

平成 29 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（首都大学東京健康福祉大学院人間健康科学専攻 D3）近藤 亮太郎（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。2008年から観測運用を続けてい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。これまで、宇宙線が陽子であることを特定するためには、陽子と星間物質との相互作用で生じるπ^0粒子の崩壊ガンマ線が鍵であると思われてきた。しかし、そのスペクトルは連続的な成分であり、電子起源の制動放射成分などが混入するため識別するのが容易ではない。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。2MeV以上で最大感度を誇る観測が1990年代にCOMPTEL検出器によって行われたが、上限値を与えるにとどまっている。COMPTELは入射ガンマ線のコンプトン散乱を利用するカメラであるが、バックグラウンドの除去能力が十分ではなかったため有効面積の割に感度が得られなかった。バックグラウンド除去能力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ド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、コンプトン散乱体としてガスや大型化が困難な半導体を用いているため、特に$2\text{MeV}\sim 10\text{MeV}$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。そこで研究代表者は、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固体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。</p>

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。また、発光減衰時間が 2ns程度で時間分解能が ~ 0.1 nsであるため、2つのガンマ線反応点が数cm以上離れていれば相互作用の反応順序を決定でき、イベント識別能力が向上する可能性がある。さらに材質を工夫することによって粒子種に応じた波形応答を持たせることができるので、中性子などの主要バックグラウンドと波形弁別できるかもしれない。このように、シンチレーションファイバーは数MeV以上のアドバンストコンプトンカメラの素子として非常に有用な可能性を秘めている。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う。

平成29年度は、宇宙線研究所の大型計算機システムを使わせて頂き、宇宙線陽子と炭素原子核の脱励起反応の際に放射される4.438MeVのガンマ線を、ファイバーを構成するポリスチレン中に入射するシミュレーションを行った。物理プロセスは、250eVまでの低エネルギーの電磁相互作用を取り扱うことが可能なLivermoreモデルを用いた。ポリスチレンは30mm角の立方体で定義した。この長さは、およそ0.1散乱長でコンプトン多重散乱が起こりにくく、かつポリスチレン上部で反応したイベントの電子飛跡をすべて含むことが可能な長さとなっている。今回は、1回のみコンプトン散乱したイベントを抽出し、ポリスチレン中での飛跡の各ステップの位置、エネルギー損失量、コンプトン散乱位置、および散乱ガンマ線の運動量を取得した。その際、通常1mmとなっている”range cut”を1 μ mに設定することによって、詳細なステップを得た。図1は、あるイベントのエネルギー損失量の分布の一例であり、エネルギー損失の式から理論的に予想される飛程とおおよそ一致した飛跡を確認することができた。これによって、mm程度の径を持つファイバーによる電子飛跡の可能性を検証することができた。

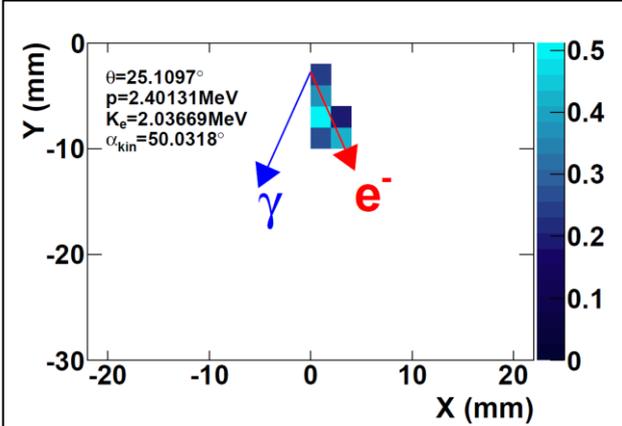


図1 4.438MeVのガンマ線を上方からシンチレーションファイバー中に入射し、コンプトン散乱したときに射出される反跳電子のエネルギー損失量の分布。青い矢印は散乱ガンマ線の散乱方向、赤い矢印は運動学的に予想される反跳電子の射出方向を示している。電子は三次元的に運動するが、視覚化のために、ガンマ線の散乱方向ベクトルおよび入射ガンマ線の入射方向ベクトルを含む平面にエネルギー損失を射影している。