

論文の内容の要旨

多様な物理実験におけるガンマ線計測のための 次世代半導体コンプトンカメラの研究

(A Study of the next generation semiconductor Compton camera
for gamma-ray measurements in physics experiments)

氏名 藪 悟郎

ガンマ線は加速された粒子や放射線同位元素などの核崩壊によって放出される。ガンマ線の測定は粒子加速の現場の環境や放射性同位元素の探索や生成の物理過程を理解するために不可欠な技術である。特にガンマ線イメージング技術はガンマ線源の分布やその動的な変化を知る上で極めて重要であるにもかかわらず、可視光やX線でのイメージングに比べて発展途上である。ガンマ線の中でもエネルギーが百数十 keV を超え、数 MeV にいたるコンプトン散乱が主たる反応となる領域は、宇宙観測から医学イメージング、さらには放射線事故におけるホットスポット探査にいたるまで多様な展開が期待される。

1980 年代、宇宙からの MeV ガンマ線観測を目的に考案されたコンプトン望遠鏡 (コンプトンカメラ) はコンプトン散乱を利用したガンマ線計測技術である。その中でも数 100 keV のエネルギー領域で高い感度の宇宙観測を行うことを目的に 15 年ほど前から日本で開発が進められてきたコンプトンカメラが、多層型の Si/CdTe 半導体コンプトンカメラである。高いエネルギー分解能と位置分解能を有する半導体検出器で構成されたこのカメラは X 線天文衛星ひとみ (ASTRO-H) への搭載を目指して開発が進められた。そのいくつかのプロトタイプ機が医学イメージングや東日本大震災後の原発事故における放射性物質の可視化などへの利用されたことで、Si/CdTe コンプトンカメラの新たな応用可能性が示された。

宇宙観測でははるか遠方にある天体からのガンマ線を測定するのに対し、加速器実験や医学イメージングなどでは、カメラから数 cm あるいは数十 cm の位置に置かれたターゲットや三次元構造の撮像が要求される。コンプトンカメラはイメージングを行うのにコリメータを必要としない撮像原理であるため、既存の技術と比べると感度に優れたガンマ線イメージングが実現可能であると考えられる。

本研究では、物理実験のみならず多くの分野で必要とされている高感度なガンマ線計測の実現のために、半導体コンプトンカメラを使った 2 つの新しいイメージングの研究を行い、次世代型コンプトンカメラの基礎となる研究を行なった。まず Si/CdTe 半導体コンプトンカメラを使い、カメラから近距離に置かれたガンマ線源を測定したときのイメージング性能を調べた。そしてその知見をもとに同カメラを使ったトモグラフィイメージング実験を通じて三次元画像の再構成や性能検証を行なった。CMOS センサーと Si ストリップを両立した新しいタイプの検出器と CdTe 検出器を組み合わせた電子追跡型コンプトンカメラによるより高精度なガンマ線イメージを取得するための研究を行なった

以下にそれぞれの研究についてまとめる。

1 近距離イメージング性能の検証

宇宙観測分野で開発が進められてきたコンプトンカメラが近距離にあるガンマ線源を測定する際のイメージング性能は、地上実験への応用において必須条件であるにも関わらず、いまだ詳細な研究が進んでいない。Si/CdTe 半導体コンプトンカメラ (Si/CdTe CC) は宇宙観測用に開発されてきた 2 層の Si 両面ストリップ検出器 (Si-DSD) と 3 層の CdTe 両面ストリップ検出器 (CdTe-DSD) で構成されたコンプトンカメラ (Watanabe *et al.* 2014) で、放射性物質の可視化実験でも高い性能を発揮してきた (Takahashi *et al.* 2012, Takeda *et al.* 2015)。Si/CdTe CC の近距離におけるイメージング性能を調べるためにカメラ前面から 41 mm の距離に設置したガンマ線源のイメージング実験を行なった。入射ガンマ線が Si-DSD 上でコンプトン散乱を生じ、散乱ガンマ線が CdTe-DSD に光電吸収されたと考えられるイベントを抽出し、各エネルギーにおける角度分解能を検出器の持つ性能や線源のサイズによる寄与を明らかにしながら定量化することができた (図 2)。さらに再構成画像から点拡がり関数 (PSF) を計算し、その半値幅に対応する直径を空間分解能とした。各エネルギーにおけるガンマ線イメージから得られた空間分解能はそれぞれ 7.8 mm@171 keV、6.8 mm@245 keV、6.0 mm@356 keV、4.4 mm@511 keV となった。

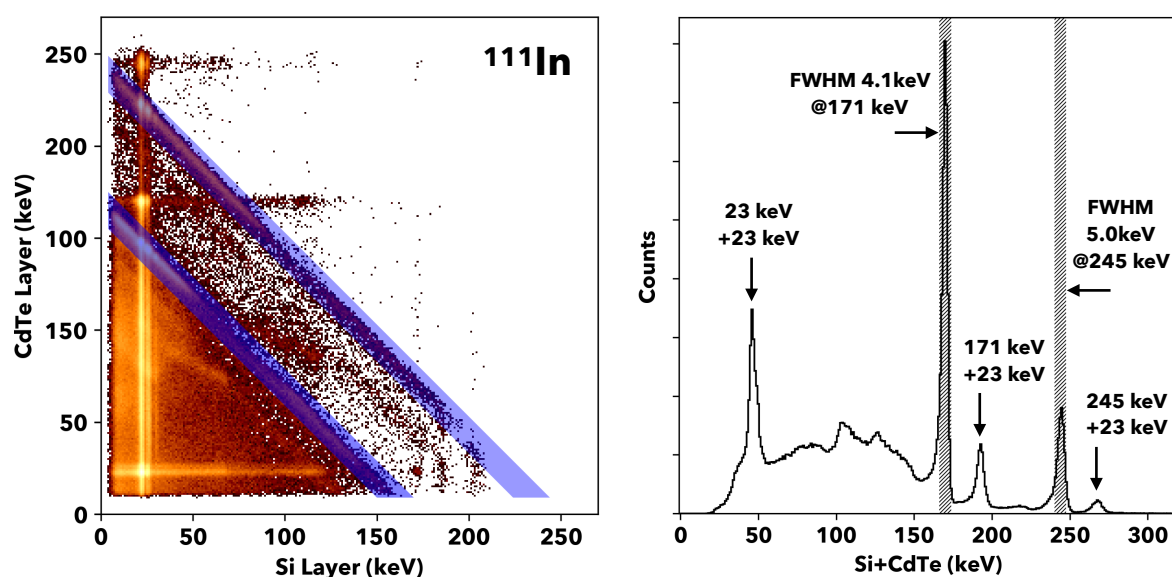


図1 (左) 検出された信号数が Si-DSD と CdTe-DSD とで 1 つずつであったイベント (Si-CdTe 2 ヒットイベントとする) について各エネルギーの二次元分布。横軸に Si-DSD、縦軸に CdTe-DSD のエネルギーが対応している。 ^{111}In が放射するガンマ線 171 keV、245 keV に対応する領域を青で示している。(右) Si-CdTe 2 ヒットイベントについて検出したエネルギーの合計によるスペクトル。(Yabu *et al.* 2021)

地上実験でのコンプトンカメラの利用には三次元空間内のガンマ線源分布を可視化する。コンプトンカメラによる三次元イメージング技術の確立が重要である。4 つの点線源で構成された三次元ファントム (較正用線源) を作成し、Si/CdTe CC による測定を実施、多角度からの測定データを組み合わせた三次元画像再構成を行った。コンプトンカメラにとっては極めて低いエネルギーである 171 keV、245 keV のガンマ線イベントを使い、ファントムの各点源を三次元的に分離できた。また測定角度の増やすことによって線源の形状が画像上で再現されることを明らかにした。

2 電子追跡型コンプトンカメラのイメージング実験

電子追跡型コンプトンカメラ (ETCC) は記録した散乱電子の飛跡を使うことでガンマ線の到来方向を一意に決定できるコンプトンカメラであり、高感度で低バックグラウンドなガンマ線イメージングの実現にはその開発が必須である。Si-CMOS ハイブリッド検出器 (Si-CMOS) と CdTe 両面ストリップ検出器 (CdTe-DSD) を組み合

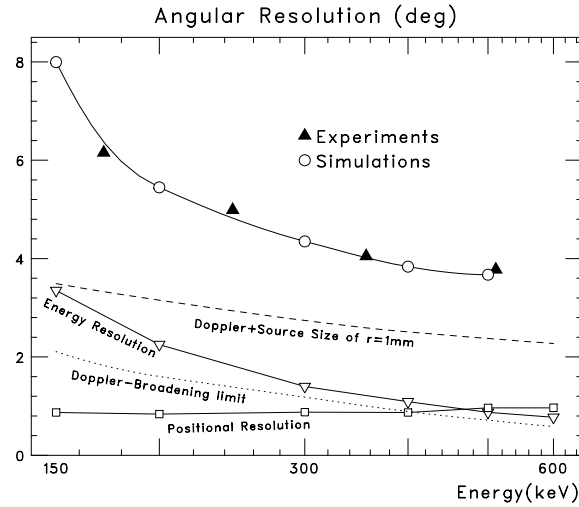


図2 ガンマ線のエネルギーと Si/CdTe CC の角度分解能の相関。黒プロットは実験データ、白プロットはシミュレーションデータから計算したもの。逆三角形と四角形のプロットはそれぞれ検出器のエネルギー分解能と位置分解能が与える角度分解能への影響を示している。点線は Doppler-broadening 効果による原理的限界である。破線は点線源の半径を 1 mm とした場合の角度分解能の限界である。(Yabu *et al.* 2021)

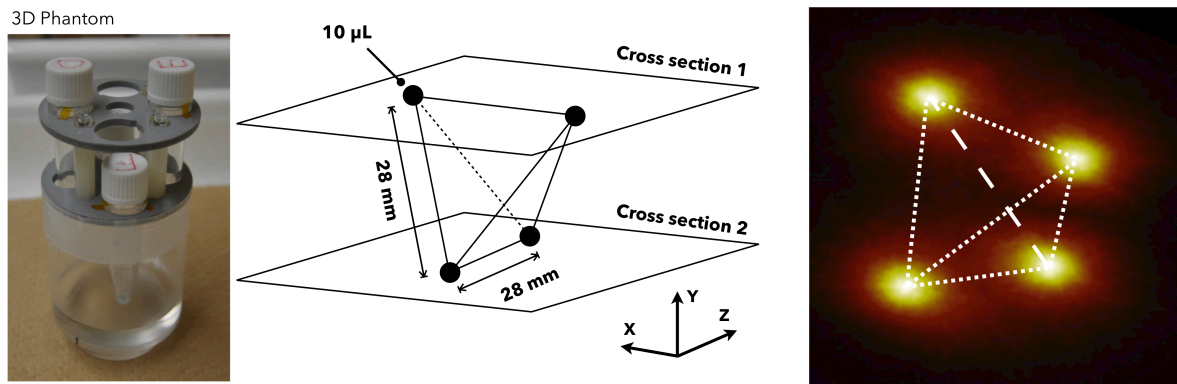


図3 三次元イメージング実験に使用したファントム。(左) 実際のファントムの写真。各点源はマイクロチューブに入った 10 μ L の液滴であり、球形を仮定すると直径約 2.7 mm となる。(中央) ファントムを構成する 4 点源は一辺 28 mm の正四面体の頂点に配置されている。4 点源の強度はそれぞれ 74 kBq である。(右) ^{111}In からの 171 keV 及び 245 keV ガンマ線イベントから再構成した三次元画像を最大値投影法 (MIP) で表示した。破線は 4 つの点線源によって構成される一辺 28 mm の正四面体をわかりやすくしたもの。各点源が分解され、三次元構造が再現されている。(Yabu *et al.* 2021)

わせた Si-CMOS/CdTe ETCC を使ってガンマ線源のよるコンプトン散乱イベントを取得し、ETCC のガンマ線イメージングが従来型に比べて優れた特長を持っていることを示すことができた。

Si-CMOS が持つ CMOS センサーの微細なピクセルサイズとストリップ検出器として可能となる高いエネルギー分解能と時間分解能が ETCC の実現には必須の能力であることを示すことができた。高精度なエネルギースペクトルからウインドウ内のガンマ線イベントを抽出し、角度分解能は従来型のコンプトンカメラと同等の性能を発揮することができた。

Si-CMOS から取得した電子軌跡画像を使って電子散乱方向を推定することができ、検出器平面上での方向角度の誤差 SPD(Scatter Plane Deviation) の分布から決まる角度の推定精度は FWHM で $110^\circ @ 662 \text{ keV}$ となった。

光源がカメラの天頂近くに位置していることを仮定すると、SPD 分布の FWHM は $62.7^\circ @ 662 \text{ keV}$ まで改善することができた。コンプトン散乱の散乱電子と散乱光子の運動量ベクトルが検出器平面上でなす角度を $\alpha_{\text{projected}}$ とすると、 $150^\circ \leq \alpha_{\text{projected}}$ の制限を加えることで精度よく散乱方向を推定したイベントを選択することができた(図4)。このイベント選択は散乱電子の方向の推定精度を向上させただけでなく、コンプトン散乱が生じた位置である電子飛跡の始点の決定をより正確にし、Si-CMOS が持つ高い位置分解能を最大限に発揮することを可能とした。

電子追跡型手法による画像再構成の結果、従来型に比べ、少数イベントによる光源位置の特定と多数イベントの場合に再構成画像の低バックグラウンド化を実現することができた。電子追跡型手法では 10 イベントという極めて少ないイベント数での光源の制限が可能となった他、多数のイベントでの再構成においても光源から遠い距離までできる広がった構造を軽減させ、低バックグラウンドなガンマ線イメージの取得ができた (図 5)。

本研究により、高いエネルギー分解能と位置分解能を併せ持ち、電子の散乱情報を用いて、コンプトンカメラが本来持つ高い感度を得るための次世代コンプトンカメラのコンセプト実証に成功した。

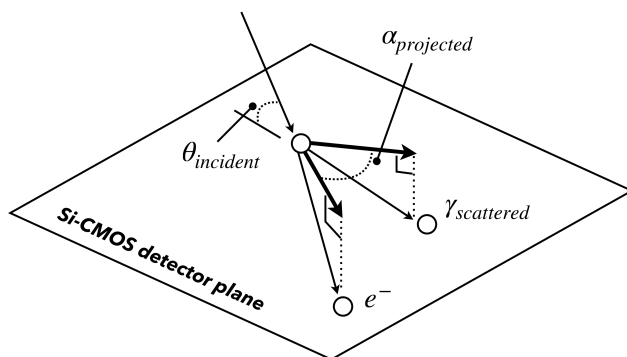


図 4 コンプトン散乱前後の各粒子の運動量ベクトル。Si-CMOS 検出器上に投影された散乱光子と散乱電子の各運動量ベクトルがつくる角度を $\alpha_{projected}$ 、入射光子ベクトルと検出器平面のなす角度を $\theta_{incident}$ とした。 $\alpha_{projected}$ を制限することは入射光子ベクトルと検出器平面のなす角度 $\theta_{incident}$ を制限するに等しい。

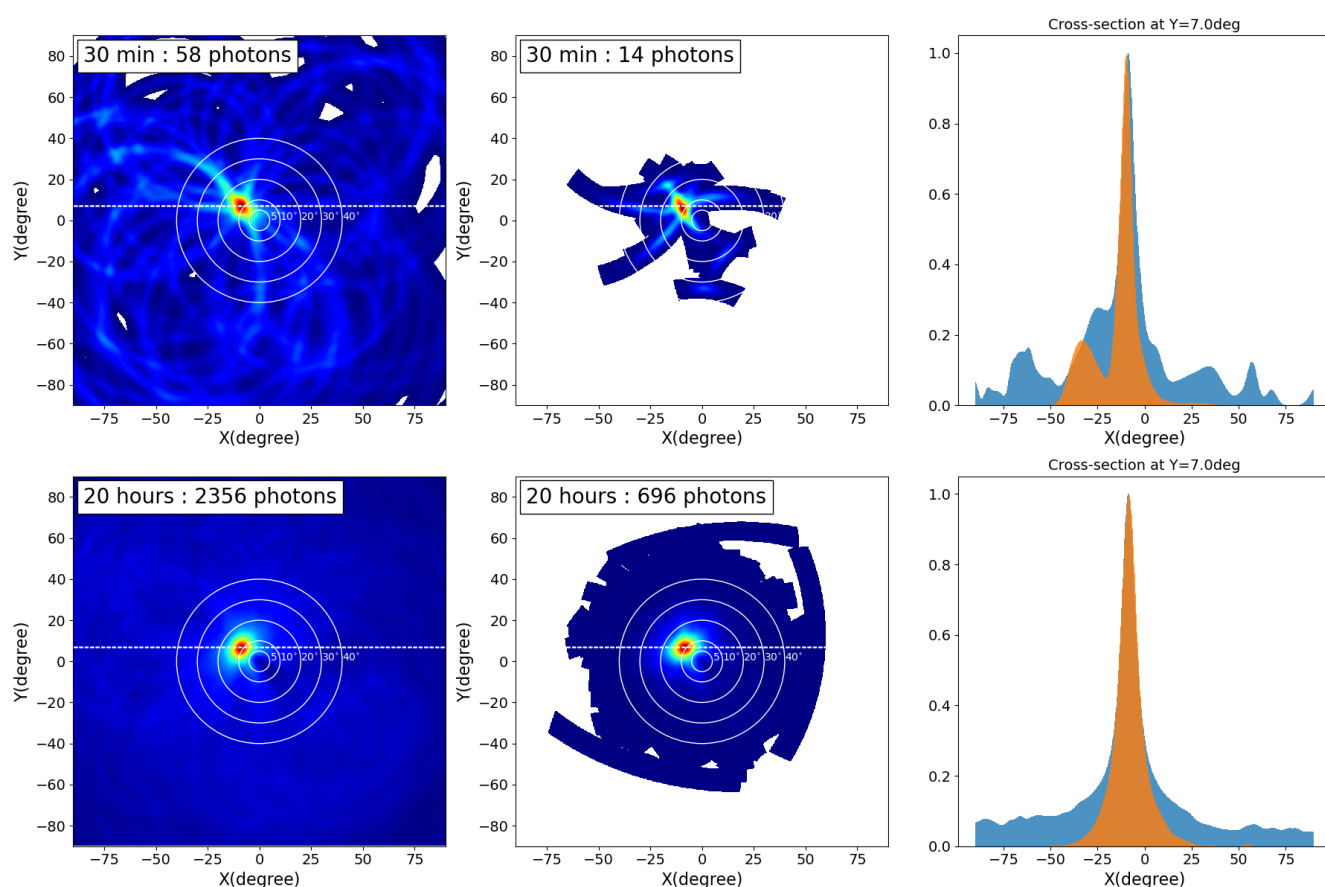


図 5 ^{137}Cs 点線源データの SBP によって得られた再構成画像。測定時間はそれぞれ上段は 30 分、下段は 20 時間である。左列はコンプトン散乱イベントから従来型手法によって逆投影したもの。中央列は電子軌跡の解析後のイベントセレクションを反映したもので、逆投影も電子追跡型手法を使っている。白の同心円は天頂からそれぞれ 5° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° に対応している。右列は光源の位置での断面図で二次元画像中の点線での断面である。青が従来型、オレンジが電子追跡型に対応している。