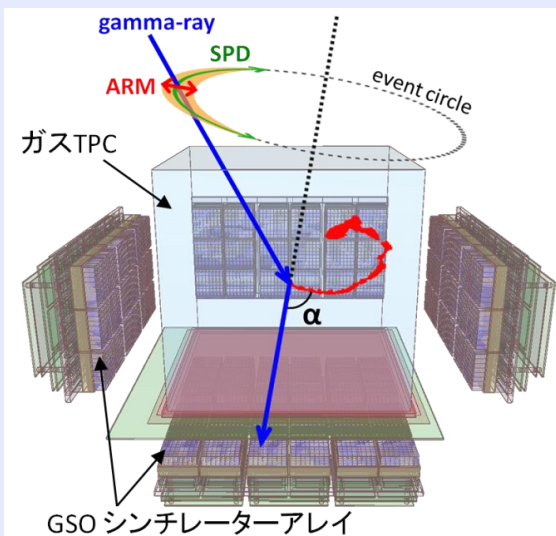


# SMILE19: 次期気球実験に向けた 偏光観測シミュレーション

古村 翔太郎

高田淳史, 澤野達哉, 岩城智, 窪秀利, 松岡佳大,  
水本哲矢, 水村好貴, 中村輝石, 中村祥吾,  
小田真, Parker Joseph, 園田真也, 谷森達,  
友野大(京都大学), 株木重人(東海大学),  
黒澤俊介(東北大学), 身内賢太郎(神戸大学)

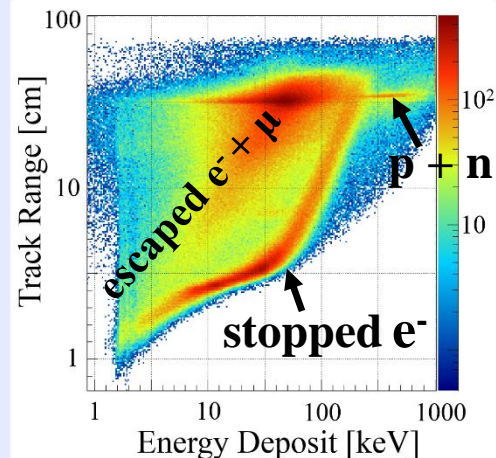
# 電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)



## 反跳電子の3次元飛跡も測定

- ◆ アーク状に到来方向制限
- ◆  $dE/dx$  で粒子識別
- ◆  $\alpha$ 角で運動学的テスト

高雑音環境下  $dE/dx$ 分布



## 高品位イメージング & 高効率の雑音除去

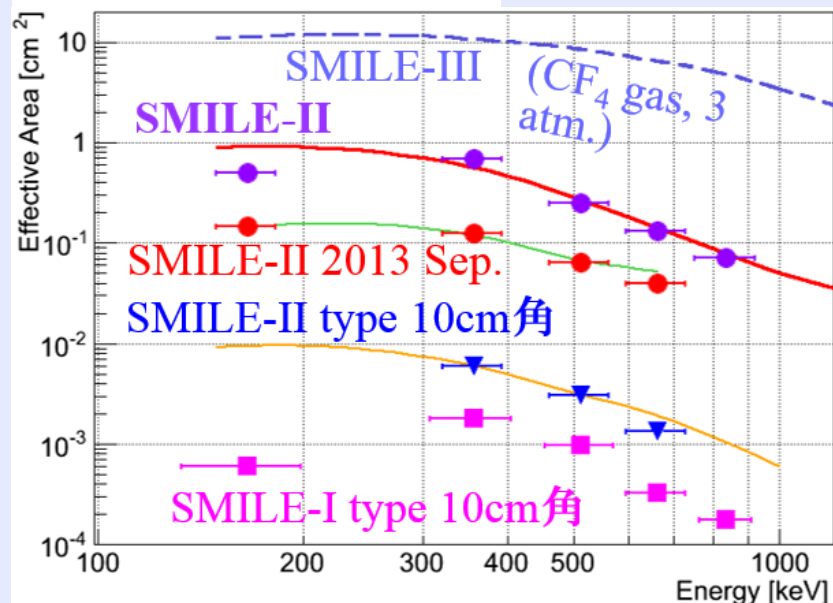
### SMILE-II 気球搭載用 スペック

- $(30 \text{ cm})^3$  TPC + 108個のGSOシンチアレイ
- ガス Ar 95% + iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 2% + CF<sub>4</sub> 3%, 1 atm
- 有効面積 0.7 cm<sup>2</sup> @ 356 keV
- ARM 5.3° @ 662 keV

**Crab を 4時間で 5 $\sigma$  検出可能 (高度40 km)**

ガス種・ガス圧変更 + シンチ増強 → 有効面積 ~ 10 cm<sup>2</sup> (SMILE-III)

### 到達予想 有効面積



# ETCC 雑音除去能力の実証

2通りの試験で、撮像 & Signal強度の定量評価に成功！

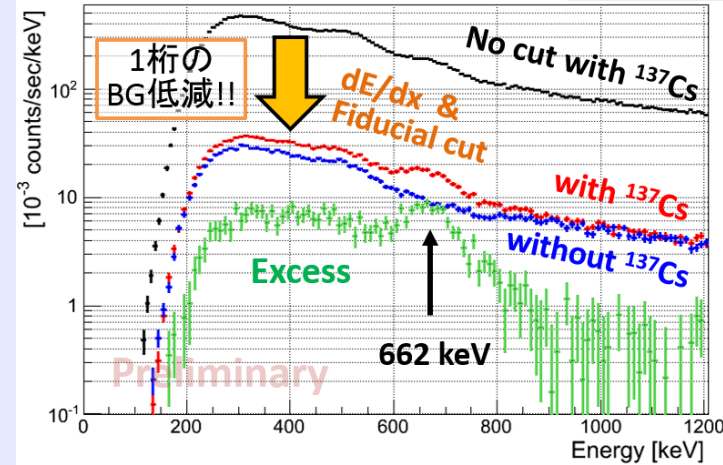
◆ 超微弱線源 (S/N~0.005, Crab観測の半分以下)

**低Signalを落とさずNoise除去** @松岡講演

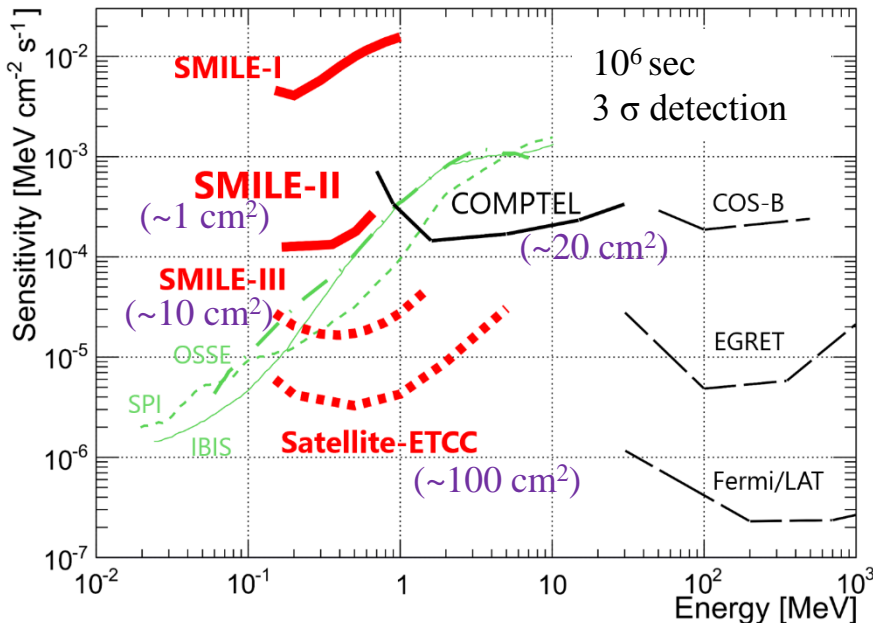
◆ 陽子ビームを用いた高雑音環境 (気球実験の約5倍)

**高NoiseでもSignal識別** @小田講演

高雑音環境( $\gamma, n, p, \mu$ )下、  
0.7MBq  $^{137}\text{Cs}$  662keVの識別



## 到達予想 感度



**宇宙雑音環境においても感度を維持**

➤ SMILE-II, SMILE-III

気球実験でCOMPTTELと同等以上の感度

➤ Satellite-ETCC

1mCrab程度の天体 ~ 千個程度の検出期待

**天体偏光観測の可能性**

NEXT ⇨ X線-ガンマ線偏光観測

# X線-ガンマ線偏光観測

## 偏光観測の意義

- ◆ 偏光の発生：散乱、磁場、強重力場
- ◆ パルサー、SNR、GRBの放射機構  
BH降着円盤の幾何学構造

} モデルにより異なる偏光度・偏光方向の予測  
高エネルギー天体現象を探る良いプローブ

## 偏光観測の現状

軟X-軟ガンマ線で **定常天体の観測例が少ない 感度不足**

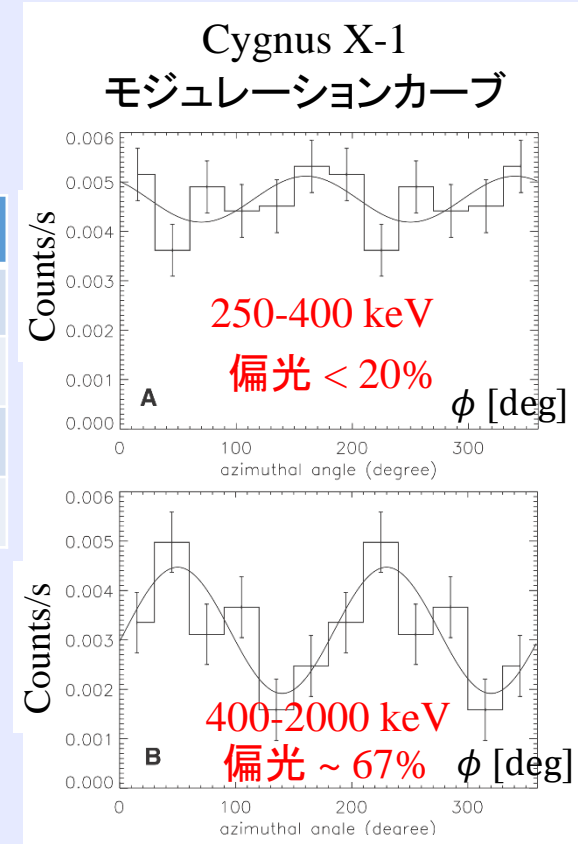
検出器	帯域	天体
OSO-8 (Weisskopf+1976,78)	2.6 keV, 5.2 keV	Crab Nebula
INTEGRAL / SPI (Dean+2008)	100-1000 keV	Crab Nebula
INTEGRAL / IBIS (Forot+2008)	200-800 keV	Crab Nebula
INTEGRAL / IBIS (Laurent+2011)	400-2000 keV	Cygnus X-1

## 定常天体の偏光観測プロジェクト

GEMS, PolariS, PoGOLite, ASTRO-H, ...

> 200 keVで感度を持つ検出器は ASTRO-H / SGD のみ

**SMILE / ETCC (150-1000 keV) は偏光観測可能か?**



(Laurent+2011)

# ETCC偏光測定

## ◆ モジュレーションファクター

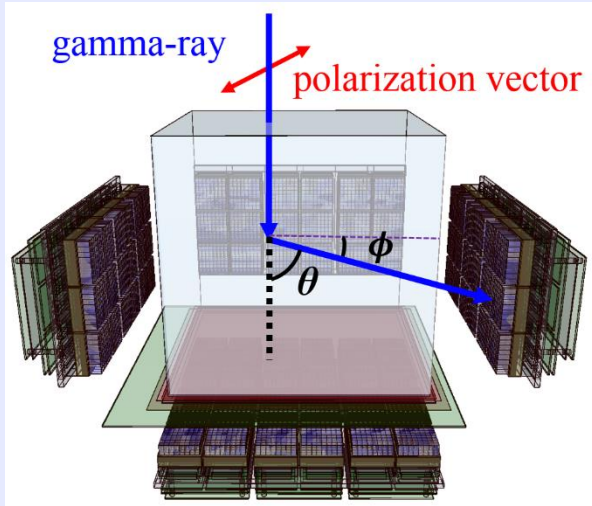
$$M = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}}$$

## ◆ 最小偏光感度 (Minimum Detectable Polarization)

$$MDP = \frac{429}{ASM} \sqrt{\frac{AS + B}{T}} \quad \begin{matrix} 99\% \\ CL \end{matrix}$$

$B \gg AS$  なら、 $MDP \propto \frac{\sqrt{B}}{AS}$

A	有効面積 [cm <sup>2</sup> ]
S	信号レート [cm <sup>-2</sup> sec <sup>-1</sup> ]
B	雑音レート [sec <sup>-1</sup> ]
T	観測時間 [sec]



## ETCCの場合

- ◆ TPC側面のシンチレータが有効
- ◆ ガス + シンチの単純構造で系統誤差小さい
- ◆ 雑音除去で高MDP維持

偏光観測に有利な特性

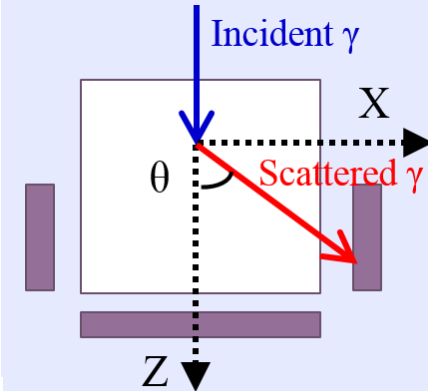
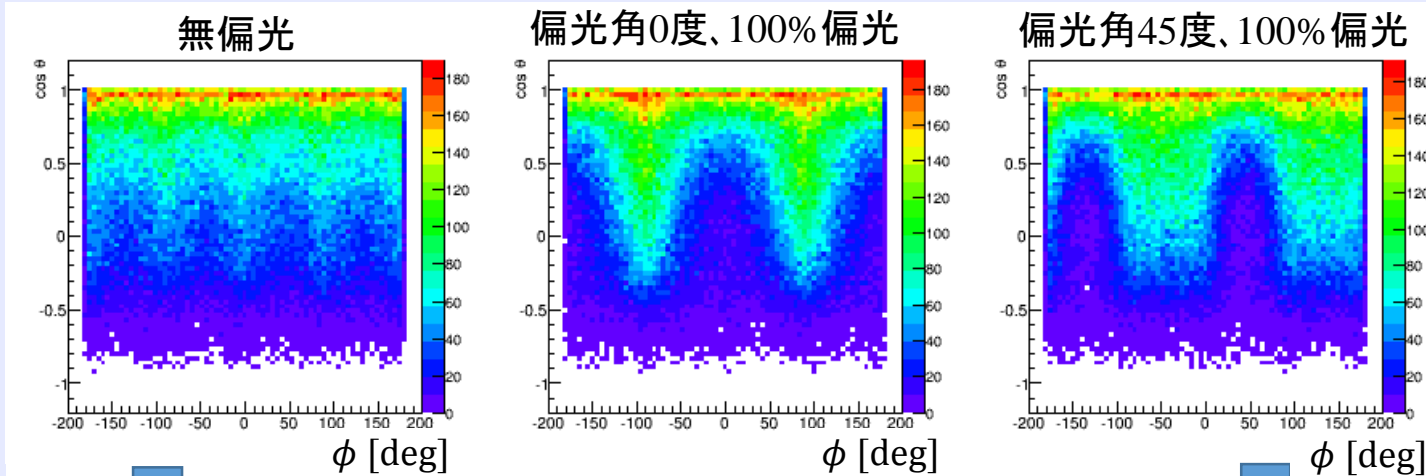
## シミュレーション条件

- ◆ 考慮  
ジオメトリー、シンチのpixel分解能
- ◆ 未考慮  
散乱点分解能、エネルギー分解能、雑音

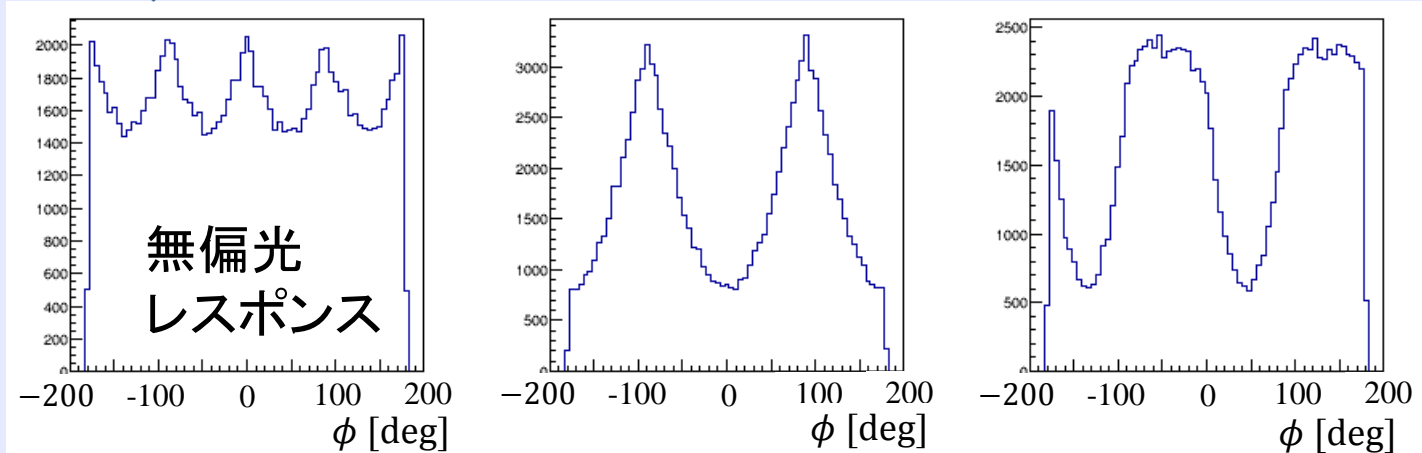
Geant4	Geant4 10.0 Patch-01 (最新版)
Physics Model	G4LivermorePolarizedComptonModel
ジオメトリー	(30cm) <sup>3</sup> TPC + 108個のシンチアレイ ※ SMILE-II と同じ
ガス	CF <sub>4</sub> 40% + Ar 54% + C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 6%, 1atm

# Geant4 シミュレーション モジュレーションファクター算出

散乱ガンマ線 2次元ベクトルマップ @ 200keV, 天頂方向から平行光



方位角  $\phi$  方向へ射影 ( $\cos\theta < 0.7$ )



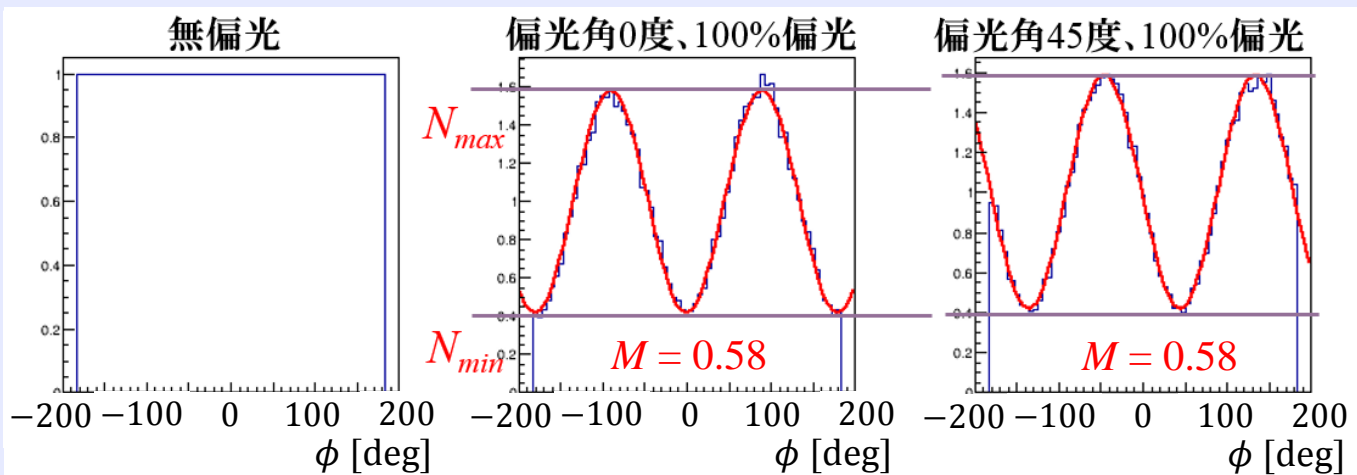
±45度、±135度は、  
シンチレータの隙間

- 無偏光時は、シンチレータ配置によるモジュレーション
- 100%偏光では、異なる周期でモジュレーションがはっきり確認できる



# Geant4 シミュレーション 結果

レスポンス補正後 (binごとに割り算) @ 200 keV, 天頂方向から平行光



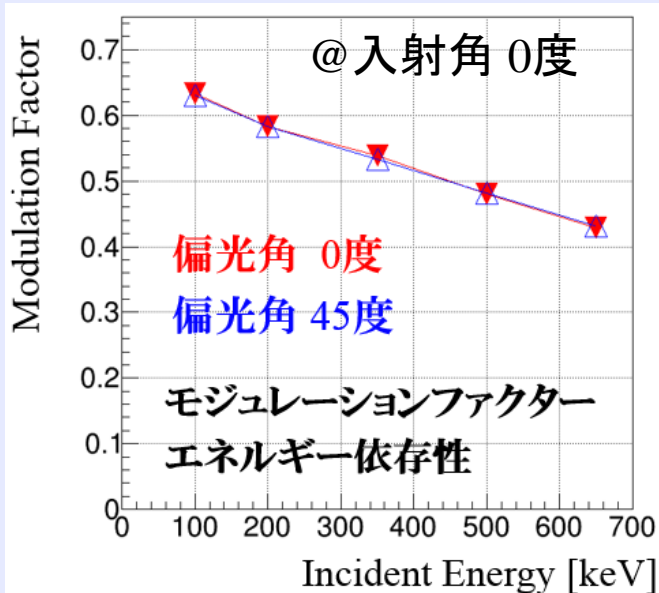
フィット関数

$$A \sin(2\phi - \phi_0) + B$$

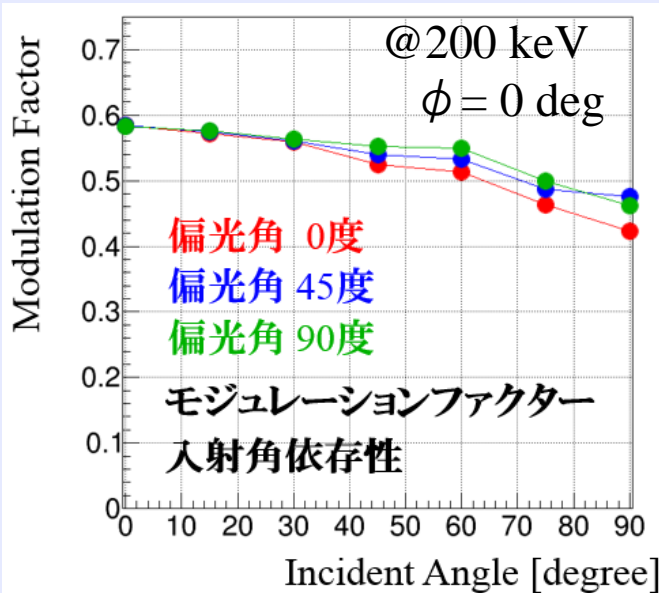
フィット結果から M算出

$$M = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}}$$

入射エネルギーを変えて



入射角を変えて(zenith方向のみ)



広い視野 ~ 3 [sr] で

低エネルギー側  
( $E \leq 200$  keV)

**M > 0.5**

高エネルギー側でも、  
( $E \leq 650$  keV)

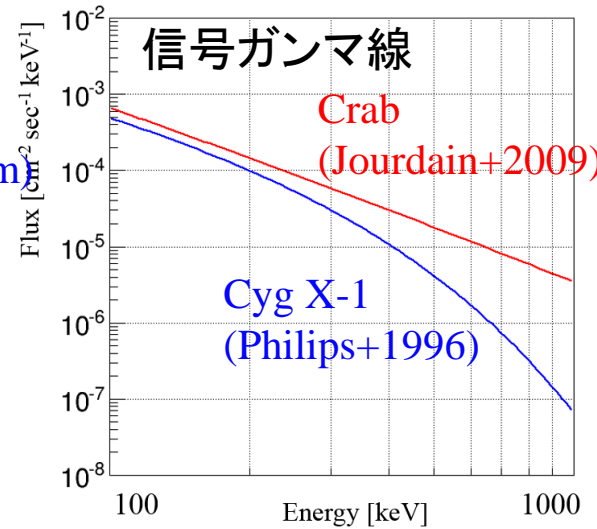
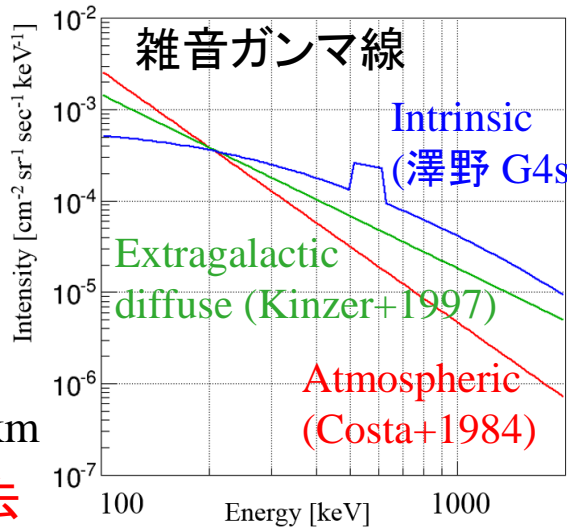
**M > 0.4**

# 最小偏光感度の見積

$$MDP_{[%]} = \frac{429}{ASM} \sqrt{\frac{AS + B}{T}}$$

Intrinsic background

- Geant4 シミュレーション
- SMILE-II 筐体 @ 中緯度, 高度40km
- 中性子・荷電粒子はdE/dxで除去



## SMILE-II / SMILE-III 10時間観測 @ 高度40 km

有効面積@200keV \ 天体	Crab 150-950 keV	Cyg X-1 150-950 keV
SMILE-II ~ 1 cm <sup>2</sup>	73%	—
gas 1 atm ⇒ 3 atm ~ 5 cm <sup>2</sup>	<b>31%</b>	<b>47%</b>
CF <sub>4</sub> gas 3atm & Scinti. 2R.L. SMILE-III ~ 12 cm <sup>2</sup>	<b>19%</b>	<b>29%</b>

SMILE-III 10時間で Crab, Cyg X-1 偏光観測可能！



# まとめ

◆ ETCCの雑音除去能力 **宇宙雑音環境でも高感度**

◆ 偏光観測に有利

単純構造で系統誤差が小さい

**雑音除去で高い最小偏光感度を維持**

◆ モジュレーションファクター (G4 シミュレーション)

$E \leq 200 \text{ keV}$   **$M > 0.5$**  (zenith  $\theta < 60^\circ$ )

$E \leq 650 \text{ keV}$   **$M > 0.4$**

◆ **気球実験で Crab, Cyg X-1 偏光観測可能!**

~12 cm<sup>2</sup> @200 keV

10時間、高度40km

MDP	Crab	~ 19%	(150-950 keV)
	Cyg X-1	~ 29%	(150-950 keV)

◆ 今後

➤ 検出器応答を考慮した詳細なシミュレーション

➤ 実機試験

➤ TPC圧力容器 & シンチ配置の改良

