

論文内容の要旨

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

次世代ガンマ線天文学のための Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの実証的研究

武田 伸一郎

はじめに

宇宙ガンマ線観測において、数百 keV から MeV にわたる帯域は、極限状態にまで加速された素粒子からの放射や、強力な重力場・電磁場におけるエネルギーの交換と解放により特徴付けられる。しかしながら、高いバックグラウンドと低い検出効率、イメージングの困難により、「すざく」衛星などによる X 線や「フェルミ」衛星による GeV ガンマ線の観測に比べて、感度は著しく制限されてきた。そのため次世代の天文学において、新しい技術を用い、このエネルギー帯域における観測を一新させることが極めて重要である。

我々は、ガンマ線天文学を切り開くことを目的として、新しい概念のガンマ線望遠鏡の研究を行い、シリコン (Si) 半導体とテルル化カドミウム (CdTe) 半導体を組み合わせた、世界で初めての Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの開発を行った (図 1 左)。コンプトン散乱の断面積が 60 keV という低いエネルギーから光電吸収を上回るシリコンと、高いエネルギーにまで阻止能力をもつ CdTe を組み合わせることで、高いエネルギー分解能とともに検出効率の極めて高いコンパクトなコンプトンカメラが実現可能である。原子番号の小さい物質である Si を散乱体に用いることにより、束縛された電子のもつ有限の運動量の効果による角度分解能劣化を最小限にとどめ、511 keV のガンマ線に対して、2° 程度、また MeV 以上のガンマ線に対しては 1° を下回る、これまでにない優れた角度分解能が実現する。Si/CdTe コンプトンカメラは、5 年ほど前に我々のグループによって考案されたものである。本研究では、その実現のための基礎研究を行い、科学衛星に搭載することを前提として、試作機 (図 1 右) を初めて製作した。これを用い、科学観測に必要な検出器応答を、較正実験と素過程を組み込んだモンテカルロシミュレーションの結果を比較することで導きだした。また、性能実証実験として、SPRING-8 のシンクロトロン放射光を用いた、ガンマ線偏光観測実験を行った。本論文は、これらの結果をまとめた上で、次世代のガンマ線天文学に応用するための具体的なミッション提案を行う。

実証実験と高精度モンテカルロシミュレーターの構築

優れた角度分解能を有する Si/CdTe コンプトンカメラは、従来のシンチレーターを用いるようなコンプトンカメラでは困難であった、広がった構造をもつ天体や、隣接する天体のイメージングを可能にする。我々は非密封線源を用いて、多様な試料を製作し、イメージングの実証試験をおこなった。図 2 にその一例を示す。左は逆 "C" 状の広がった構造に対するもの、右は 20 mm ピッチで規則的に配置した点源に対するイメージング結果である。逆 "C" の広がったソースに対しては環状の構造が浮き彫りにされ、さらにギャップ構造を正しく認識することができる。隣接する点源についても、点源が正しい位置に分解できることが明らかとなった。

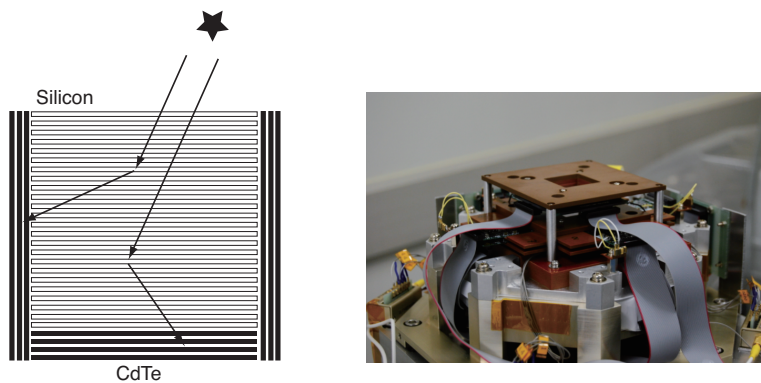


Figure 1: 左図:Si/CdTe コンプトンカメラの概念図、右図: 1層の両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) と 4層の CdTe ピクセル検出器を組み合わせた、性能評価用のコンプトンカメラ。2 mm の間隔で積層した半導体検出器、合計 1152 チャンネルを 18 個の低ノイズアナログ LSI を使って読み出した。

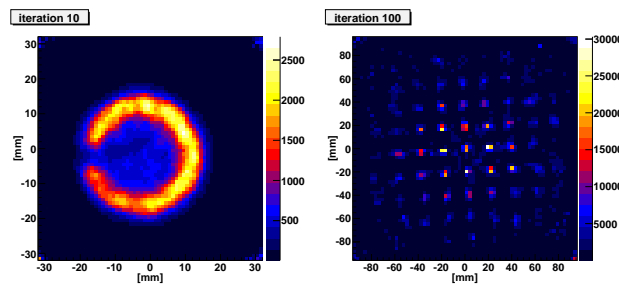


Figure 2: コンプトンカメラによって得られた ^{131}I 364 keV のイメージ、左は逆 "C" 型の広がったターゲット、右は 20 mm ピッチで等間隔に配置したもの。

我々は Geant 4 をベースとして、コンプトンカメラ用のシミュレーターの構築をすすめた。光子や二次的に生成された電子のトラッキングは Geant 4 パッケージを用いておこない、出力される位置・エネルギー情報に対して、熱拡散や電荷収集効率などの検出器の応答を作用させた。個々の検出器の応答は、実験で得られた検出器のヒットパターンや、チャージシェアリング時のエネルギー分配等を手懸かりとして、実験データをよく再現するようなパラメーターを見つけ出し、シミュレーターに組み込んだ。

図 3 左は、276–511 keV 帯域におけるコンプトンカメラの絶対検出効率の実験値とシミュレーション値との比較である。両者はよく一致している。これより、シミュレーターによるコンプトンカメラの絶対検出効率の計算が可能となった。右は、170 keV の 100 % 偏光ビーム入射時の、散乱光子の方位角分布の比較である。 -135° 、 -45° 、 45° 、 135° に見られる、検出器の配置に由来するギャップ構造や、素子を支持する構造物の非対称性に由来する -90° と 90° における約 10 % の検出効率の差を、よく再現することに成功した。

ガンマ線の偏光観測実験

ガンマ線の偏光観測により、天体近傍の磁場や物質の構造を知る手懸かりを得ることができる。しかしながら測定の実験の困難のために未だ実現されていない。我々は SPring-8 において 170 keV の 100% 偏光シンクロトロンビームを入射させ、偏光ベクトルの決定精度に関して調査した。検出器からみた偏光ベクトル ϕ_0 の方向が異なる 7 種類のセットアップから得られたモジュレーションカーブを、図 4 にしめす。カーブの中で測定点が欠けている、 -135° 、 -45° 、 45° 、 135° 方向は、吸収体の CdTe が配置されていない方向である。散乱方向異方向性が最大となる方向に CdTe が無い不利な条件であっても (図中 $\phi_0=45^\circ$) 偏光ベクトルが正しく決定できることがわかった。

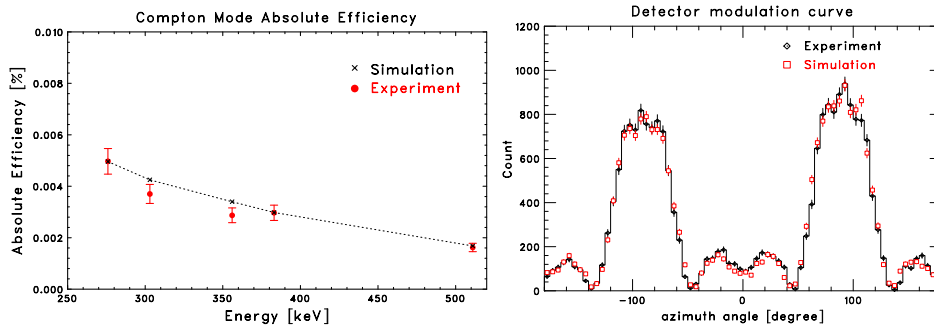


Figure 3: 左図: コンプトンカメラの絶対検出効率。実験値のエラーは、実験に用いた RI 強度の不定性に由来する 10 % のエラーである。右図: 100 % 偏光ビームに対する散乱光子の方位角分布。いずれの場合も実験値とシミュレーション値をよく一致させることができた。

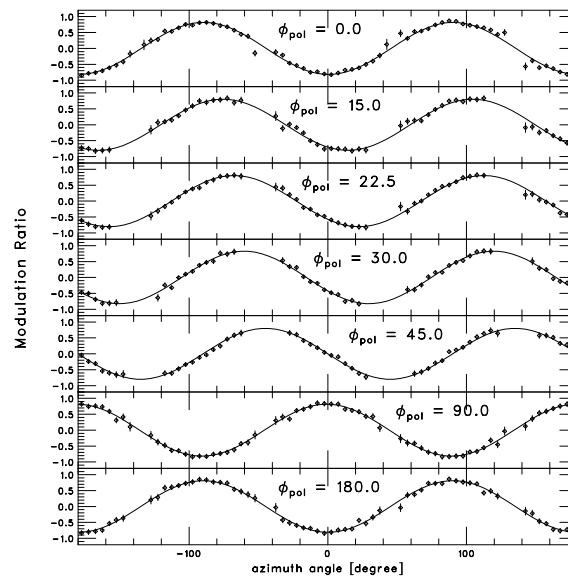


Figure 4: SPring-8 における偏光実証実験で得られたモジュレーションカーブ。偏光ベクトルの方向に対して検出器を 0° 、 15° 、 22.5° 、 30° 、 45° 、 90° 、 180° の刻みで回転させた。

高感度ガンマ線天文学に向けたコンプトンカメラの設計

実証実験を経て高精度化されたモンテカルロシミュレーターを用いて、高感度ガンマ線天文学に向けたコンプトンカメラの設計と、軌道上における性能評価をすすめた。まず、検出効率と角度分解能の点から Si、CdTe 検出器の配置について最適化を図った。96 層にスタックした Si/CdTe 半導体コンプトンカメラにおいて、Si と CdTe の混合比が (1) Si:CdTe=3:1、(2) Si:CdTe=1:1、(3) Si:CdTe=1:3 の 3 つのケースについて計算をおこなった。その結果、(1) のとき角度分解能が最大 (1.6° @511 keV, 1.8° @1.8 MeV) となり、(1)(2) の時ほぼ同等の効率最大値を得た。この結果より、(1) を選択し衛星軌道における性能評価をおこなった。実際の衛星軌道における観測感度を決定するのは、信号に対する検出効率に加え、バックグラウンドの強度・除去方法である。ガンマ線や電子線その他、中性子による弾性散乱や陽子による放射化成分を評価することが重要である。そこで、Geant 4 のハドロン素過程を用いたモンテカルロシミュレーションや MGGPOD による検出器の放射化成分のシミュレーションを行った。その結果、コンプトンイメージングにより、中性子や放射化成分が低減され、宇宙 X 線背景放射や地球大気ガンマ線が主要な成分となることがわかった。図 5 に、低高度赤道軌道におけるバックグラウンドをシミュレートして得た、連続成分とライン (511 keV 、 847 keV (^{56}Co)、 1157 keV (^{44}Ti)、 1809 keV (^{26}Al)) に対する予想感度を、数 100 keV、MeV 帯域で過去最大の感度を達成している INTEGRAL 衛星 SPI 検出器、CGRO 衛星 COMPTEL 検出器の感度とともに示す。連続成分に関し

て、1 MeV 以下の帯域で SPI 検出器を優に 5 倍上回る感度を持つことがわかる。コンプトンカメラの広い視野を生かせば、3-5 年程度で有効観測時間 3×10^7 (1 年) を達成することができる。その場合、感度は 1 mCrab に達し、過去の衛星を一桁上回ることができる。ラインガンマ線に対しても、Ge 検出器を用いている SPI 検出器を上回る感度を有することがわかる。最後に図 6 に、Anti Galactic Region Sky をシミュレートした結果をしめす。ここでは、100 MeV 帯域で得られた EGRET 3rd catalog に基づいて、ベキをそのまま 500 keV - 10 MeV 帯域に外挿した。観測時間は 67 ksec で、バックグラウンドもモンテカルロシミュレーションで見積もり混入させてある。コンプトンイメージングにより、数 10 mCrab に対応する天体を認識することができる。

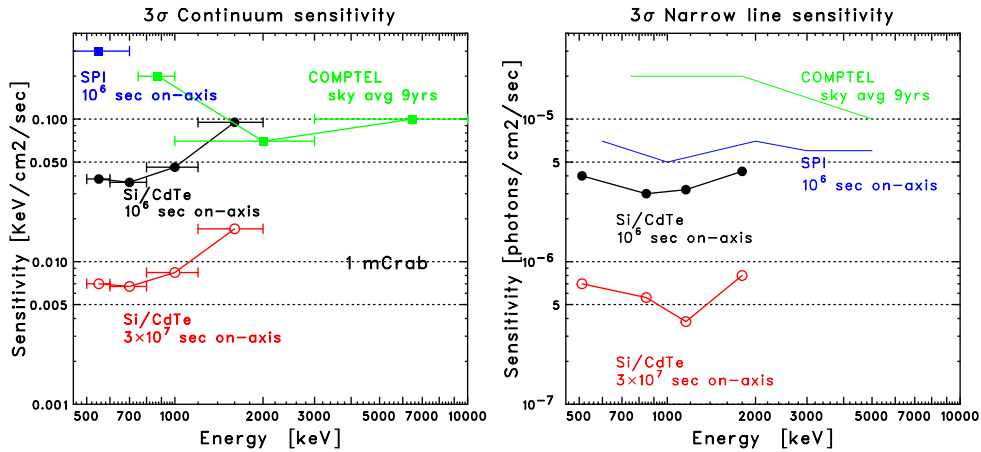


Figure 5: 左: 連続成分に対する 3σ 感度。右: ラインに対する 3σ 感度。COMPTEL は 9 年間通算の成果である。

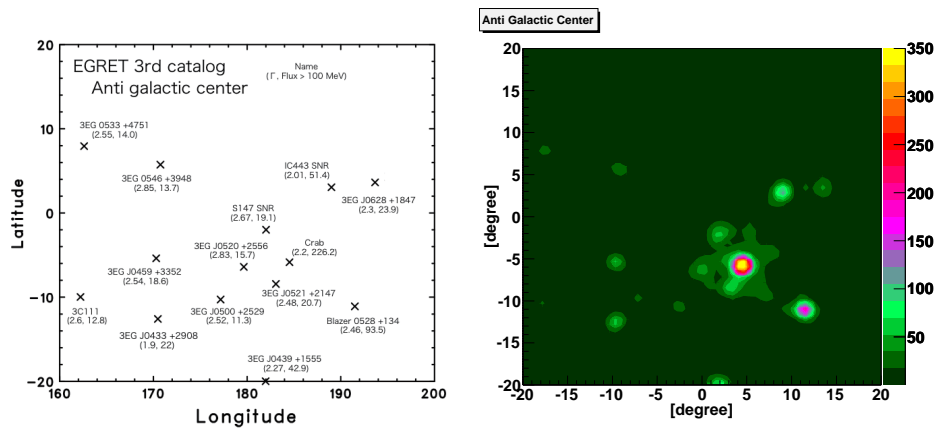


Figure 6: コンプトンカメラによる 500 keV 以上の帯域における Anti Galactic Region のシミュレーション。67 ksec の短い観測で数 10 mCrab に対応する天体を認識することができる。

まとめ

本研究では、Si/CdTe コンプトンカメラという新しい検出器を完成させ、高い位置分解能とエネルギー分解能に基づく、優れたイメージング能力・偏光測定能力を実験的に示した。高精度化したモンテカルロシミュレーターを駆使し、Si/CdTe コンプトンカメラの最適化を図った。軌道バックグラウンドをシミュレーションし、数百 keV から MeV にわたる帯域での全天サーベイ観測で、過去の如何なる検出器よりも、1 桁以上優れた感度を達成できることを示した。