

令和 6 年度（2024） 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名 和文：3 次元シリコン半導体検出器を用いた電子飛跡コンプトンカメラの開発 英文：Development of an advanced Compton camera using SOI pixel semiconductor	
研究代表者	加賀谷美佳（仙台高等専門学校 総合工学科 准教授）
参加研究者	片桐秀明（茨城大学理学部・准教授），鶴剛（京都大学大学院理工学研究科・教授），武田彩希（宮崎大学工学部・准教授），島添健次（東京大学大学院工学研究科・准教授），上ノ町水紀（東京科学大学総合研究院・特任助教）
研究成果概要 Sub-MeV、MeV 領域のラインガンマ線の観測は、超新星爆発における元素合成プロセスの解明、宇宙線の起源の特定、暗黒物質探査など様々な高エネルギー天体現象を明らかにするためのプローブとなる。このエネルギー領域における高感度観測を達成するためには、バックグラウンドの低減が必須である。そのため、本研究では、エネルギー分解能に優れたピクセル半導体検出器（SOIPIX）を利用し、電子飛跡を検出可能なコンプトンカメラ（図 1）を開発し、Sub-MeV および MeV ガンマ線観測におけるバックグラウンド低減を試みる。電子飛跡検出型コンプトンカメラの場合、散乱部での反跳電子をとらえることによって、ガンマ線の到来方向が運動学的に一意に推定できる。また、電子飛跡の情報を利用して再構成画像の虚像の低減や粒子の識別、PSF の改善など、コンプトンカメラとしての性能向上が可能になる。 電子飛跡検出型コンプトンカメラの角度分解能を向上させるためには、電子の反跳方向の決定精度が重要であるため、SOI 半導体検出器の改良と、反跳方向の推定手法について研究を行っている。MeV ガンマ線がシリコン中でコンプトン散乱を起こすことによって反跳した電子の飛跡は約数十 μm から数百 μm ほどになり、複数のピクセルにエネルギーを落とす。現在の解析手法では、反応点の周辺のピクセルに堆積したエネルギーの大きさによって重み付けをしてベクトルの方向を推定している。反跳電子がピクセルに対して斜めに走る場合、ピクセルの形状を受けやすく、反跳方向の推定に偏りが生じやすくなると考えているため、ピクセルの形状による反跳方向の推定精度の違いをシミュレーションによって明らかにする。令和 5 年度から令和 6 年度にかけて、六角形のピ	

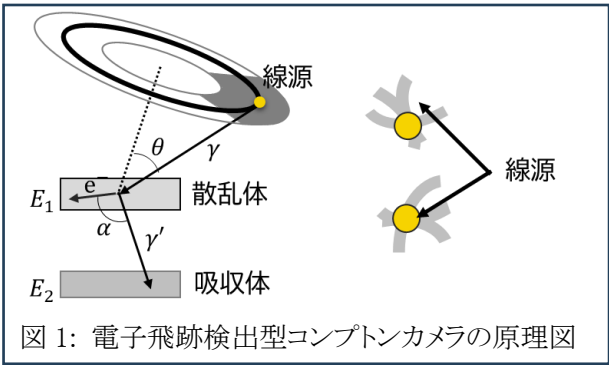


図 1: 電子飛跡検出型コンプトンカメラの原理図

クセル形状での評価を進めてきた。六角形のピクセルを並べた半導体検出器は、SOIPIXグループによって過去に実際に製作された実績があるため、実際に設計できる実現性も高いと考えた。先行研究 (M. Kagaya et al., 2024) では X 線観測用に開発された $30\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$ サイズの格子型の素子 (XRPIX2b) を使用して評価を行ったため、六角形の辺の長さが $30\text{ }\mu\text{m}$ になるように設定し、六角形のピクセル形状での Geant4 シミュレーションを行った。コンプトンカメラは散乱体と吸収体が必要になるが、吸収体は先行研究のプロトタイプと同様に 3.5 cm 角のヨウ化セシウムの結晶シンチレータを用いた。令和 6 年度では、主に解析プログラムの改良を進め、六角形のピクセルの場合でも反跳方向を推定できるようになった。図 2 に格子型の場合と六角形のピクセル形状での飛跡の形状の比較を示す。現状では、素子の検出面に対して平行に電子が走るパターンのシミュレーションしか行えていないため、今後、様々な方向に電子が走る場合を想定したシミュレーションを行って反跳方向の推定精度の比較を行う。さらに、格子状のピクセルの評価の時と同様にピクセルサイズを変えた場合についても比較する予定である。

また、先行研究である K. Shimazoe et al., 2020 や T. Ikeda et al., 2021 でも報告されているように、電子の反跳方向の推定には機械学習も有効である。本研究においても、電子の反跳方向の推定に機械学習を取り入れることを検討しているため、ピクセル形状による評価が終わり次第、機械学習を用いた解析手法の確立に着手する。

既存の半導体検出器は 2 次元方向にしか電子飛跡を検出できないため、最終的には電子の反跳方向を 3 次元的に推定する技術が必要となる。そのため、現在ある様々な素子開発のアイデアも大型計算機を利用してシミュレーションによる評価を進めて開発方針の検討の一助としたい。

さらに、これまでは電子飛跡の検出という観点でシミュレーションを行ってきたが、最終的にコンプトンカメラとしての性能が重要となるため、プロトタイプコンプトンカメラの撮像性能の評価 (感度、角度分解能など) Geant4 シミュレーションを用いて行う。これらの評価のために、引き続き宇宙線研究所の大型計算機システムを利用させていただきたい。

