

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01919

研究課題名(和文) 脱励起ラインガンマ線観測で解明する銀河系内宇宙線の起源

研究課題名(英文) Search for the origin of Galactic cosmic rays by observing gamma-ray de-excitation lines

研究代表者

片桐 秀明 (Katagiri, Hideaki)

茨城大学・理工学研究科(理学野)・准教授

研究者番号：50402764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、低エネルギー宇宙線の探査が可能な2-10MeVの脱励起ガンマ線に特化した高感度ガンマ線カメラの開発を行った。カメラは研究代表者が考案したシンチレーションファイバーを用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラである。以前開発した小型カメラを改良するとともに、Geant4シミュレーターで検出器モデルを構築し、飛跡再構成や宇宙線ミュオンによるエネルギー較正の手法を開発した。また、ガンマ線の複数回散乱事象を検証可能な大型のカメラを設計・製作し、カメラを構成するCMOSカメラ等の評価を行った。尚、大型カメラ設計の際に考案したガンマ線のエネルギー・到来方向再構成の手法の特許申請を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、1GeV以下の低エネルギー宇宙線の探査が可能な2-10MeVの脱励起ガンマ線に特化した高感度ガンマ線カメラの基礎開発を行い、その有効性を実験的に検証することを目的とした。もし、本研究で開発に成功すれば宇宙線研究の核心的な問題である(a)加速粒子種、および(b)銀河系内エネルギー収支の問題に迫れる。一方、本研究で開発するカメラで感度が高く撮像することができれば、核融合や放射線治療など、原子核の反応に関連する広い分野で応用する可能性がでてくる。本研究期間内では、このようなガンマ線カメラの基本的な要素技術の開発を進めることができた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a highly-sensitive gamma-ray camera specializing in de-excitation line gamma rays with energies in the range of 2-10 MeV, capable of searching for low-energy cosmic rays. The camera is an electron-tracking Compton camera using scintillation fiber, designed by the principal investigator. We improved the previously developed small prototype camera and developed a realistic simulation model based on Geant4 simulator. By using the simulation model and environmental cosmic-ray muon data, we developed the methods of track reconstruction of charged particles and energy calibration. We also designed and developed a large prototype camera which allows us to investigate the multiple scattering events of gamma rays, and evaluated the performance of a CMOS camera used for the gamma-ray camera. We note that we applied for a patent for the method of reconstructing the energy and arrival direction of gamma rays, which was found when designing the large camera.

研究分野：宇宙高エネルギーガンマ線の観測による宇宙線等の高エネルギー天体现象の研究およびガンマ線検出器の開発

キーワード：ガンマ線 宇宙線 コンプトンカメラ シンチレーションファイバー イメージング

1. 研究開始当初の背景

加速器を遙かに凌駕するエネルギーを持つ原子核(宇宙線)が宇宙のどこでどのように加速されているかという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。観測的に検証するには、宇宙線と天体近傍の星間物質と相互作用する際に生じるガンマ線の観測が有効である。主にエネルギー収支の観点から、銀河系内の宇宙線の主要な部分は超新星残骸(SNR)の衝撃波中で加速されているというSNR起源説が議論されてきた。この説は1934年にバーデおよびツビッキーのアイデアを発端として古くから考えられてきたが、観測的な証拠は近年まで得られなかった。2000年代に入って地上チェレンコフ望遠鏡、さらに2008年からはフェルミ衛星によってSNRから高エネルギーガンマ線が相次いで発見され、これまでに数10個程度のSNRからガンマ線が発見された。これらの観測によって、SNRにおける粒子加速は揺るぎない事実となった。しかし、宇宙線研究の上で根本的な問題がいくつか残されている。以下に、核心をなす学術的な問いを提示する。

(1) 本当に、加速される高エネルギー粒子 = 宇宙線(高エネルギーの原子核)なのか？

多くのSNRからガンマ線が検出されてきたが、これらは確実な宇宙線の存在証拠ではない。加速された電子も放射効率が高くガンマ線源となり得るためである。現在、SNRにおける宇宙線加速の最も直接的な証拠は、フェルミ衛星による π^0 粒子の崩壊ガンマ線の検出である

(Ackermann et al.+13)。宇宙線と星間物質との相互作用で生じる π^0 粒子崩壊ガンマ線は70MeV前後で対称的なピークを持つ特徴的なスペクトルを示すはずだが(図1)、フェルミ衛星の実効的な検出エネルギーの下限が60MeVであるため、70MeV前後の対称的なピークははっきりと捉えられていない。また、検出器の有効面積が100MeV以下で急激に減少するため、非常に明るい数個のSNRしか π^0 粒子崩壊ガンマ線を探索できていない。2030年代に打ち上げが計画されているいくつかのガンマ線衛星では、このエネルギー領域での観測が予定されているが、その感度はフェルミ衛星のせいぜい数倍であるため劇的な改善は見込めない。

(2) 銀河内宇宙線のエネルギー収支は本当に成り立っているのか？

銀河内宇宙線のSNR起源説の重要な根拠は、エネルギー収支である。超新星爆発の莫大な運動エネルギーをエネルギー供給源として利用するというアイデアに基づいている。現在、多くのSNRで粒子加速が起こっていることがガンマ線観測により判明しているため、加速粒子 = 宇宙線原子核、と仮定すれば一見問題ないように見える。しかし、 π^0 崩壊ガンマ線は陽子が $\sim 1\text{GeV}/c$ 以上の運動量を持たないと生成されず、低エネルギーの宇宙線には感度がないことは注意を要する。ボイジャー1号による太陽系近傍の宇宙線測定によってエネルギー密度の半分以上を1GeV以下の宇宙線が担っていることが明らかになったが(Cummings et al.+16)、遠方の低エネルギー宇宙線を直接的に測定する手段は今のところ存在しない。

2. 研究の目的

背景に記載した宇宙線研究における問い(1)(2)に答える、即ち銀河系の宇宙線起源を解明するには、1GeV以下の低エネルギー宇宙線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を捉えればよい(図1)。脱励起ガンマ線は数100keVから10MeV程度まで存在するが、2MeV以下では宇宙の元素合成に起因する核ガンマ線等が混入するため分離が難しい。よって本研究では、1GeV以下の低エネルギー宇宙線の探査が可能な2-10MeVの脱励起ガンマ線に特化した高感度ガンマ線カメラの基礎開発を行い、その有効性を実験的に検証することを目的とする。カメラは研究代表者がこれまでのガンマ線検出器の開発経験を生かして考案し、基礎開発を進めているシンチレーションファイバーを用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラである。

3. 研究の方法

本研究では、2-10MeVの脱励起ガンマ線に特化した低エネルギー宇宙線探査用ガンマ線カメラの基礎開発を行い、その有効性を実験的に検証することを目的とした。具体的には、(1)シンチレーションファイバーを用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発 (2)既存の小型プロトタイプカメラによる測定と解析手法の開発、となる。以下に詳述する。

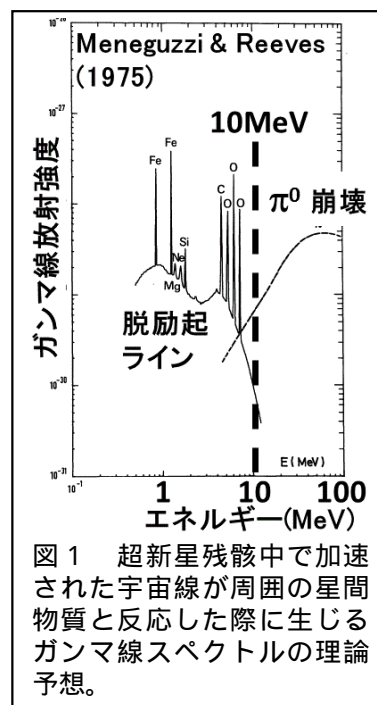


図1 超新星残骸中で加速された宇宙線が周囲の星間物質と反応した際に生じるガンマ線スペクトルの理論予想。

(1) シンチレーションファイバーを用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発

2-10MeV のガンマ線を検出するには、このエネルギー領域で主要な反応過程であるコンプトン散乱を利用するのがよい。2MeV 以上で最大感度を誇る観測は、1990年代の衛星 CGRO に搭載された入射ガンマ線のコンプトン散乱を利用するコンプトンカメラである COMPTEL であるが、フラックスの上限値を与えるにとどまっている。期待されるガンマ線強度から評価すると、COMPTEL 程度の有効面積で十分な統計数が検出可能なはずである (例えば Summa et al. 2011) が、COMPTEL は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向上し、かつ角度分解能を上げるための有力な方法がコンプトン散乱の反跳電子の飛跡を検出する電子飛跡検出型コンプトンカメラである。図 2 (左) は従来型コンプトンカメラによる放射線源の探索方法である。散乱体、吸収体で測定したエネルギーから運動学によりガンマ線到来方向を決定する。この方法では 1 個のガンマ線事象に対し、ガンマ線到来方向をコーン状にしか限定できないため (図 3 左) 他の線源からのコーンが混入することによりバックグラウンドが増す。これは、微弱な線源の検出では致命的になる。対処法として、散乱体に位置分解能の高い検出器を使い、散乱された反跳電子の方向を捉えることにより、ガンマ線の到来方向をイベント毎に一意に決定すればよい (電子飛跡検出型コンプトンカメラ; 図 2 (右) および図 3 (右))。

研究代表者は 2MeV 以上のガンマ線に、シンチレーションファイバーを用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ (図 2 (右)) を考案した。ガンマ線のエネルギーが数 MeV 以上であればファイバーでもコンプトン散乱の際に生ずる反跳電子の方向を捉えることができる。測定システム概要は図 4 である。以下にシステムについて詳述する。

散乱体のシンチレーションファイバー束

多数のファイバーで 1 枚のファイバープレートを作成し、1 層毎に 90 度回転させて X、Y 方向に重ねることで、2 次元的位置を得る。脱励起ガンマ線として最も強度が期待される 4.4MeV のガンマ線に対する反跳電子の飛程は、散乱角が 15 度で約 5mm である。ファイバーの直径が微細であるほど低角度の散乱まで飛跡検出が可能だが、読み出しチャンネルやコストが増大し製作が難しくなるので、本研究では 1mm のファイバーを用いた。形状としては円形断面と方形断面があるが、光収集効率が高い方形断面を採用した。1mm の精度があれば、実験室レベルで用いることが可能な低エネルギーガンマ線 (1.3MeV など) でも比較的大きな散乱角の事象を選別することにより方向の検出が可能である。サイズは、実験室で使用可能な放射線源で複数回散乱事象も検証可能な検出効率を持つ 32mm × 32mm × 64mm とした。複数回コンプトン散乱したガンマ線事象を再構成する手法を確立できれば、検出効率の向上が見込める。ただし、今回の研究では配分予算の関係で下半分のみを製作し、後に拡張可能な設計とした。

光検出器と読み出しシステム

ファイバーの径が 1mm の場合、32 × 64 = 2048 本のファイバーの読み出しを実現する必要があり、さらにこれらのファイバーからの微弱な光を読み出すには信号増幅機能が必要となる。これらを両立させるために、イメージンシファイアと高速読み出しの CMOS カメラを組み合わせたシステムを構築する。ただし、利用可能なイメージンシファイアの有効径は 17mm でファイバー検出器より小さいので、ファイバーオプティクスプレートを用いてファイバーからの光を誘導する。ファイバー検出器の他端には光電子増倍管を接合して CMOS カメラへのトリガー信号を生成する。

(2) 既存の小型プロトタイプカメラによる測定と解析手法の開発

平成 30 年度に X、Y に交差する 1mm 角 のファイバー 8 × 8 本で構成された小型の試作 1 号機を制作した。光信号の読み出しは高い増幅率を持つ 64 チャンネル MPPC を用いた。この検出器

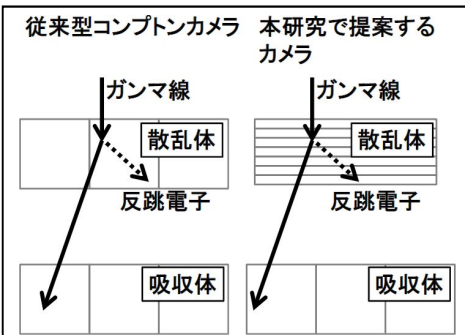


図 2 従来型カメラ (左) と本研究で提案するカメラ (右) の原理。

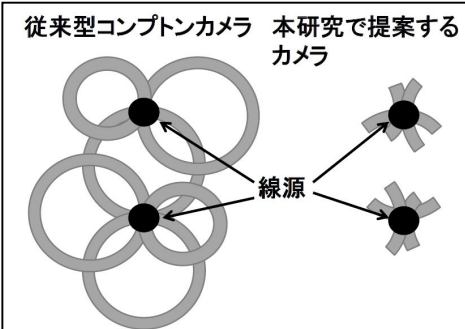


図 3 従来型のコンプトンカメラ (左) と電子飛跡検出型カメラ (右) の画像再構成の違い。

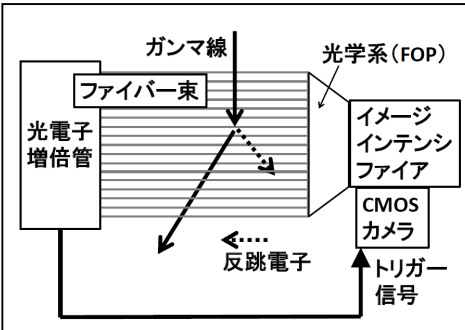


図 4 本研究で提案するカメラの概要。ガンマ線が散乱した際に放出される反跳電子がシンチレーションファイバーと反応して放射される光をファイバーの片方に接合したイメージンシファイアで撮像する。FOP は Fiber Optics Plate。

は、サイズが小さいため、検証可能な散乱角が限定され、さらに複数回散乱事象の検証はできない。その反面、ファイバーは64本のみであり信号読み出しチャンネル数が少なくてもよい、散乱体の読み出しシステムとしては確立している。そこでまず、吸収体となる検出器を組み合わせることによって、コンプトンカメラを製作する。吸収体は光減衰時間が短くコンプトンカメラの散乱体・吸収体の同期をとるのに優れ、さらに発光量が大きく良好なエネルギー分解能が期待できる GAGG(Ce)シンチレーターを用いる。GAGG の中でも減衰時間が 50ns と短いものを採用する。この検出器を用いて宇宙線ミュオン事象の実測を行い、Geant4 ツールによるシミュレーションと比較することによって飛跡再構成などの解析手法の開発を行い、本研究で製作する大型カメラのデータ解析手法の基礎を築く。

4. 研究成果

(1) シンチレーションファイバーを用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発

まず用いるシンチレーションファイバーを詳細に検討した。ファイバーは1mm角で、イメージンシファイアの GaAsP 光電面の波長応答と合う緑色の光を発光するサンゴパンの BCF-20 を選定した。さらにファイバーの反射面はマルチクラッドという2層の構造を持ち光収率が高いものを選んだ。検出器サイズに関しては、予算の制限があるため東大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なサイズかどうか評価しつつ詳細設計を行い、最終的に 3.2cm × 3.2cm × 3.2cm の大型のプロトタイプ2号機を製作した。このシミュレーション評価時に考案した解析手法を特許申請した。

また、マルチアノード光電子増倍管(MAPMT)で生成した信号の読み出しに用いる EASIROC 信号読み出しモジュール用の信号反転基板を開発した。EASIROC の ASIC チップ は正の信号入力にのみ応答するため、MAPMT の負の信号を読み出すには極性反転が必要である。ロスや歪みが少ないチップトランスを選定し、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。

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像を撮像するための CMOS カメラの性能評価(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)を行い、さらにイメージンシファイアの簡易動作試験を行った。

(2) 既存の小型プロトタイプカメラによる測定と解析手法の開発

まず、吸収体となる 1cm 角の GAGG(Ce)シンチレーターを3個購入し、散乱体の信号読み出し回路を用いて ^{137}Cs からの 662keV ガンマ線のエネルギースペクトルの測定を行った。エネルギー較正を行い、エネルギー分解能を導出するオフライン解析プログラムを作成した。

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。宇宙線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(図6)。また、宇宙線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7)。

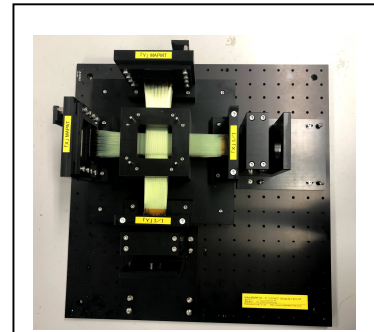


図5 制作したファイバーカメラ。

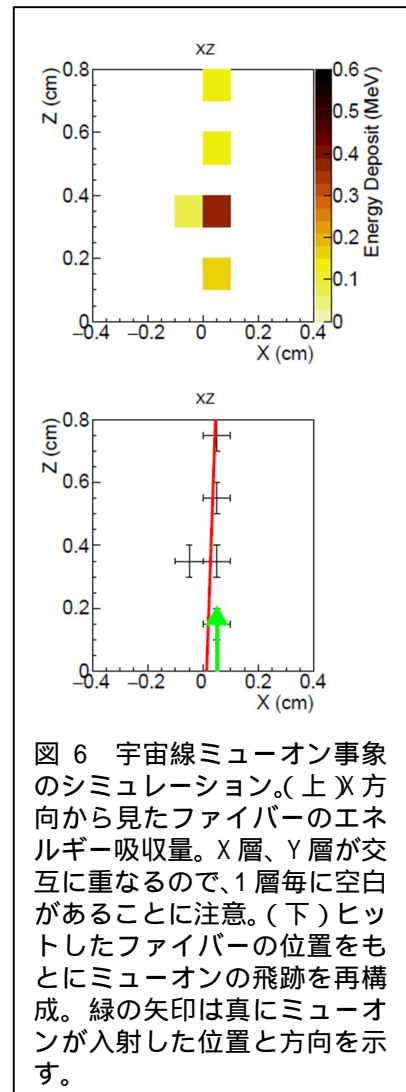


図6 宇宙線ミュオン事象のシミュレーション。(上) X 方向から見たファイバーのエネルギー吸収量。X 層、Y 層が交互に重なるので、1層毎に空白があることに注意。(下) ヒットしたファイバーの位置をもとにミュオンの飛跡を再構成。緑の矢印は真にミュオンが入射した位置と方向を示す。

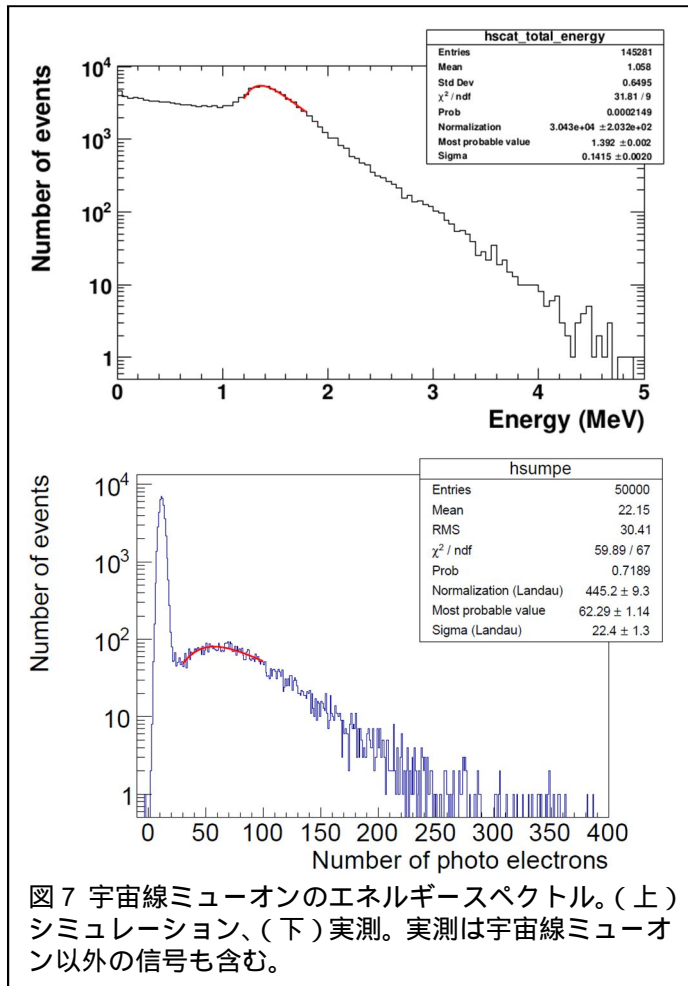


図7 宇宙線ミュオンのエネルギースペクトル。(上)シミュレーション、(下)実測。実測は宇宙線ミュオン以外の信号も含む。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ガンマ線測定システム、ガンマ線測定方法、及びガンマ線測定プログラム	発明者 片桐 秀明	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2021-60320	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	村石 浩 (Muraishi Hiroshi) (00365181)	北里大学・医療衛生学部・准教授 (32607)	
研究分担者	加賀谷 美佳 (Kagaya Mika) (10783467)	仙台高等専門学校・総合工学科・助教 (51303)	
研究分担者	榎本 良治 (Enomoto Ryoji) (80183755)	東京大学・宇宙線研究所・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------