

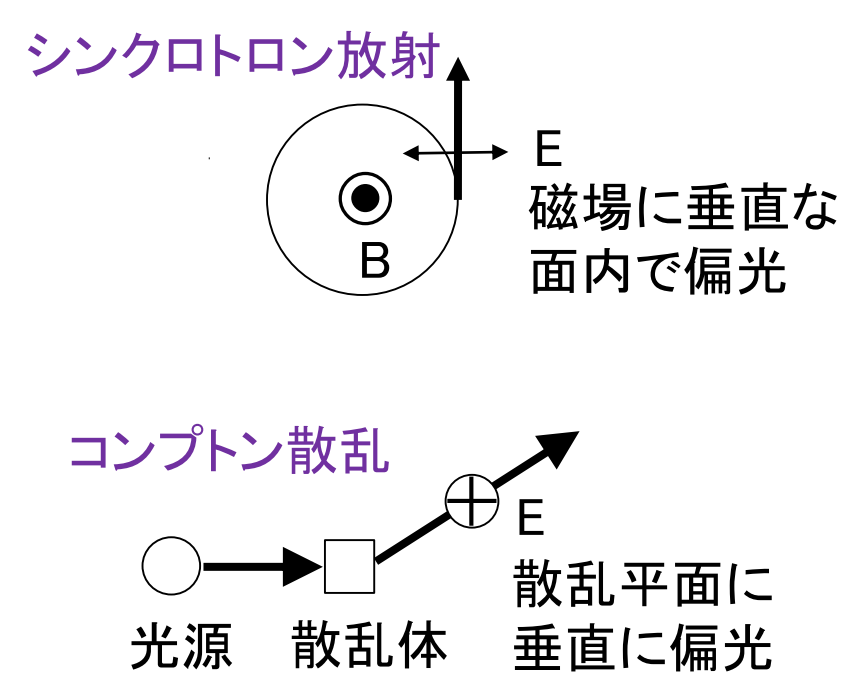
電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡が持つ MeVガンマ線偏光撮像能力の検証

谷森達, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 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, 竹村泰斗, 宮本奨平,
身内賢太郎,¹ 黒澤俊介² 京都大学,¹ 神戸大学,² 東北大学

1. Introduction

X線・ガンマ線帯域における偏光生成プロセス

- 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
- 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

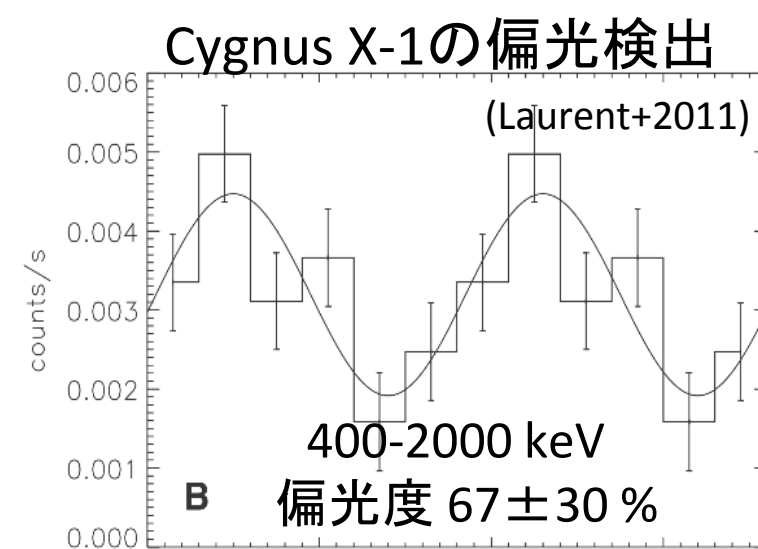


X線・MeVガンマ線帯域における偏光観測

観測例は Crab Nebula, Cygnus X-1, 数例のガンマ線バーストのみ

定常天体の観測

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



INTEGRALによる観測は、MeV帯域で最も明るいCrab NebulaやCygnus X-1においても誤差が大きく、暗い定常天体での偏光検出の難しさを示している。偏光検出においては雑音の除去が最重要である。一方で、MeV帯域では宇宙線との相互作用により多量のガンマ線・中性子・荷電粒子が生じ、必然的に高雑音環境となる。さらに、MeV帯域では撮像技術が確立されていないために、撮像精度が悪く、雑音除去が十分に行えていない。

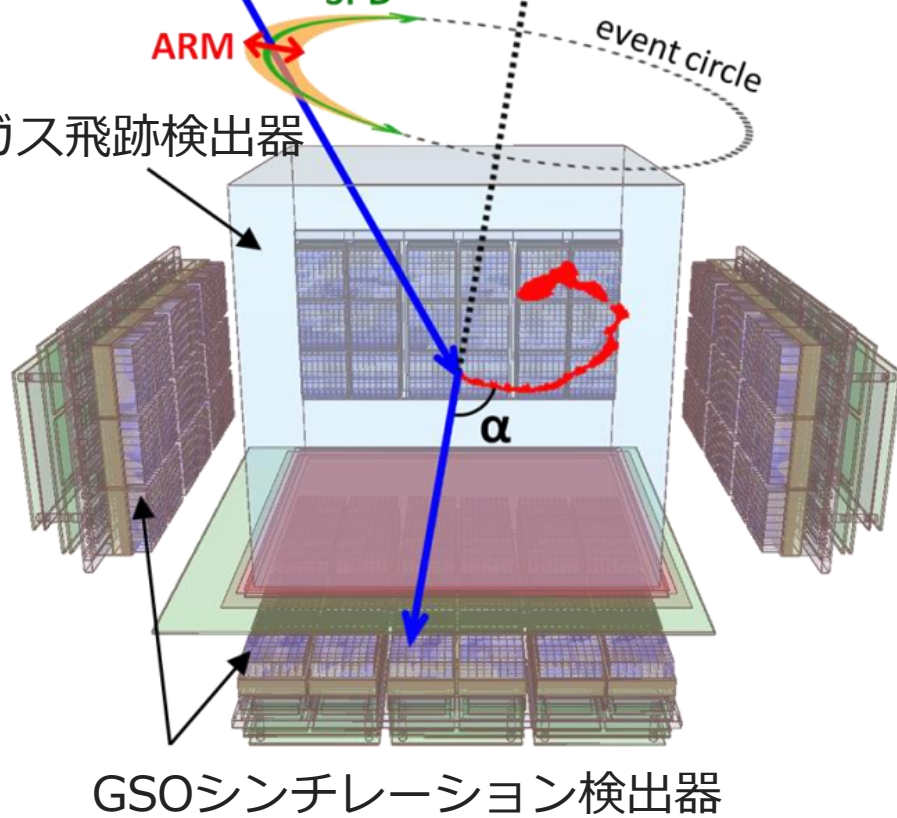
したがってMeV帯域における偏光検出器は、強力な雑音除去能力および高精度な撮像能力を持つことが求められる。

2. Electron-Tracking Compton Camera (ETCC)

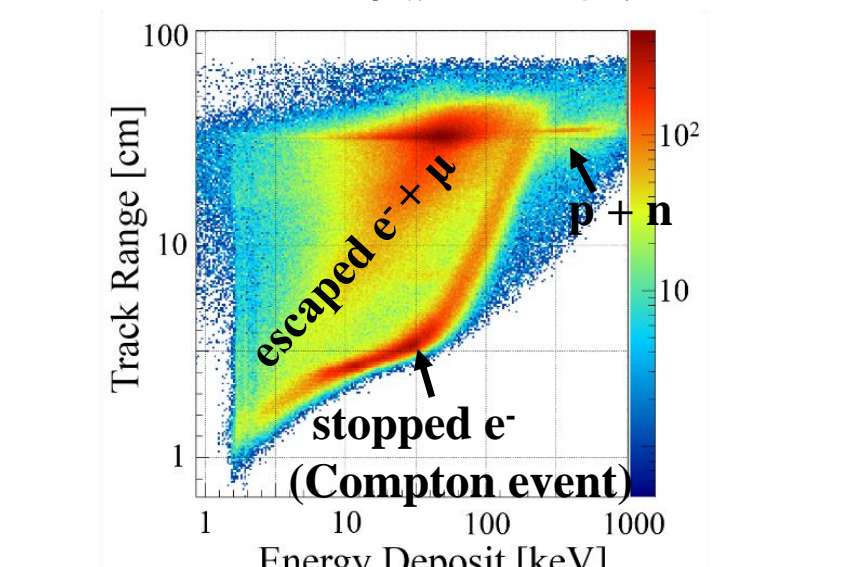
電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)

- ガス飛跡検出器
反跳電子のエネルギー & 3次元飛跡
- シンチレーション検出器
散乱ガンマ線のエネルギー & 吸収位置

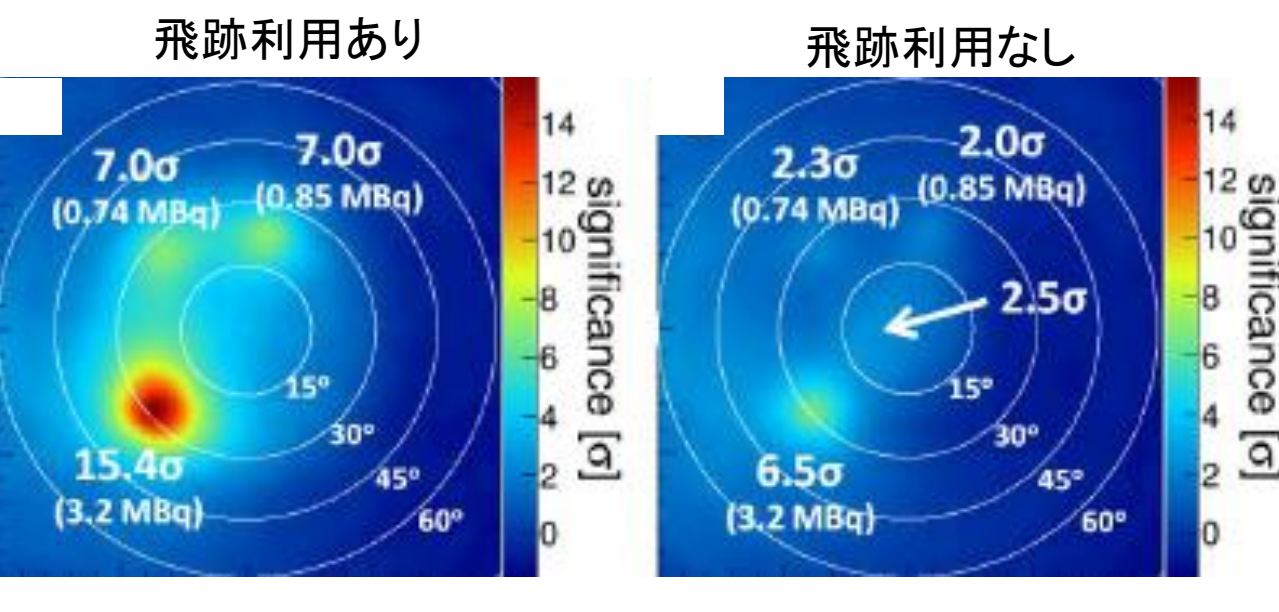
- 3次元飛跡の利用により、
 - ✓ エネルギー損失率を用いた粒子識別 (高効率な雑音除去)
 - ✓ 1事象毎にガンマ線の到来方向を強く制限 (高品質な撮像)



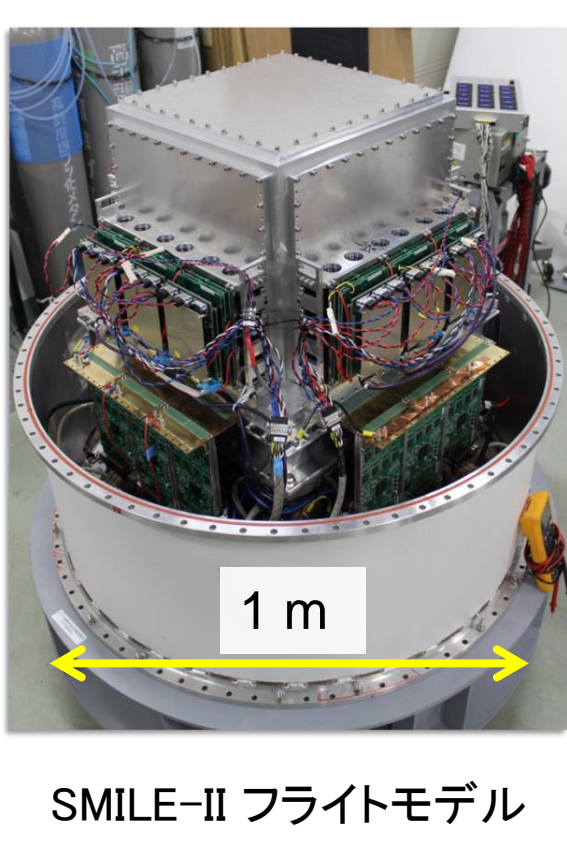
陽子ビームを利用した高雑音環境下でのエネルギー損失率分布(実測)



¹³⁷Cs 放射線源 × 3 の撮像(実測)



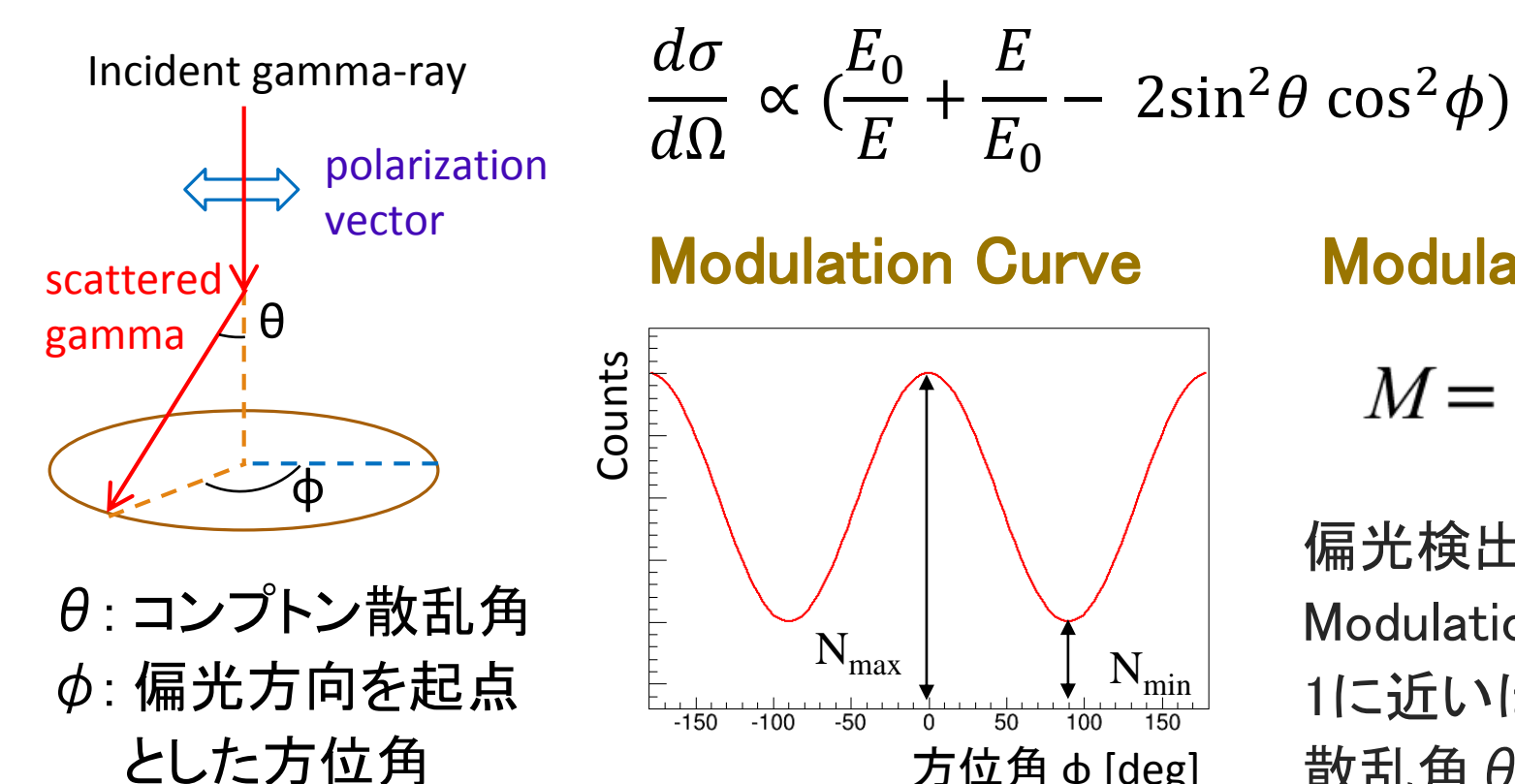
ETCC現行機のパフォーマンス (気球実験 SMILE-II フライトモデル)



飛跡検出器サイズ	(30 cm) ²	有効面積	0.7 cm ² @ 300 keV
ガス	Ar:iso-C ₄ H ₁₀ :CF ₄ (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)		
シンチレータ種類	GSO:Ce (6.71 g/cm ³)		
ピクセルサイズ	6 × 6 × 13 mm ³		
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)		

3. Compton Polarimetry using ETCC

コンプトン散乱断面積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。ETCC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。

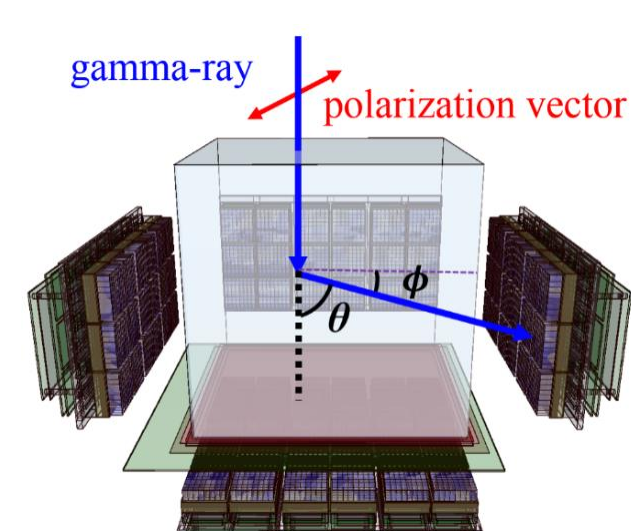


Minimum Detectable Polarization (MDP)

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、雑音の1/2乗に比例して劣化



ETCCを用いる利点

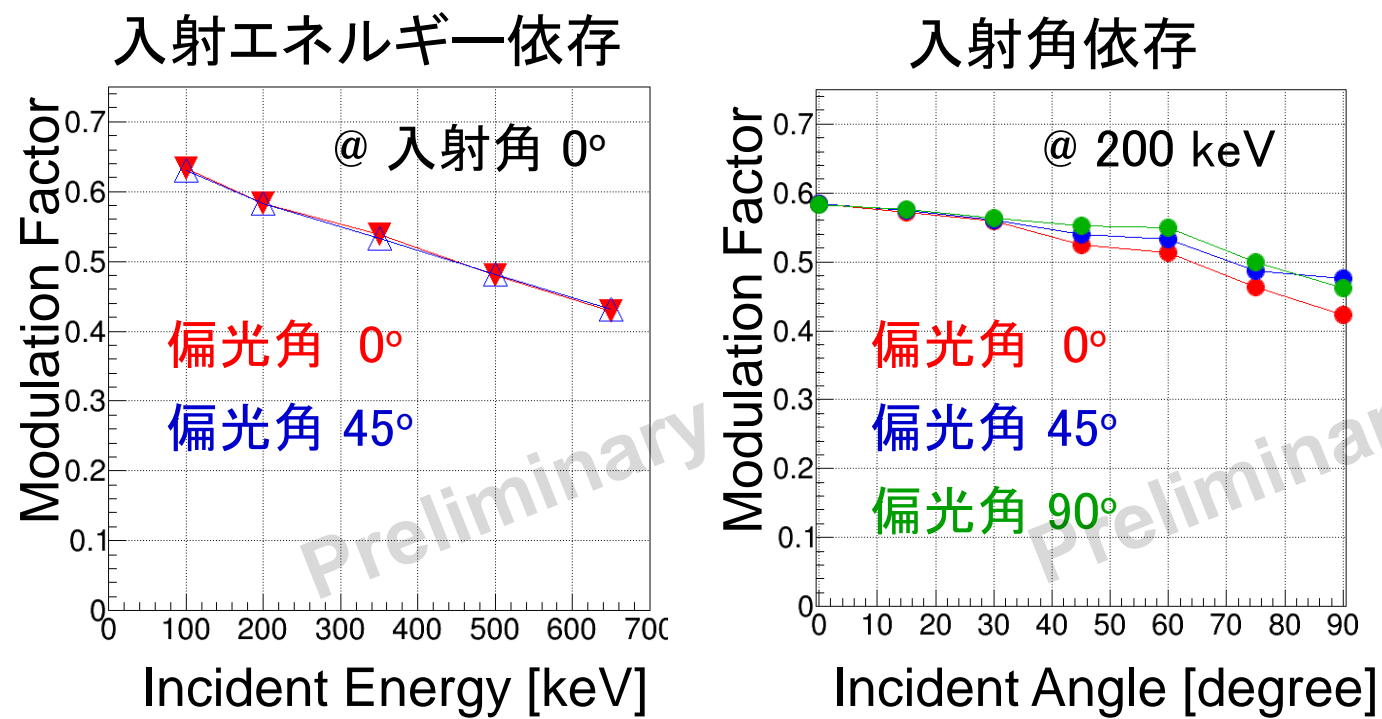
- ◆ 優れた雑音除去と撮像により、高雑音な宇宙環境下でも高いMDP値を維持
- ◆ コンプトン散乱点の3次元的な位置決定
- ◆ ジオメトリが単純で、系統誤差が小さい

4. Geant4 Simulation

セットアップ

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
位置分解能	シンチレーション検出器のみ考慮
エネルギー分解能	未考慮

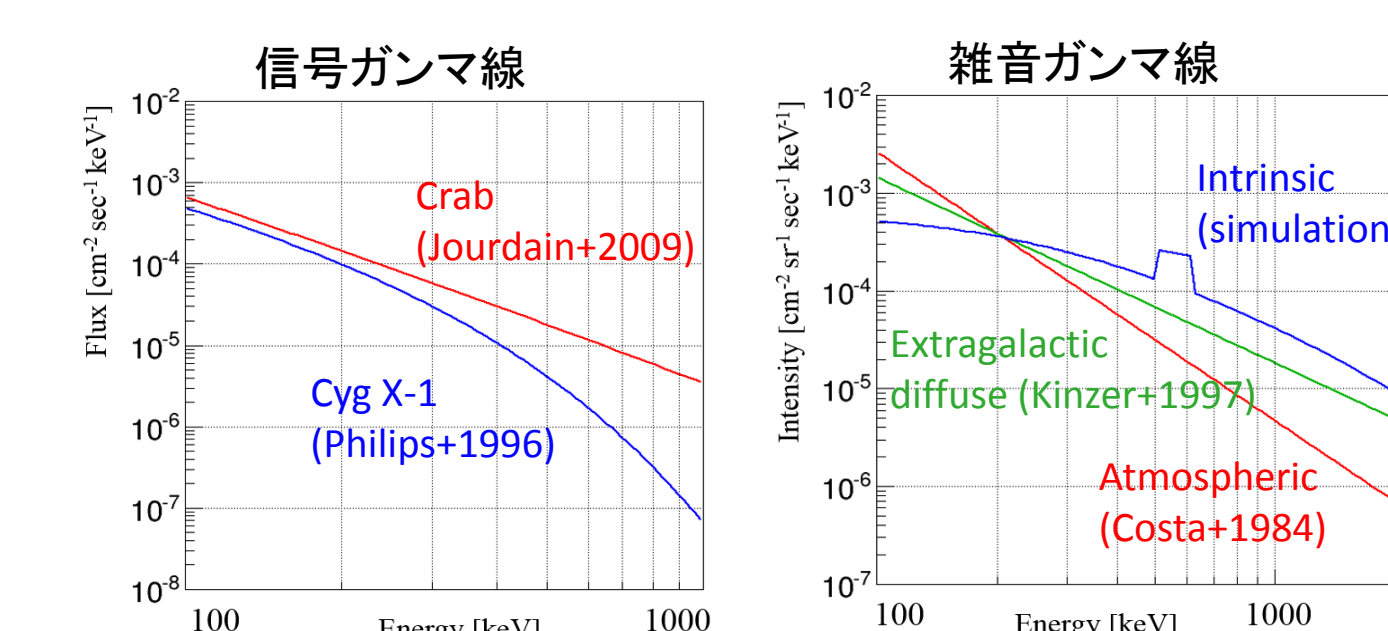
◆ Modulation Factor



✓ 広い視野~3 [sr] で $M > 0.5$ @ 200 keV

◆ Minimum Detectable Polarization

- 気球環境(中緯度、高度 40 km)で10時間観測を仮定
- 雑音成分: 系外銀河拡散ガンマ線、大気ガンマ線、Intrinsicガンマ線



Intrinsicな雑音成分のうち、中性子・荷電粒子はETCCで雑音除去可能

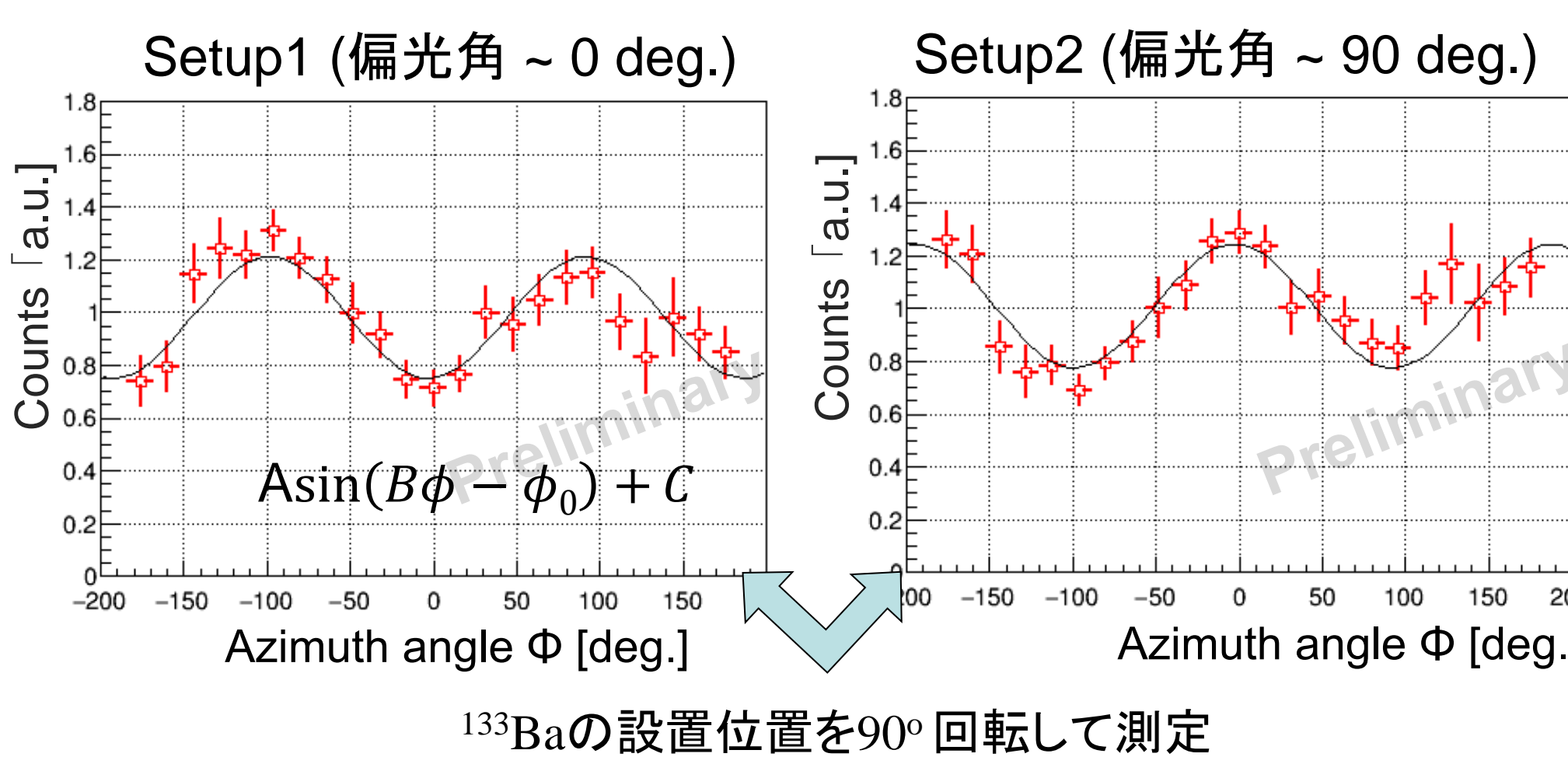
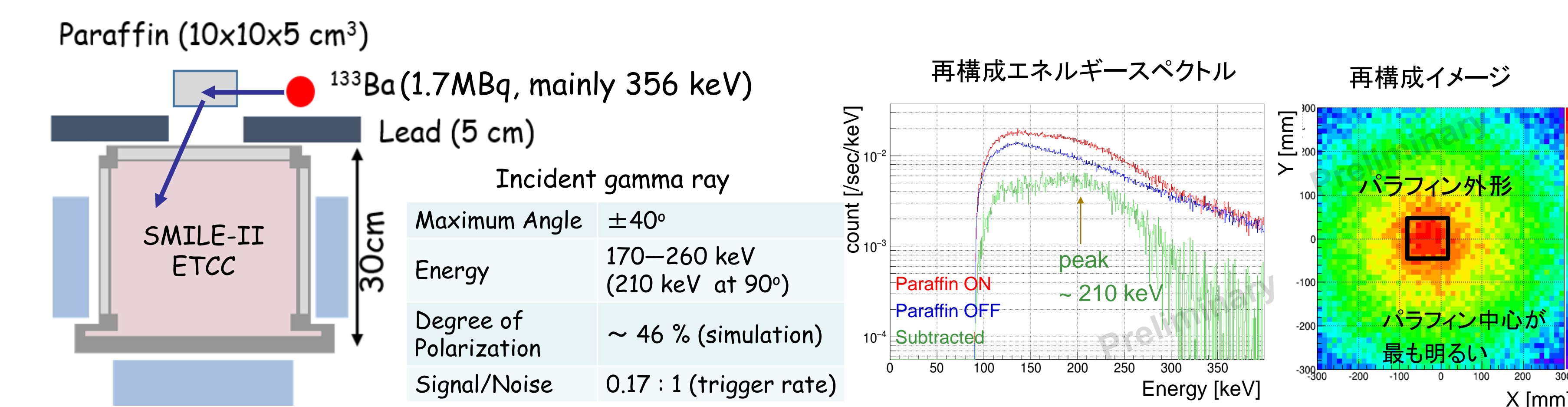
SMILE計画におけるMDP

Effective area @ 200 keV	Crab Nebula 150-950 keV	Cygnus X-1 150-950 keV
SMILE-II ~ 1 cm ²	73%	—
~ 5 cm ²	31%	47%
SMILE-III ~ 12 cm ²	19%	29%

✓ SMILE-III 気球実験
10時間観測で
Crab Nebula, Cygnus X-1
偏光検出可能

5. Laboratory Experiment with RI source

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。¹³³Ba線源から放射されるガンマ線を、散乱体(パラフィン)でコンプトン散乱させることで偏光させた後、ETCCで測定する。イベント統計を稼ぐため、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。2度コンプトン散乱したイベントを利用するため、SN比は低く、雑音優位な環境である。

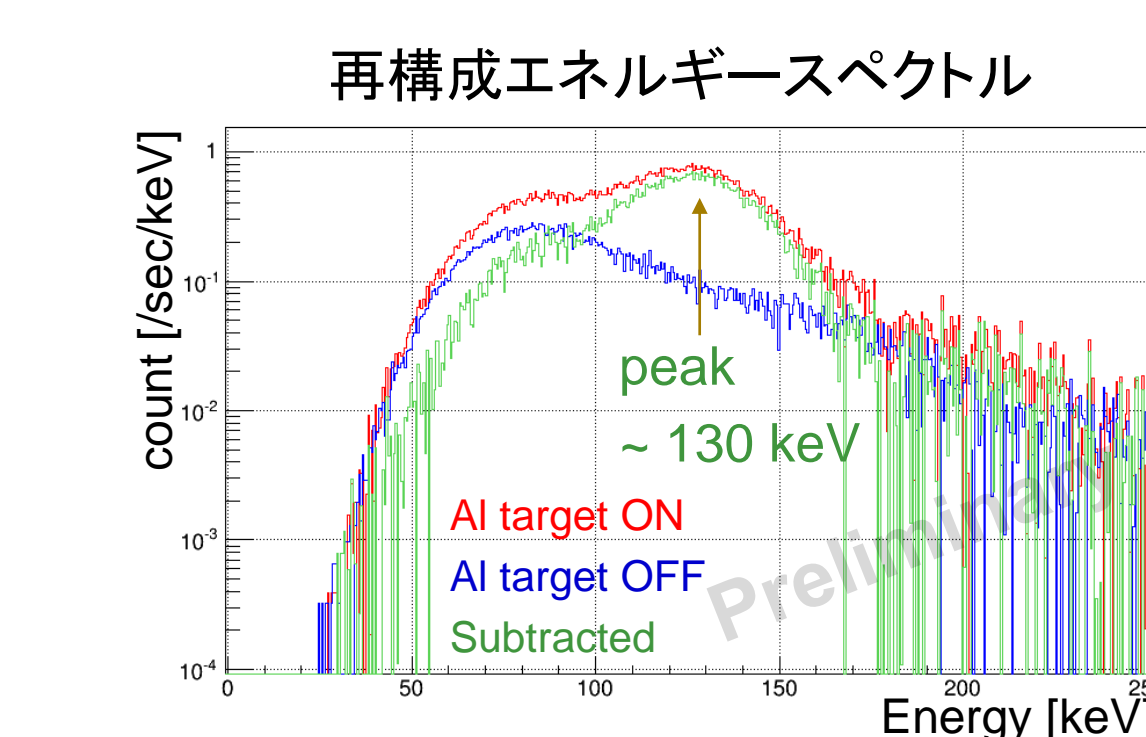
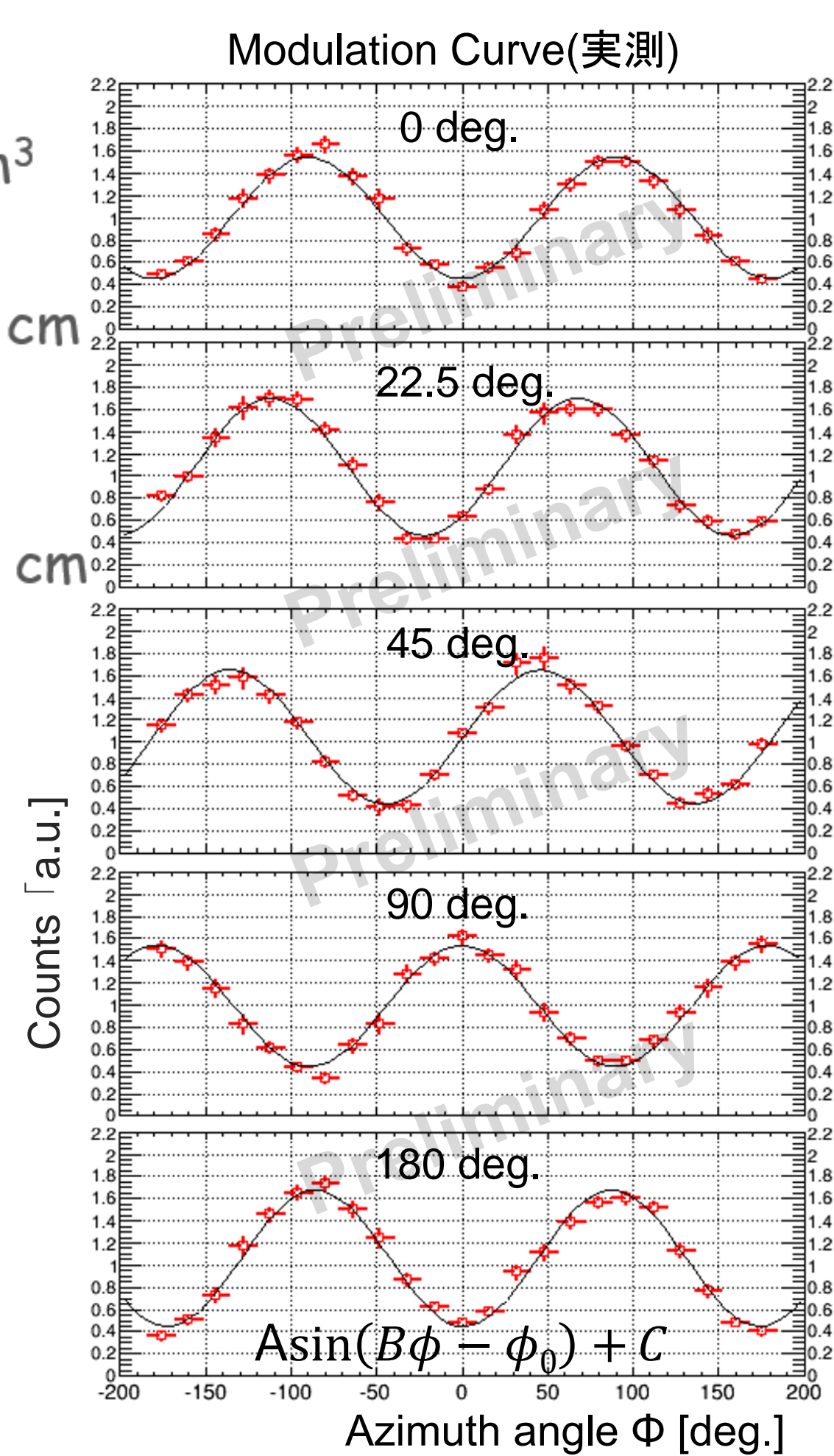
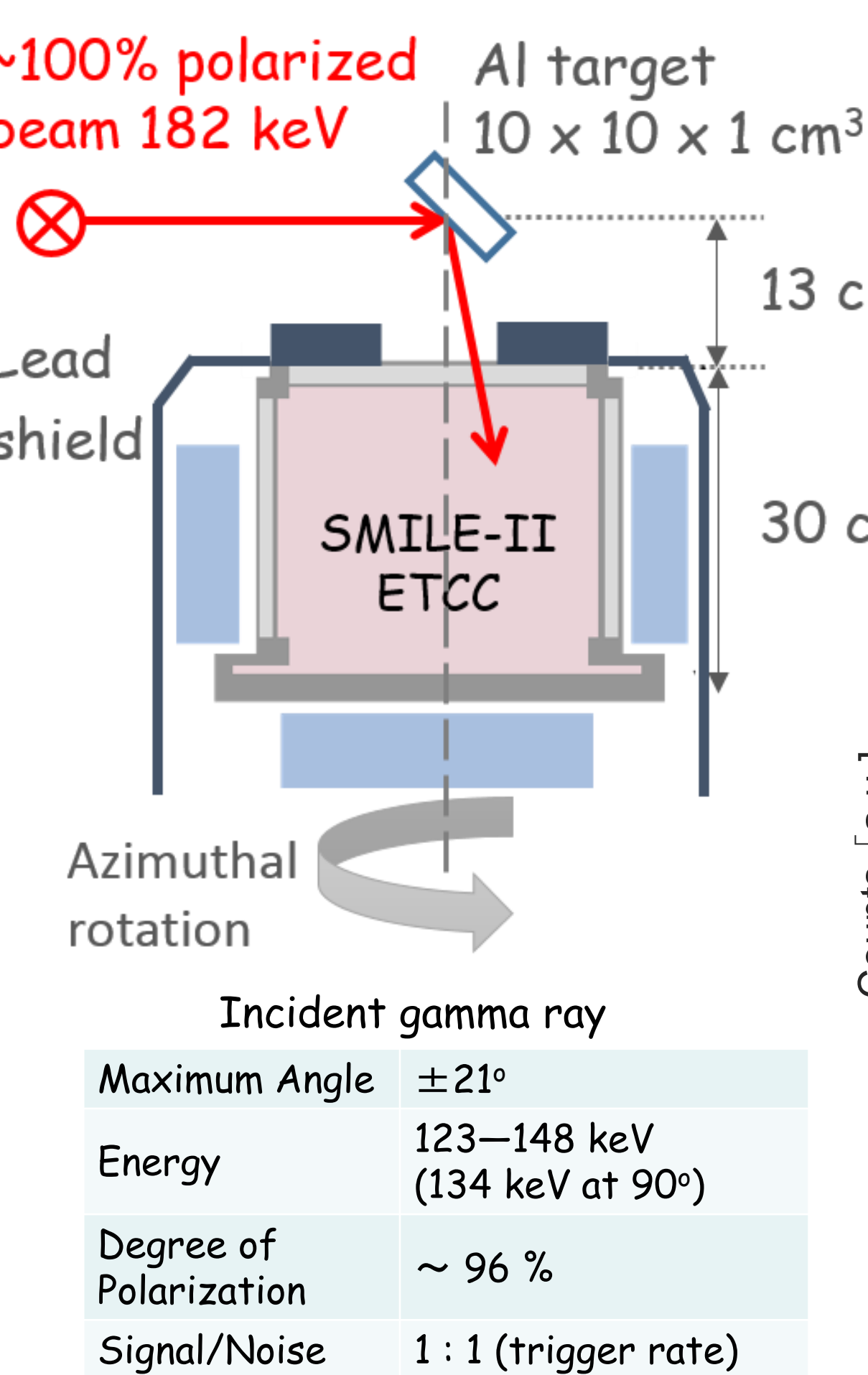


	Modulation Factor	Polarization Angle [deg.]
Setup1	0.51	1.7±8.4
Setup2	0.50	-93±4.7

- ✓ 雑音成分優位な環境下で、170-260 keV、~46%偏光ガンマ線の検出に成功
- ✓ シミュレーション値 > 0.5 に近いModulation Factor
- ✓ 撮像・分光にも成功、偏光撮像検出器として動作
- ✓ 撮像の活用は今後の課題

6. Experiment @ SPring-8 BL08W

偏光観測には高統計が必要となるため、上記のような下限数量以下の放射線源を用いた実験では定量評価は難しい。そこで、ETCCの観測エネルギー帯域(数百 keV - 1 MeV)で出力可能なビームラインSPring-8 BL08Wで実験を行った(2015年1月)。182keV直線偏光ビームを10mm厚のアルミ板に照射し、その~90° 散乱光をETCCで測定した。ETCC全体をAzimuth方向に回転させることで、入射ガンマ線の偏光方向を変えて、ETCC偏光検出のAzimuth依存性をみる。



Rotation angle [deg.]	Modulation Factor	Polarization Angle [deg.]	χ ² /ndf
0	0.57	0.3±1.3	19.2/19
22.5	0.59	-22±1.0	24.0/19
45	0.60	-44±0.7	16.1/19
90	0.57	-90±1.1	17.4/19
180	0.60	-2.3±1.1	25.4/19

- ✓ Modulation Factorはシミュレーション値とほぼ一致 ~ 0.6@130 keV
- ✓ 偏光角も設定値と誤差の範囲内で一致
- ✓ ETCCの高い偏光感度の実証
- ✓ Simulationとの詳細な比較は今後の課題

Summary & Future works

- RIを用いた低SN実験
 - ✓ 雑音優位な環境下で、170-260 keV、~46%偏光ガンマ線の検出に成功
 - ✓ シミュレーション値 > 0.5 に近いModulation Factor ~ 0.5 @ 170-260 keV
- Spring-8 BL08Wでの実験
 - ✓ シミュレーションとほぼ一致する高いModulation Factor ~ 0.6@130 keV
 - ✓ 偏光角の検出も設定値と誤差の範囲内で一致
- 実験とGeant4シミュレーションとの詳細な比較
 - 撮像を活かした偏光測定実験
 - より偏光検出に適したジオメトリの考案