

2020 (令和二) 年度 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名	和文：宇宙線研究のためのコンプトンカメラの検討 英文：Design study of a Compton camera for study of cosmic rays
研究代表者	茨城大学・准教授・片桐 秀明
参加研究者	榎本 良治（東京大学宇宙線研究所 准教授）、村石 浩（北里大学医療衛生学部 准教授）、加賀谷 美佳（仙台高等専門学校総合工学科 助教）、吉田 龍生（茨城大学理学部 教授）、柳田 昭平（茨城大学 名誉教授）、渡辺 宝（国立がん研究センター東病院放射線技術部 診療放射線技師）、原田 幸征（茨城大学大学院理工学研究科 M2）、吉田 和生（茨城大学大学院理工学研究科 M1）、石川 咲貴（北里大学大学院医療系研究科 M1）
研究成果概要	<p>宇宙線起源の問題は、未だ完全には解決していない宇宙物理学上の重要な問題である。フェルミ衛星によって有力な銀河内宇宙線の加速候補天体である超新星残骸（SNR）からのガンマ線（主に$>100\text{MeV}$）を高感度で測定できるようになり、多数の SNR からガンマ線が発見され、SNR における粒子加速は揺るぎない事実となった。しかし、SNR で加速される粒子が、地球で測定される宇宙線の主要な成分である陽子であるか、それとも電子であるか、という根本的な問題が残されている。この問題を解決するための有力な方法の 1 つとして、宇宙線陽子が星間物質中の原子核を励起した後生ずる脱励起ラインガンマ線（10MeV 以下）の観測がある。これを捉えてやれば、加速粒子の種類を確実に検証することが可能となる。2MeV 以下では元素合成で生成される不安定同位体からの核ガンマ線などの寄与があるため、2MeV 以上の脱励起ガンマ線の観測が特に重要である。感度を飛躍的に向上させるには、コンプトン散乱の反跳電子の飛跡を検出するアドバンストコンプトンカメラが有力である。いくつかのカメラの開発が進んでいるが、$2\text{MeV}\sim 10\text{MeV}$ の領域では脱励起ガンマ線を検出できる程の感度を得るのは簡単ではない。研究代表者は、安価でかつ数 m の長さまで光信号を伝送でき、容易に大面積で高検出効率の検出器を作れるシンチレーションファイバーを用いる方法を考案した。ファイバーは小さい原子番号の物質から成るためクーロン多重散乱による電子飛跡の歪みが小さく、数 MeV 以上のガンマ線になると反跳電子の飛跡が数 mm 以上となる。よって、ファイバーによってサブ mm 程度の位置分解能が実現できれば、アドバンストコンプトンカメラとして動作する可能性がある。さらに、大型化できる利点を生かして 3 回以上コンプトン散乱をさせれば、重い吸収体がなくても入射エネルギーと到来方向の推定ができる。本課題では GEANT4 シミュレーターを用いて、宇宙線が星間物質を励起させた際に生じるガンマ線を高感度で測定可能なシンチレーションファイバーを用いたアドバンストコンプトンカメラの実現可能性の検討を行っている。さらに、科研費などを用いて試作機を制作し、シミュレーションと比較した実証を進めている。</p>

2020年度は具体的には以下のようなことを行った。

(1) 科研費によるプロトタイプ 2 号機の開発

3 回以上コンプトン散乱した場合のエネルギー・到来方向の再構成の検証も目的とするため、1 号機より大きなサイズとなる。サイズは予算による制限があるため、宇宙線研究所の大型計算機システムを用いたシミュレーションによって実験室における現実的な測定での検証が可能かどうか評価しつつ設計し、32mm 角の

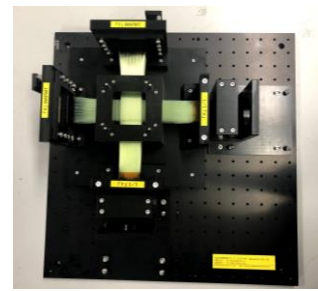


図 1 制作したファイバーカメラ試作 2 号機の検出部。

ファイバー検出器部の製作が完了した (図 1)。現在、イメージンシファイアやトリガー信号を生成する MAPMT などを用いた信号読み出しシステムを構築中である。その他、以下のような 2 号機制作に向けた開発も進めている。(1-1) EASIROC 信号読み出しモジュールの ASIC は正の信号入力に対応するため、MAPMT を読み出すには信号反転が必要だが、多チャンネル信号反転基板を実際に作成した。入力信号に対する波形の歪みや周波数特性を調べ、検証試験に耐えうる性能があることを確認した。ノイズレベルが変動しやすいという問題点が見つかったが、接地方法を工夫することにより低ノイズで安定してデータ取得できることを確認した。(1-2) EASIROC の NIM 出力をイメージンシファイアの信号を撮像する CMOS カメラの外部トリガーの規格である LVTTTL 入力に変換するための回路の開発・評価を行った。長時間駆動すると、不安定になる問題があったが、入力部に保護ダイオードを追加し、さらに供給電源の電流上限リミットを低くすることによって、長時間でも安定した動作をすることを確認した。

(1-3) 2 号機試験用の暗箱の製作中。

(3) 2 号機のデータ解析に向けた Geant 4 シミュレーションデータを用いた解析プログラムの開発

プラスチックシンチレータ中のコンプトン散乱点やエネルギーデポジットを可視化した (図 2)。さらにエネルギーデポジットを検出器分解能でコンボリューションした疑似データを作成し、簡易解析でヒット情報を得てシミュレーションとの比較を行った (図 2)。今後、ファイバー検出器用に改良を加える必要がある。

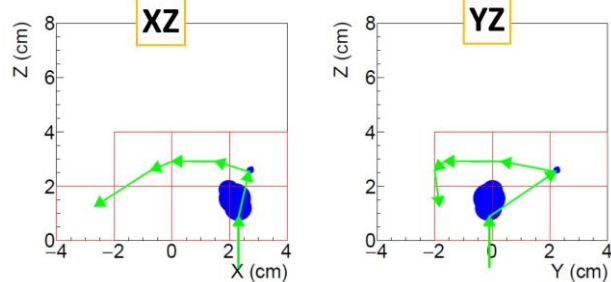


図 2 4.4MeV ガンマ線を下からプラスチックシンチレータに入射した時の散乱およびエネルギーデポジットの様子 (左は XY 平面、右は YZ 平面に投影)。緑: MC true のコンプトン散乱点と向き 青: MC のエネルギーデポジット (シミュレーションステップ毎に 1cm/MeV の半径の円) 赤: シミュレーションデータをピクセル化、プラスチックシンチレータのエネルギー分解能で true energy をコンボリューションして疑似データを生成し、それを解析した際のヒットピクセル (>20keV)。