

## 令和 4 年度 (2022) 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・助教 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 および 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や、宇宙線の起源の解明、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。このエネルギー帯の観測では、バックグラウンドガンマ線の多さが問題となっており、バックグラウンドを低減させ、高い感度を実現することが観測装置開発の大きな目標となっている。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(SOIPPIX)を利用し、電子飛跡を検出するタイプのコンプトンカメラを開発して MeV ガンマ線観測におけるバックグラウンドの低減を図る。</p> <p>装置開発および評価試験と並行し、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行ってきた。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。R2 年度では、ピクセルのサイズを 30 <math>\mu\text{m}</math>、20 <math>\mu\text{m}</math>、10 <math>\mu\text{m}</math> と小さくした場合の評価を行ったため、R4 年度では、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始めた。既存のピクセル形状は格子状であったが、今回の評価では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</p> <div style="text-align: center; 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>

の飛跡は約数十  $\mu\text{m}$  から数百  $\mu\text{m}$  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、1 つピクセルに対して隣り合うピクセルは 4 つしかないため到来方向の推定に偏りが生じやすいが、六角形の場合、6 個のピクセルが隣り合うため、この偏りが小さくなる効果がある。また、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。

R4 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  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$  を参考に、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用いた。図 2 に Geant4 シミュレーションで設定した検出部を可視化した図を示す。ピクセル数が多くなるとシミュレーションが動かなくなるため、ピクセルの配置(定義方法)について工夫が必要であることがわかった。また、六角形ピクセルを用いた場合の解析プログラムも開発を行っている途中で、データ解析ができるようになったら、これまでの格子状のピクセルの評価結果と比較を行う。

また、電子飛跡の検出性能は、検出部の形状やサイズの工夫だけでなく、解析手法によっても向上できる可能性がある。特に最近では、ディープラーニングなどの機械学習が有効であることがわかっており、ガス検出器を用いた MeV ガンマ線観測実験である SMILE プロジェクトでは、電子飛跡の方向の決定精度や散乱点の決定精度の向上に成功し、同じ検出器でも角度分解能を 2 倍改善させることに成功している。SOI ピクセル半導体検出器においても、機械学習を利用することで電子飛跡検出性能の向上が確認されている。そのため、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おり、反跳方向の推定方法の確立のために、引き続き宇宙線研究所の共同利用として大型計算機を使用させていただき、研究を進めていく。

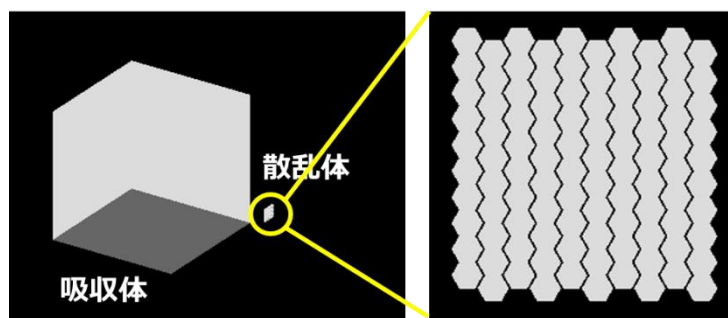


図 2: シミュレーションでの検出器の配置(左)と散乱部の六角形ピクセルアレイの半導体検出器の概略図(右)  
実際には  $144 \times 144$  個のピクセルを配置している。