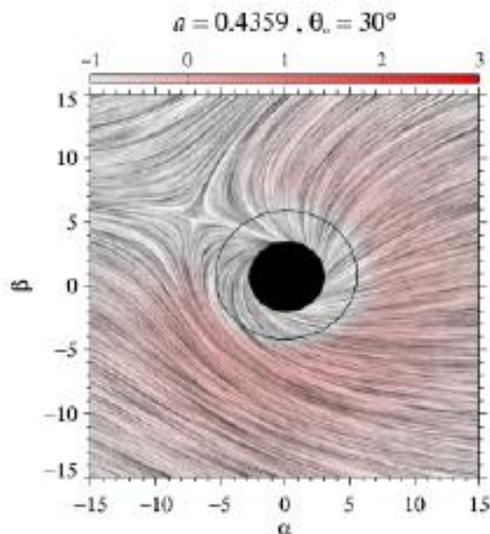
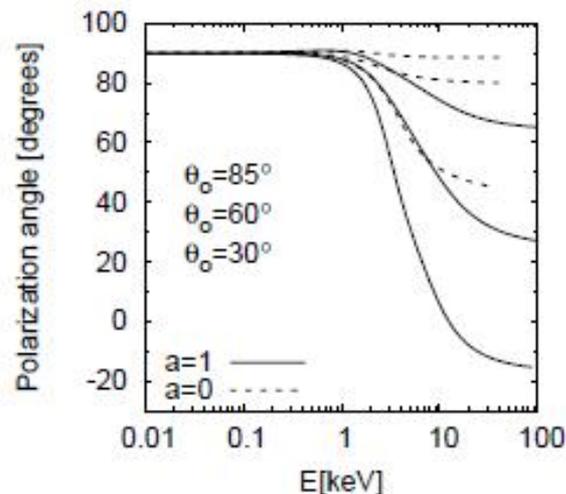
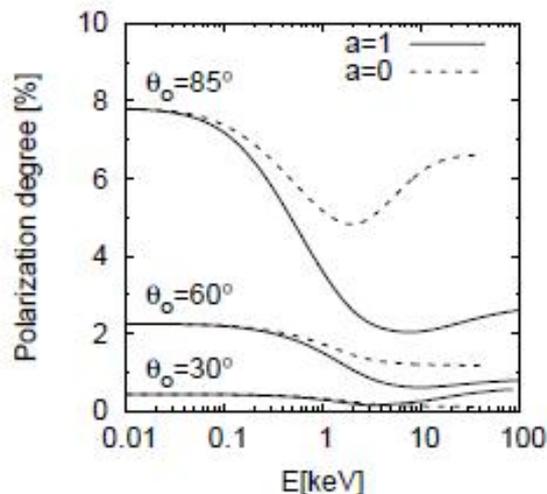
Laurent et al., 2011, Science, 332, 438

- INTEGRAL/IBISでCyg X-1からのガンマ線 (400-2000keV)に67+-30%の偏光検出



熱的な降着円盤からの放射の偏光 (降着円盤表面での散乱)

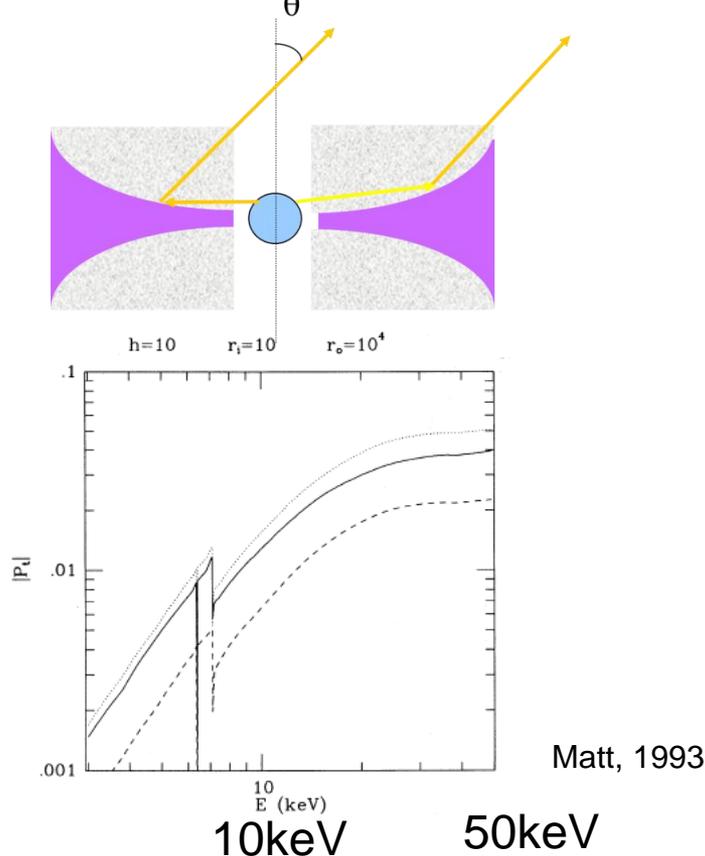
Dovciak et al., 2008, 2009



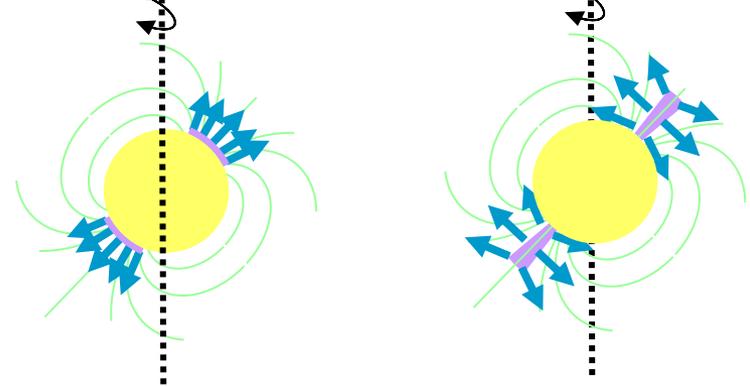
偏光のエネルギー依存性 (理論予想)

直接撮像不可能な構造の偏光観測による検証

■ ブラックホールの降着円盤からの反射成分

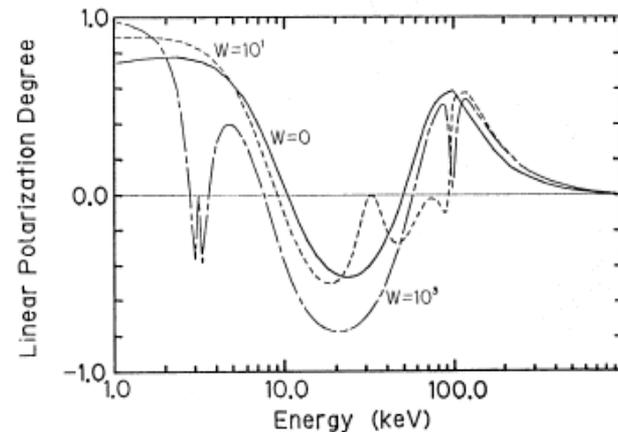


■ X線連星系パルサー



板状降着体: 強度の強いとき偏光度低い

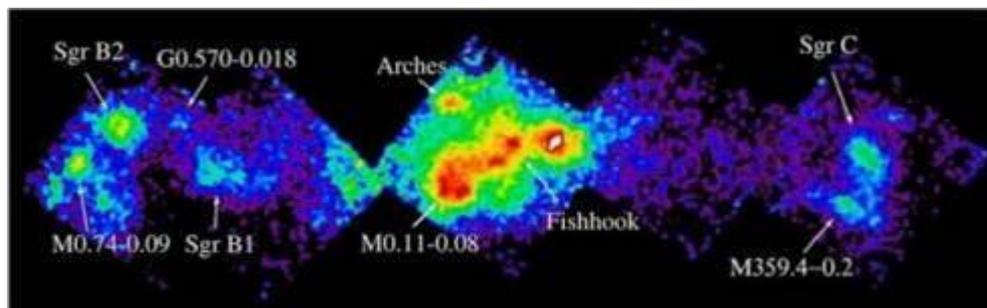
柱状降着体: 強度の強いとき偏光度高い



Kii 1986

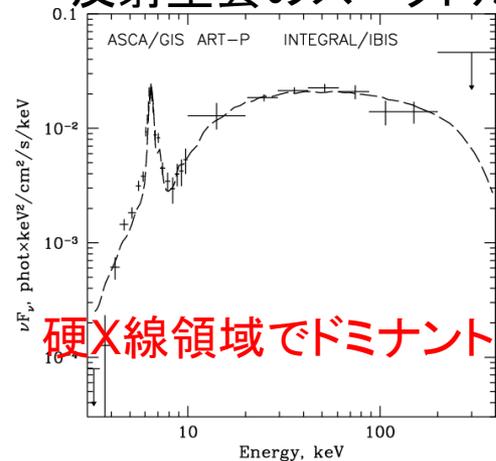
期待される観測例もうひとつ 銀河系中心の反射星雲3Dマップ

Suzaku 6.4keV Map

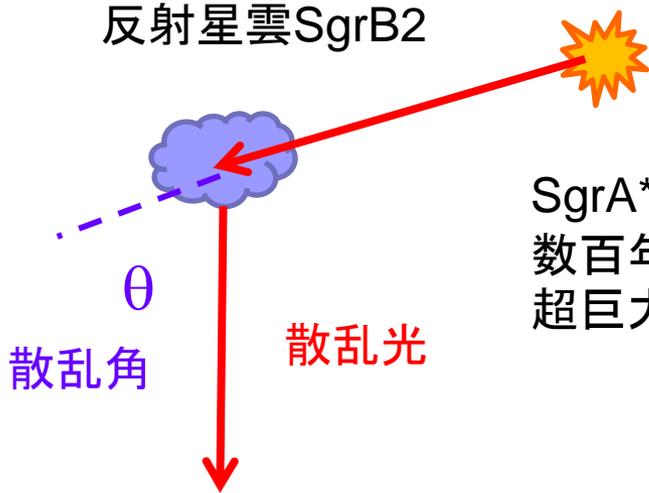


Koyama et al., 2008

反射星雲のスペクトル

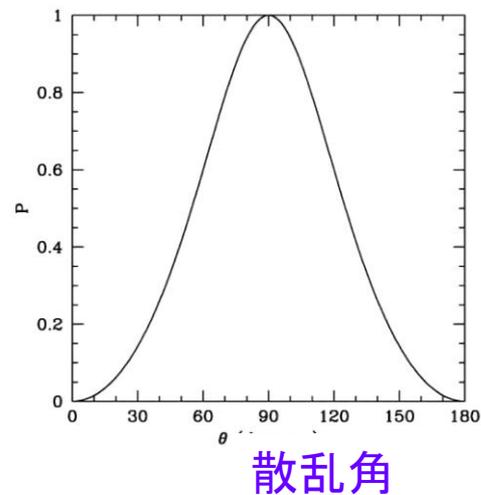


反射星雲SgrB2



SgrA*
数百年前活動的だった
超巨大ブラックホール

散乱光の
偏光度



Churazov et al. 2002

その他

- ブレーザーのX線放射が、全てSSC起源か、外部コンプトンの寄与は無視できるか？
- SNR (SN1006など)の磁場方向、整列度の測定
- AXPのハード成分の起源
- AXPの軟X線成分の観測によるQEDの証明
- ○ ○ ○ ○

Polaris コンポーネント

(多層膜)ミ
ラー:6m \times 3

伸展式光学台

ガス撮像偏光計

散乱撮像偏光計
x2

GRB偏光計
x4

バスシステム~260kg

ベースプレート込み
ミッション部
W=187kg
P=106W
H~6m

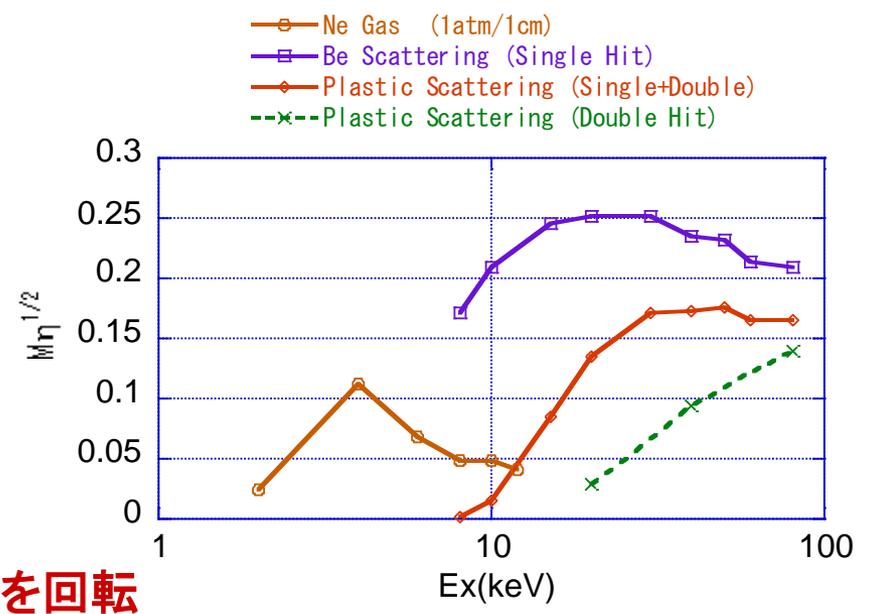
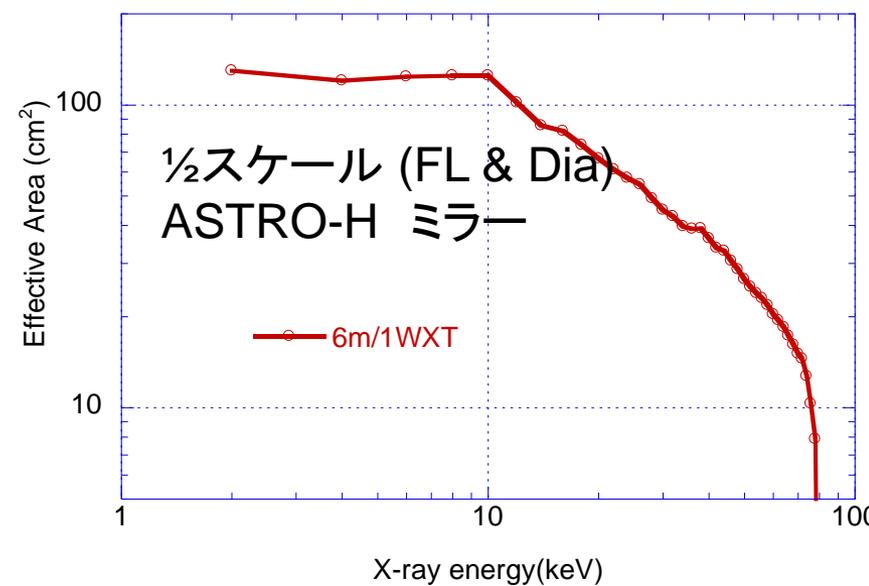
打ち上げ時
H~1m

軌道
LEO 550km, i~30



0.1RPM で衛星全体を回転
(小型衛星でなければ不可能)

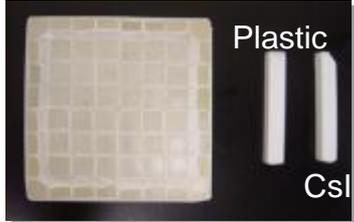
Effective Area of 1 Super-Mirror



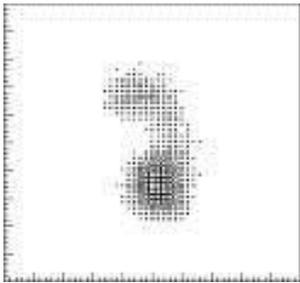
散乱撮像偏光計



PHENEX2006
かに星雲気球実験



ガス撮像偏光計



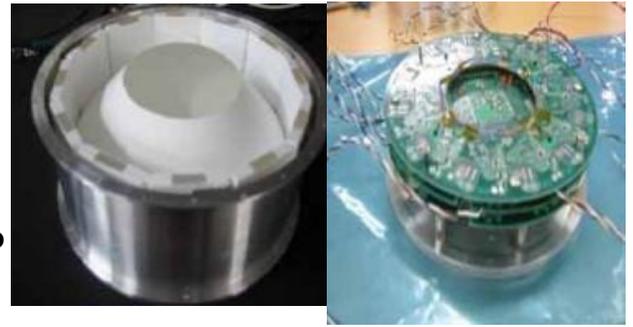
微細電極ガス検出器による
光電子の飛跡の直接撮像



Sealed type MPGD and VLSI-ASIC
Readout System developed by INFN
(Italy) group.

GRB散乱偏 光計

IKAROS/GAP
フライトモデル



硬X線多層膜スーパーミラー



SUMIT2006
Balloon Flight

伸展式光学台EOB

Haruka 1997-2005

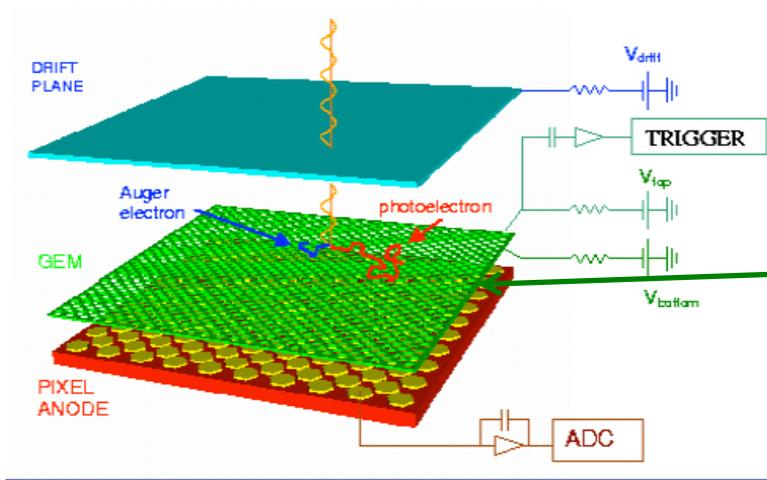


ASTRO-H 2014-

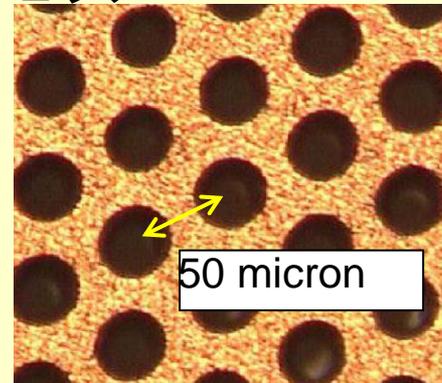


ガス撮像偏光計 (国際協力協議中)

イタリアPisa/INFN GPD system + RIKEN GEM



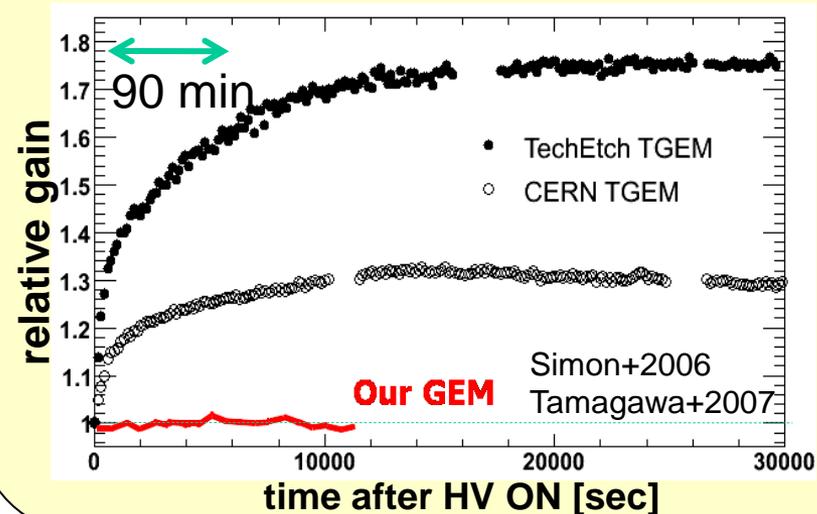
細密なピッチ



Tamagawa+2006

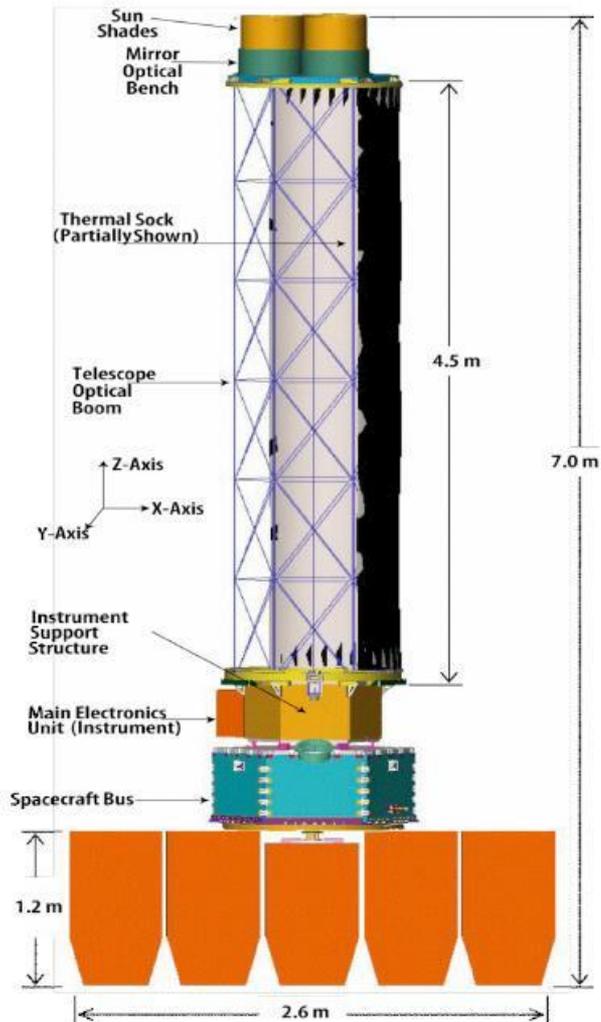


安定なゲイン



GEMS

Gravity and Extreme Magnetism Small Explorer



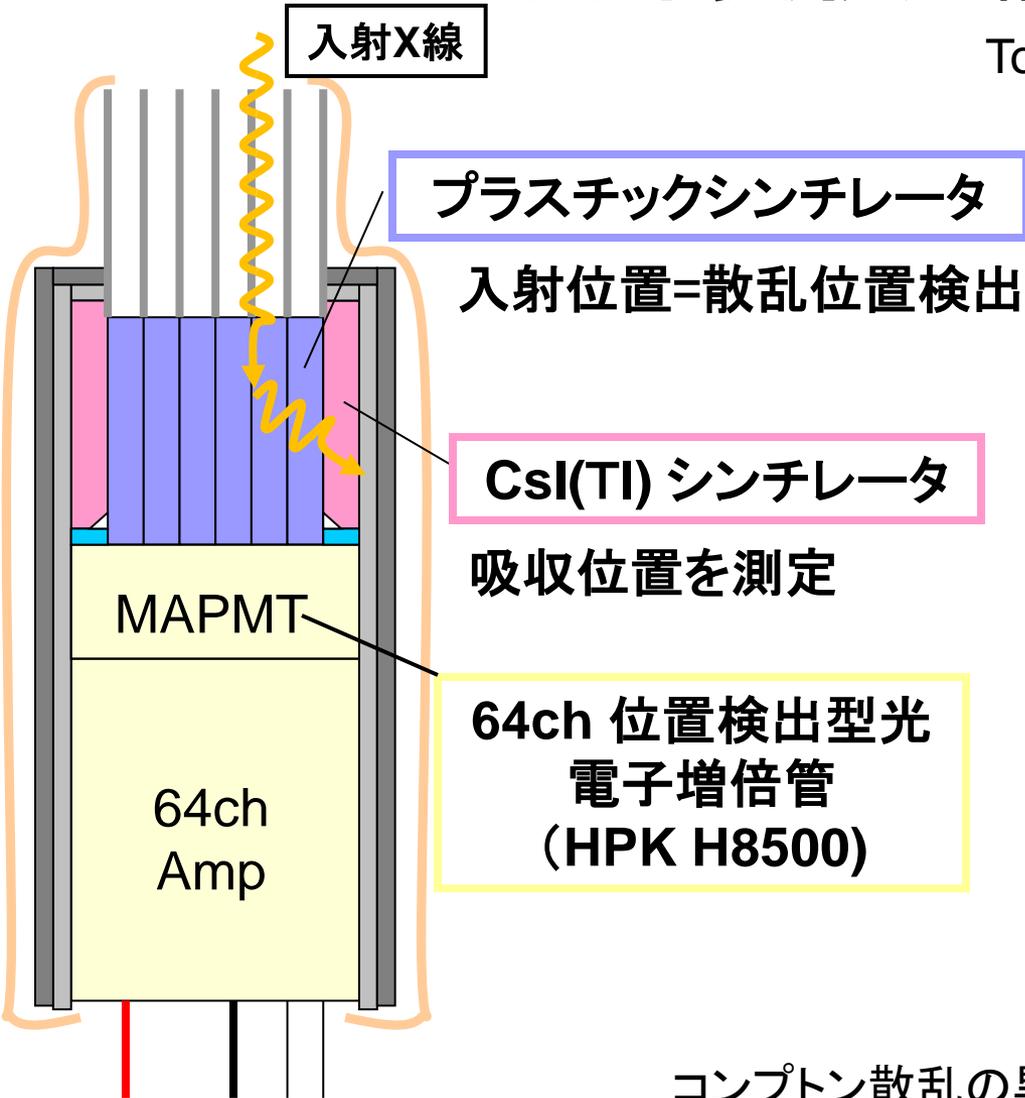
■ NASAのSMEX(小型衛星) ミッション

- 2-10keVのX線偏光専用衛星
- 2014年打ち上げ予定
- PI: G. Swank (GSFC/NASA)
- すざく衛星と同等の軟X線ミラーとGEM使用のTPCガス偏光計
- 理研他開発のGEMを搭載



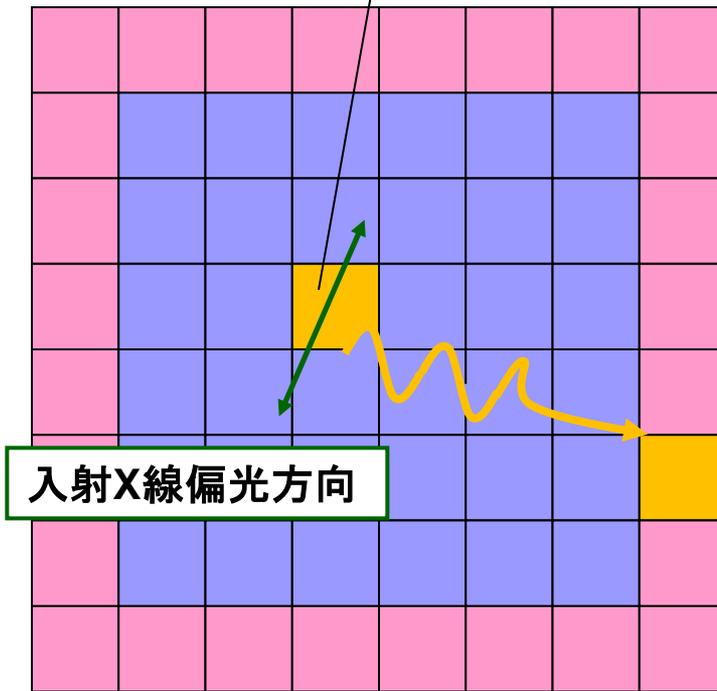
散乱撮像偏光計の原型

PHENEX 気球実験用散乱偏光計

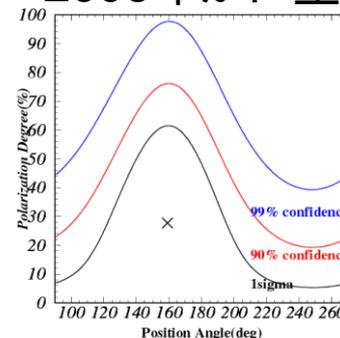


Top view

反跳電子の信号
~5keV for 60keV入射



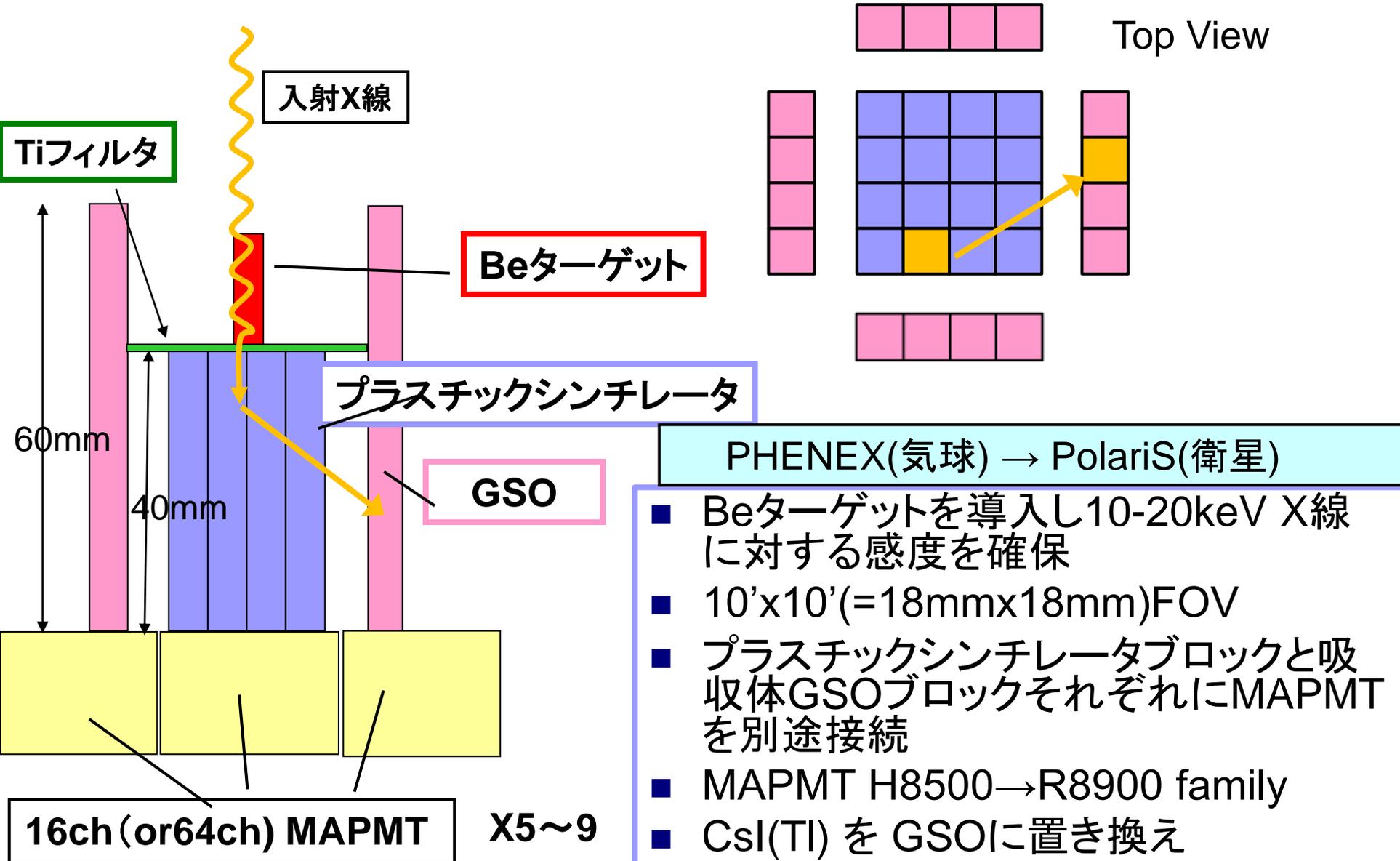
2006年かに星雲の



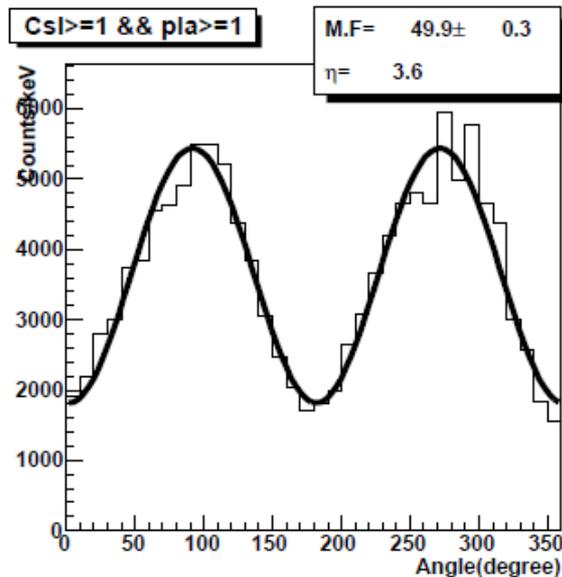
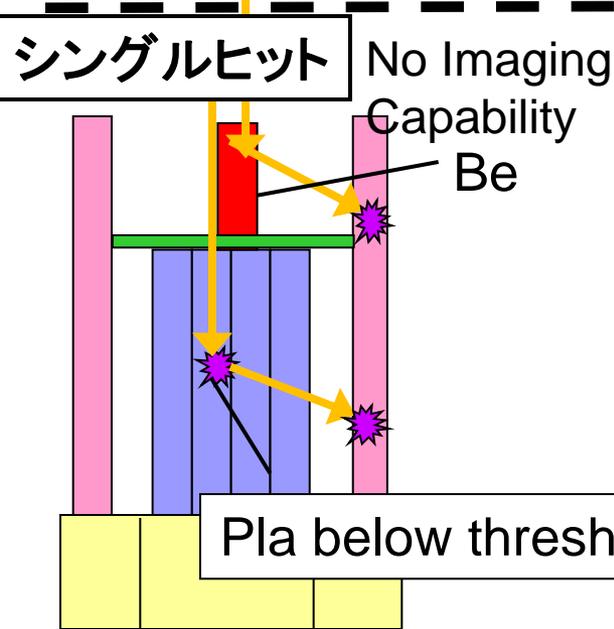
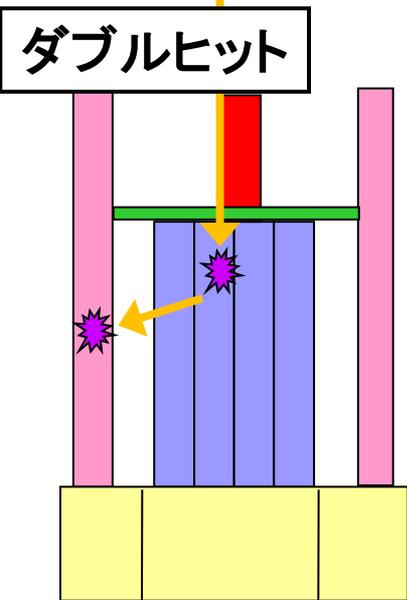
Kishimoto et al., 2007

コンプトン散乱の異方性→偏光方向

PolariS 散乱撮像偏光計



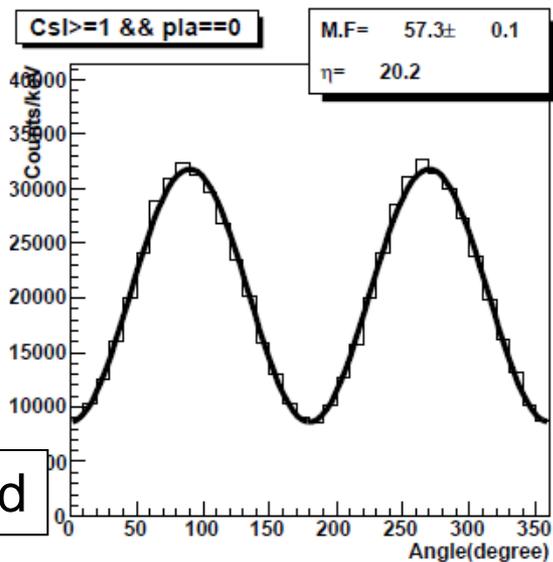
ダブルヒットイベント. シングルヒットイベント



GEANT4 Simulation

η : 3.6%
M: 49.9±0.2%

(40keV beam incidence



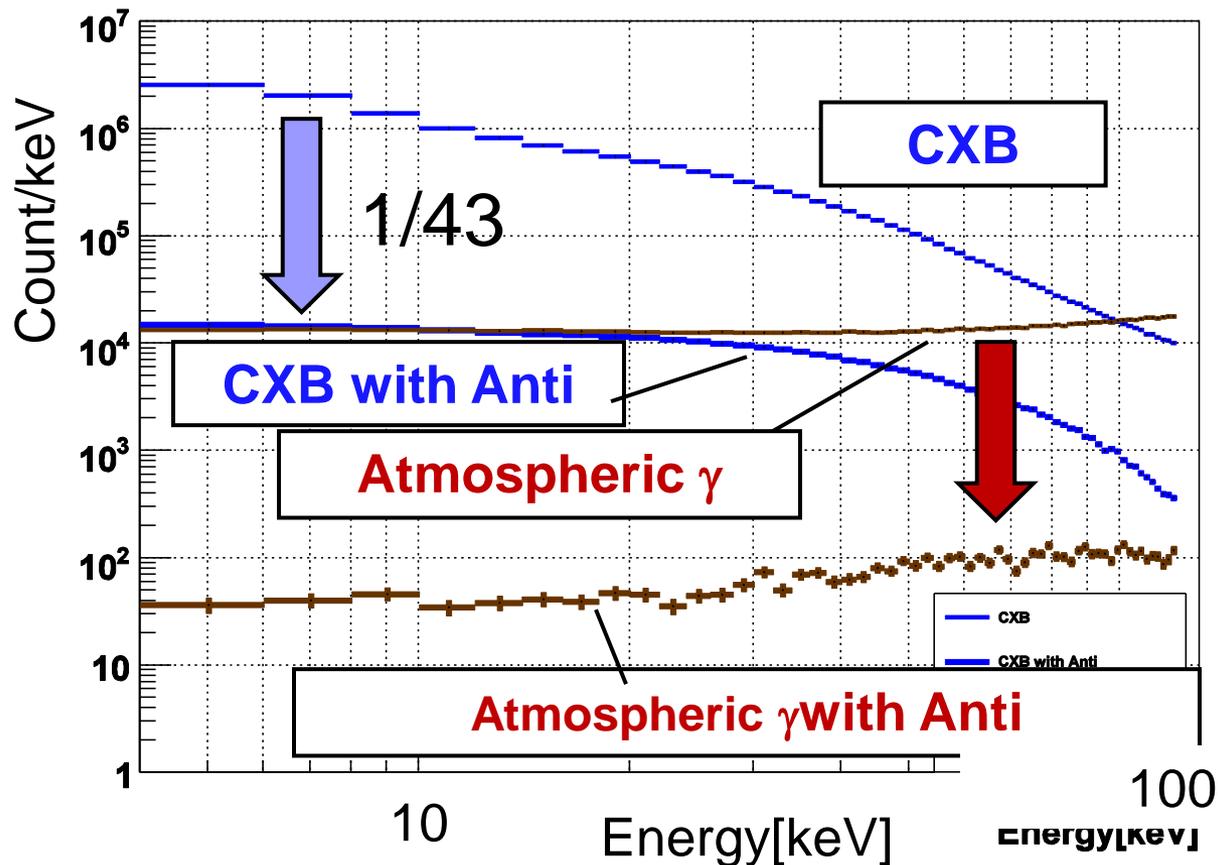
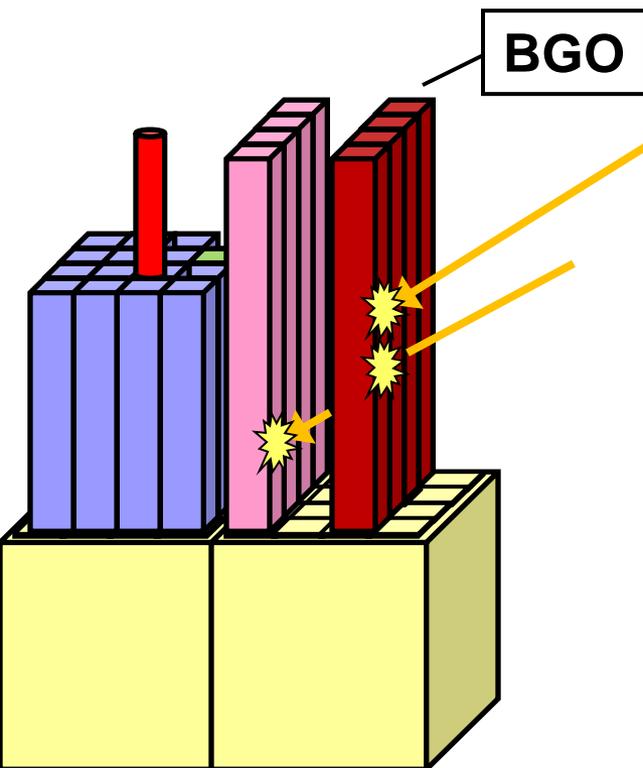
η : 20.2%
M:57.3±0.1%

Light-Leak to adjacent
Ch is considered

By Ohta

バックグラウンド

BGOピラーをANTIとして使用 + Passiveシールド



Passiveシールド

Pb : 2mm

Sn : 1mm

で全体を囲む

残留BGD

(10-80keV)

~30mCrab(プラシンチ全面積分)

イメージングモードでは領域選択でさらに軽減

By Ohta

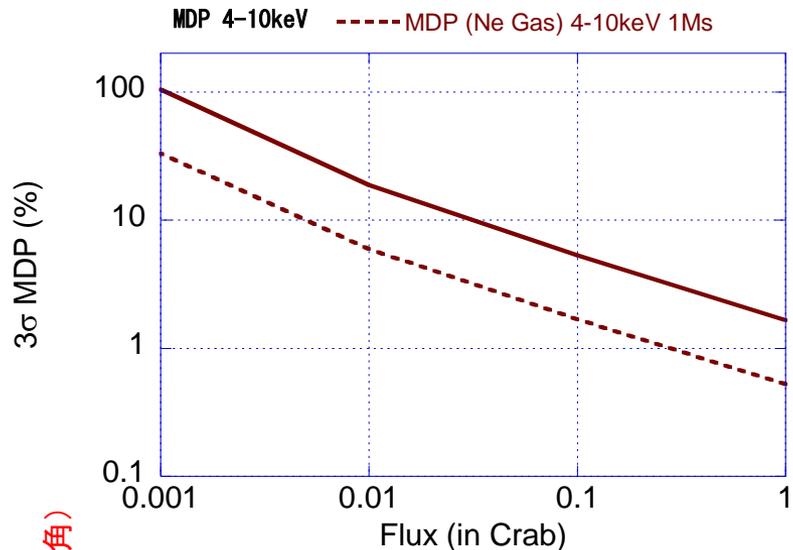
散乱撮像偏光計の偏光検出感度

- +Beターゲット使用
- シングルヒット+ダブルヒットを利用
- BGO-pillars ANTI + passive shield
- 10-30keV band

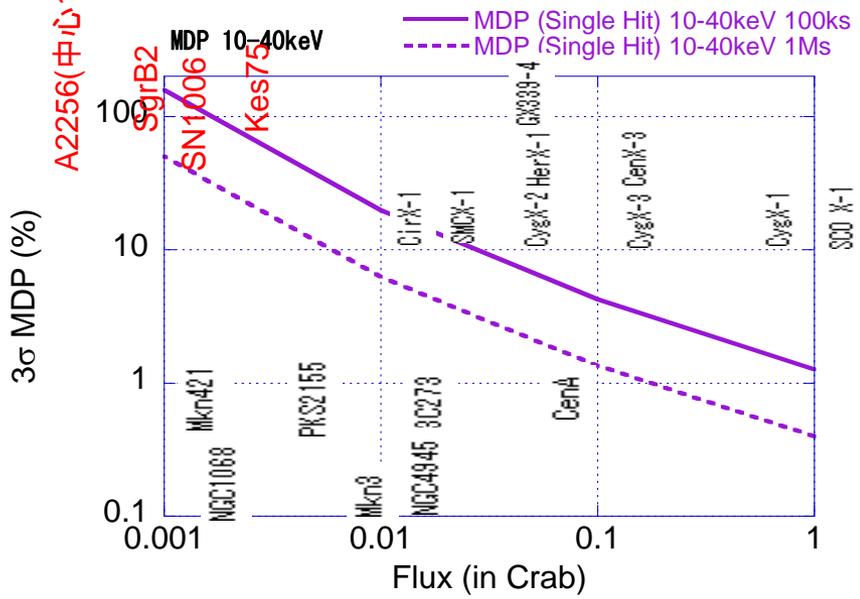
- かに星雲 (P~20% を仮定)
 - 99%信頼度の検出に必要な時間 $T=300s$
- 活動銀河核(10mCrab) $T=1.5Ms$
 - $MDP=9\%$
 - Ch間クロストークを補正できれば $MDP=5\%$ に改善
 - バックグラウンド削減もMDP改善に有効
- c.f. ガス偏光計4-10keV MDP (10mCrab, 1.5Ms)は~5%

予想感度 MDP

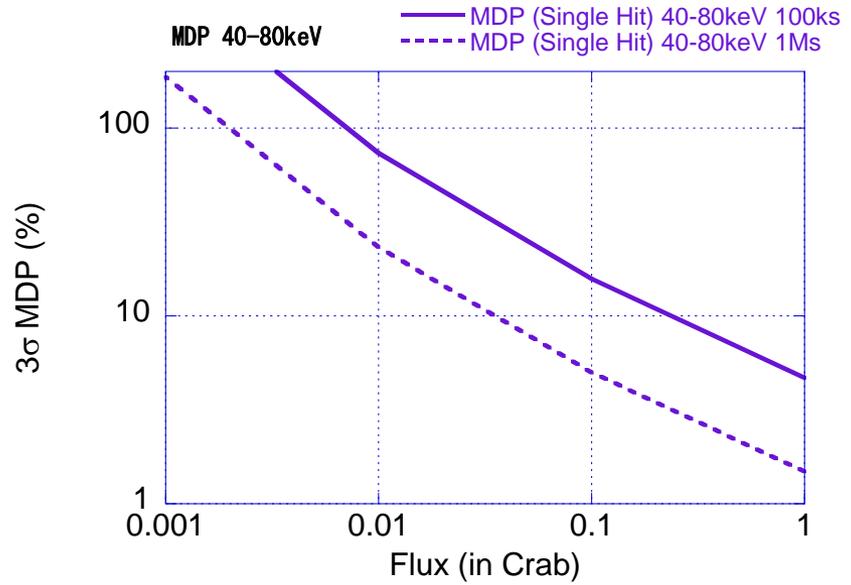
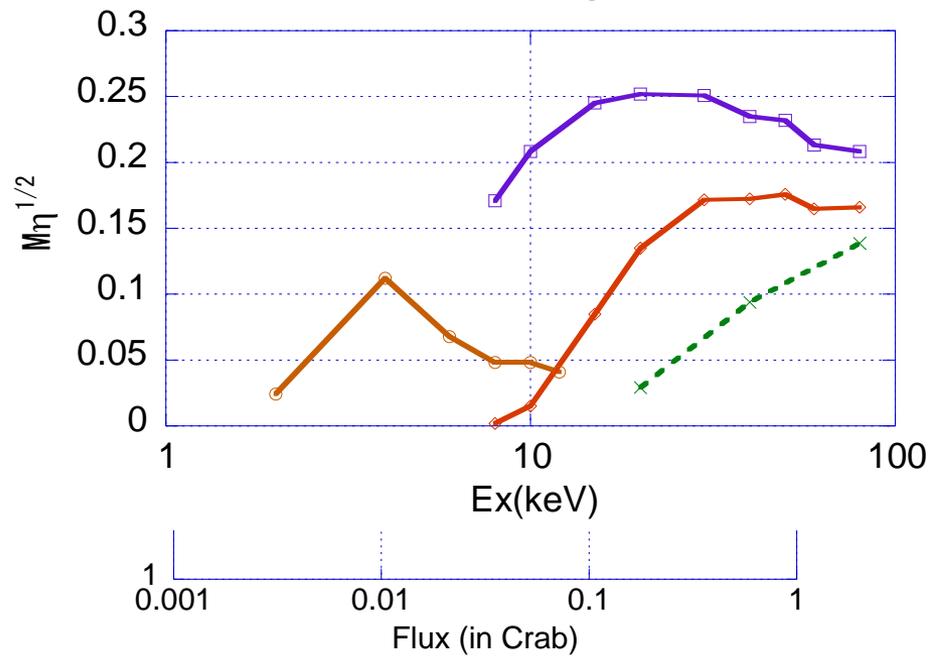
— MDP (Ne Gas) 4-10keV 100ks



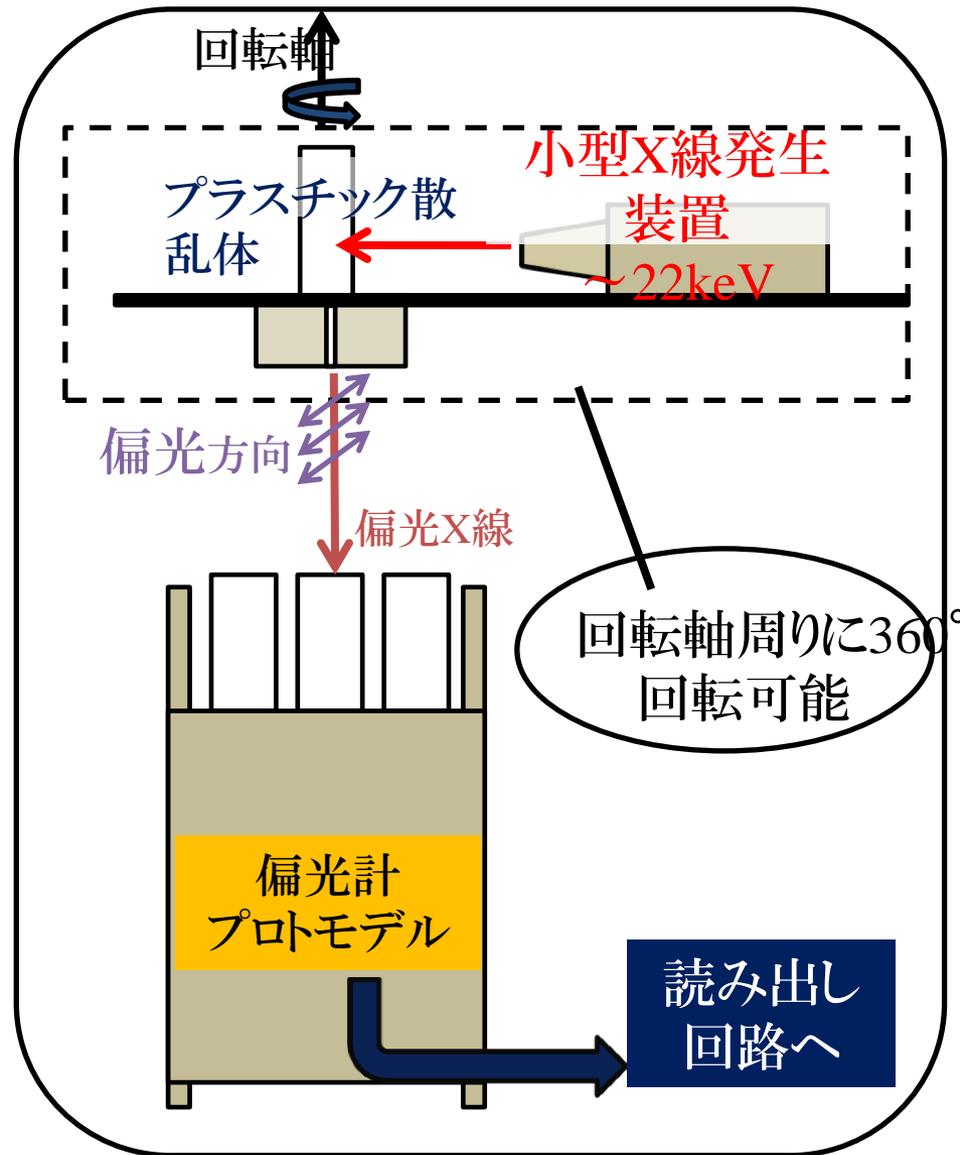
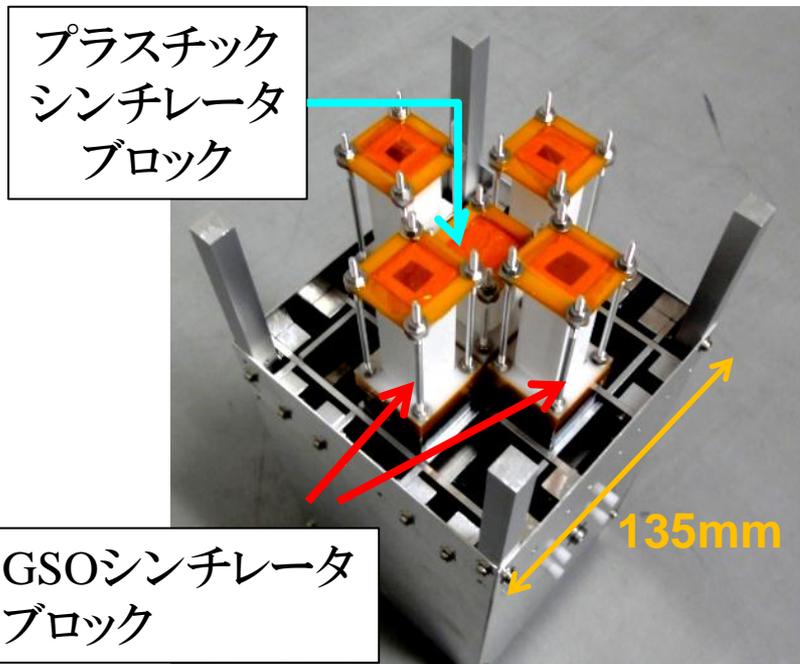
A2256(中心1'角)



- Ne Gas (1atm/1cm)
- Be Scattering (Single Hit)
- ◇— Plastic Scattering (Single+Double)
- - - × - - Plastic Scattering (Double Hit)

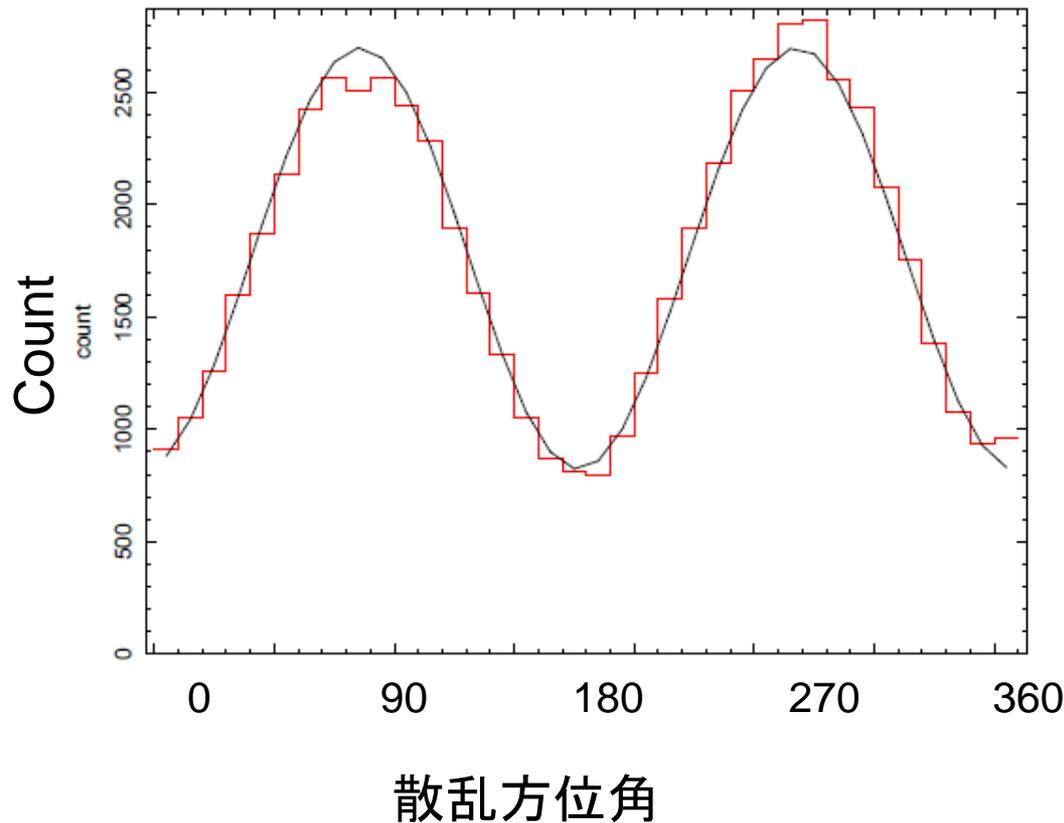


PolariS偏光計プロトモデル 偏光X線照射試験@阪大



22keV X線入射に対する散乱角分布実測

定本(阪大) 2012



$$M = 53.2 \pm 1.6\%$$

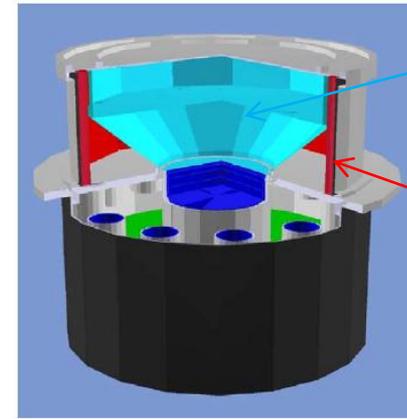
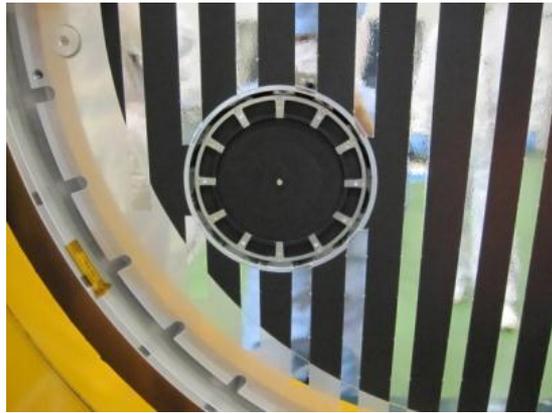
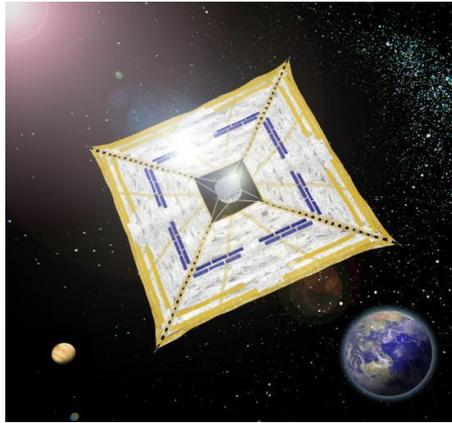
散乱イベントのうち
反跳電子検出した割合

$$18.4 \pm 0.1\%$$

c.f. 先のシミュレーションでは2keV以下を全てカットする設定にしており、3%

- ⇒
- Mが50%以上と高い。
 - データ選別方法の見直しにより、反跳電子信号の検出効率をシミュレーションの6倍に向上させた。

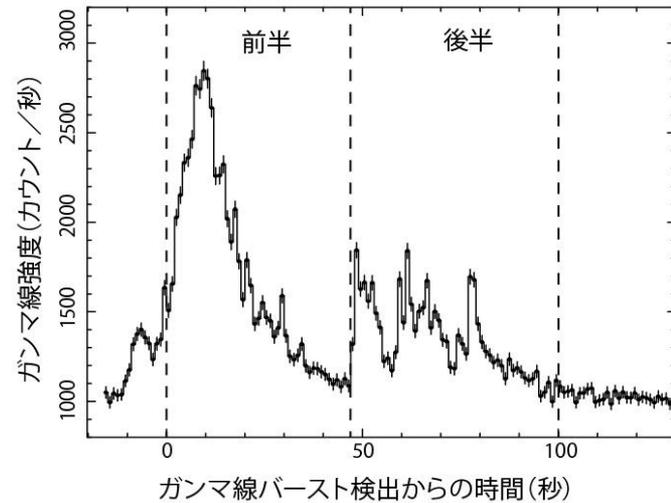
IKAROS GAP 2010-



プラスチック
シンチレータ

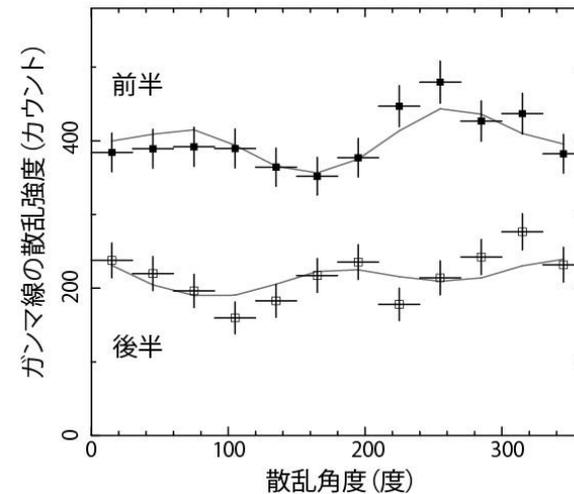
CsIシンチ
レータ

ガンマ線バーストGRB100826A



Yonetoku et al., 2011

散乱角度分布



	偏光度	偏光角
前半	25 ± 15%	159 ± 18度
後半	31 ± 21%	75 ± 20度

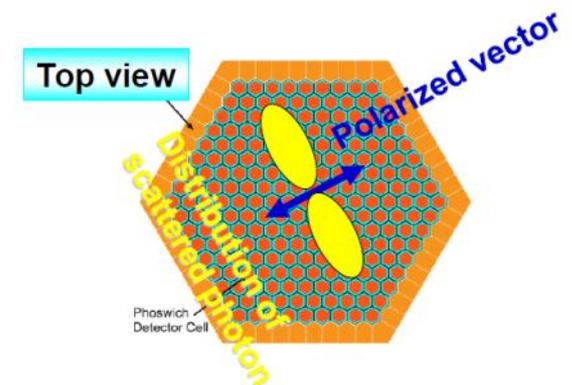
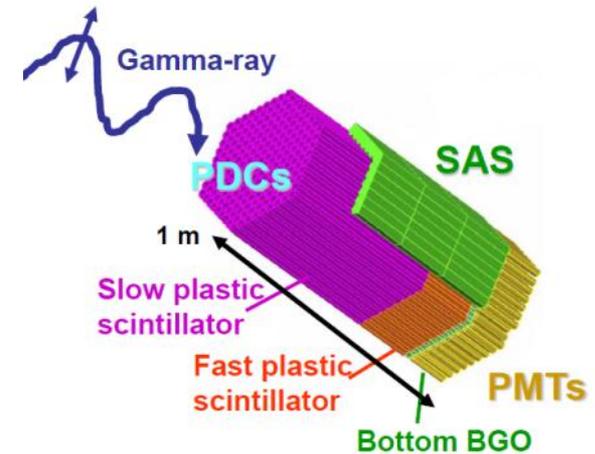
ガンマ線バーストの想像図

- (1) 重い星が爆発してブラックホールが誕生すると、中心からほぼ光速のジェットが飛び出す。
- (2) 「ガンマ線の偏光が検出された」ことから、放射領域には数万ガウス程度のよく揃った強磁場が存在していると考えられます。背景の図において、ジェット内部の赤線は強磁場を表現したものです。

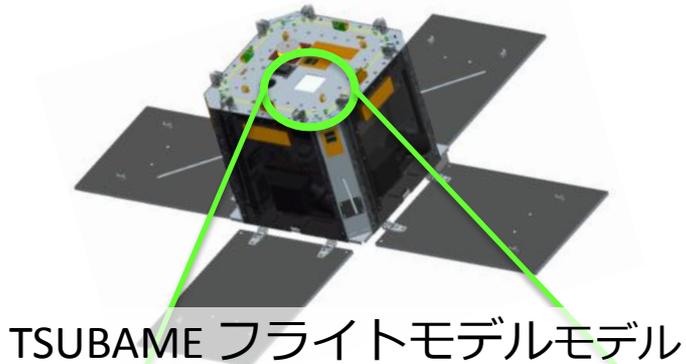
- (3) 「偏光方向が短時間で変化した」ことは、ジェット内部にはガンマ線を作り出す領域がいくつか点在していて、それぞれの磁場の向きは異なっていると考えられます。
- (4) 電子・陽電子が強磁場に絡みつくことでガンマ線を作り出していると考えるのが自然です。

PoGO-Lite Polarized Gamma-ray Observer

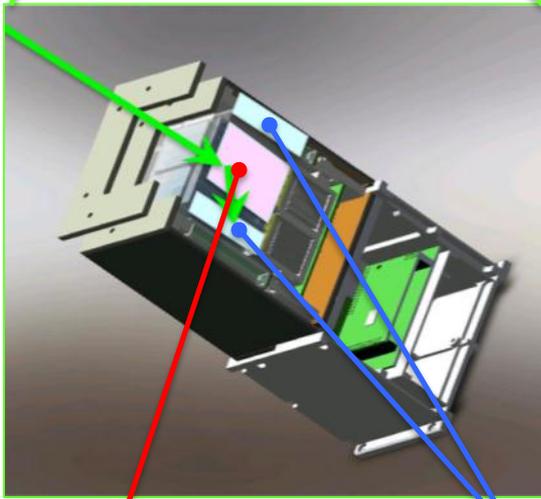
- 大面積低バックグラウンド散乱偏光計
- スウェーデン、日本、アメリカの共同
- 2011/7/6 パスファインダーフライト→観測前に降下
- 2012年(?)再挑戦



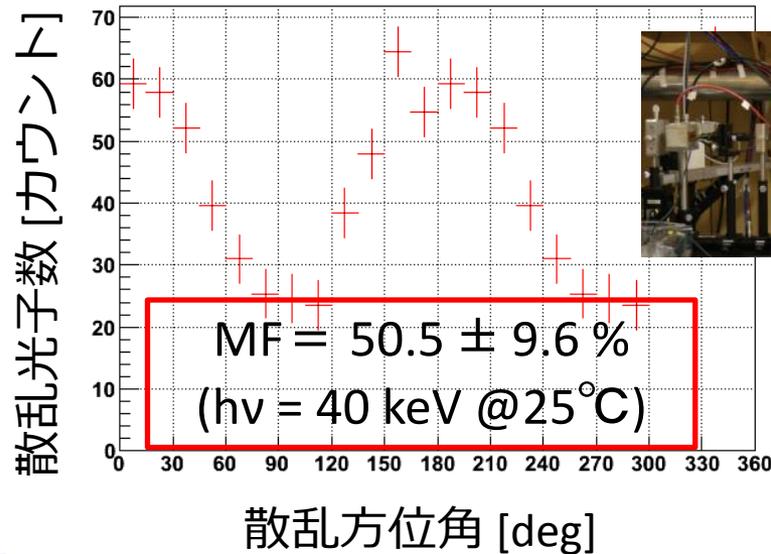
GRB偏光観測用超小型衛星TSUBAME



- 質量50kg, サイズ50x50x50 cm³
- 年間数個のGRBを即時指向観測
- 2011年までにEMでの各種環境試験完了
- **本年2012年12月に打ち上げ予定**



EM性能評価試験@KEK-PF(2011/12)



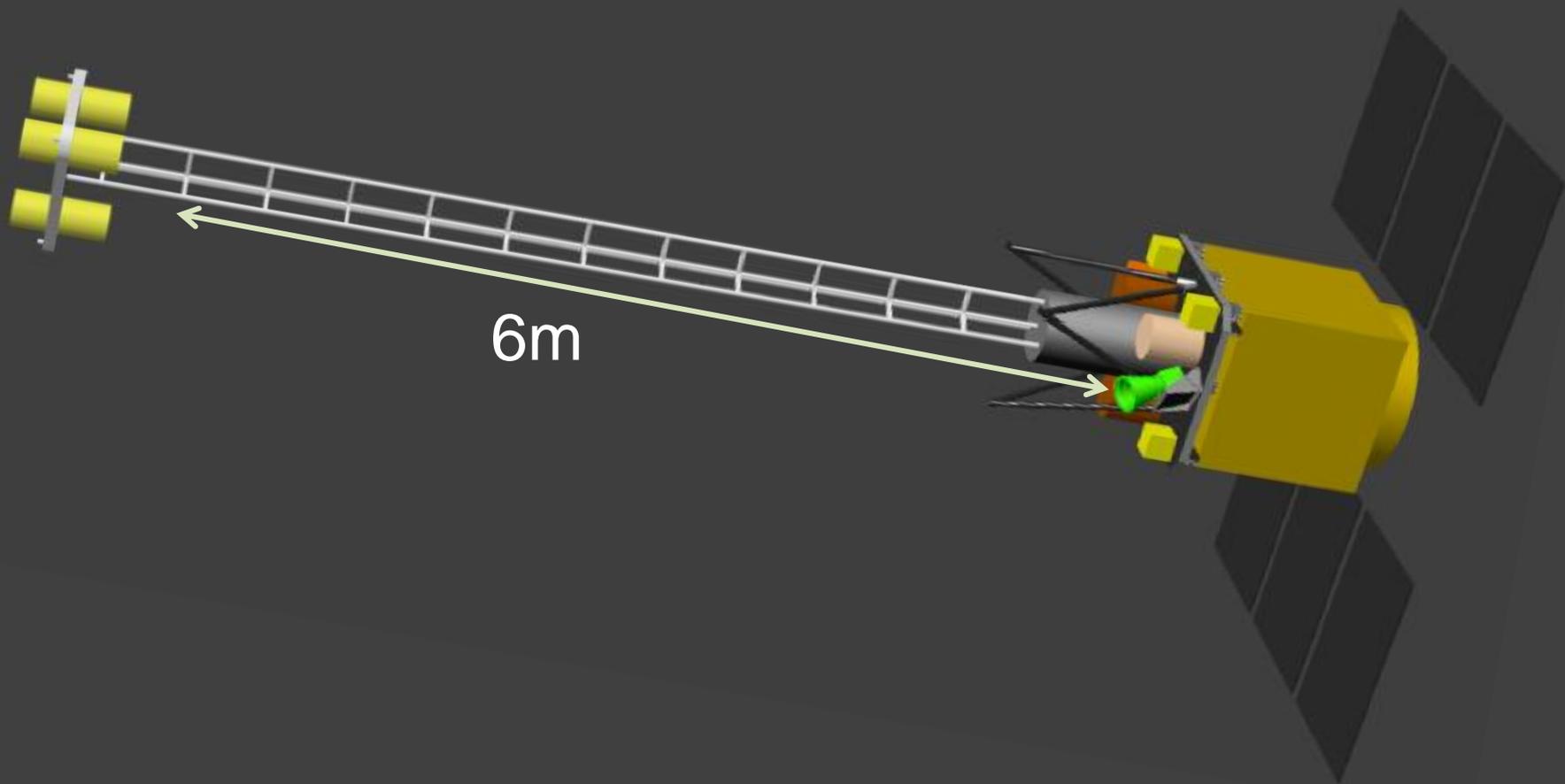
散乱体

- プラスチックシンチ
- マルチアノードPMT

吸収体

- CsI(Tl)
- APD

EMにて目標性能を達成。
→ 現在フライトモデル開発中

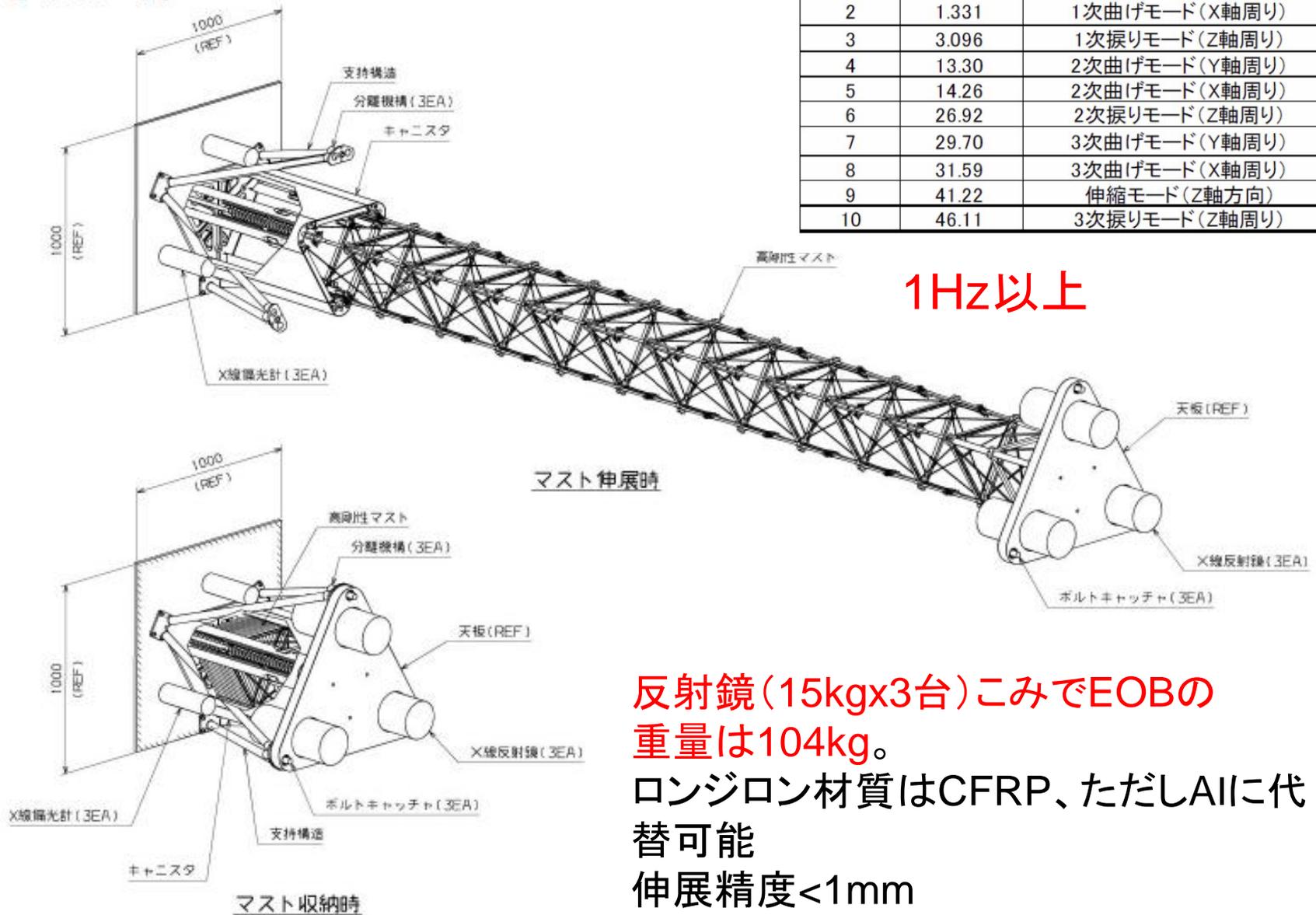


6m

6m 伸展式光学台

モードNo.	固有振動数	モード
1	1.204	1次曲げモード(Y軸周り)
2	1.331	1次曲げモード(X軸周り)
3	3.096	1次振りモード(Z軸周り)
4	13.30	2次曲げモード(Y軸周り)
5	14.26	2次曲げモード(X軸周り)
6	26.92	2次振りモード(Z軸周り)
7	29.70	3次曲げモード(Y軸周り)
8	31.59	3次曲げモード(X軸周り)
9	41.22	伸縮モード(Z軸方向)
10	46.11	3次振りモード(Z軸周り)

1Hz以上



反射鏡(15kgx3台)こみでEOBの重量は104kg。

ロンジロン材質はCFRP、ただしAlに代替可能

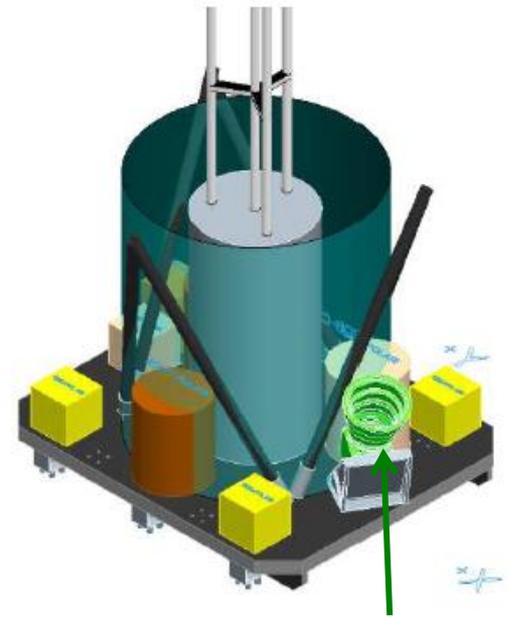
伸展精度<1mm

姿勢制御と姿勢決定

- ターゲットを視野中心にとらえたまま0.1RPMで回転
- 散乱偏光計はX線入射位置と各GSOシンチまでの距離の精度が、系統誤差を決める
- プレートスケールは1'~1.8mm
- 姿勢制御精度目標: 1'
- 姿勢決定精度目標: 0.1'

平成22年度 戦略予算による検討 by NEC

- 外乱として重力傾斜のみを考えた場合、姿勢制御精度は0.5'以内
- 姿勢決定精度はSTT視野干渉(月、地球)時以外でX軸、Y軸まわりに約0.1'。
- 干渉時は0.5'に劣化。STTとIRUの選定、較正に工夫が必要



STTをミッションベースプレートの上に設置

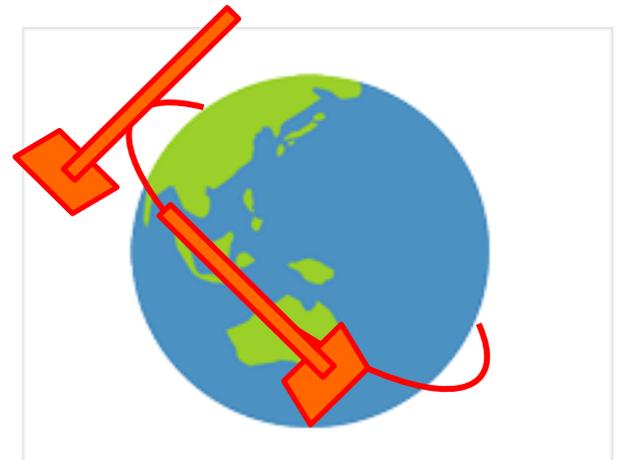
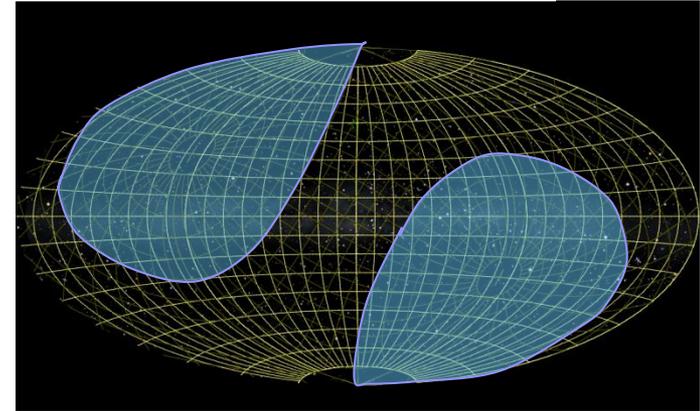
-Z軸から太陽を受ける



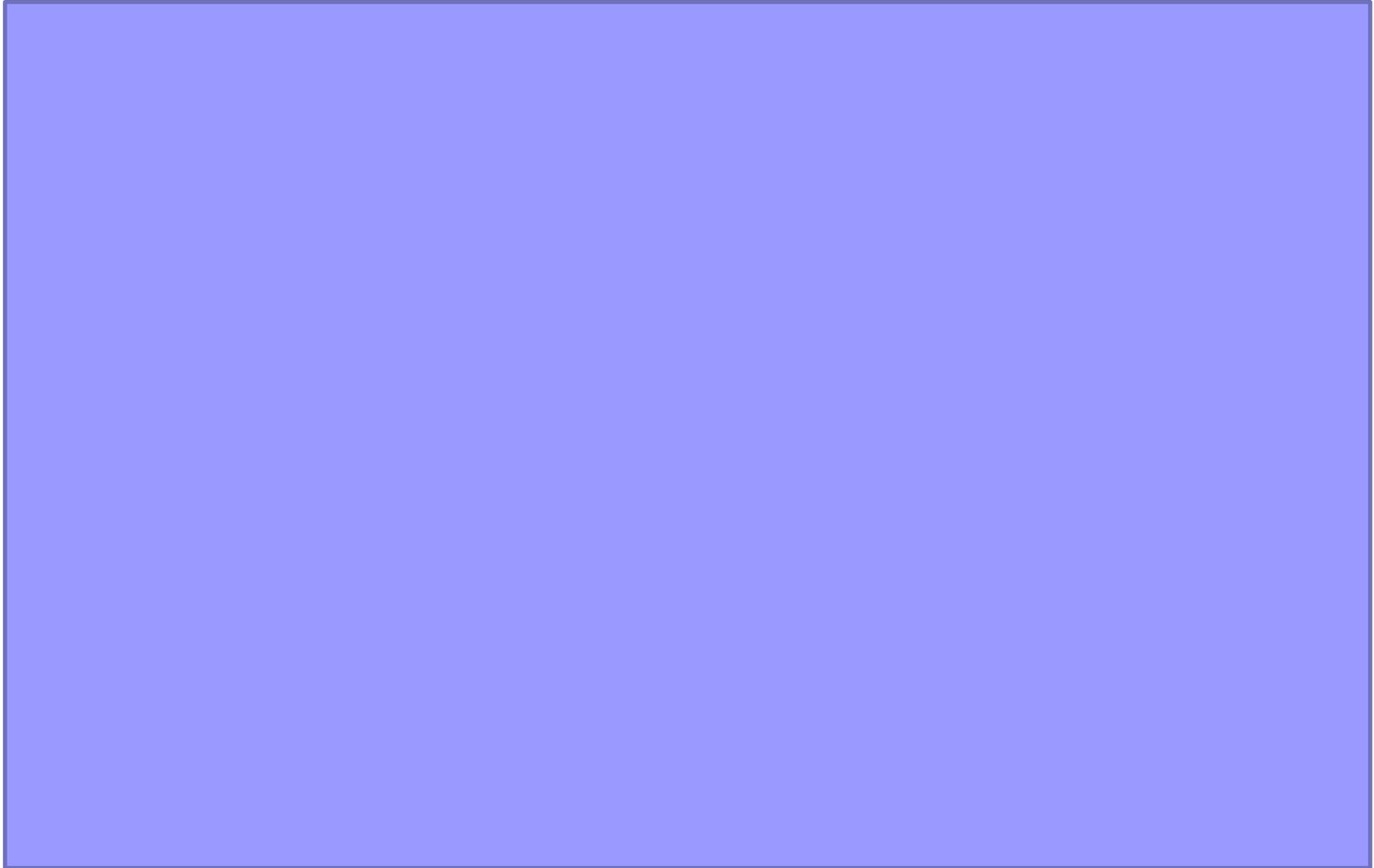
観測天空領域の制限

銀河座標での観測不能域

- 太陽パドルを-Z軸とすると
 - 視野方向(+Z軸)は黄道から±30度に制限される
 - 太陽パドルをY軸方向に設置することも検討する。
- 衛星軌道面とz軸(長手方向の関係)
 - デフォルトの磁気トルカでは重力傾斜トルクの蓄積をアンローディングするにはサイズ不足



磁気トルカのサイジング: FY2011 戦略検討



国内外の状況とPolaris

- 硬X線(>30keV以上)-軟ガンマ線領域 (明るい天体+GRB限定)
 - PoGO-Lite1stフライト実施、PHENEX 3rdが準備中
 - ASTRO-H SGDも軟ガンマ線偏光検出能力を備える(ただしPolarisのような回転観測は困難、Siを使用しているため60keV以上が対象)
- 軟X線領域(<10keV)での偏光観測
 - NASA/GSFC他のGEMSミッションが2014年打ち上げ予定で準備中。
 - ミラー+1次元位置検出+TPCガス偏光計
 - 数mCrab以上のX線源の軟X線偏光観測
- 両者のギャップを埋める、2keV-80keVのバンドでの偏光のエネルギー依存性から天体の構造を探る=Polaris
 - 多くの対象にとって10keV以上で世界初の偏光検出をめざす
 - 2次元撮像
 - 偏光は非熱的放射でドミナント
- ASTRO-Hの資産は最大限に活用(e.g.ミラー製作ファシリティ、SpW、開発スキルなど)
 - Polarisの打上げ目標はASTRO-H以降、オーバーラップをもてる時期

Polarisの一側面：偏光を志向する国内(外)のエフォートを取りまとめ、集約化、観測に結びつける

まとめ

- PolariSは2-80keVワイドバンドのX線偏光測定を目指す。
 - ブラックホール、中性子星連星系、パルサー、超新星残骸、明るい活動銀河核、10mCrab以上のX線天体が対象
 - 典型的には1週間で1天体の観測
- 観測装置は気球実験、あるいは別の衛星ミッションの資産を最大限に活かして開発する
- 偏光の系統誤差を最小限におさえるため、3軸制御をたもったまま、0.1RPMで衛星回転
- 打ち上げ目標は2010年代後半、ASTRO-H以後