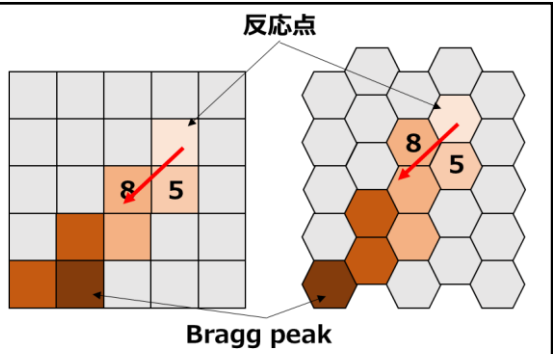


## 令和 5 年度 (2023) 共同利用研究・研究成果報告書

<p>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</p> <p style="text-align: center;">英文：Development of an advanced Compton camera using SOI pixel semiconductor</p>
<p>研究代表者 仙台高等専門学校 総合工学科・准教授 加賀谷美佳</p> <p>参加研究者 片桐秀明 (茨城大学理学部・准教授), 鶴剛 (京都大学大学院理学研究科・教授), 田中孝明 (甲南大学理工学部・准教授), 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 (京都大学学際融合教育研究推進センター宇宙総合学研究ユニット・特定助教)</p>
<p>研究成果概要</p> <p>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。</p> <p>装置の開発と並行して Geant4 シミュレーションを用いた評価および解析手法の開発もおこなってきた。電子飛跡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になるため、様々なピクセルのサイズ、形状での電子の反跳方向の決定精度の評価を行っている。現在は、ピクセルの形状を変更して電子飛跡の検出性能が向上するかどうかの評価を行っており、ピクセルの形状を六角形とし、これを複数並べたピクセル半導体検出器を模擬した。MeV ガンマ線が半導体検出器に入射すると、コンプトン散乱を起こして半導体中の電子を弾き飛ばす。この電子の飛跡は約数十 <math>\mu\text{m}</math> から数百 <math>\mu\text{m}</math> 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 (図 1)。ピクセルが格子状の形状の場合、反跳電子がピク</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;">  <p style="text-align: center;"><b>反応点</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Bragg peak</b></p> <p style="text-align: center;">反応点を中心に周囲のピクセルのエネルギーの大きさを重み付けをして反跳方向を推定 (濃い色が検出したエネルギーが大きいことを示す)</p> <p style="text-align: center;">図 1: 反跳電子の推定方法の概略図</p> </div>

セルに対して斜めに走るとピクセルが1つしかないため反跳方向の推定に偏りが生じやすいが、六角形の場合、斜め方向に対してピクセルが2つになるため、反跳方向の推定精度が向上できると考えている。R5年度では、共同利用によって使用させていただいた計算機を用いて、六角形のピクセル形状での Geant4 シミュレーションを動かした。ピクセルサイズは過去に開発したプロトタイプコンプトンカメラに搭載した XRPIX2b(京都大で開発された X 線観測用の SOI ピクセル半導体検出器) のサイズ  $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$  と比較するために、六角形の辺と辺の長さが  $30\ \mu\text{m}$  になるように設定した。コンプトンカメラは散乱体と吸収体が必要になるが、吸収体は同時計数のイベントを増やすため、実際に開発した過去のプロトタイプと同様に  $3.5\ \text{cm}$  角のヨウ化セシウムの結晶シンチレータを想定してシミュレーションを行った(図2)。511 keV のガンマ線を散乱角 90 度になるようセットアップの配置を決定し、反跳電子が素子の検出面を水平に走る方向を想定した。シミュレーションによる RAW データの作成は完了し、現在、六角形の素子に対応した解析プログラムの改良を行っている。散乱層および吸収層で得られたエネルギーデポジットにおいては、90 度散乱の際に想定されるエネルギーの分布が得られており、それらを足し合わせた場合のエネルギースペクトルはシミュレーションで降らせた 511 keV のエネルギーにピークが得られていることを確認している。反跳電子の電子飛跡を 2 次元のマップで表し、反跳方向を推定する部分が未完成であるため、引き続き、本共同利用で大型計算機を利用させていただき、解析プログラムの改良を進める。

また、XRPIX2b を用いたプロトタイプの電子飛跡検出型コンプトンカメラにおけるシミュレーションおよび実測での性能評価について、論文[1]として成果を公表したことを報告する。

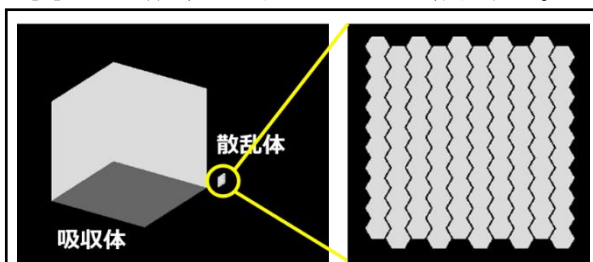


図 2: シミュレーションでの検出器の配置(左)と散乱部の六角形ピクセルアレイの半導体検出器の概略図(右)。実際には散乱部に  $144 \times 144$  個のピクセルを配置。

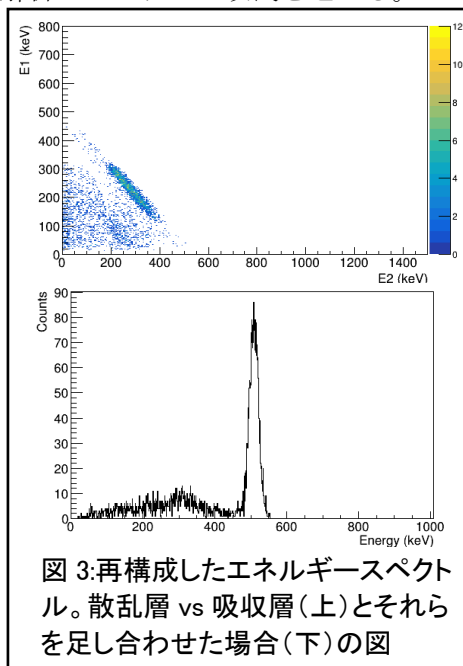


図 3:再構成したエネルギースペクトル。散乱層 vs 吸収層(上)とそれらを足し合わせた場合(下)の図

[1] M. Kagaya et al., "Evaluating the capability of detecting recoil-electron tracks using an electron-tracking Compton camera with a silicon-on-insulator pixel sensor", NIM A, Vol. 1062, 169213 (2024)