

令和 3 年度 (2021) 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 M2）
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に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反跳電子検出型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、反跳電子検出型コンプトンカメラとして動作する可能性がある。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ド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>

2021年度は具体的には以下のようなことを行った。

(1) 試作1号機の評価

平成30年度X, Yに交差する1mm角のファイバー8×8本で構成された64チャンネルMPPC読み出しの小型の試作1号機を制作した。令和1年度に宇宙線ミュオンのデータを取得し、ミュオン候補事象の飛跡を検出できた。令和2年度および令和3年度は、GAGG(Eu)シンチレーターと組み合わせたコンプトンカメラを制作した。また、実データの解析アルゴリズムを開発するために、Geant4シミュレーターで実機に近い現実的な検出器モデルを構築した。ミュオン事象をもとに簡単な飛跡再構成アルゴリズムを開発した。また、環境ミュオンを模擬したシミュレーションを行い、実測と比較することによってエネルギー較正を行う手法を開発し実際に較正を行った(図1)。現在、コンプトンカメラとして機能させるために同時係数システムを開発している。

(2) 大型化した試作2号機の開発

2号機は複数回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、令和1年度に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、令和2年度から令和3年度にかけて行ったファイバー検出器部の製作が完了した(予算の関係でこの時点でのファイバー検出器は設計の半分のみ)。令和3年度は、さらに以下のようなことを行った。(1) LEDの光を用いてイメージンシファイアの像を撮像するためのCMOSカメラの性能評価を行った。ピクセル毎のノイズレベル、ダイナミックレンジ、外部トリガーによる遅延時間などを評価した。(2) ファイバーからの光を増幅するイメージンシファイアの簡易動作試験を行った。今後、以下を進める予定。(1) ファイバー検出器の残り半分を増設する。(2) (1)に伴う読み出し基板の修正を行う。(3) ファイバーとイメージンシファイアを結合するファイバーオプティクスプレートの評価やトリガーシステムの開発を行い、コンプトンカメラのシステムとして完成させる。(4) 環境ミュオンによるエネルギー較正を行う。(5) 実験室でガンマ線源を用いてコンプトンカメラとしての動作を確認する。

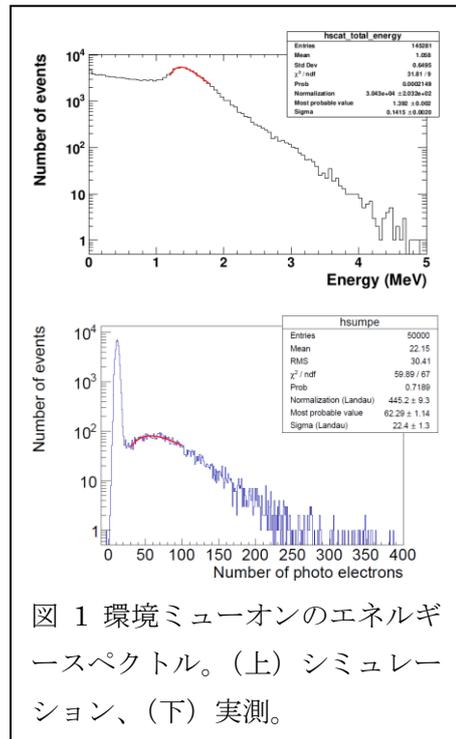


図1 環境ミュオンのエネルギースペクトル。(上) シミュレーション、(下) 実測。