

広視野ガンマ線偏光計における Off-axis入射効果と感度の再検討

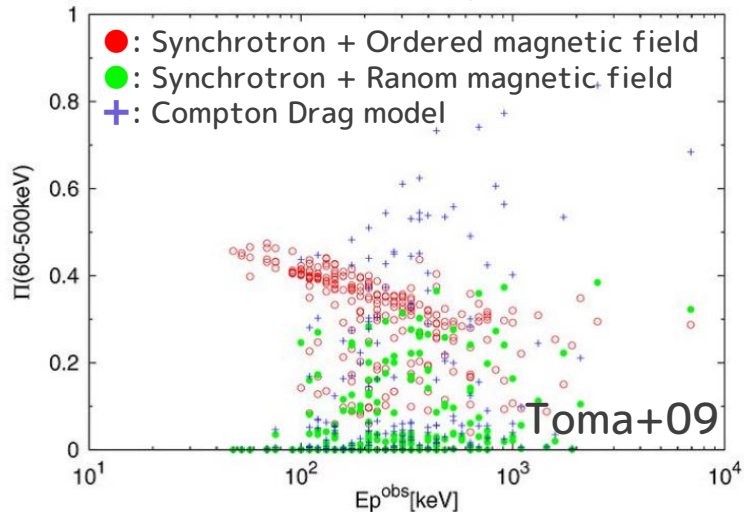
京都大学 古村翔太郎

谷森達, 高田淳史, 水村好貴, 竹村泰斗, 岸本哲朗, 窪秀利, 水本哲矢, 中増勇真,
中村優太, 小野坂健, 齋藤要, 園田真也, 谷口幹幸, 吉川慶 (京大理)
黒澤俊介(東北大/山形大), 身内賢太郎(神戸大理),
澤野達哉(金沢大数物), 友野大(阪大RCNP)

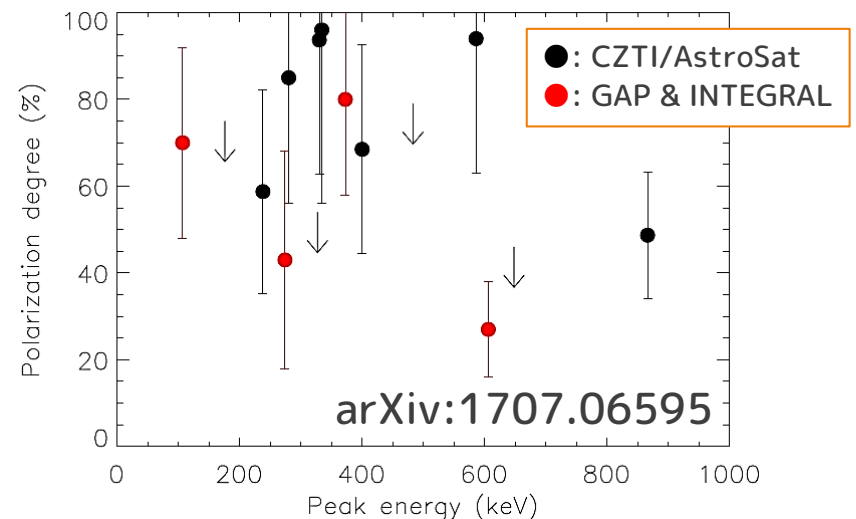
硬X-MeVガンマ線偏光観測

- ▶ 新しい2観測パラメータ: 偏光度・偏光方向
- ▶ GRB, AGN, Microquasar, Pulsarなど
ジェット放射機構、磁場構造、降着円盤の幾何構造

GRBモデルによる偏光度の違い



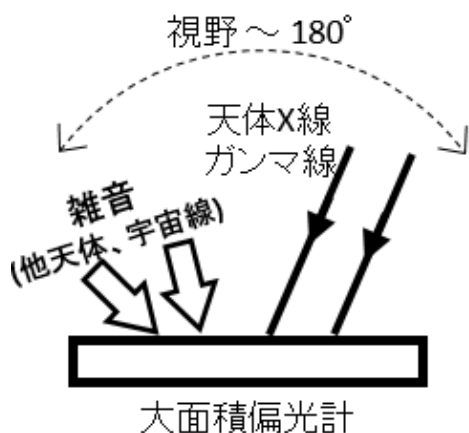
過去のGRB偏光観測



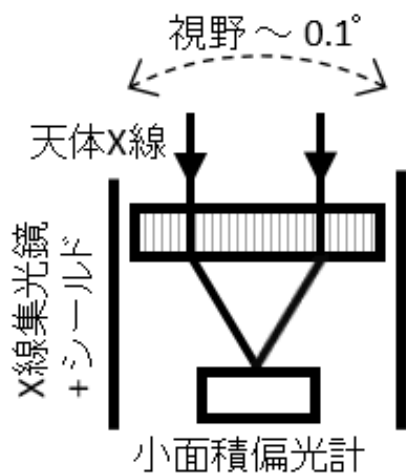
- ▶ 高い偏光度 > $\sim 30\%$. バイアス懸念
 - ▶ 最近のGRB偏光計: 大面積で光子統計($N \sim 10^4$)を上げ高感度化
- $\sim 10^{-5} \text{ erg/cm}^2 \times 100 \text{ cm}^2$

広視野GRB偏光計の特徴

広視野GRB偏光計



狭視野X線ガンマ線

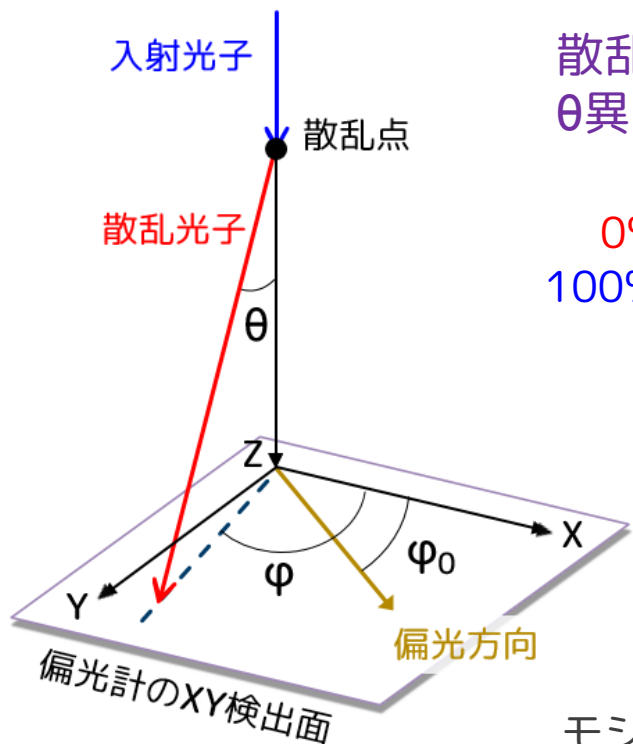


偏光計	広視野GRB	狭視野X線・ガンマ線
対象天体	明るいGRB ~ 10^{-5} erg/cm ²	定常天体 ~10 mCrab
光学系	なし	X線集光鏡/コリメータ
検出器	GAP, POLAR, LEAP, SPHiNX, (CZTI) など	PoGO+, IXPE, XIPE, PoSTAR, Polarisなど
視野	~120-180度 Off-axis入射	0.1 - 数度 On-axis入射
雑音	全視野から混入	天体の周辺のみ

本講演の目標

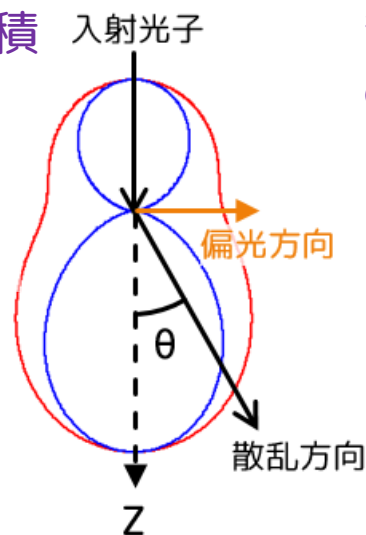
- ▶ Off-axis入射と雑音の感度への影響評価
- ▶ 感度決定要因の体系的理解を目指す

コンプトン散乱偏光計 (50 keV – 数MeV)

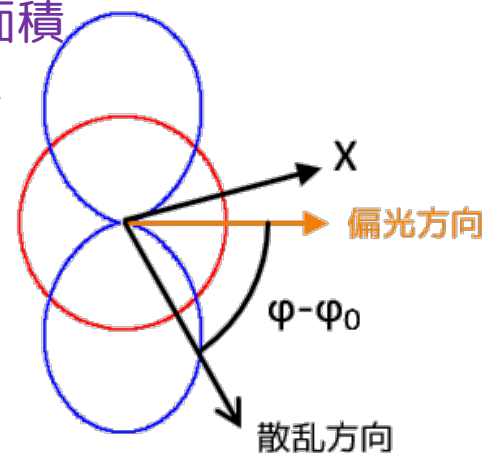


散乱断面積
 θ 異方性

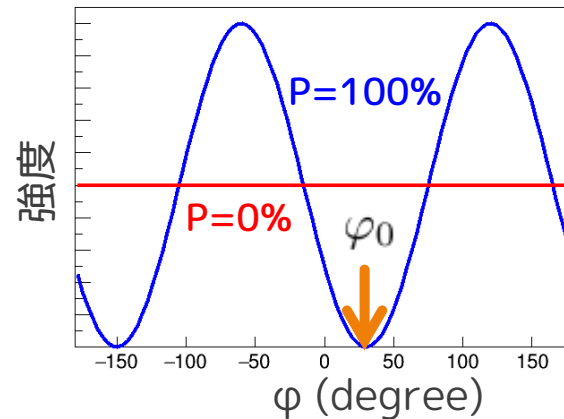
0%偏光
100%偏光



散乱断面積
 φ 異方性



モジュレーションカーブ
 φ 方向の散乱光強度分布

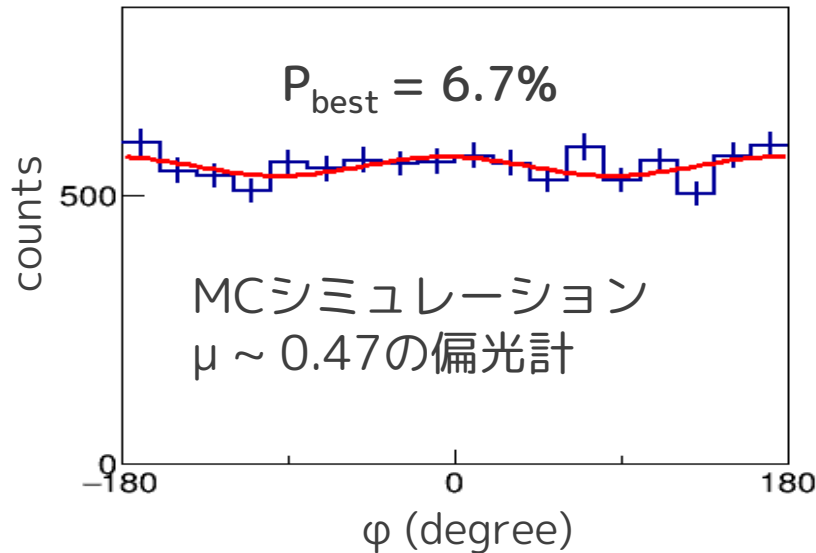


- モジュレーションファクター
- ▶ φ 方向の異方性: $\mu P \cos\left(2\left(\varphi - \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right)\right) + 1$
偏光状態(P, φ_0)が一意に決まる
 - ▶ θ 方向の異方性は測定しない検出器が多い

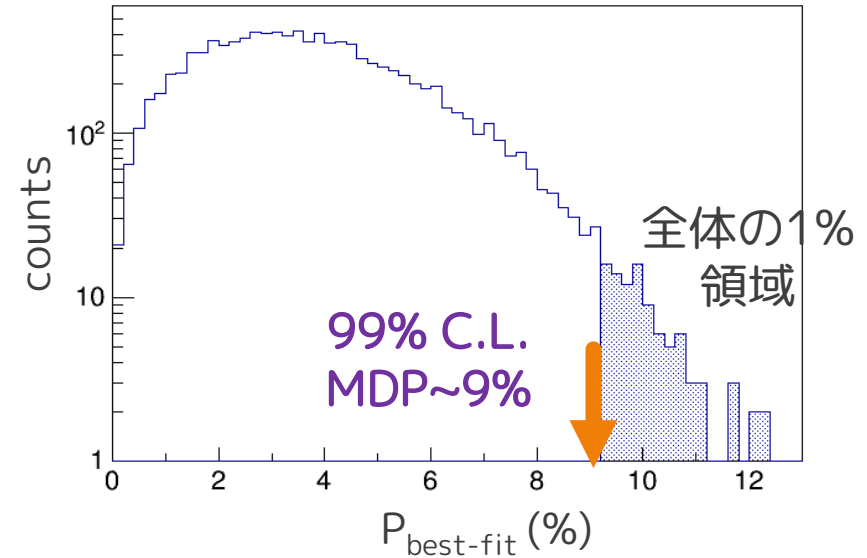
MDP (Minimum Detectable Polarization)

- ▶ 統計揺らぎで、偏光度Pが大きく見積もられる可能性
- ▶ MDPはP=0測定のConfidence Level。検出限界を示す感度指標

P=0%、測定光子数N=10⁴

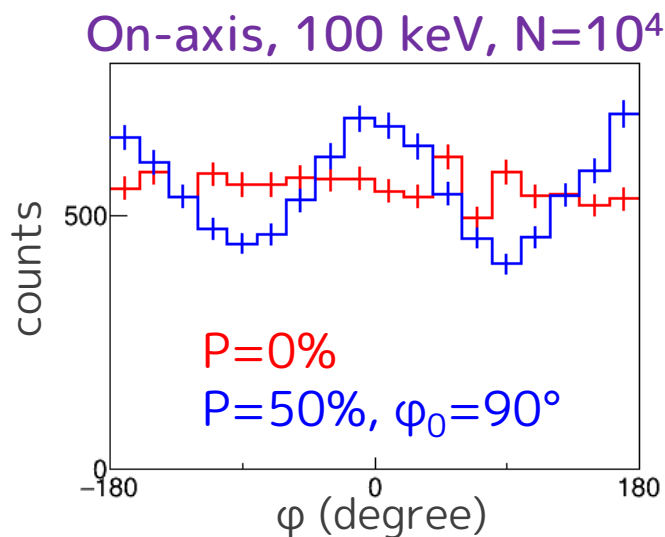


P_{best} 値のばらつき

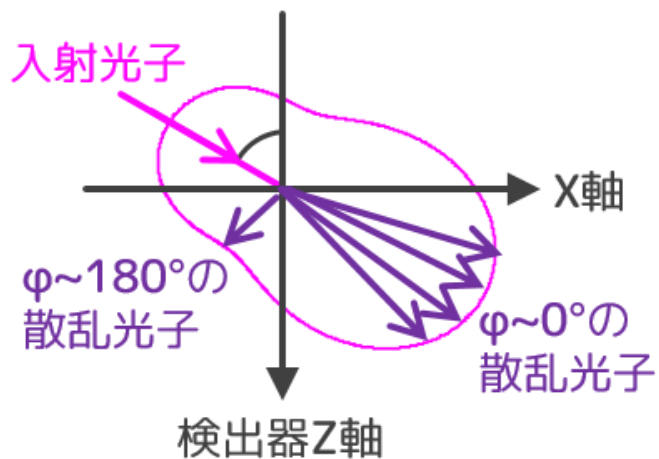
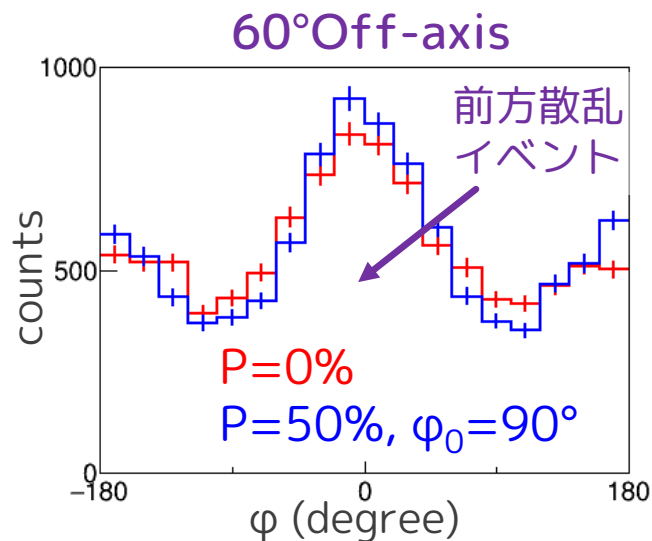


- ▶ $\cos 2\phi$ 仮定を含む、解析的に導かれた計算式
$$\text{MDP}_{99\%} = \frac{4.29}{\mu\sqrt{N}}$$
 (Weisskopf+10)

Off-axis入射効果 (cf. Lei+97, Muleri+14)



同じ2イベント
←→



- ▶ 散乱断面積 θ 方向の異方性が見え始める:
前方散乱で進行方向にイベント集中
- ▶ 偏光状態間の区別が付きにくくなる
- ▶ $\cos 2\varphi$ 補正には3次元散乱方向(θ, φ)が必要。
 φ 測定のみでは補正不完全。

=> $\cos 2\varphi$ fittingやMDP計算式は不適當

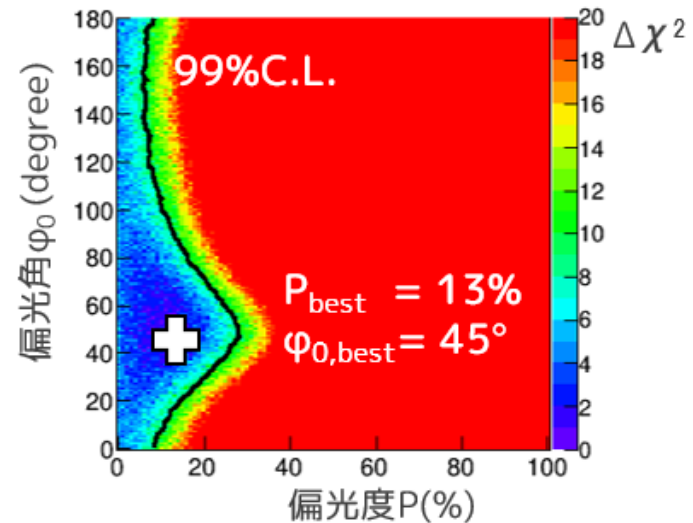
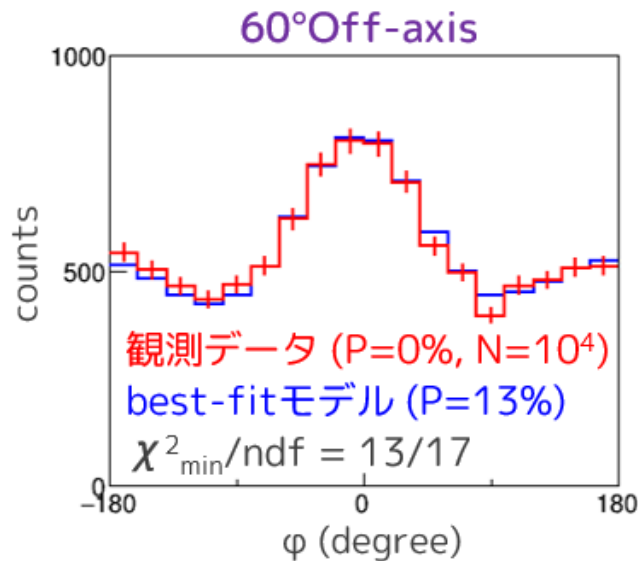
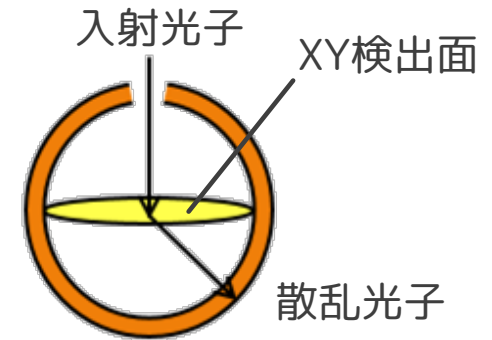
解析: MCモデルでフィッティング

- 理想的Compton偏光計を仮定
全方位 Efficiency = 1, $\mu \sim 0.47@100 \text{ keV}$

- 観測データ: $N=2.5 \times 10^3, 10^4, P=0\%$

モデル : $N=10^6, P$ は1%刻み, φ_0 は1°刻み

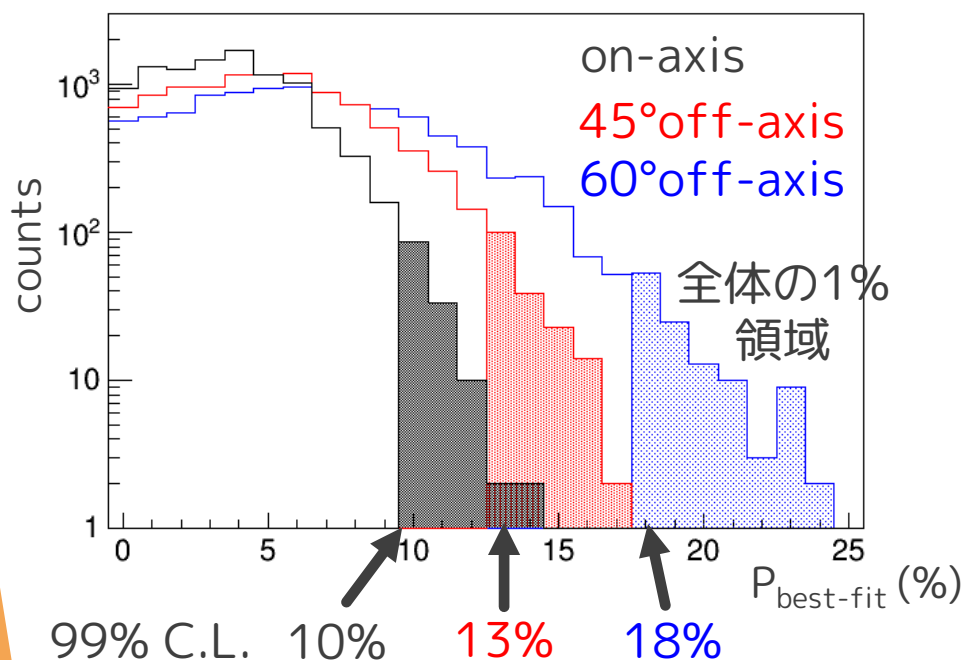
到来方向、エネルギーは観測データと同じ



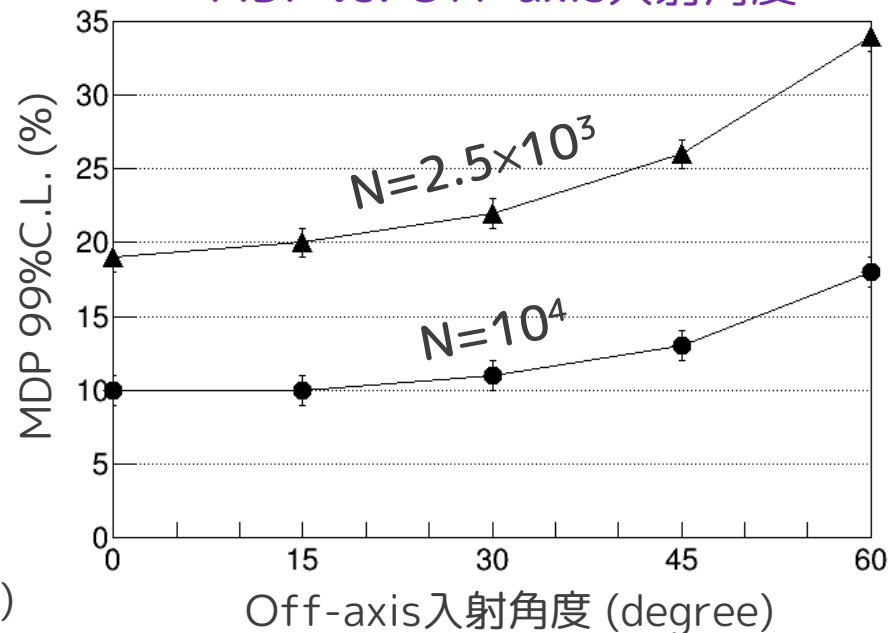
on-axisより大きな偏光度が誤って検出されやすい

Off-axis入射効果を含むMDP

P_{best} 値のばらつき, $N=10^4$



MDP vs. Off-axis入射角度

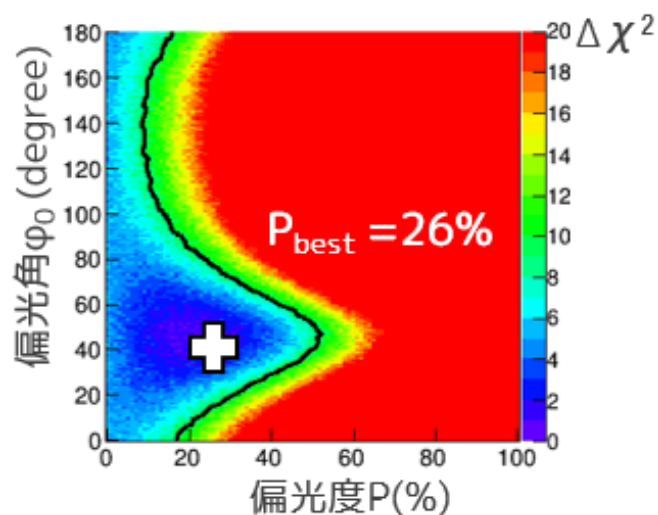
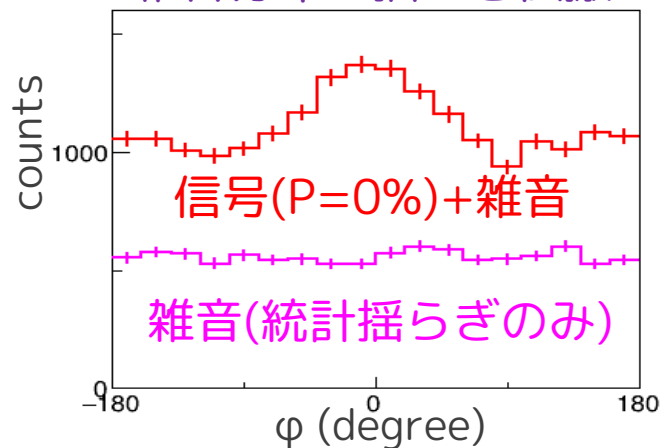


- ▶ 定義に基づいて、99%MDPを求めた
- ▶ $MDP \propto 1/\sqrt{N}$ は保たれている
- ▶ 入射角度 $>60^\circ$ ではOn-axisの1.7倍以上に劣化 (2π str視野の半分)

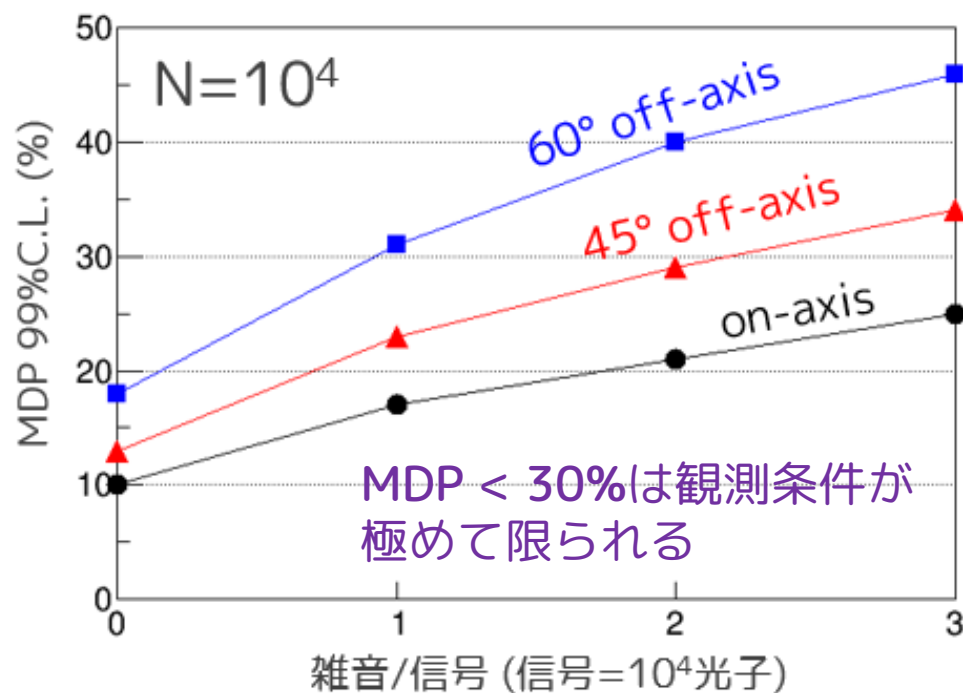
広視野からの雑音混入

60°Off-axis

雑音分布の揺らぎ伝搬



- ▶ 地球アルベド, 宇宙拡散X線, 宇宙線シャワー
→ 大量・複雑な雑音分布
- ▶ 今回は、雑音量・統計揺らぎのみに注目
- ▶ 雑音の揺らぎが伝搬しMDP劣化する



まとめと感度改善方針

- ▶ Off-axis入射効果と雑音によるMDP劣化を定量評価
 - ▶ 入射角度=60°: on-axisの場合より、1.7倍劣化
 - ▶ 雑音/信号=1 : 雑音=0の場合より、1.7倍劣化
- } 理想的偏光計の場合！

=> $N=10^4$ でも、MDP<30%は観測条件が極めて限られる

=> 光子統計の改善だけでなく、

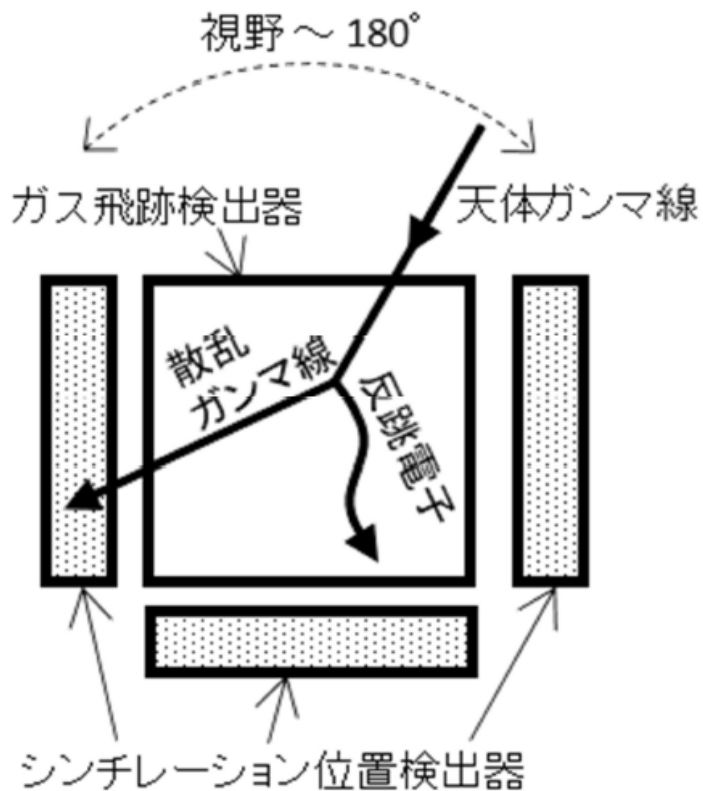
「Off-axis入射効果の補正」および「信号雑音比の改善」が必要

そのほかの劣化要因

- ▶ 宇宙空間におけるMCモデルの信頼性
"とある方向から到来した光子が作るモジュレーションカーブ"を実測し、MCモデルと比較する必要がある。

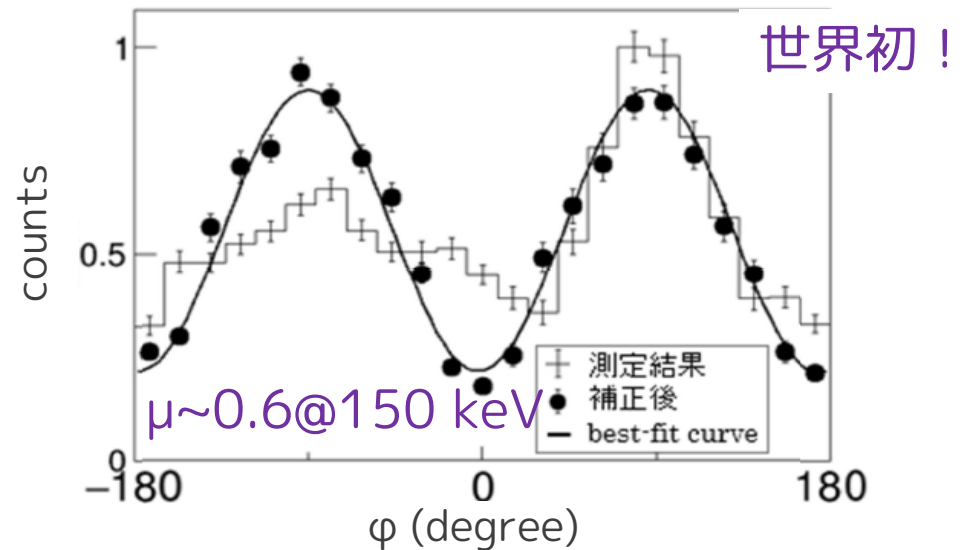
=> 「光子の到来方向決定=Imaging」が必要

Electron-tracking Compton Camera



- ▶ 3次元散乱ガンマ線方向(θ, φ)の測定

30°Off-axis入射効果の補正可能

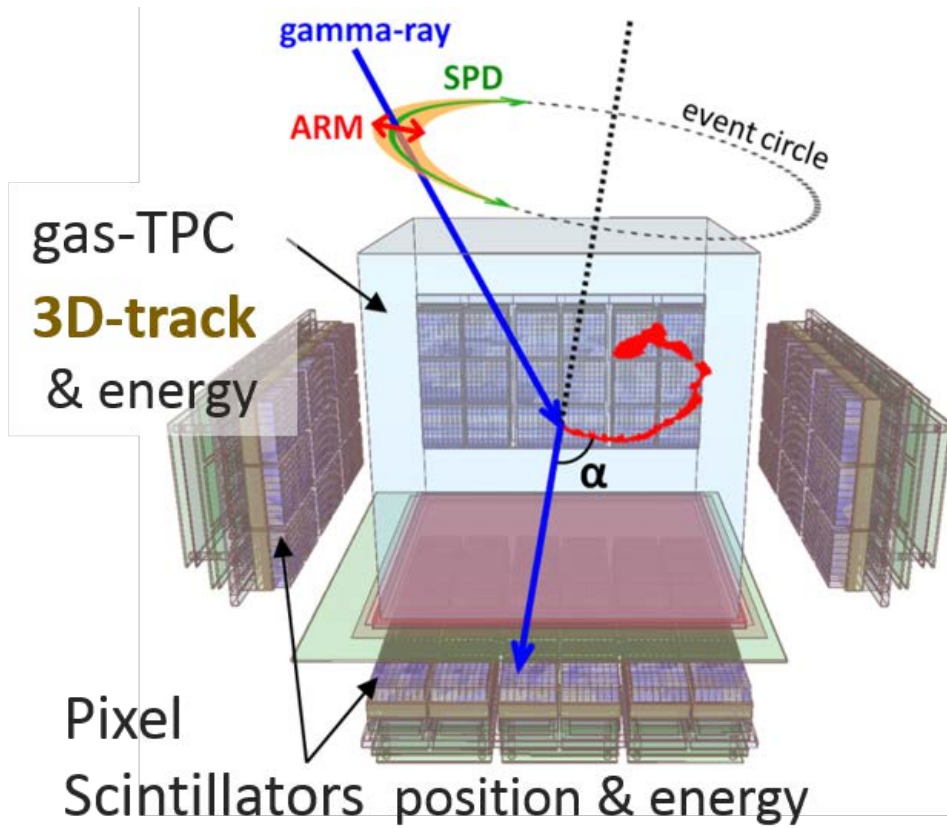


- ▶ 優れたImaging (well-defined PSF)

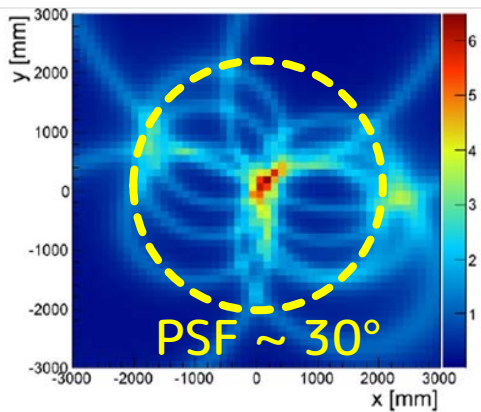
$\Delta\Omega(\text{PSF})/4\pi \Rightarrow$ 雑音量 $\sim 1/100$

GRB, 定常天体も含めた多天体同時の、広視野偏光観測に期待
(Komura+2017, ApJ)

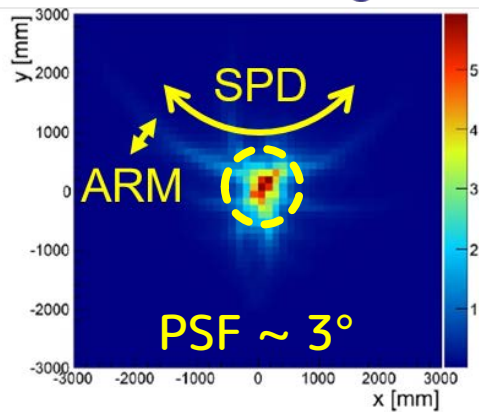




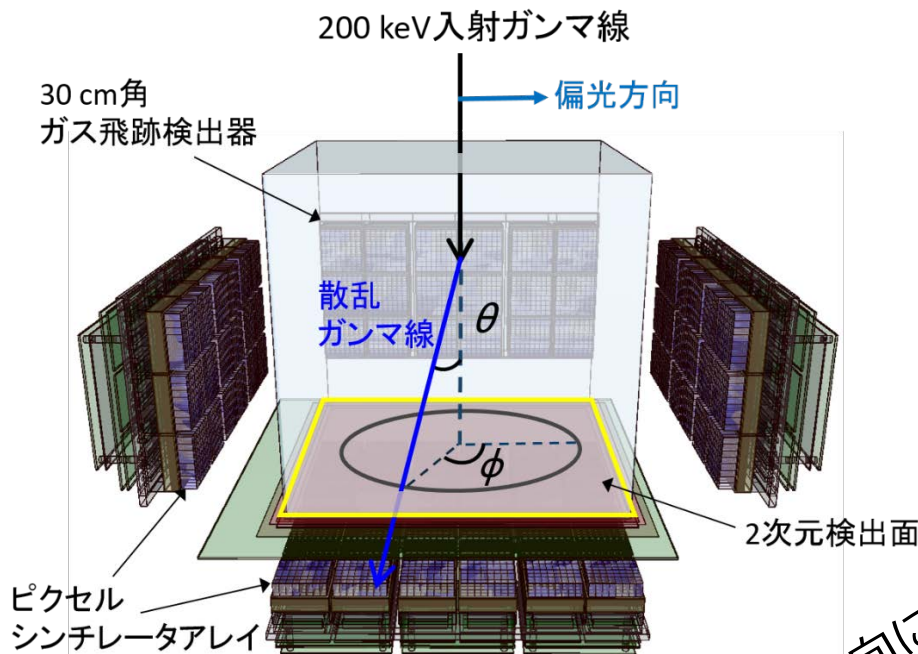
Conventional method



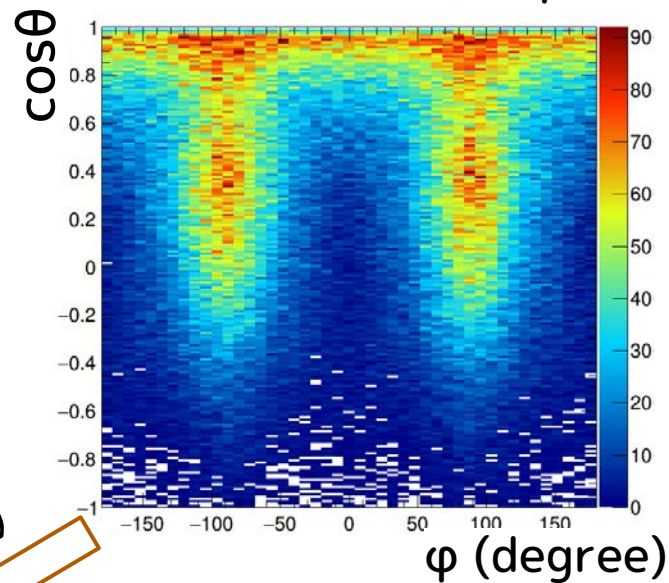
Electron Tracking method



ETCCによる偏光測定 (Geant4 Sim.)

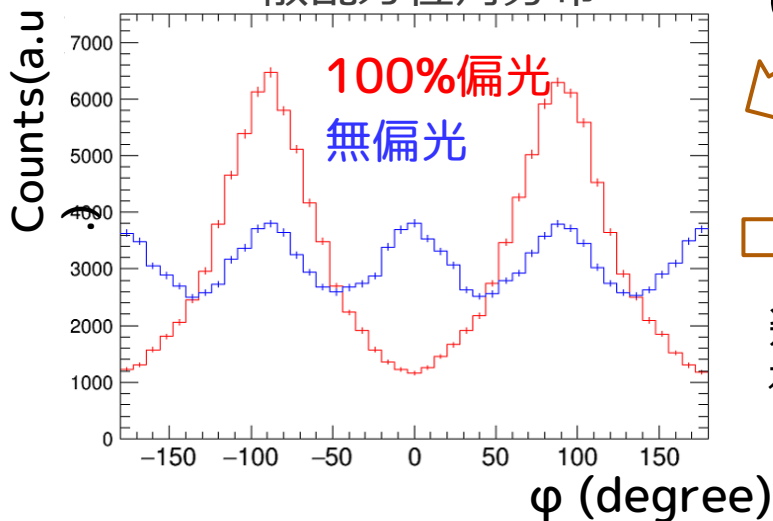


100%偏光ガンマ線 On-axis入射
散乱方向分布 ($\cos\theta, \phi$)

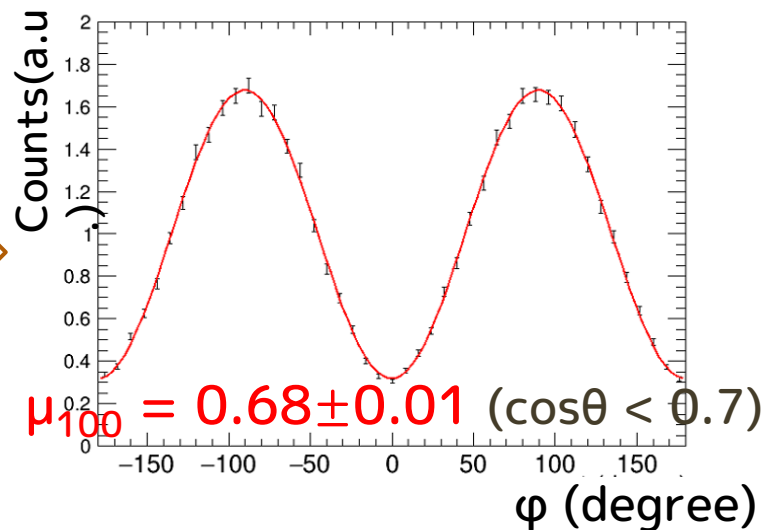


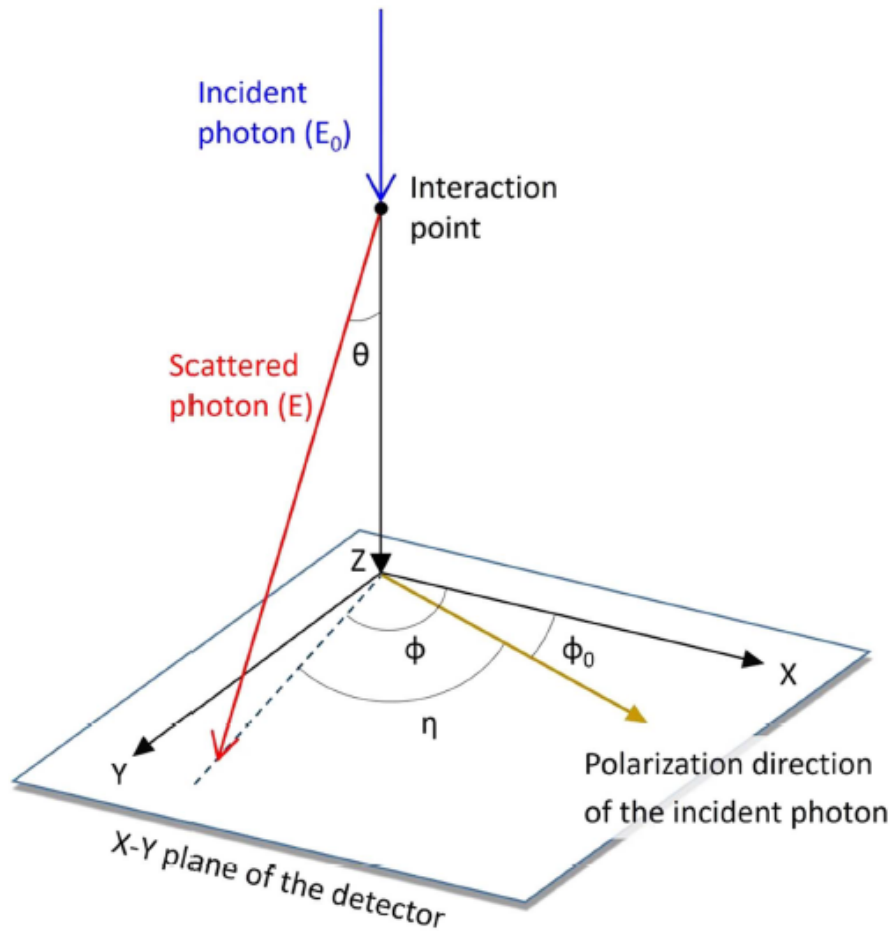
ϕ 方向に射影
($\cos\theta < 0.7$)

散乱方位角分布

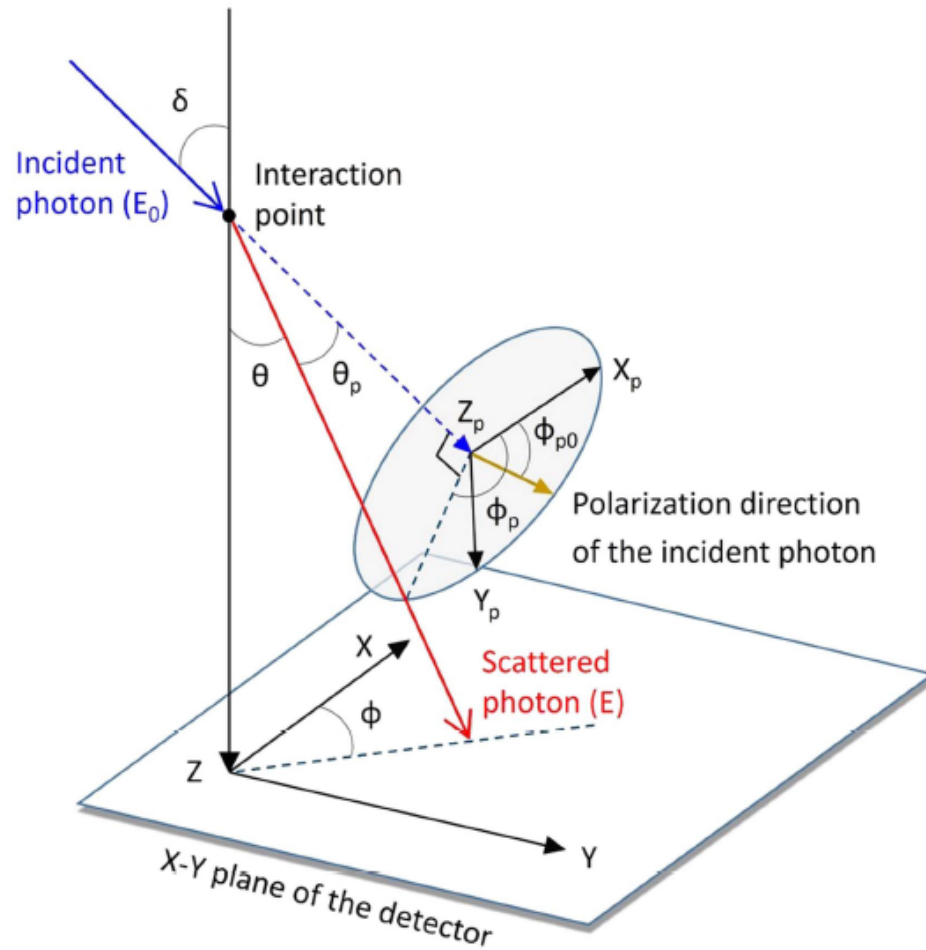


幾何効果の
補正





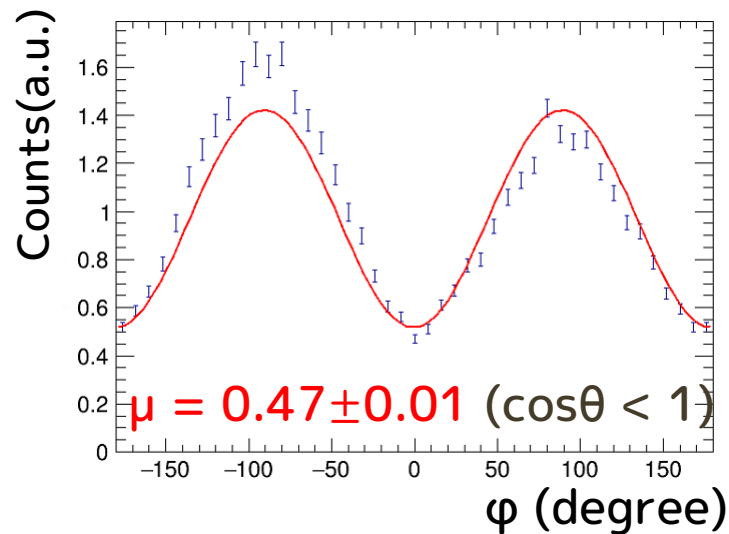
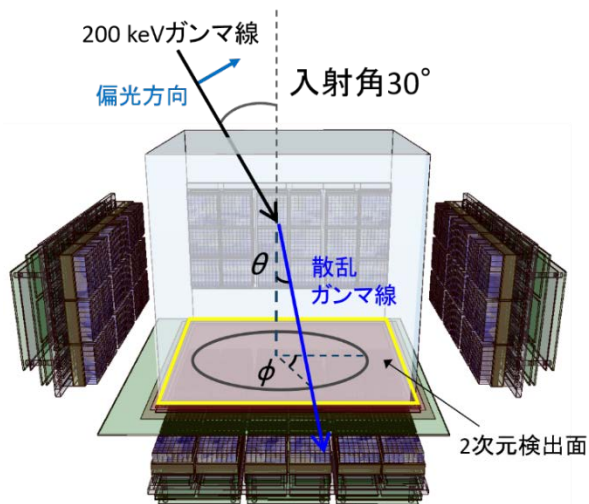
(a)



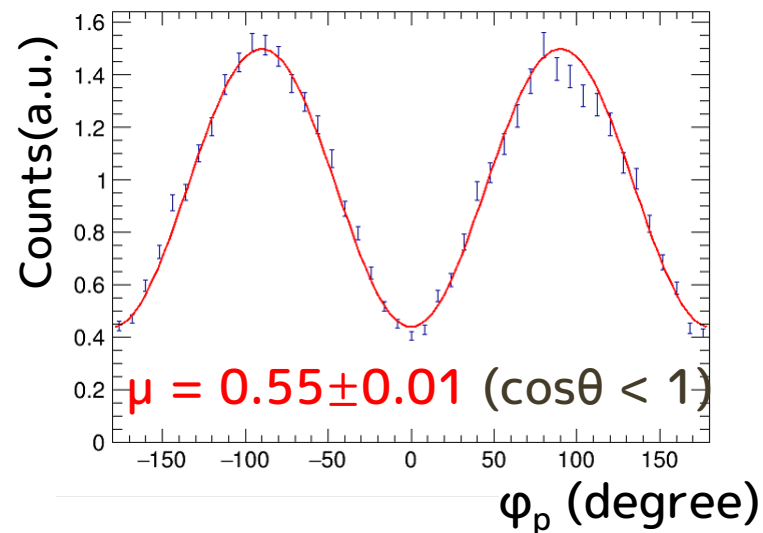
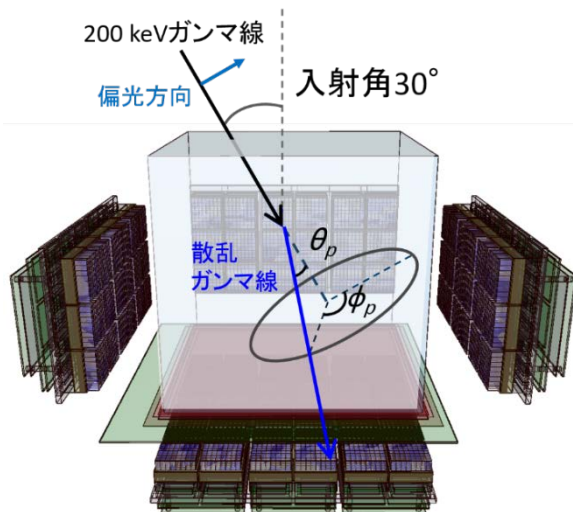
(b)

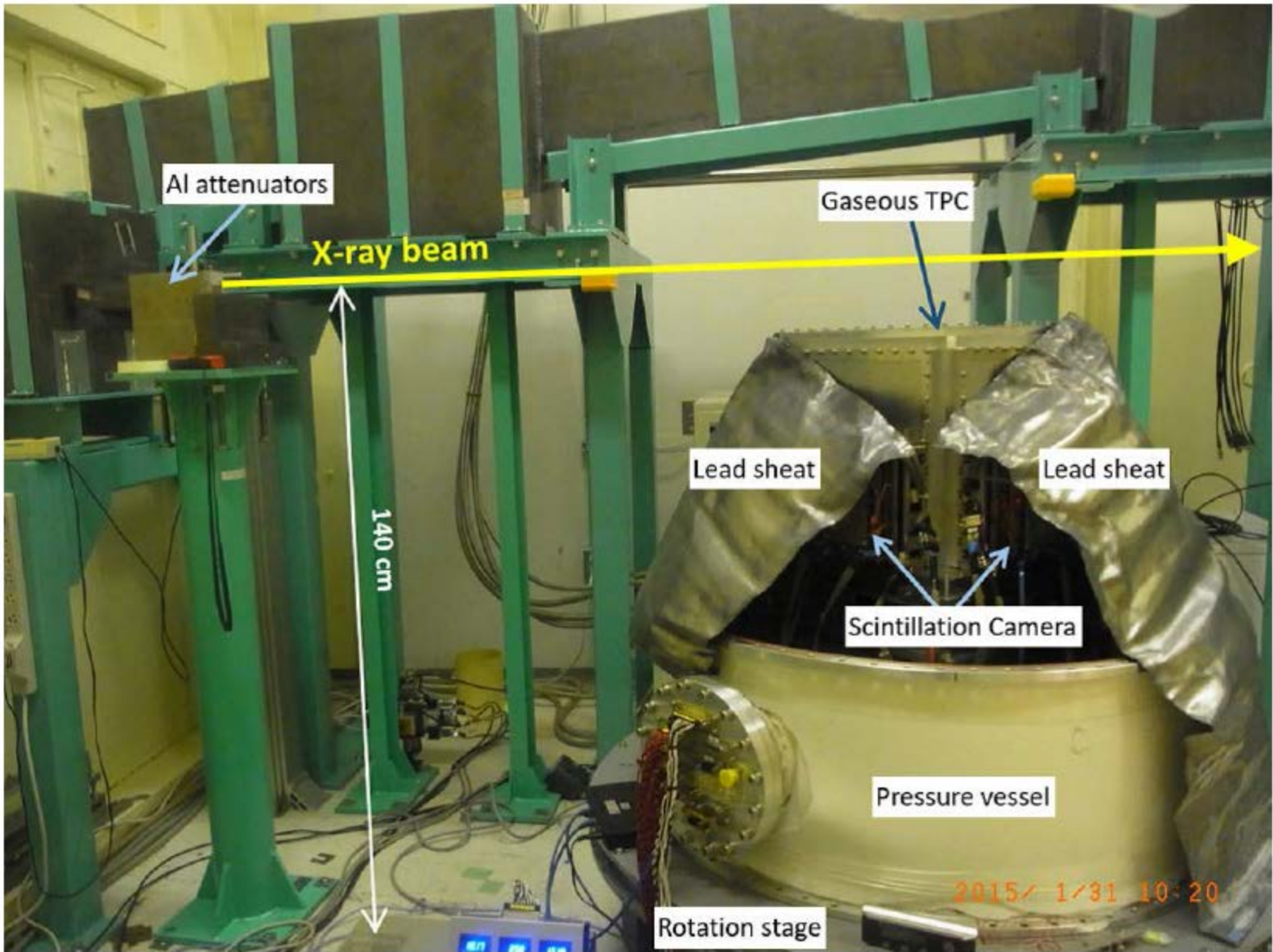
Off-axis入射効果補正

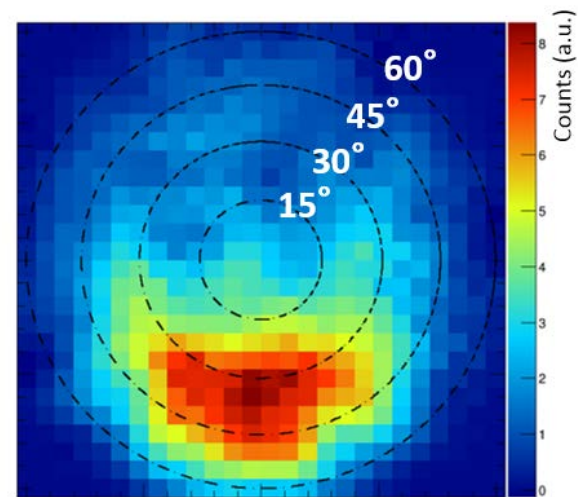
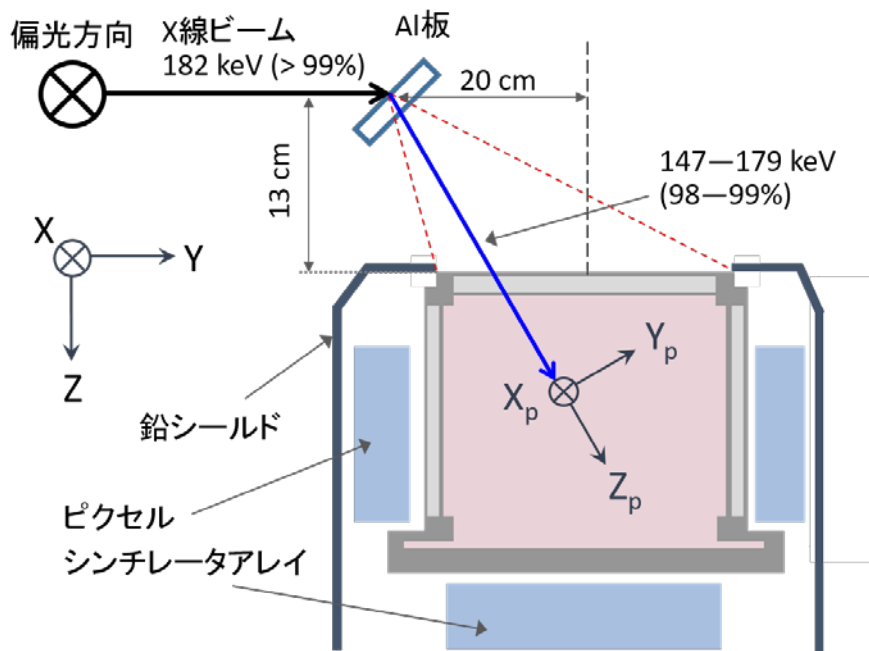
検出器
座標系
(θ, φ)



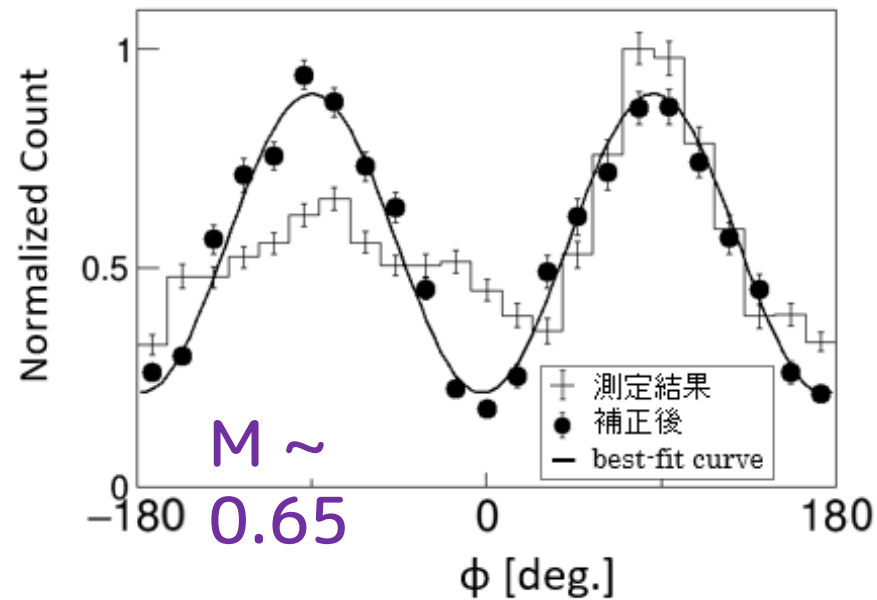
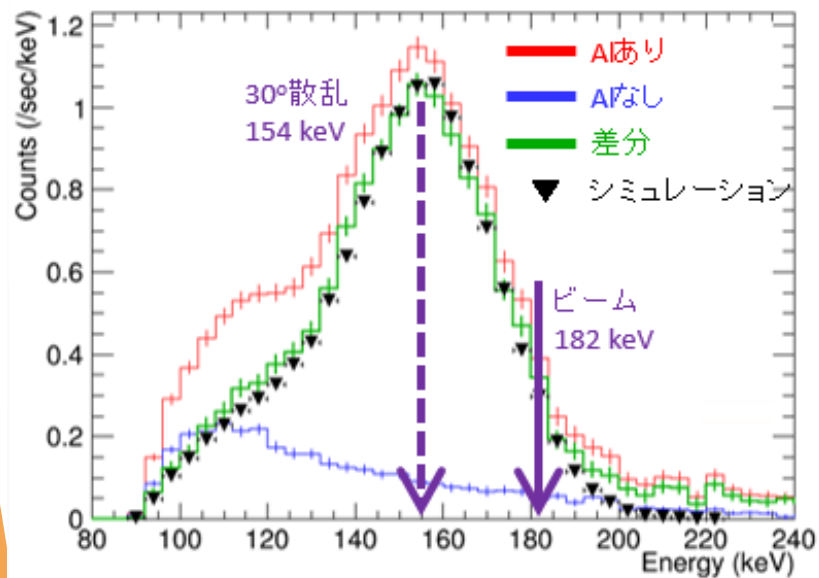
入射光子
座標系
(θ_p, φ_p)



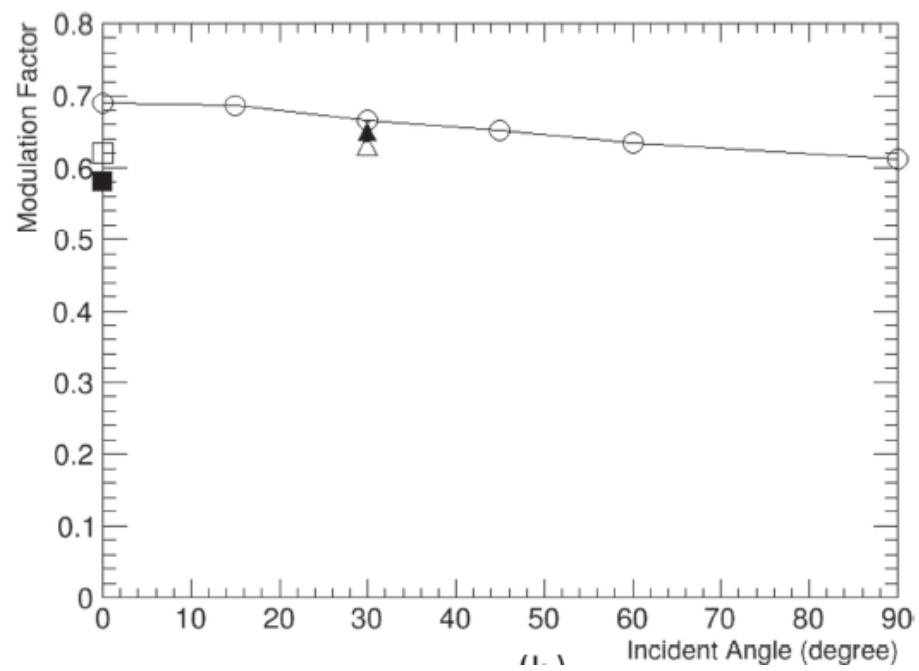
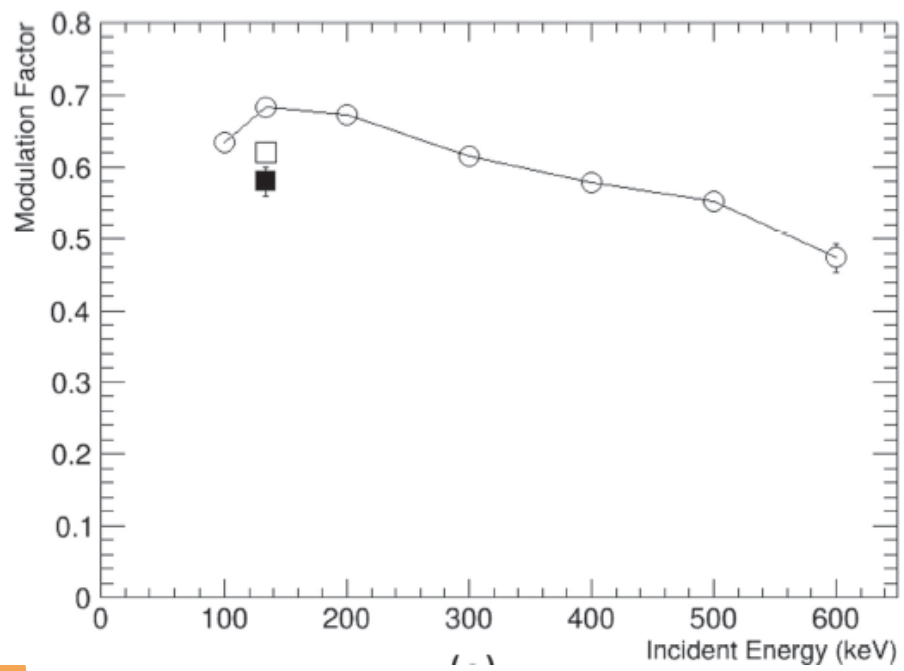




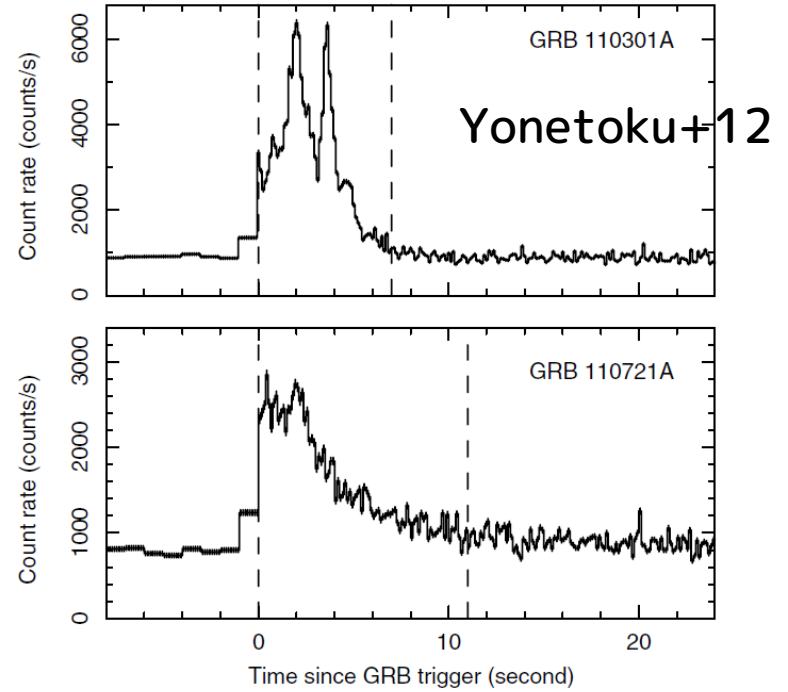
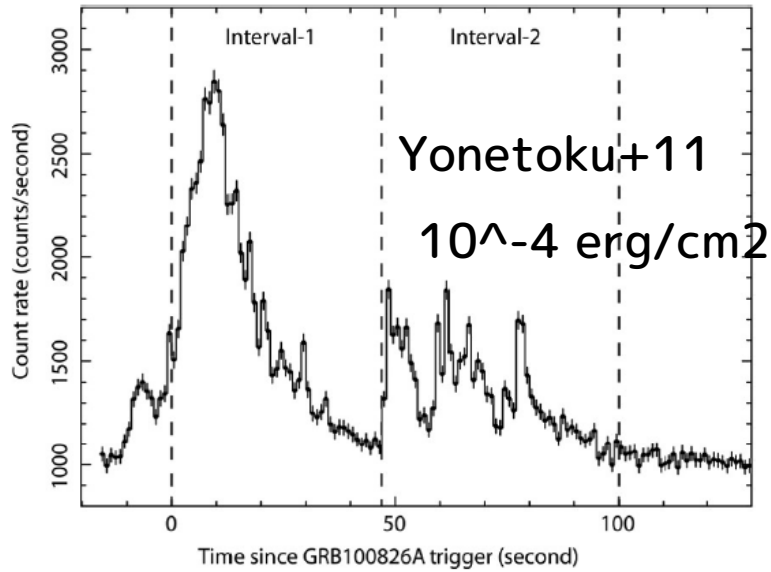
入射角 $\sim 30^\circ$



- ◆ 世界で初めて実験的に確かめた
- ◆ 雑音が多い環境下でも補正成功



GRB光度曲線



POLAR LC - GRB 170210A T0: 2017-02-10T02:47:37

