

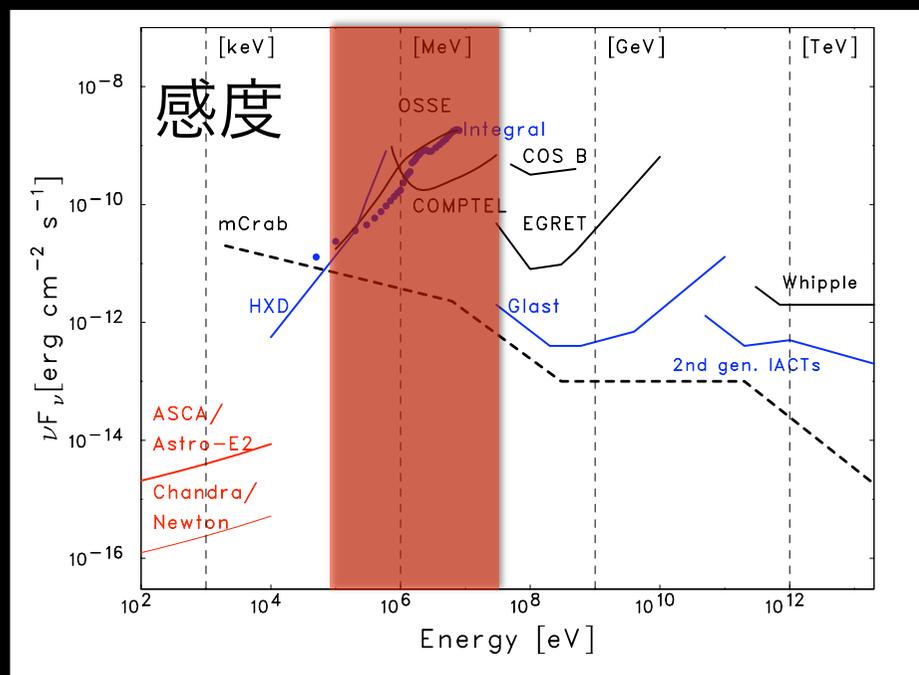
Experimental Study of  
a Si/CdTe Semiconductor  
Compton Camera  
for the Next Generation  
of Gamma-ray Astronomy

ISAS/JAXA 高橋研究室  
東京大学大学院理学系研究科  
武田伸一郎

# Sub-MeV/MeV 観測

100 keV -- MeV Band はもっとも挑戦的な帯域

粒子加速による非熱的放射が支配的なエネルギー帯域  
星の重力崩壊プロセスを知る手懸かりとなる核ガンマ線  
銀河中心方向から来るポジトロン由来の 511 keV 線



しかし、最も観測が遅れた帯域  
他の帯域に比べて1-2桁感度がわるい

集光鏡によるイメージングできない  
(cf. X線帯域)

相互作用がコンプトン散乱に支配  
(cf. 100 MeV-- GeV 帯域 Fermi)

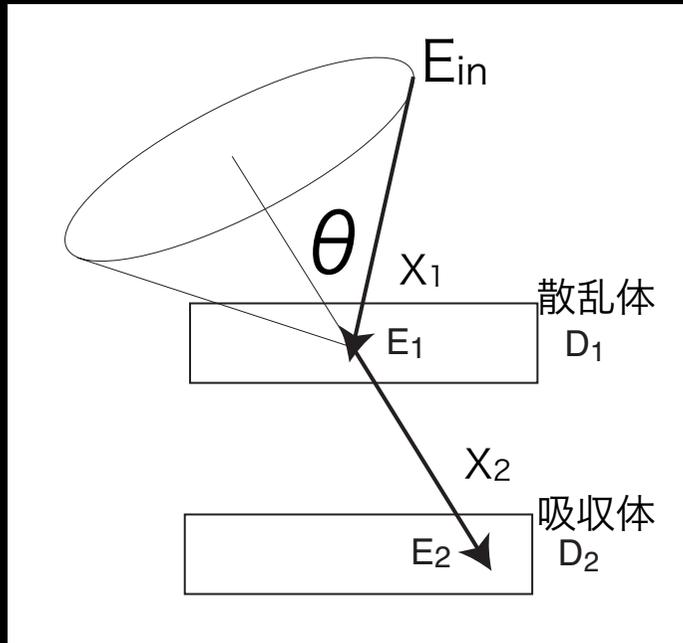
検出効率が稼げない

バックグラウンドの遮蔽が困難

感度向上の鍵は次世代コンプトンカメラ！

# Compton Camera

## コンプトン運動学を利用した検出器



$D_1$ 、 $D_2$  によるコンプトン散乱プロセスの追跡位置と計測エネルギー ( $X_1, E_1$ )と( $X_2, E_2$ ) より、

$$E_{in} = E_1 + E_2$$

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right)$$

光子の到来方向を円環に制限できる。

位置とエネルギーの正確な測定が鍵

- ・ 円環を重ね合わせることで線源の場所がわかる。
- ・ 特定の方角からくる光子を抜き出すことができる。

→イメージング能力

「コンプトン運動学」を用いて、荷電粒子イベント・検出器の放射化によるバックグラウンドと天体からの信号とを区別できる

# Compton Camera の歴史

1970年代に MeV 宇宙望遠鏡として提案

( Schonfelder et al 1975 )

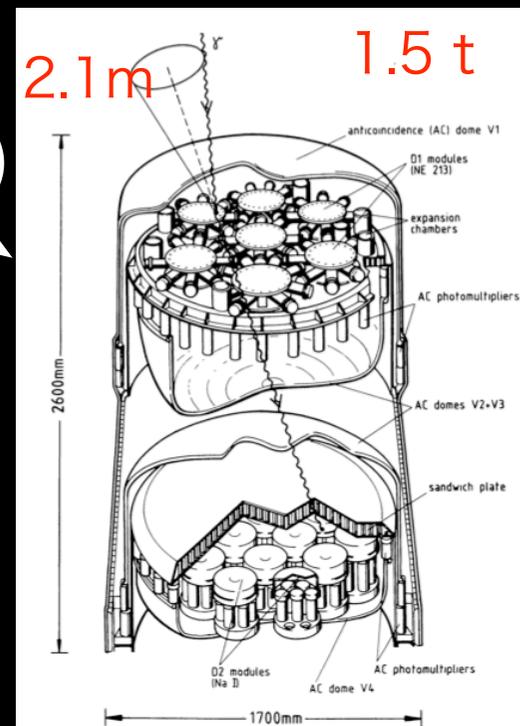
COMPTTEL (CGRO衛星)

液体シンチ + NaI (TI)

精度の高い追跡(  $\Delta E$ ,  $\Delta X$  ) が困難

COMPTTEL < 超巨大 (1t)、  
低有効面積 ( 10 -- 20 cm<sup>2</sup> )

それでも  
過去最高感度  
(1--10MeV)



様々な分野で次世代コンプトンカメラの提案

( 1990 -- 2000 年 )

半導体多重コンプトンカメラの概念 (kamae et al 1988)

C-SPRINT (Si/シンチレーター) (フランス/イタリア)

HPGe コンプトンカメラ (LBL Group/原子核実験)

ガスコンプトンカメラ (京都大学)

Si/CdTe コンプトンカメラ

我が国の独自技術に基づいた提案 Takahashi, Makishima and Kamae (2000)

それぞれに特徴あり、実際の検出器の開発と実証が要求されていた

(ただし、高度な検出器技術・解析技法が必要)

開発のねらい

要求されるのは感度の向上のみではない



## 宇宙観測用次世代コンプトンカメラ

X線観測との連続性から数 10 keV から数 MeV までカバーする

(cf. COMPTEL 750 keV 以上)

$\Delta E/E \sim 2\%$  ( X線CCD at 6 keV )のエネルギー分解能

角度分解能の理論的な限界まで (ドップラー限界)

偏光観測が出来る (これまで観測そのものがなされていない)

感度がこれまでの検出器を 1桁以上上回る

衛星搭載が容易な動作環境

(特に動作温度、読み出し回路、サイズ。。。&コスト)

# 本論文 次世代コンプトンカメラ Si/CdTe Compton Cameraの世界初の開発、実証実験

## 発表の内容

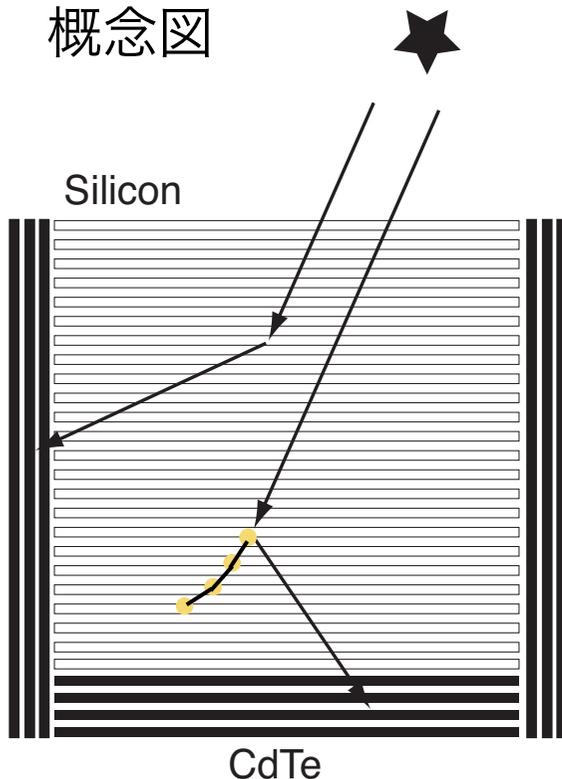
- ・ コンプトンカメラの開発 (第5章)  
半導体検出器の基礎開発より始め、世界で初めて  
Si と CdTe よりなる半導体コンプトンカメラシステムを確立した。  
製作したコンプトンカメラにより、初めて  
天体観測にむけた実証実験が可能となった。
- ・ コンプトンカメラの絶対検出効率 (第6章)
- ・ コンプトンイメージングの実証 (第7章)
- ・ 偏光測定能力実証 (第8章)
- ・ 軌道上性能シミュレーション (第9章)

本講演では省略

# Si/CdTe Compton Camera

## Si と CdTe の半導体検出器の積層構造

概念図



- ・ 高い位置分解能による正確な反応位置の測定  
(  $\Delta X$  : 数100  $\mu\text{m}$  -- mm )
- ・ 高いエネルギー分解能による正確なエネルギーデポジットの測定  
(  $\Delta E \sim 1\text{--}2 \text{ keV}$  for Si )  
(  $\Delta E/E \sim 1\%$  for CdTe )

## 正確なコンプトン散乱プロセスの記録

-> 精度のよい再構成

## Si/CdTe の 組み合わせ

効率よくコンプトンイベントを取得

Si (  $Z = 14$  )  $\sigma_{\text{comp}} / \sigma_{\text{photo}} > 1$  @ 50 keV

CdTe (  $Z = 48,52$  ) 高い光子阻止能

Doppler broadening 影響小さい ( 3.4 節)

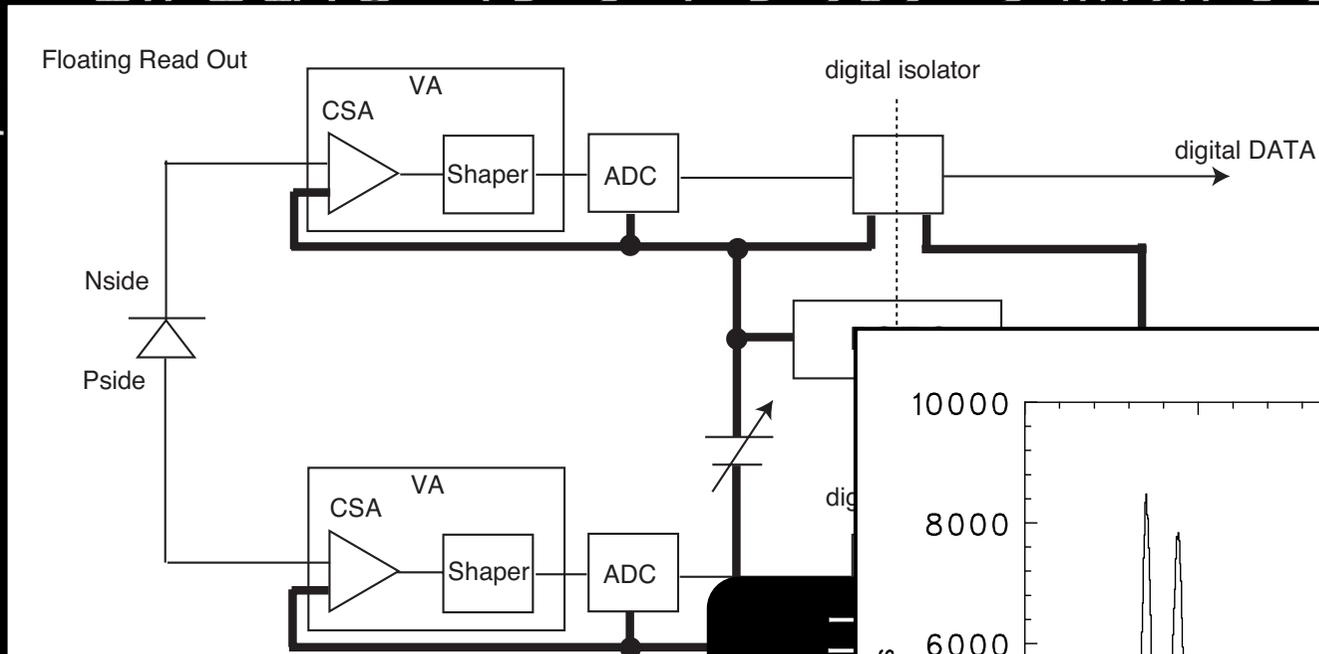
-> 高い角度分解能

500 keV 以上の帯域で  $\sim 1^\circ$  (FWHM)

# 1. コンプトンカメラの開発

## Si/CdTe コンプトンカメラ開発の鍵

(1) 散乱

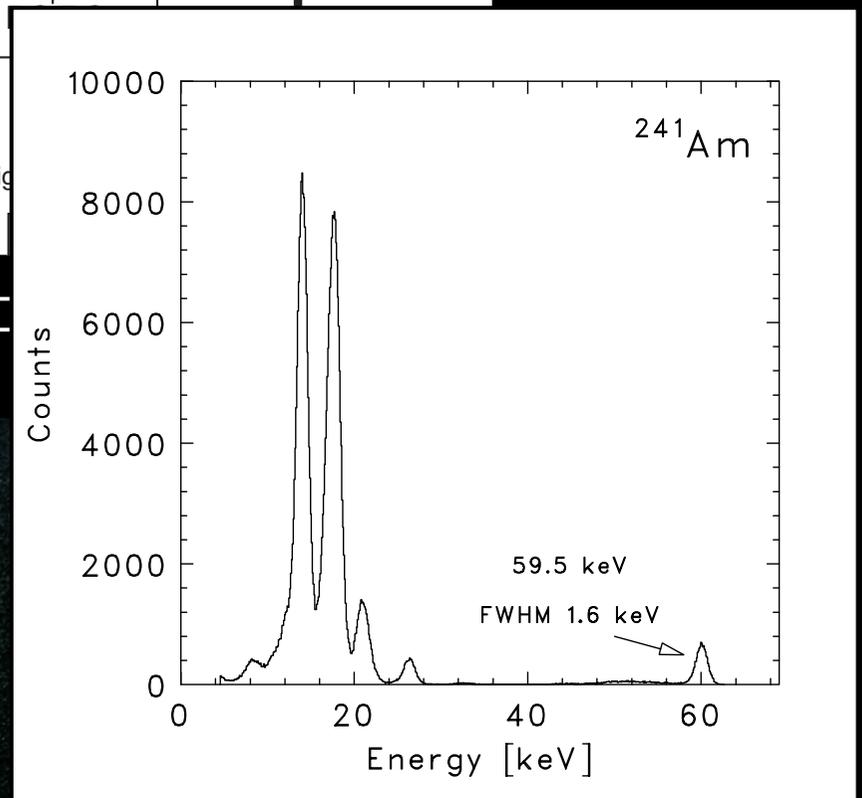


器 (DSSD) )

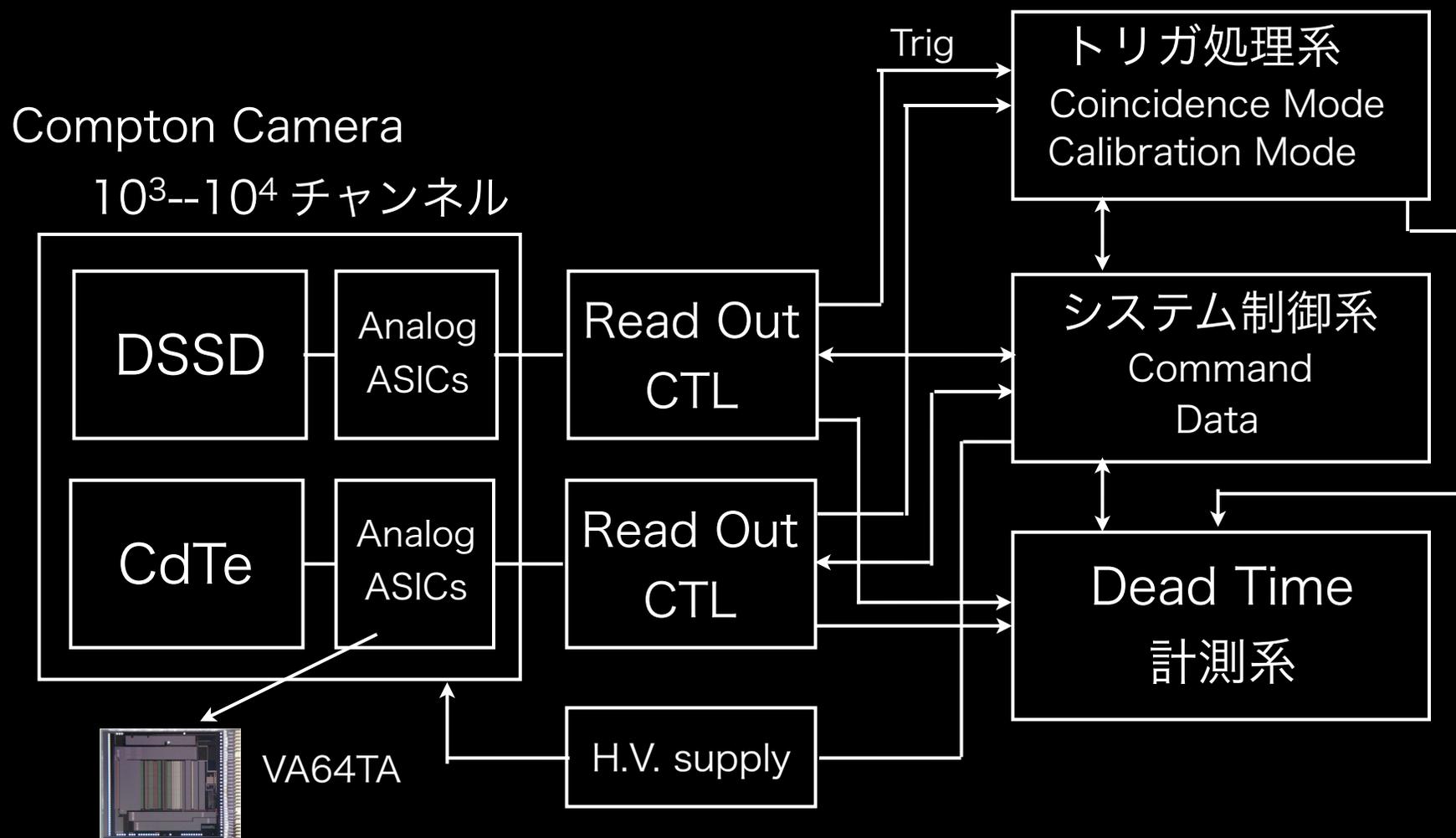
Floating



両サイドとも低ノイズかつ  
高密度実装が可能になる



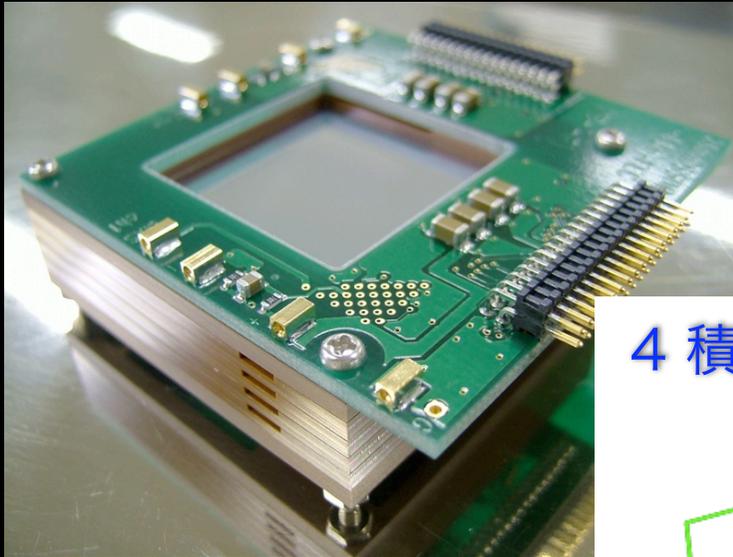
## (2) Si と CdTe 検出器を統合、読み出しシステムの構築



10<sup>3</sup>--10<sup>4</sup> チャンネルに及ぶ、半導体検出器からの信号を読み出すシステムを構築し、初めてコンプトンカメラを動作させた。

# Si / CdTe コンプトンカメラ ( Takeda et al. SPIE 2007 )

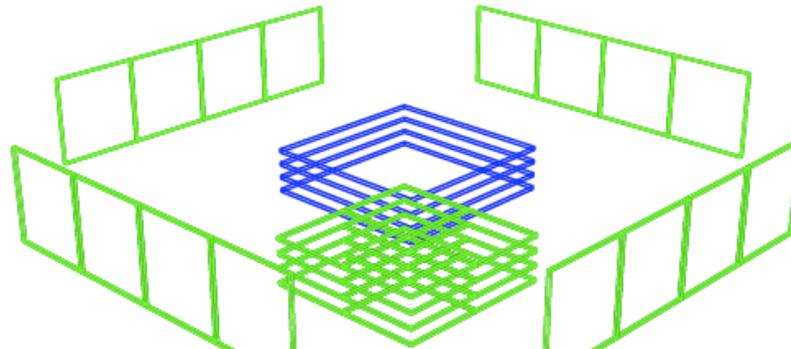
4 積層 DSSD ( 2 mm ピッチ )  
(Takeda et al. SPIE Newsroom)  
(Takeda et al. NIM 2007)  
 $\Delta E = 1.6 \text{ keV (FWHM) @ } 60 \text{ keV}$



2.4 mm ピッチ 4層積CdTe Bottom Module  
1.4 mm ピクセルサイズ、厚さ 500 um  
 $\Delta E/E < 1 \%$

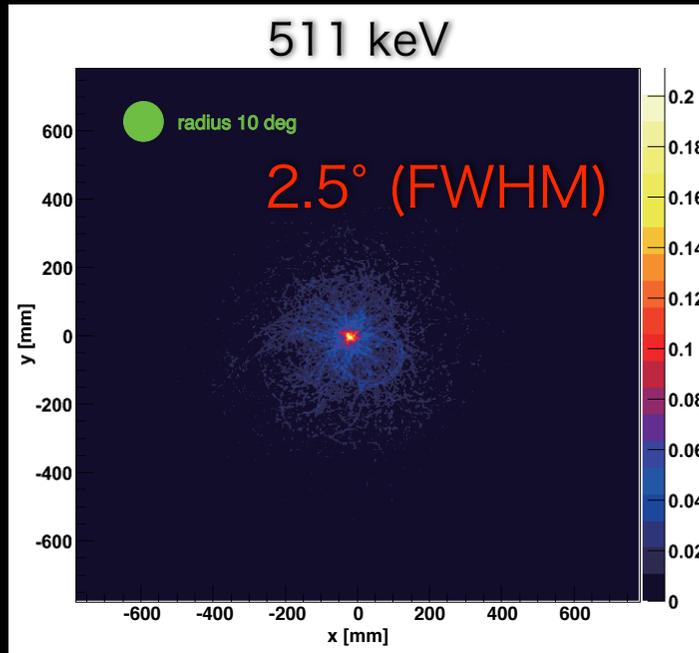


4 積層DSSD + 32 CdTe Pixels



イメージング実験、偏光測定実験の目的に応じて、検出器構成をカスタマイズ。3種類のコンプトンカメラを製作した。

# コンプトンカメラの性能



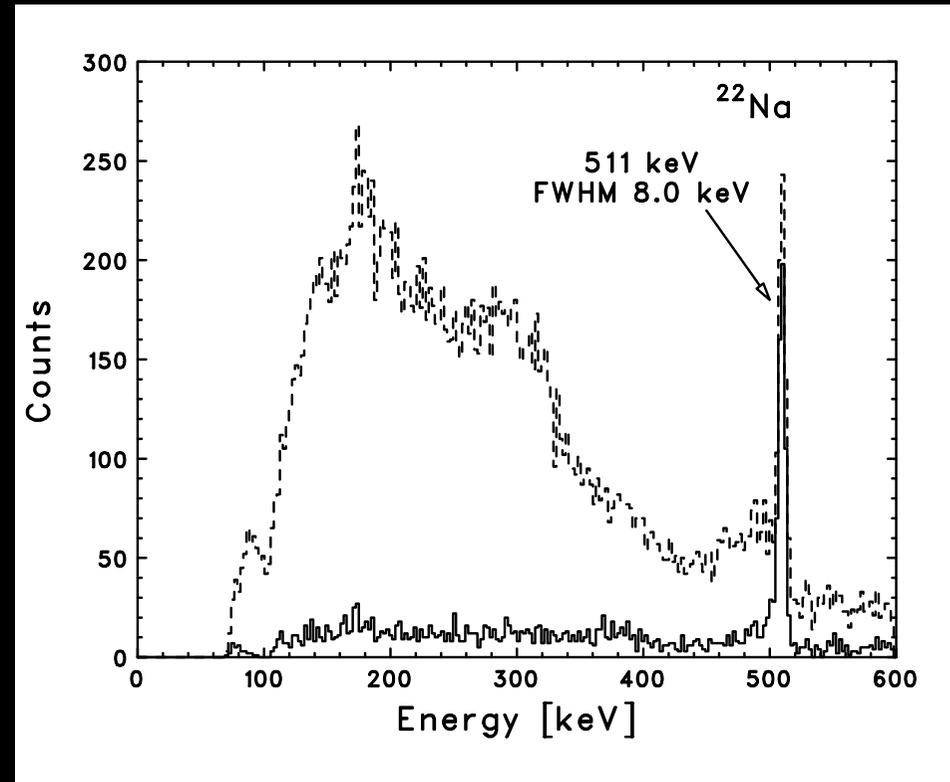
- 59.5 -- 662 keV の帯域で点線源のイメージングに成功

DSSD の低い検出 Threshold ~5 keV を達成したことにより初めて実現 (世界に例がない)

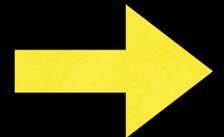
高いスペクトル性能を達成  
8.0 keV (FWHM) @ 511 keV

$\Delta E/E \sim 1.5\%$

イメージングによるバックグラウンド  
除去能力を実証



より詳細な検出器評価へ



## 2. 絶対検出効率の評価

絶対検出効率は、検出器の特性として最も重要

- a) 天体の絶対フラックスからの物理量の決定
- b) 強度分布の正確な測定 など。

絶対検出効率 =  $F$  ( 視野 (立体角), Dead Time, 較正線源の絶対強度)

特にDead Time補正の「検証」が重要。

数 % の精度で絶対効率を測定できる実験が必須

絶対検出効率の検証

→ コンプトンカメラの応答の理解が不可欠

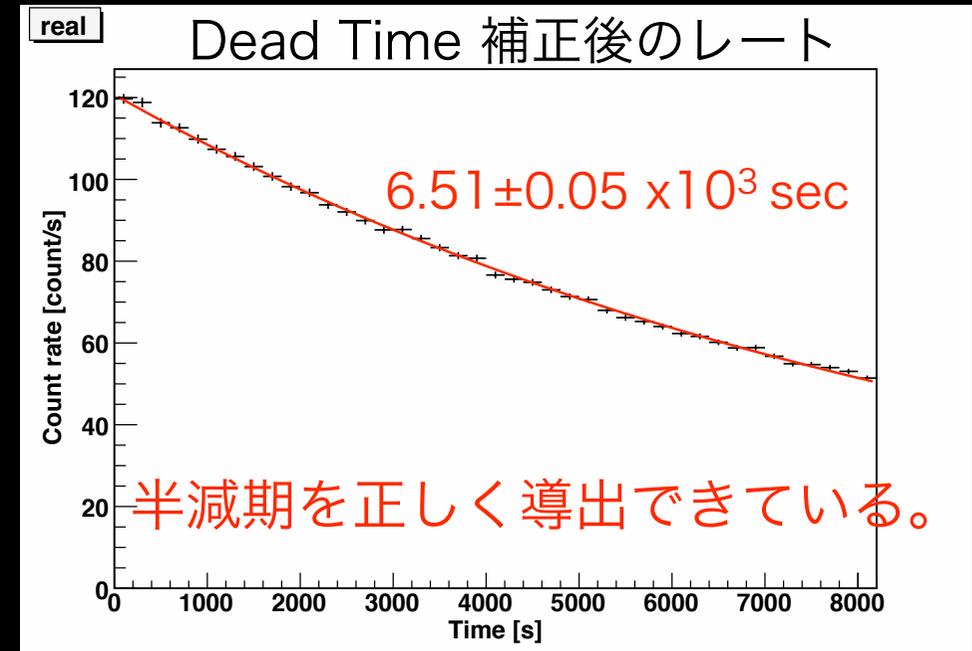
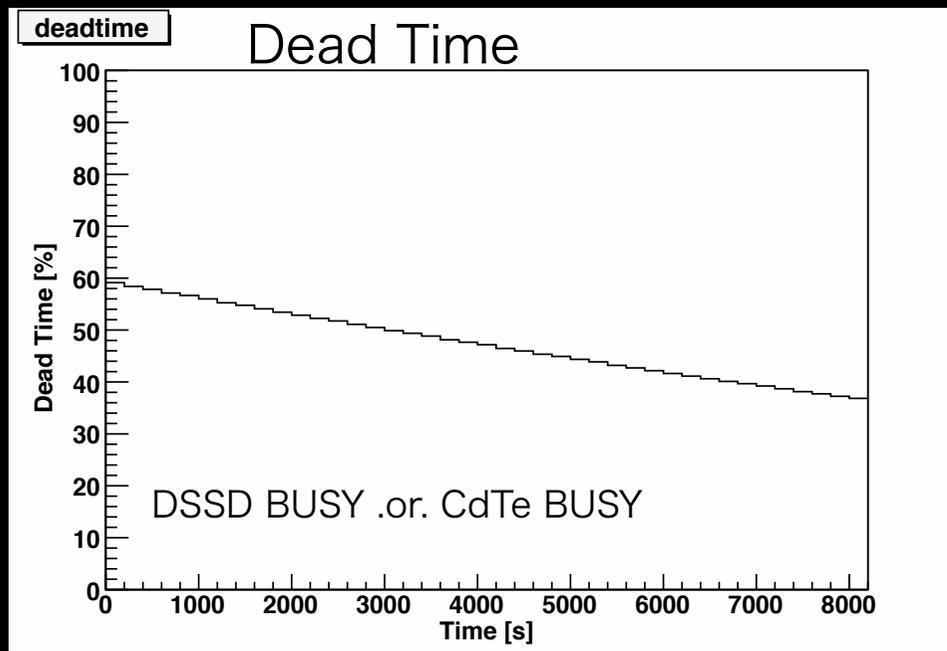
(光電吸収、コンプトン散乱、蛍光X線 etc. with Geometry)

→ Geant4 をベースとしたモンテカルロシミュレーター

実験データとSimulation Output を直接比較し、検証

# Dead Timeの「検証」

- 1) Dead Timeを測定
- 2) 半減期の短い線源 ( $^{18}\text{F}$ ,  $6.59 \times 10^3 \text{ sec}$ ) を用意 (群馬大学医学部との共同実験)、半減期を測定、上述のDead Timeが正しいことを検証。



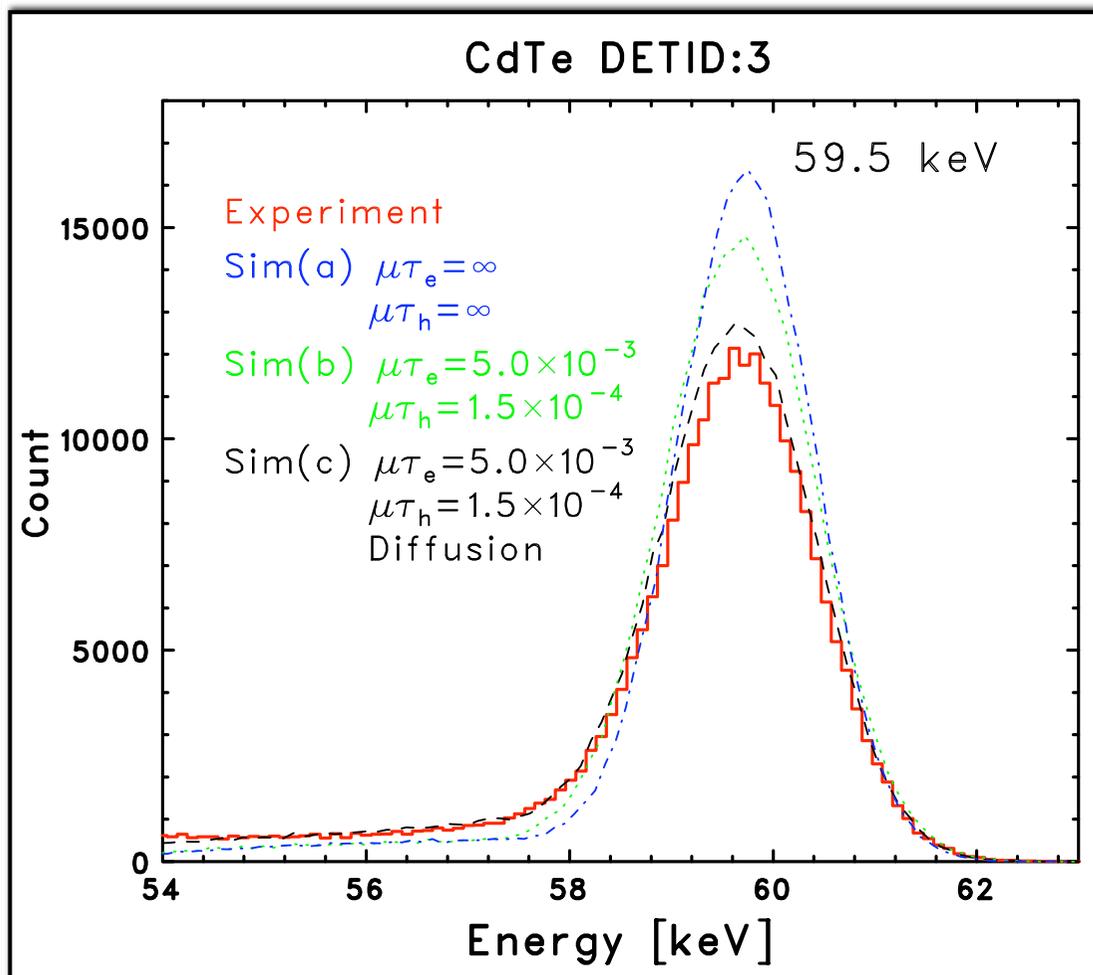
Data Block 2kB/event (Bottom CdTe+DSSD) → Count Rate 500 counts/sec,

# 高精度 MC Simulatorの構築

物理の結果を出すために必須の道具 (Forward Method)

Si半導体, CdTe半導体の検出器応答

(半導体内部のキャリア移動等) の組み込みが必要。



(例) CdTe 1 Pixel スペクトル

キャリア移動度、寿命無限大

+キャリアのトラップ( $\mu\tau$ 積)

+複数ピクセルへの広がり (Charge Sharing)を実際に測定、それを「拡散」の効果とした。隣接したピクセルにthreshold以下のEnergyがDepositして検出できなかった効果をモデル化 (節6.4, 6.5)

Si と CdTe

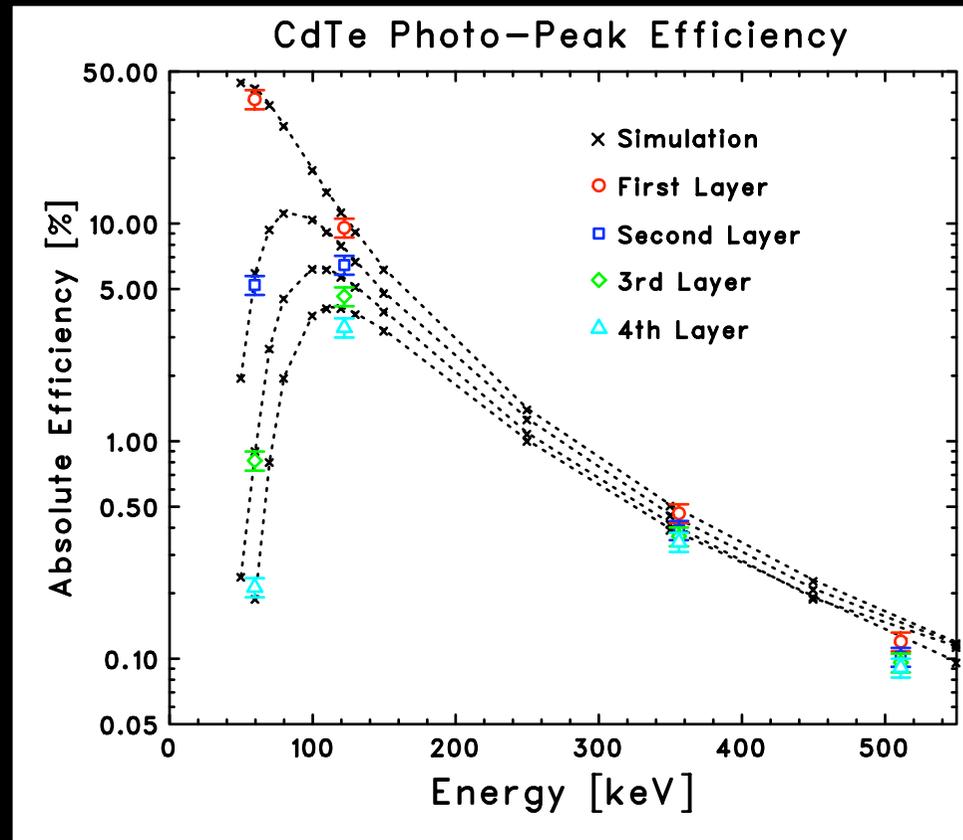
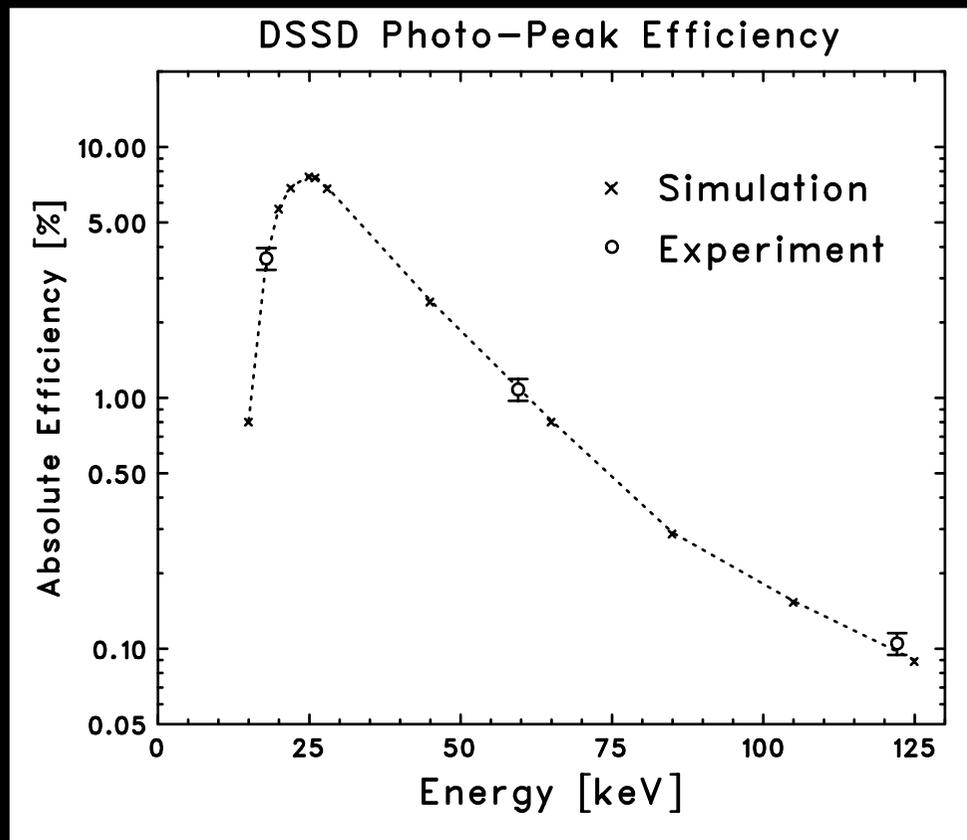
両方の検出器応答のモデル化

# 絶対効率の検証 (1)

光電吸収ピークの面積 (1層事象を選択)

DSSD

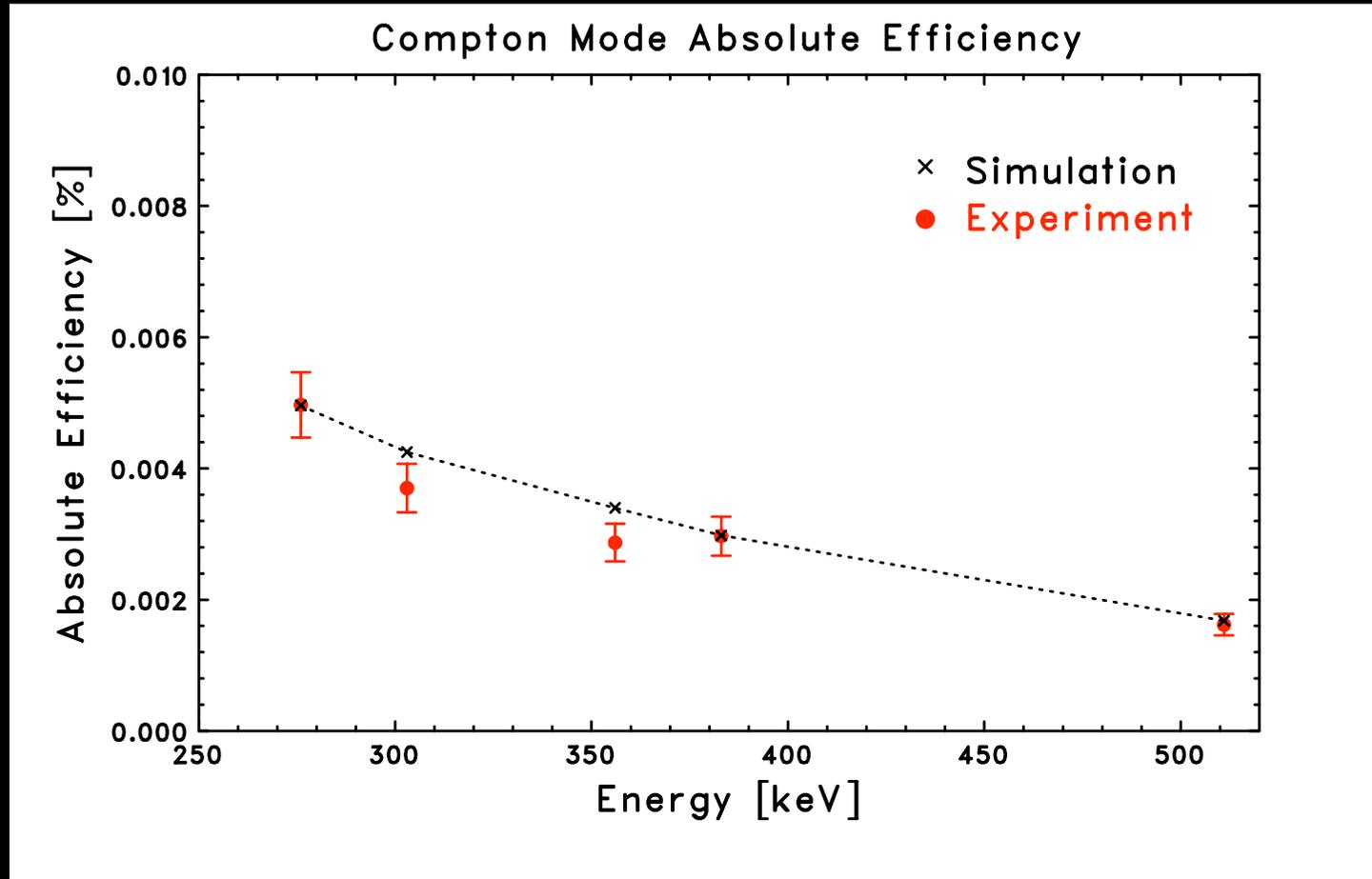
CdTe



DSSD はガウシアンフィット、CdTe は Line Energy  $\pm 5$  keV Window  
測定値には使用したRI Source の絶対強度の不定性に基づく 10 % のエラー  
実験値と Simulator Output は 10 % の程度で一致する。

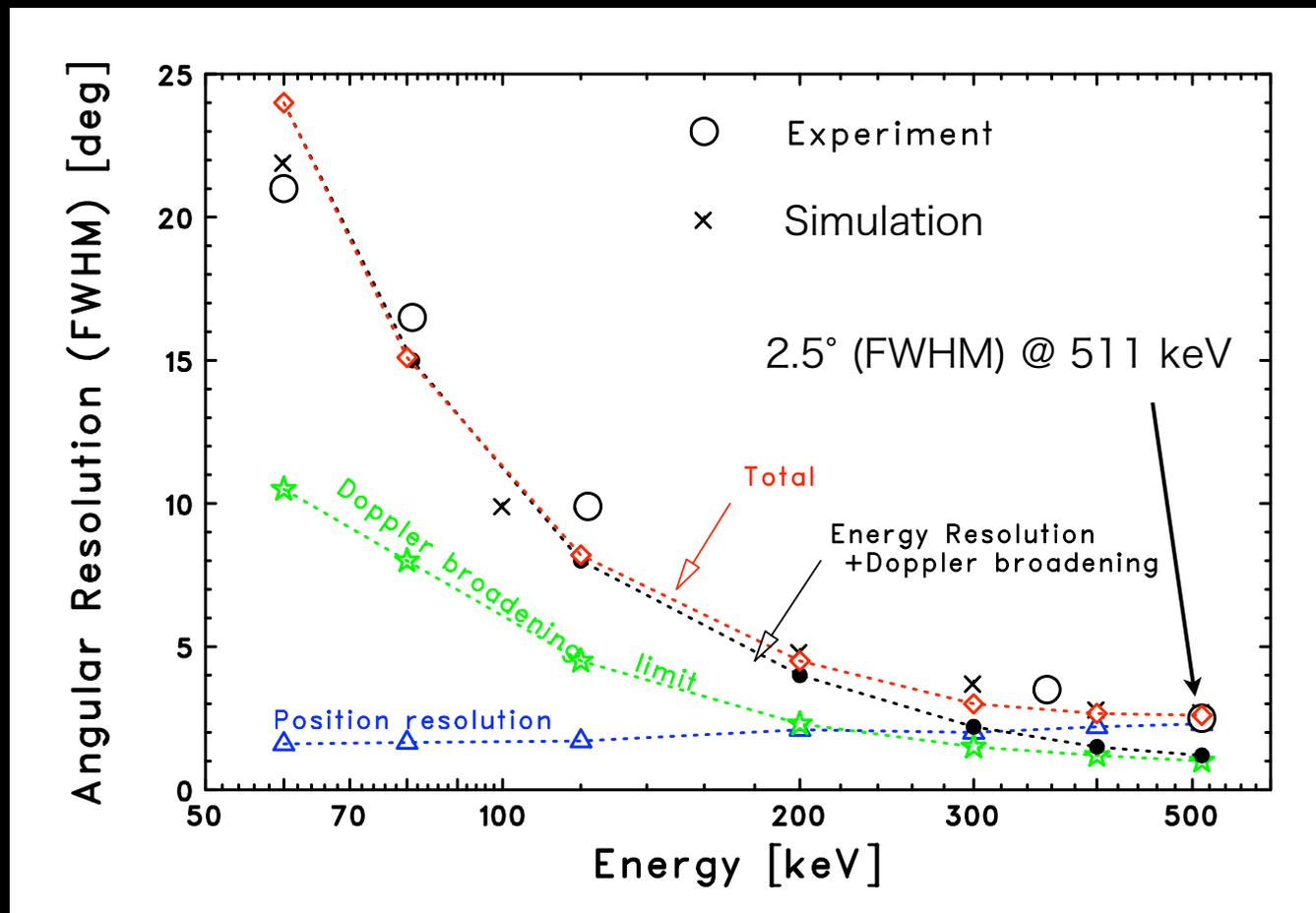
# 絶対効率の検証 (2)

コンプトン散乱事象を選択、イメージング後、線源を切り出す。  
(線源位置より $10^\circ$ 以内にコンプトンリングが通った事象を選択)



Si/CdTeコンプトンカメラの絶対検出効率を  
10%レベルで求めることに成功。

# 角度分解能の再現性



- 300 keV 以上でドップラー限界にせまる角度分解能

2.5° (FWHM) @ 511 keV

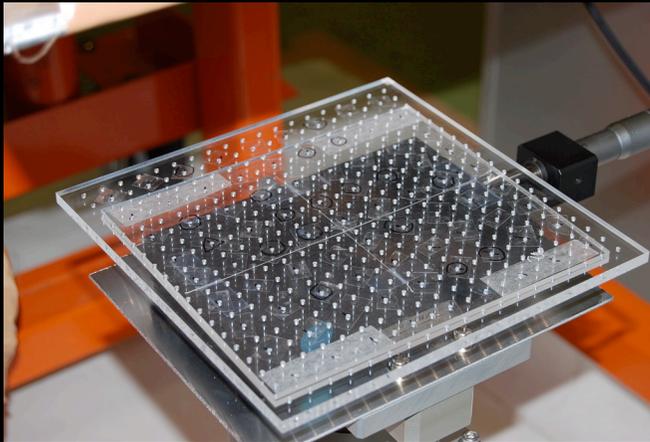
角度分解能のエネルギー依存性も Simulator でよく再現

# 3. コンプトンイメージングの実証

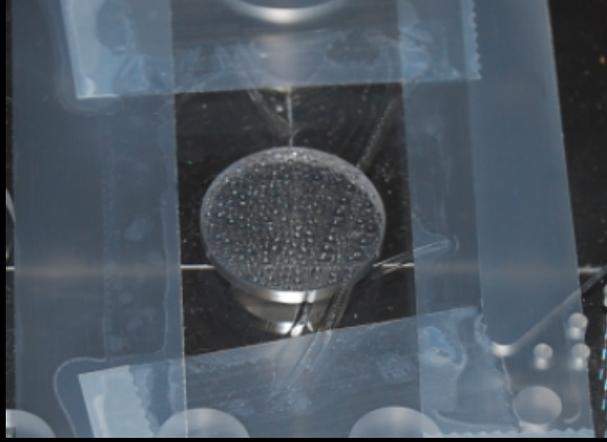
非密封線源を用いた実験 (with 群馬大医学部、原研)

点線源だけでなく、これまでコンプトンカメラでは実証されてこなかった、「広がった構造のイメージング試験」が可能に

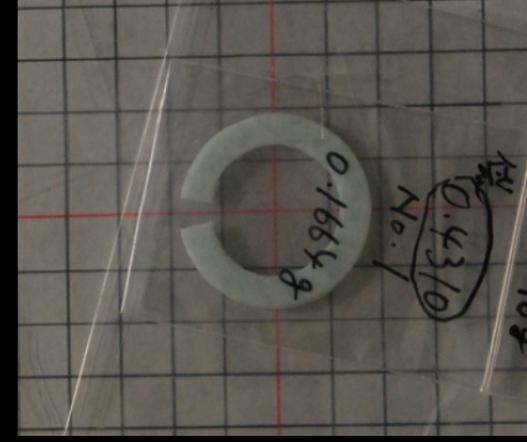
3種類のターゲットを作成。 $(^{131}\text{I}, 364 \text{ keV})$



(a)



(b)



(c)

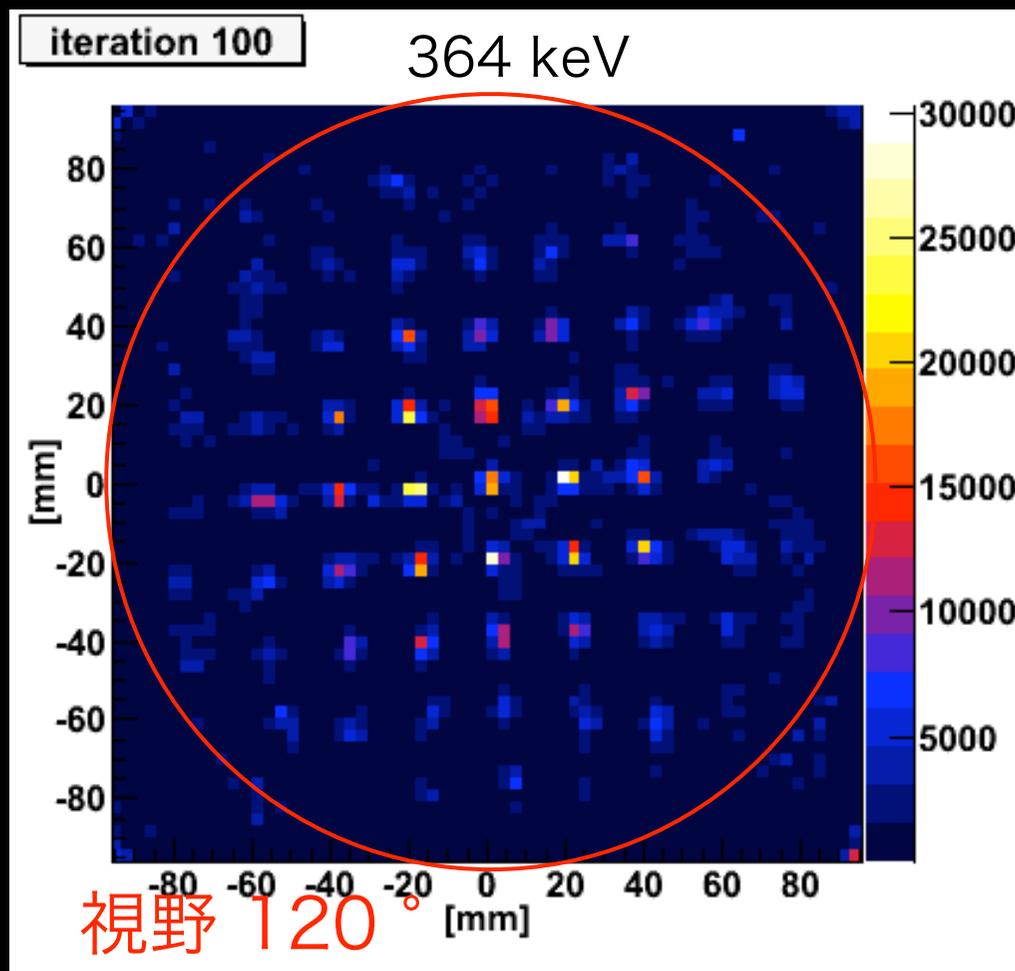
(a) 20 mm ピッチに配列した点線源。径 2 mm

(b) 直径 20 mm の真円

(c) 逆 "C" 状。ギャップ 3 mm

(注) 以下、Deconvolution Algorithm として、List-Mode Maximum Likelihood Expectation Maximization 法を採用したときの実験結果をしめす。(詳細は7.2節)

# Grid 状線源の撮像

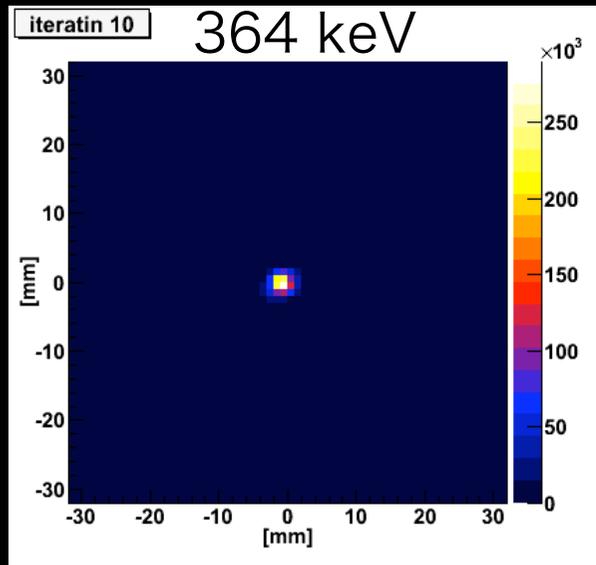


- 配列した点源が正しい位置にイメージングされた。  
60 cm 離れた場所で 1 mm 以下の位置決定精度
- 広い視野にわたるイメージング能力を実証。

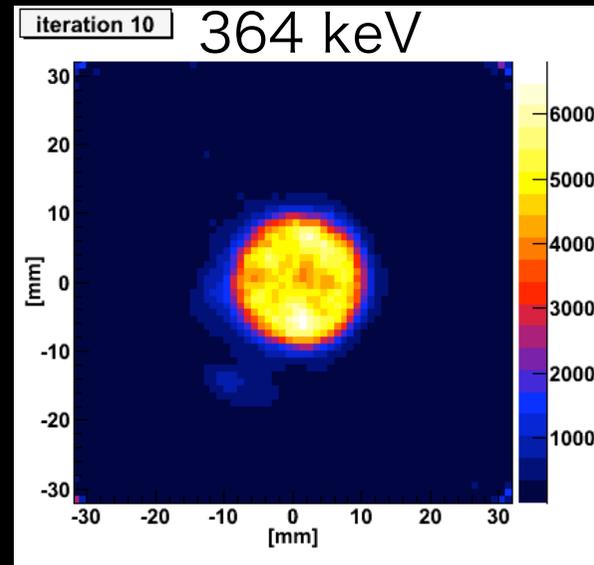
# 広がった構造の撮像

角度分解能に優れた Si/CdTe コンプトンカメラにより初めて実証

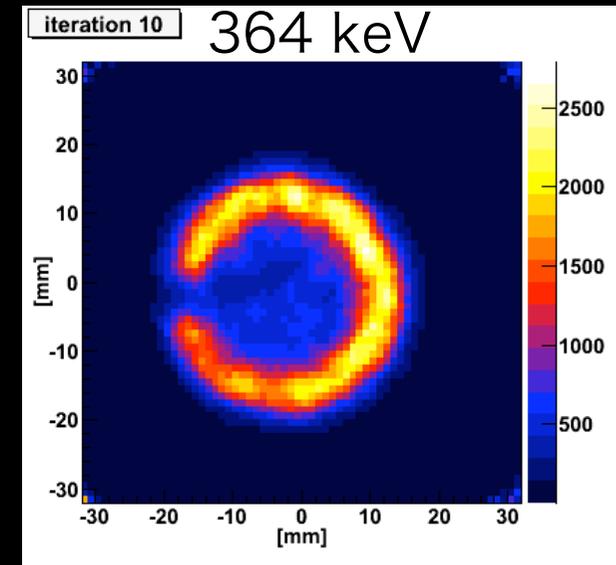
比較用点線源



真円



逆”C”状



- 点線源、真円、逆”C”状、それぞれ真の形状にイメージングされた。
- 選択した Deconvolution 法の有用性を確認。

真円が一点に収束すること無く、

逆”C”状のギャップと中心が抜けた構造が正しく Deconvolution された。

- 広がった構造をもつ対象のイメージングを実証した。(Takeda et al. IEEE 2008)

# 4. 偏光測定能力実証

Semiconductor

New !!

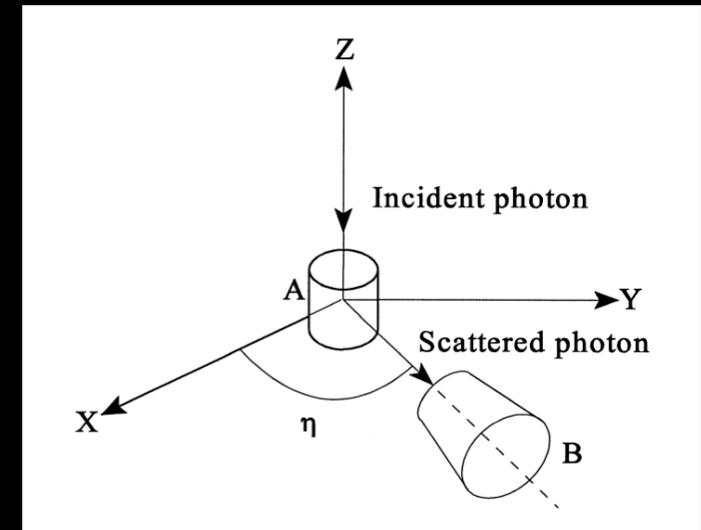
Compton Camera && Polarimeter

( cf. Traditional  
Compton Polarimeter )

- ・ 散乱光子の精度のよい追跡 ( $\sim$ mm) により、精度よく ( $\sim 1^\circ$ ) 偏光方向を測定できる。

(ただし実証が必要、本発表で)

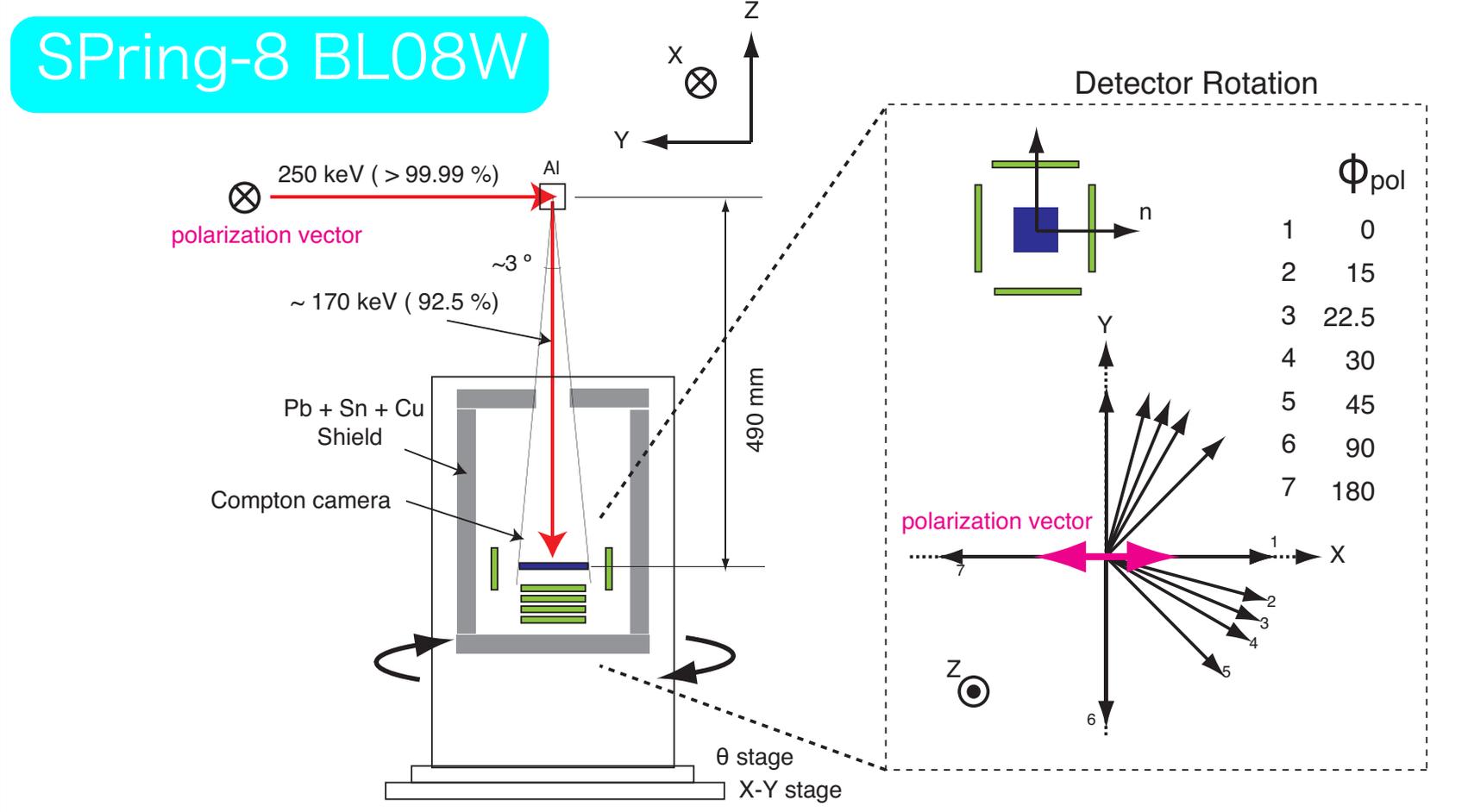
- ・ 散乱体を取り囲む構造により、高い偏光分解能力と検出効率を実現。
- ・ イメージングによる低バックグラウンド観測



ガンマ線の追跡精度が悪い

SPring-8、BL08Wビームラインで 100 % 偏光シンクロトロンビームを用いた、偏光測定能力実験を執り行った。

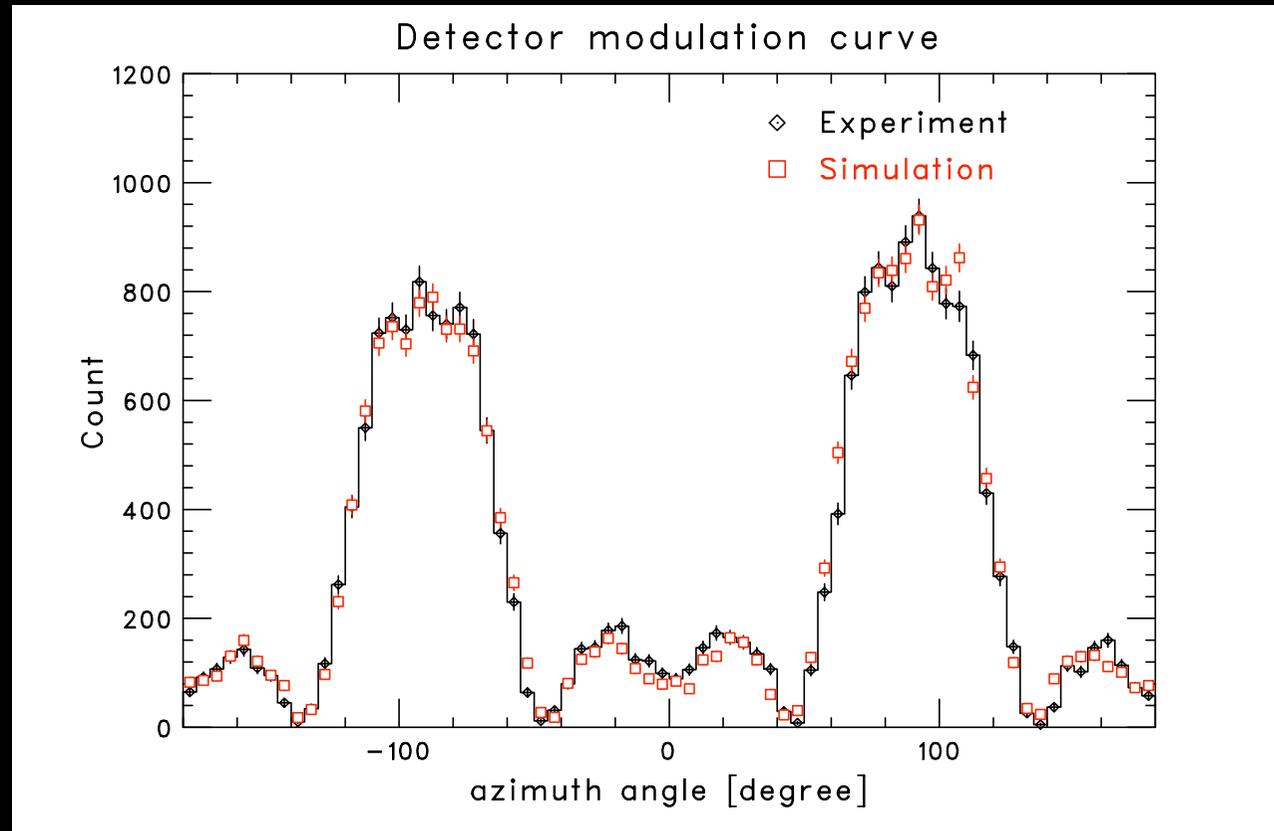
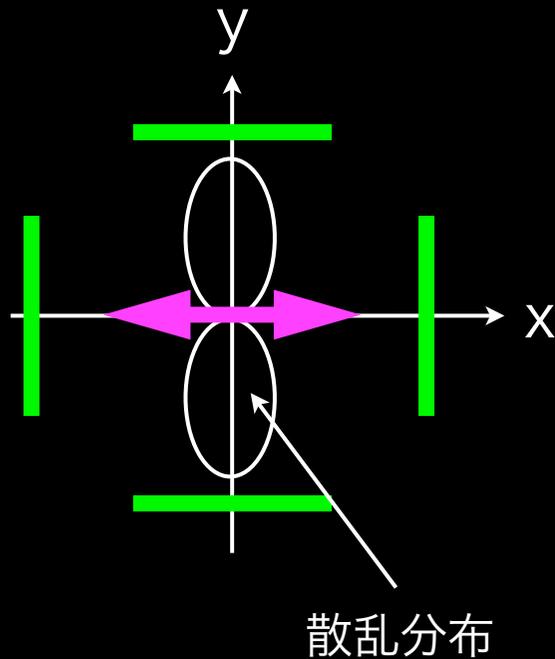
# ビームラインセットアップ



- ビームラインからの 250 keV ガンマ線を 90° 散乱させて検出器に入射。
- 検出器には ~170 keV、92.5 % 偏光のガンマ線が入射する。
- 検出器を回転させて、検出器座標で 0 , 15 , 22.5 , 30 , 45 , 90 , 180° の偏光ベクトルをもつ 7 種類のデータを取得。
- トリガーは CdTe Side 検出器から取得。( DSSD--CdTe Side イベントをつかう。)

# Azimuth 散乱分布

検出器座標における Azimuth 散乱分布 ( $\phi_{\text{pol}} = 0^\circ$  のデータ)



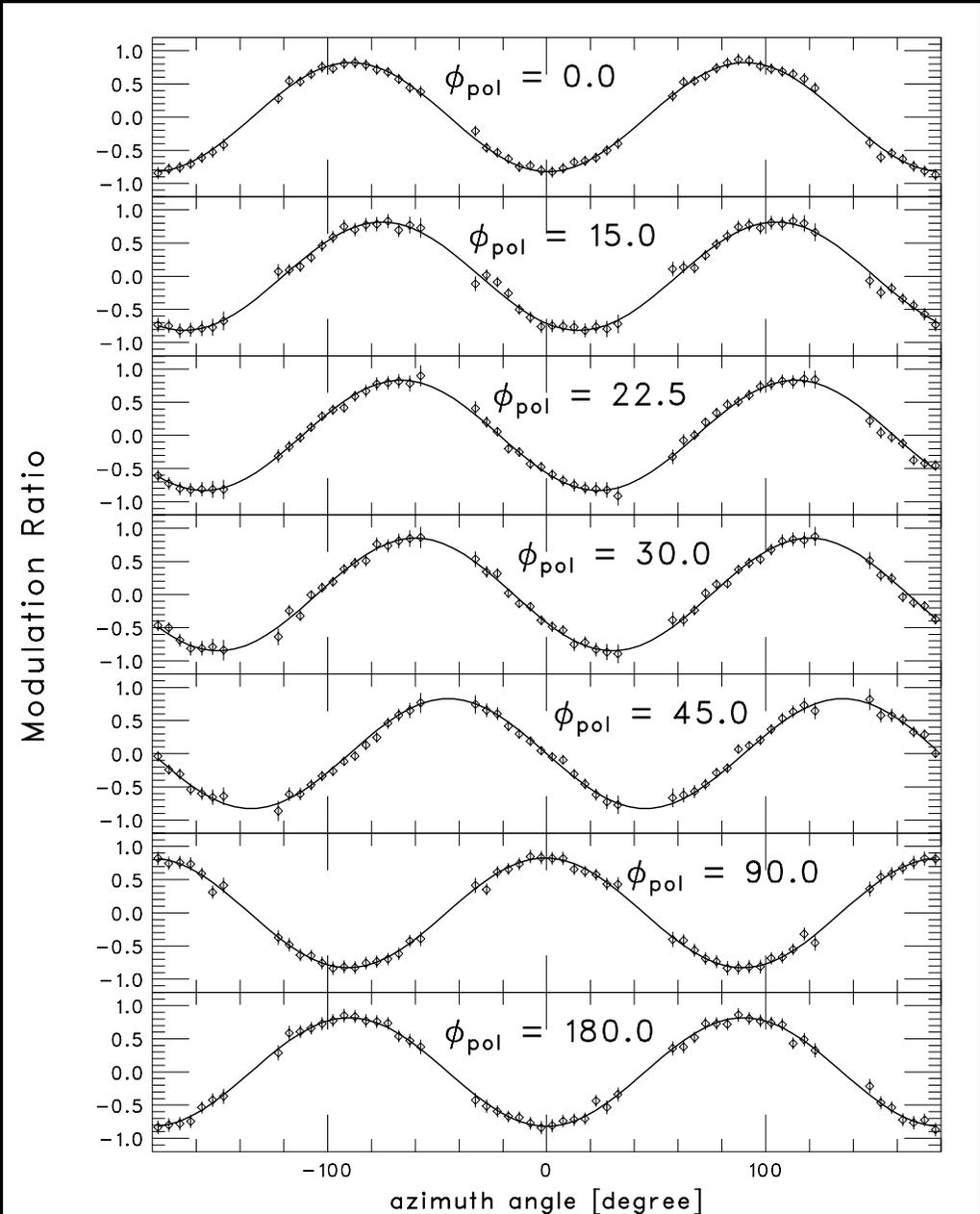
- $\pm 90^\circ$ 方向と、 $0, 180^\circ$ 方向の計数の違いが入射光子の偏光によるもの。
- $+ 90^\circ$ と $- 90^\circ$ 方向の  $\sim 10\%$  の計数の違いが DSSD 周りの passive material の非一様性によるもの。

# Modulation Ratio

シミュレーターで無偏光レスポンスを計算し、検出効率の非対称性を補正した  $N_{\text{true}}(\phi)$  をもとに以下に  $R$  を定義する。

$$R(\phi) = \frac{N_{\text{true}}(\phi) - N_{\text{true}}(\phi + \pi/2)}{N_{\text{true}}(\phi) + N_{\text{true}}(\phi + \pi/2)}$$

$R$  の振幅 ( $Q$ ) が偏光度に比例し偏光ベクトルの方向が最小値となる。



# 偏光度と偏光方向

	Amplitude	Polarization vector	$\chi^2/\text{ndf}$
Setup 1 ( $\phi_{\text{pol}} = 0.0$ )	$0.82 \pm 0.02$	$0.6 \pm 0.5$	$66.4/53 = 1.25$
Setup 2 ( $\phi_{\text{pol}} = 15.0$ )	$0.82 \pm 0.02$	$14.7 \pm 0.7$	$56.0/53 = 1.05$
Setup 3 ( $\phi_{\text{pol}} = 22.5$ )	$0.83 \pm 0.02$	$23.4 \pm 0.6$	$48.0/53 = 0.90$
Setup 4 ( $\phi_{\text{pol}} = 30.0$ )	$0.85 \pm 0.02$	$30.0 \pm 0.6$	$52.8/53 = 1.00$
Setup 5 ( $\phi_{\text{pol}} = 45.0$ )	$0.83 \pm 0.03$	$45.0 \pm 0.5$	$52.6/53 = 1.00$
Setup 6 ( $\phi_{\text{pol}} = 90.0$ )	$0.83 \pm 0.02$	$89.3 \pm 0.6$	$44.5/53 = 0.84$
Setup 7 ( $\phi_{\text{pol}} = 180.0$ )	$0.82 \pm 0.02$	$180.1 \pm 0.6$	$59.4/53 = 1.12$

・ 偏光ベクトルの方向は  $1^\circ$  以下の精度で正しく決定された。

・ R の振幅 (Q) は  $0.83 \pm 0.02$  と求まった。

シミュレーションでもとめた、

92.5 % 偏光に対して期待される  $Q = 0.84 \pm 0.02$

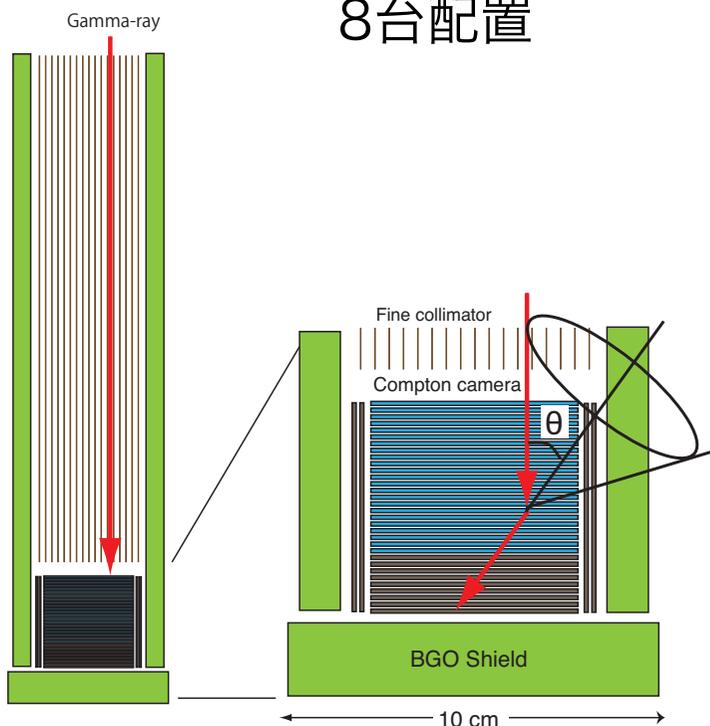
高い偏光分解能力を達成 (シミュレーションとも一致)

# 次世代検出器

本研究により見えてきた次世代検出器

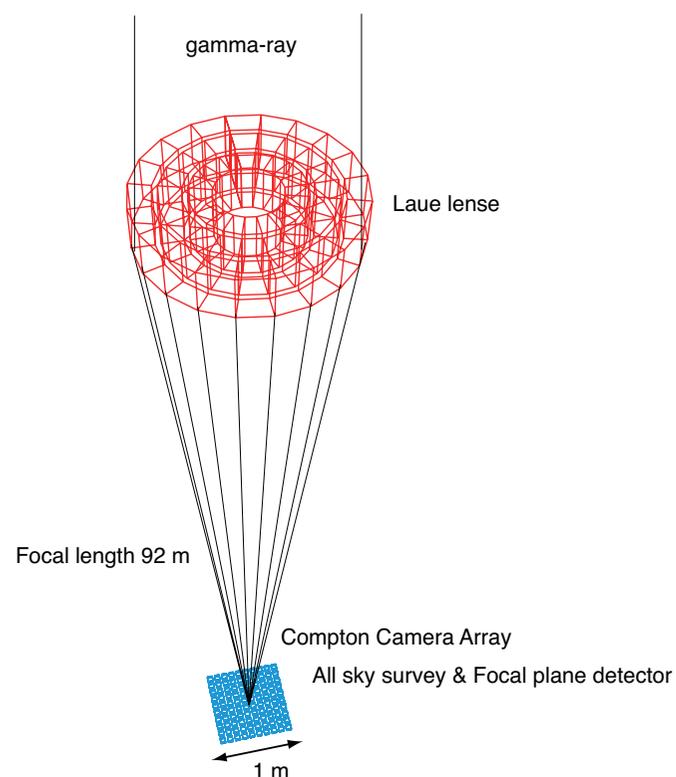
SGD (ASTRO-H) 2013

8台配置



コンプトン運動学を用いた  
極低バックグラウンド観測  
1 mCrab (100 ksec) < 300~keV

DUAL 2015 -- 2020



ガンマレンズとコンプトンカメラ  
全天サーベイ & ポインティング

# まとめ

Si / CdTe 半導体コンプトンカメラを世界で初めて開発し  
天体観測に向けた性能評価をすすめた。

Si と CdTe の詳細な検出器応答のモデル化に成功し高精度の  
Monte Carlo Simulator を構築した。

とくに、従来のコンプトンカメラでは実証されてこなかった  
広がった構造のイメージングに成功。

コンプトンカメラが高い精度 ( $\sim 1^\circ$ ) で偏光方向を決定できる  
ことを実証した。

100 kg 級コンプトンカメラが到達する感度は、これまでの  
の如何なる検出器よりも1桁上である。

次世代検出器コンプトンカメラに要求される  
測定能力を実証した。

# Welcome to Matsuyama

春や昔 十五万石の 城下かな

