

# 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡を用いた 天体MeVガンマ線の偏光撮像観測計画

古村翔太郎, 谷森達, 窪秀利, 高田淳史, 水本哲矢,  
J. D. Parker, 水村好貴, 澤野達哉, 中村輝石, 松岡佳大,  
中村祥吾, 小田真, 岸本哲朗, 竹村泰斗, 宮本奨平,  
身内賢太郎,<sup>1</sup> 黒澤俊介<sup>2</sup>

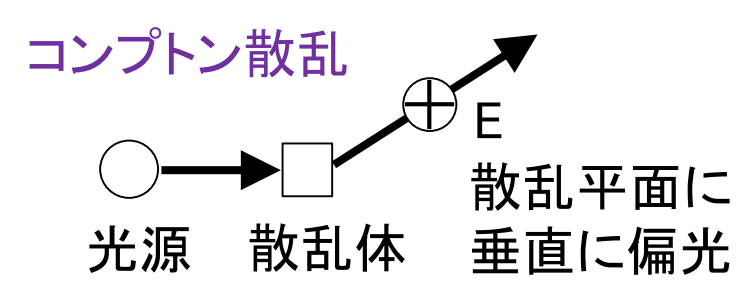
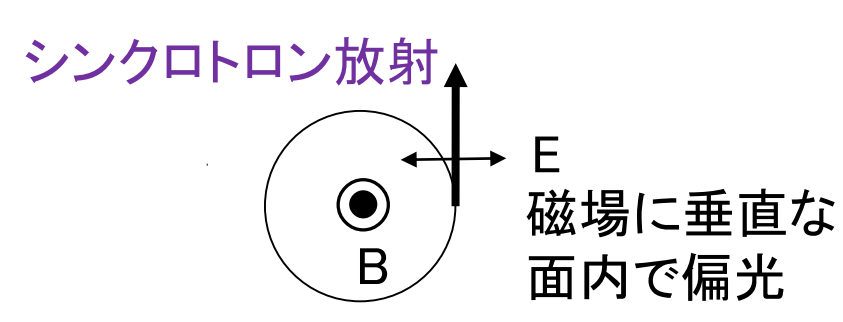
京都大学,<sup>1</sup> 神戸大学,<sup>2</sup> 東北大学

## Introduction

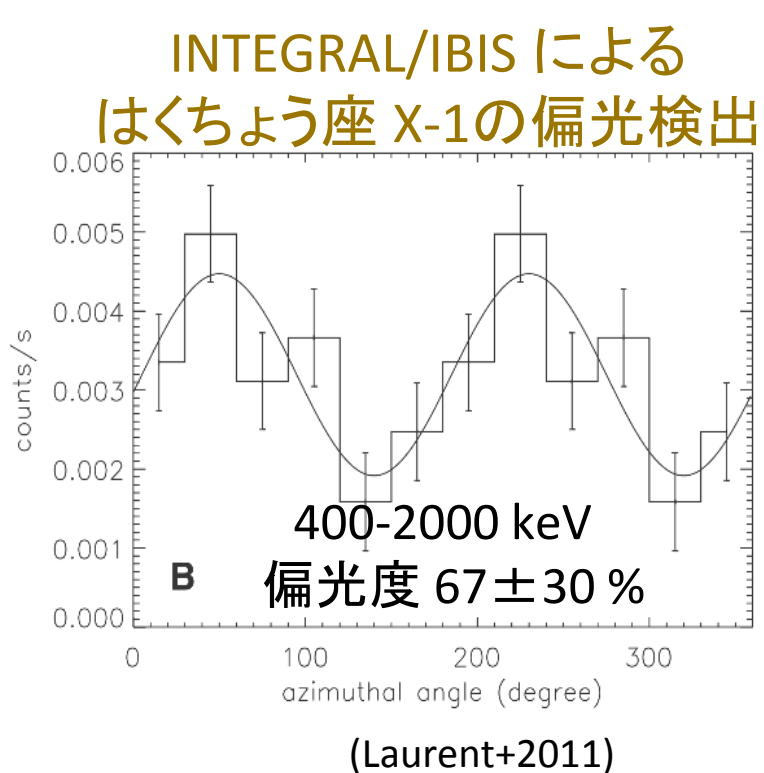
偏光観測は測光・分光・撮像に続く第4の観測手法であり、天体から到来する光の偏光度および偏光方向を測定する。X線・ガンマ線天文学においては、光源天体の磁場・幾何学構造や強重力場を探るプローブとなる。

### 偏光生成プロセス・天体

- シンクロトロン放射
  - 超新星残骸の磁場構造
  - ガンマ線バーストの放射機構の解明
- コンプトン散乱
  - 降着円盤、分子雲トラスの幾何学構造
- 重力レンズ効果
  - ブラックホールの直接観測



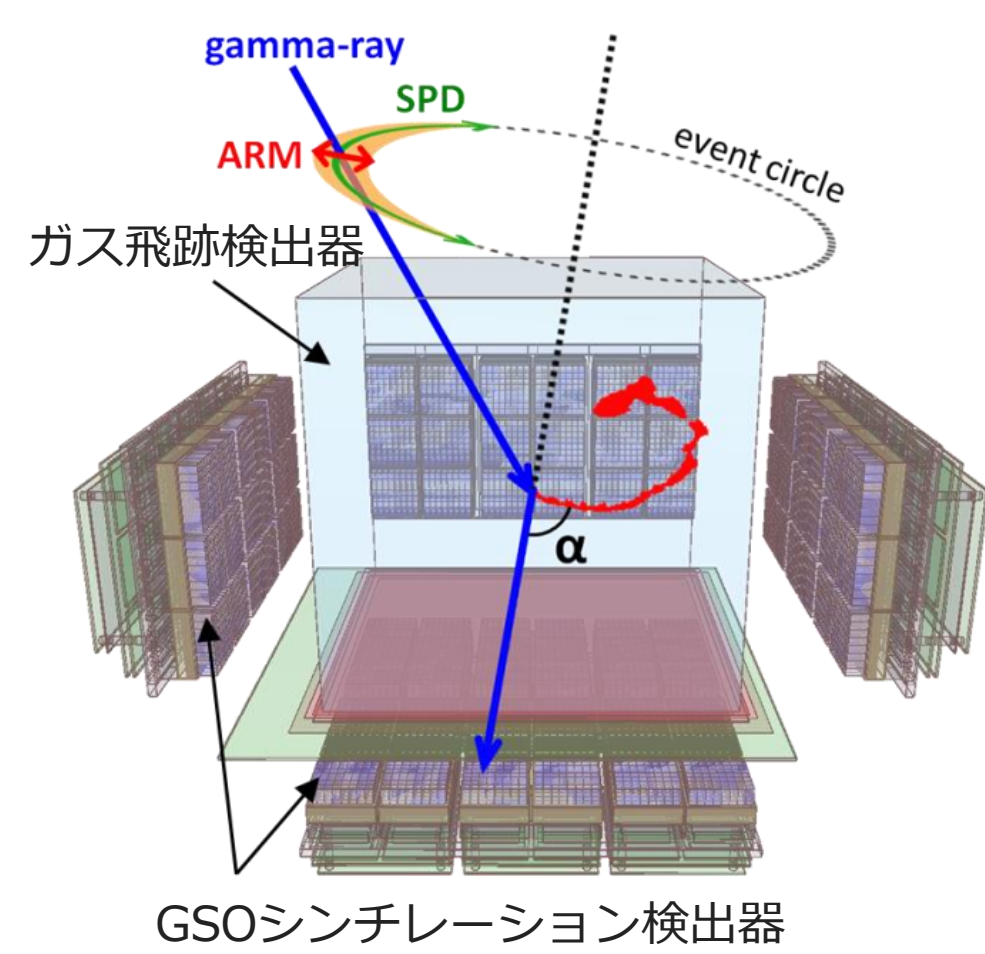
しかし、sub-MeVからMeVのエネルギー領域における観測例はごく最近まで皆無であった。2008年になってINTEGRAL衛星搭載の検出器(SPI, IBIS)によってかに星雲の偏光が検出され、現在まで数例のガンマ線バーストおよび、はくちょう座X-1についてのみ報告がなされている。ただし、いずれも観測結果の誤差は大きく、この他の暗い定常天体の偏光検出には至っていない。



この問題はMeV帯域では撮像技術が確立されていないことに起因する。画像を用いて目標天体由来の信号を切り出す際に、撮像精度が悪い場合にはイメージの立体角分の広がりに応じて存在する雑音成分は除去できずに残ってしまう。さらにMeV帯域では、宇宙線と衛星筐体との相互作用から生じる多量のガンマ線や中性子・荷電粒子、これらすべてが雑音成分となり、画像品質の劣化を引き起こす。このためMeV帯域における偏光検出器は、高精度な撮像能力を持ち、かつ低雑音であることが求められる。

## Electron-Tracking Compton Camera (ETCC)

### 電子飛跡検出型コンプトンカメラ



コンプトン散乱を利用したMeVガンマ線撮像装置。反跳電子のエネルギーと方向を取得するガス飛跡検出器と、散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点を取得する位置感度型シンチレーション検出器から構成される。反跳電子の方向を取得することで高品質な画像取得と高効率な雑音除去が可能となる。気球に搭載して天体観測を行うSMILE計画を進めている。詳細はP-066(高田講演)にて。

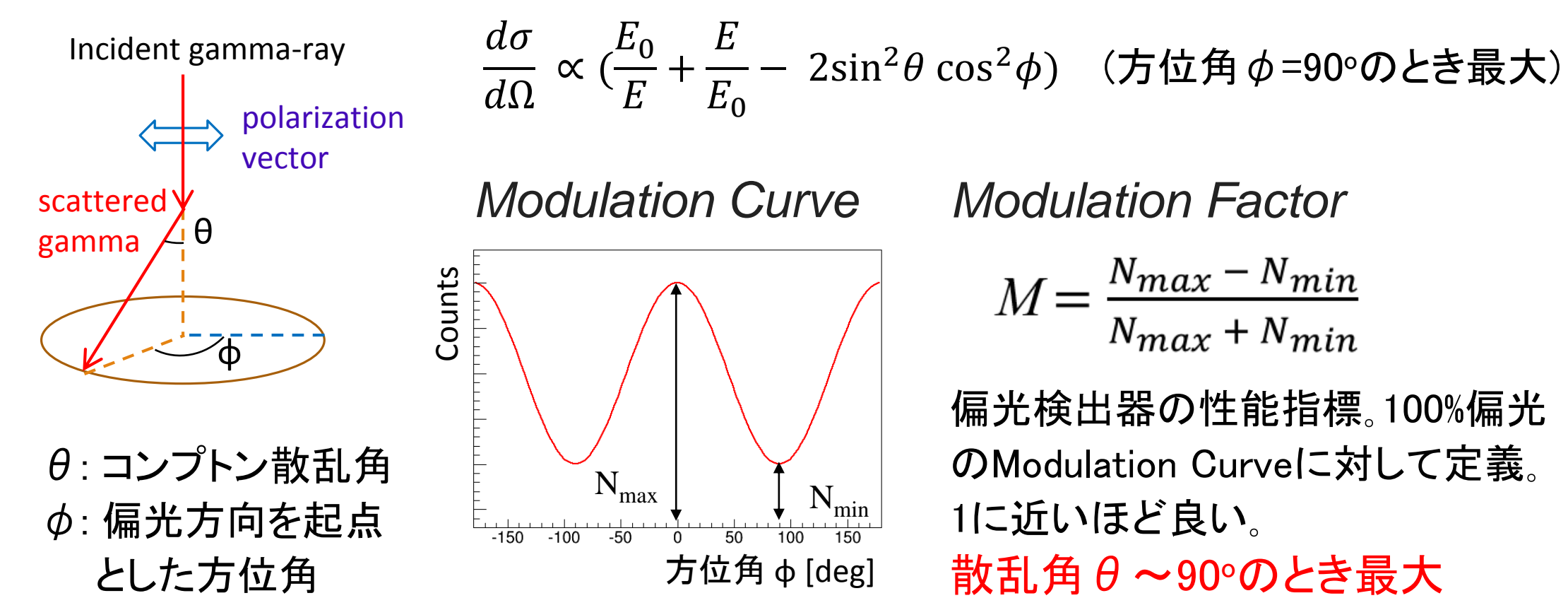
### Performance of Current ETCC (for SMILE-II)

飛跡検出器サイズ	(30 cm) <sup>3</sup>	有効面積	0.7 cm <sup>2</sup> @ 356 keV
ガス	Ar:iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> :CF <sub>4</sub> (95:2:3), 1 atm	角度分解能	5.3° @ 662 keV
空間分解能	< 0.5 mm	視野角	~ 6 sr @ 662 keV
エネルギー分解能 (FWHM)	22 % (@ 22 keV)	かに星雲を高度40 km, 数時間で検出可能	
シンチレータ種類	GSO:Ce (6.71 g/cm <sup>3</sup> )	ガス種・ガス圧変更 + シンチ増強で有効面積 ~ 12 cm <sup>2</sup> (SMILE-III)	
ピクセルサイズ	6 × 6 × 13 mm <sup>3</sup>		
ピクセル数	6912		
ダイナミックレンジ	80 keV - 1.3 MeV		
エネルギー分解能 (FWHM)	10 % (@ 662 keV)		

SMILE-II フライトモデル

## Compton Polarimetry using ETCC

コンプトン散乱断面積の大きさは偏光方向に依存性を持ち、ガンマ線は偏光方向と垂直に散乱されやすい。コンプトンカメラはガンマ線散乱方向の方位角分布を取得することで、その異方性(modulation)から偏光検出を行う。



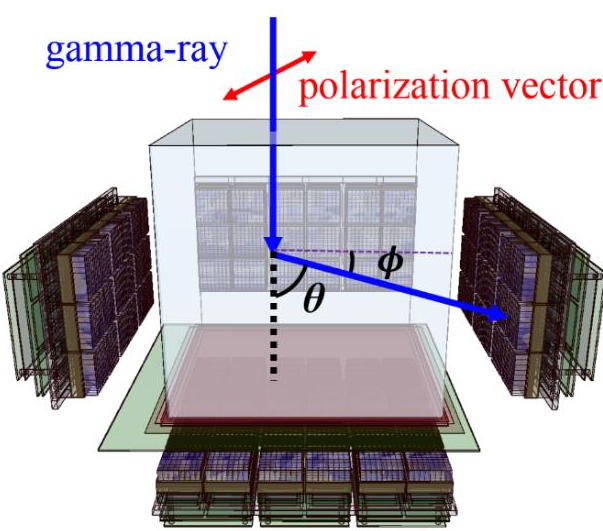
### Minimum Detectable Polarization (MDP)

最小偏光検出感度。対象天体がこれ以上の偏光度であれば、99 % CL で検出可能。

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

一般には、 $B \gg AS$  であり、 $MDP \propto \frac{\sqrt{B}}{AS}$  より、**雑音に大きく影響を受ける**

- コンプトン散乱点の3次元的な位置決定が可能
- 側面シンチレーション検出器が  $\theta \sim 90^\circ$  をカバーしているため、大きなModulation Factorを得られる
- 優れた雑音除去能力により、高雑音な宇宙環境下でも本来のMDP値を維持
- ジオメトリが単純で、系統誤差を小さく抑えることができる



## Performance

偏光検出器としての性能評価を、Geant4シミュレーションおよび室内実験の両面から行った。

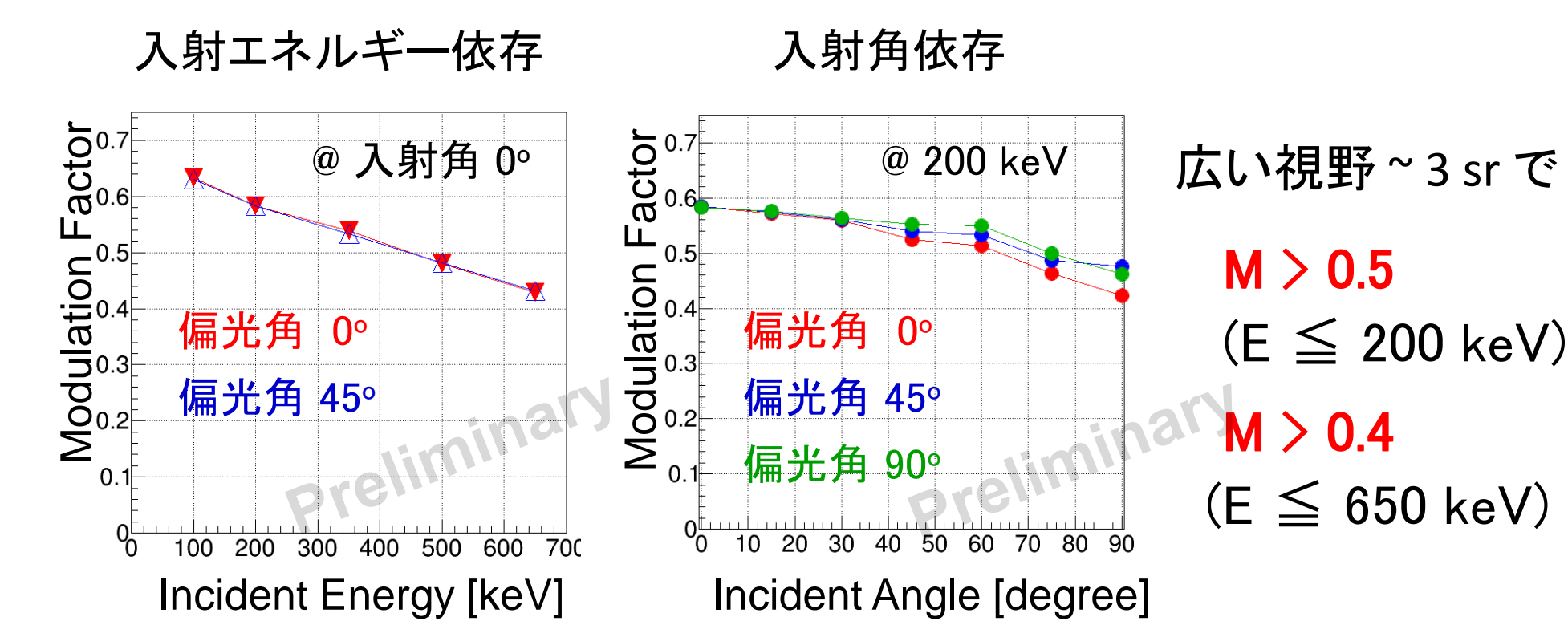
## Geant4 Simulations

### (1) Conditions

100 %偏光した平行光をETCCに入射させ、Modulation Factorの変化を見る。

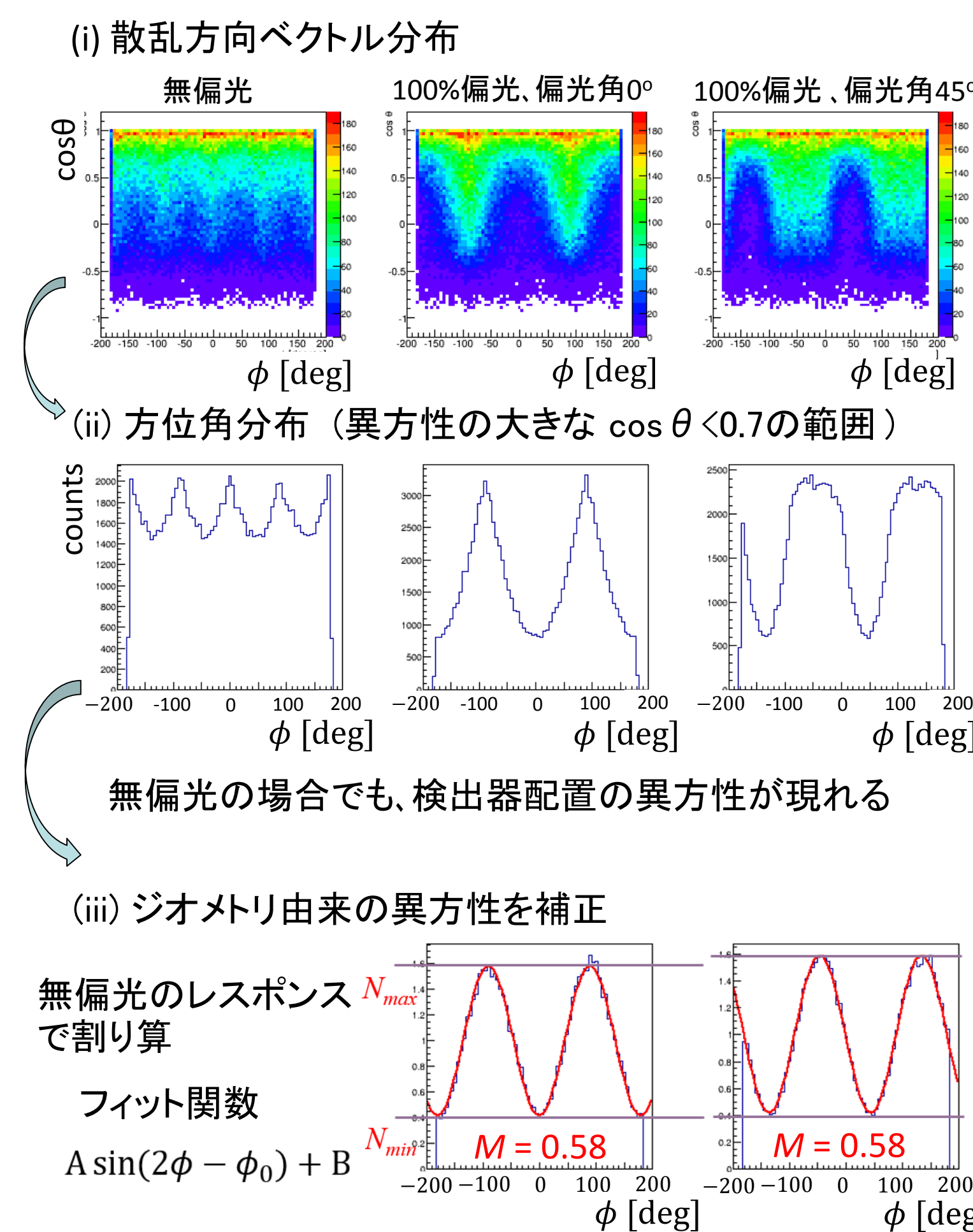
Geant4バージョン	Geant4 10.0 Patch-01
物理モデル	G4LivermorePolarizedComptonModel
ジオメトリ	SMILE-II フライトモデルに準拠
構成物質	SMILE-II フライトモデルに準拠
位置分解能	シンチレーション検出器は考慮 ガス飛跡検出器は未考慮
エネルギー分解能	未考慮

### (3) Results



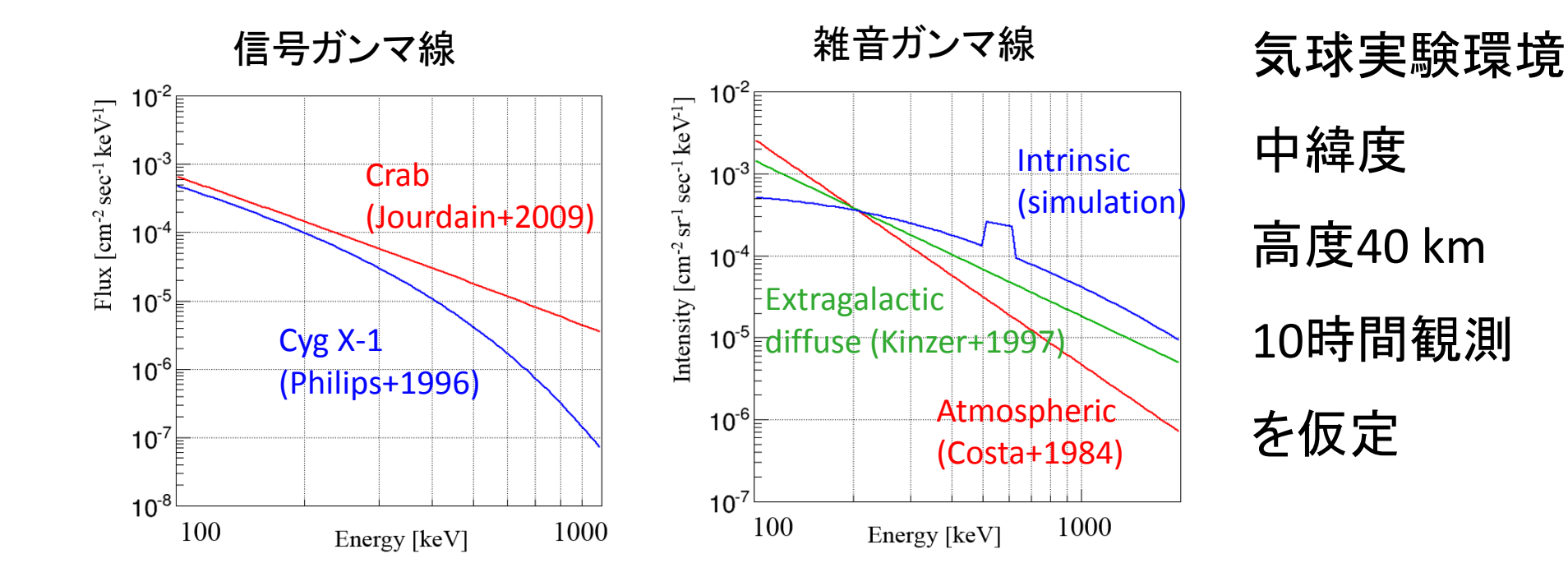
### (2) Data Analysis

例) 200 keVガンマ線、天頂方向から入射



### (4) MDPs

得られたModulation Factorから、気球実験環境下での最小偏光感度を見積もる。対象天体は、かに星雲・はくちょう座X-1。雑音成分としては、系外銀河拡散ガンマ線、大気ガンマ線、および検出器筐体を考慮したIntrinsicなガンマ線を考える。Intrinsicな雑音成分はGeant4シミュレーションで計算した。このうち、中性子・荷電粒子はETCCの雑音除去能力により除かれているものとした。(dE/dx粒子識別)

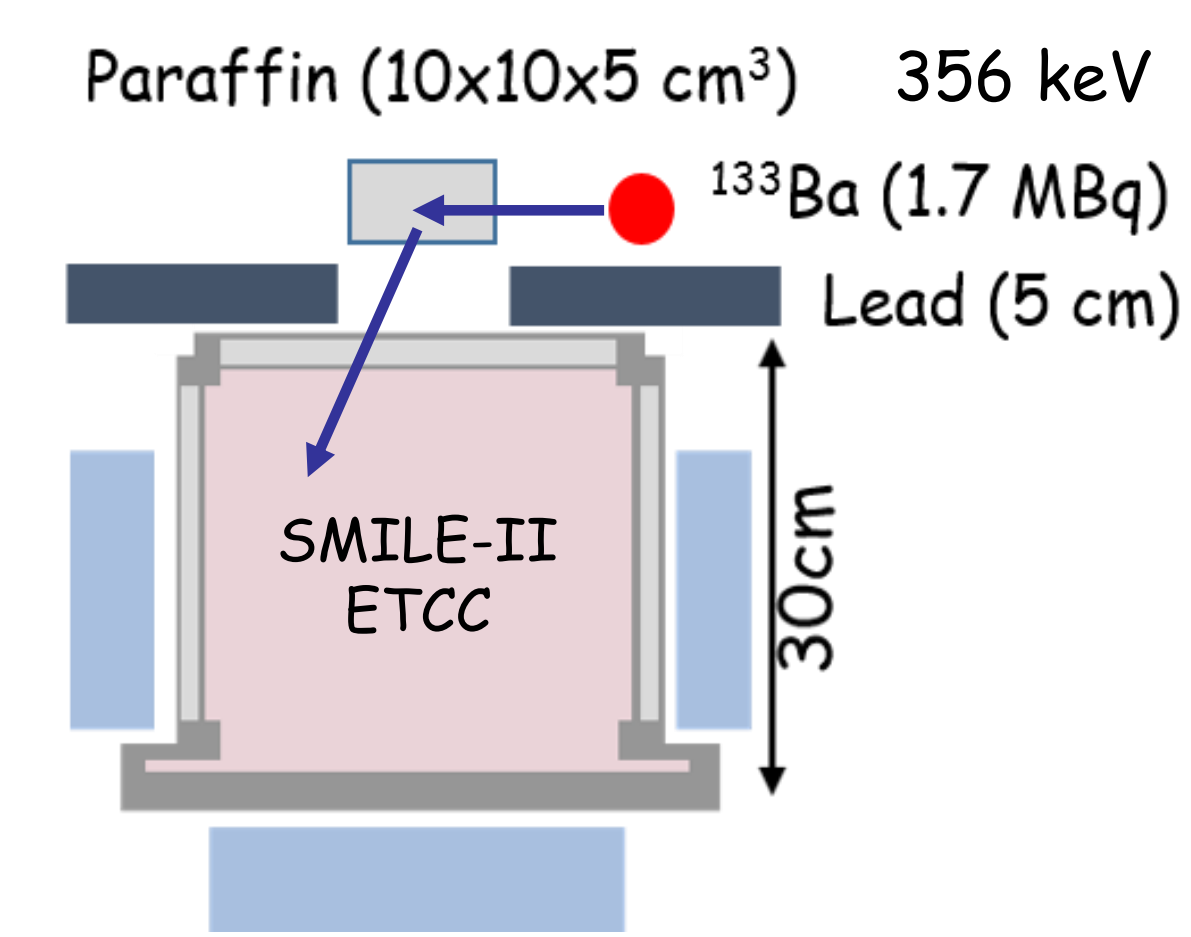


有効面積@ 200 keV \ 天体	かに星雲 150-950 keV	はくちょう座X-1 150-950 keV
SMILE-II ~ 1 cm <sup>2</sup>	73%	—
~ 5 cm <sup>2</sup>	31%	47%
SMILE-III ~ 12 cm <sup>2</sup>	19%	29%

SMILE-III 気球実験10時間で、かに星雲・はくちょう座X-1の偏光検出可能!

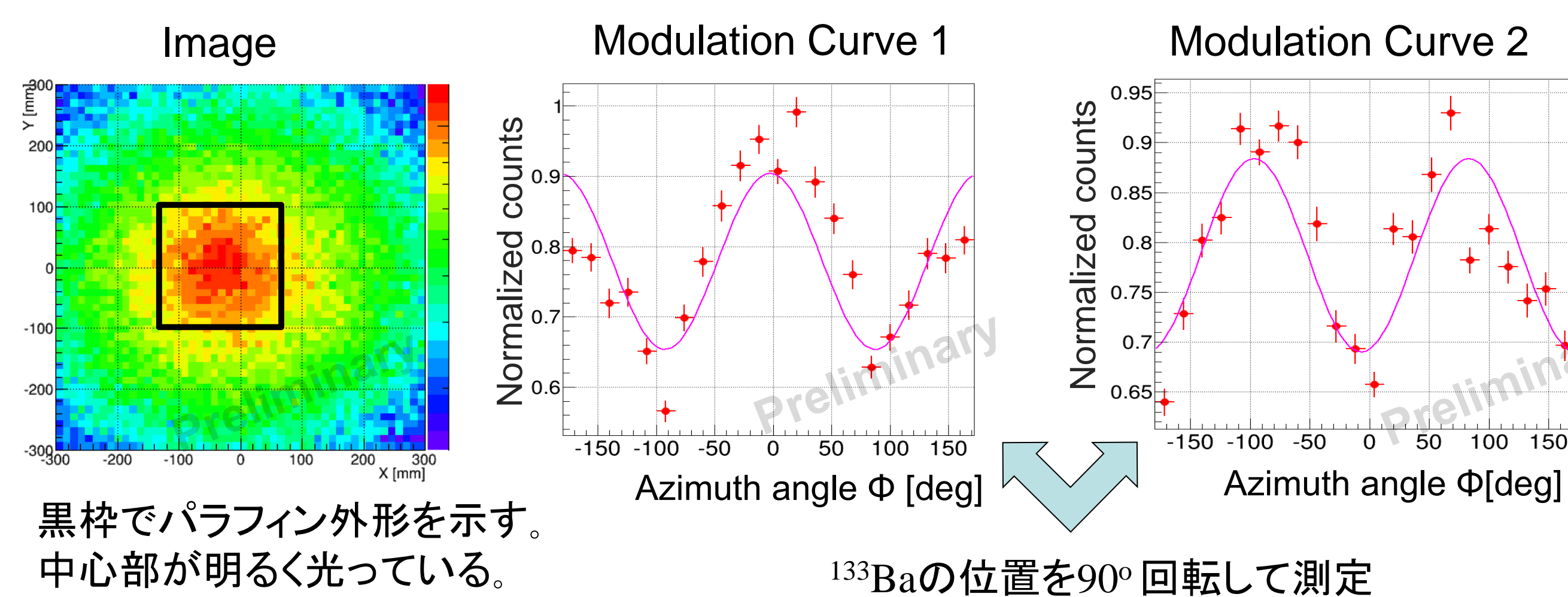
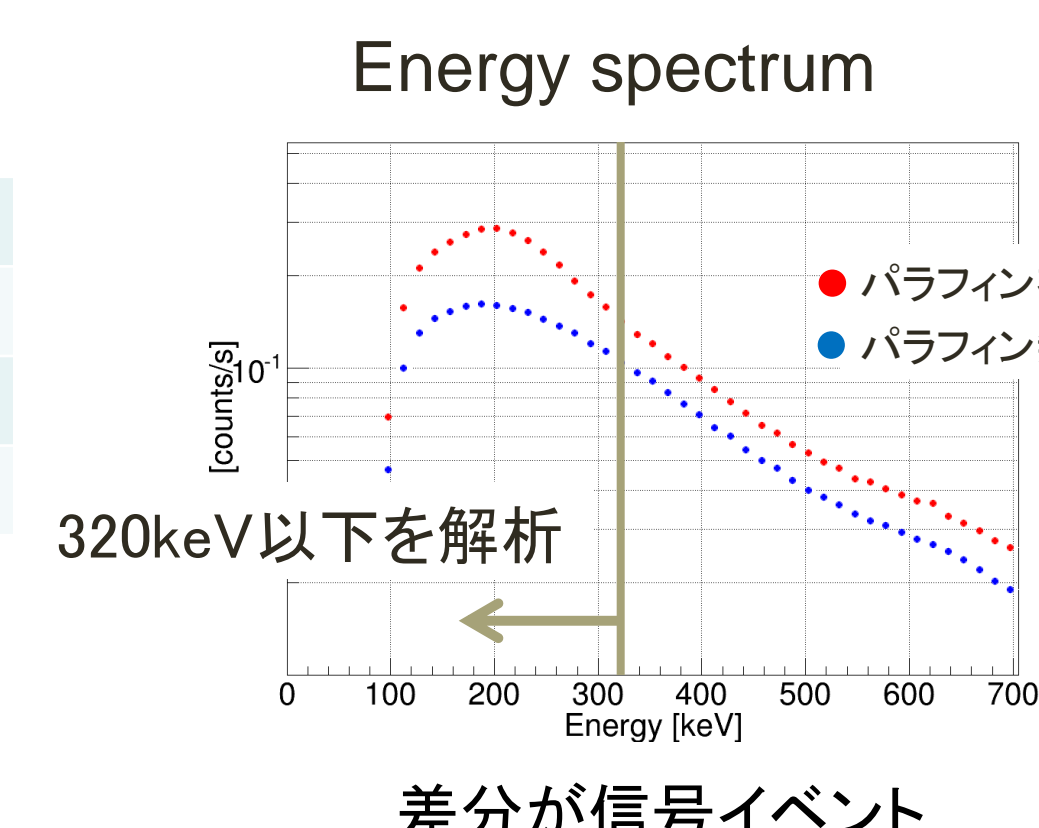
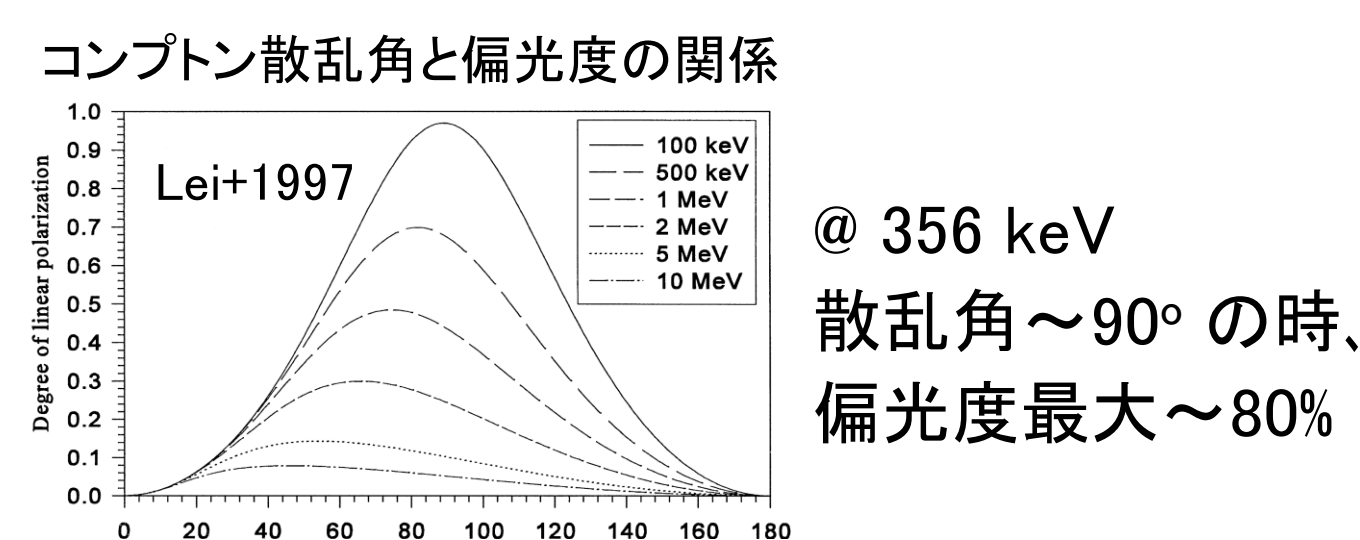
## Laboratory Experiments

コンプトン散乱後のガンマ線は、一部直線偏光していることを利用する。<sup>133</sup>Ba線源から放射されるガンマ線を、パラフィン中でコンプトン散乱させることで偏光させた後、ETCCに入射させて測定する。統計を稼ぐため、ETCCの間口を広く取り、様々な角度で散乱したガンマ線の入射を許容した。



ETCCに入射するガンマ線  
コンプトン散乱角 50-130°  
エネルギー 170-260 keV  
偏光度 ~ 40 %  
SN比 0.17 : 1

偏光度はGeant4シミュレーション、SN比はトリガーレートから計算した。  
雑音成分優位な環境である。



雑音成分優位な環境下で、偏光度 ~ 40 %  
Energy < 320 keV  
ガンマ線偏光検出に成功!  
撮像も成功しており、偏光撮像装置としての第一歩

## Summary

- ETCCは偏光観測に有利な特性を持ち、次世代のMeVガンマ線偏光撮像観測装置となりうる。
- Geant4シミュレーション: 大きなModulation Factor  $M > 0.5$  ( $E \leq 200$  keV),  $M > 0.4$  ( $E \leq 650$  keV)
- 気球実験で、かに星雲、はくちょう座X-1の偏光検出可能。  
有効面積 ~ 12 cm<sup>2</sup>, 高度40 km, 10時間観測で  
MDP ~ 19 % (かに星雲), ~ 29 % (はくちょう座X-1)
- 室内実験: 雑音優位な環境下でガンマ線偏光検出に成功  
偏光度 ~ 40 %,  $E < 320$  keV

## Future works

- 2015年1月末にSPring-8で高エネルギー非弾性散乱ビームライン(BL08W)を利用した偏光測定実験予定 (170 keV - 340 keV)
- 詳細なGeant4シミュレーション
  - より高エネルギー側
  - 検出器応答を考慮
  - SMILE-IIIジオメトリ
  - ジオメトリの大胆な変更(右図)
  - 室内実験の再現・比較
- 撮像を活かした偏光測定実験

