

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月18日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14264

研究課題名(和文)3次元半導体検出器を用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラによる暗黒物質の探査

研究課題名(英文) Study of dark matter using an advanced Compton camera with 3D-semiconductor detector

研究代表者

加賀谷 美佳 (Kagaya, Mika)

仙台高等専門学校・総合工学科・助教

研究者番号：10783467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、シリコン半導体ピクセル検出器を用いて、電子飛跡を検出するコンプトンカメラの開発を行った。511 keV ガンマ線がコンプトン散乱する時にはじき出される反跳電子の飛跡を検出するためにプロトタイプ検出器を開発し、原理実証として測定試験を行った。プロトタイプ開発においては、散乱部の半導体検出器と吸収部のシンチレーションカウンターの同期システムの開発に成功し、コンプトン散乱と光電吸収の同計数事象を捉え、電子飛跡を検出することに成功した。また、シミュレーションで実測の試験を再現し、シミュレーションで得られた結果とプロトタイプ検出器で得た実測のデータが一致していることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

511keV を含むsub-MeVガンマ線の観測は、宇宙物理の課題を解決するために重要なエネルギー帯であるが、バックグラウンドガンマ線の多さの問題から、観測技術の開発が遅れている。本研究では、ピクセル半導体検出器を用いたコンプトンカメラによって511keVガンマ線による反跳電子の飛跡の検出に成功した。検出部に半導体検出器を採用することで、エネルギー分解能に優れ、ガス検出器などに比べてバックグラウンドを低減できる可能性がある。これにより、sub-MeV領域のラインガンマ線観測に最適な宇宙観測用検出器の開発の見通しをたてることができた。

研究成果の概要(英文)：We developed an advanced Compton camera using silicon pixel semiconductor. The prototype Compton camera detects recoiled electron tracks which are released by Compton scattering of 511-keV gamma rays. We carried out tests for evaluation of detection capability of recoil electron tracks using this prototype. The prototype Compton camera consists of a scatterer (XRPIX2b) and an absorber (CsI (TI) scintillator). We succeeded to develop a coincidence system between 2 readout boards. Then, we could detect recoiled electron tracks. Moreover, we simulated the measurement test using Geant4 simulator, and the images of recoiled electron tracks and recoil direction obtained by measurement tests are consistent with the result of the simulation.

研究分野：数物系科学

キーワード：電子飛跡型コンプトンカメラ SOIピクセル半導体検出器 MeVガンマ線天文学

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

暗黒物質探査は宇宙物理学にとって最も重要な課題の1つである。自己重力により暗黒物質が集中している場所では、暗黒物質は対消滅を起こして陽電子を生成すると考えられており、これらの陽電子は電子との対消滅によって 511 keV のガンマ線を放出するため、これを観測することで間接的に暗黒物質の空間分布を探査できる。

2. 研究の目的

本研究では、最新の3次元シリコン半導体検出器を用いた 511 keV に特化した電子飛跡検出型コンプトンカメラを開発し、気球実験によって暗黒物質由来の 511 keV ガンマ線のマップを作成して暗黒物質探査を行うことを大目的とする。その中で、本研究期間では、基礎開発として3次元半導体検出器を用いた小型プロトタイプを開発し、電子飛跡検出の原理実証試験を行う。

3. 研究の方法

(1) 散乱部に用いるシリコン半導体検出器の性能評価

コンプトンカメラは、散乱部と吸収部で構成されるが、まず検出部の基本的な特性として、ノイズレベルやエネルギー分解能を評価する。本研究では京都大学で開発された X 線・ガンマ線検出用のピクセル半導体検出器 (XRPIX2b) をもちいる。データの読み出しには、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で開発された読み出しボード (SEABAS ボード) を採用する。

(2) 小型プロトタイプの開発

散乱部に XRPIX2b, 吸収部に 1cm 角のヨウ化セシウム結晶シンチレータと光電子増倍管を接続したシンチレーションカウンターを用いて、小型プロトタイプを作成する。同時計数イベントを取得するためには、2つの検出器の同期が必要となるため、2つの読み出しボードの測定プログラムを改良し、同期システムを開発する。

(3) 測定試験およびシミュレーション結果との比較

測定試験では、1MBq の ^{24}Na (511 keV) の密封線源を用いて、散乱体でコンプトン散乱、吸収体で光電吸収を起こしたイベントを取得し、そのときの散乱体での反跳電子の飛跡を確認する。測定データを解析するためのオフライン解析プログラムを開発する。また、実測の実験セットアップを Geant4 シミュレータで再現し、シミュレーションによって得られる飛跡および反跳方向を算出し、実測と比較する。

4. 研究成果

(1) 散乱部に用いるシリコン半導体検出器の性能評価

コンプトンカメラの散乱部に用いるシリコン半導体検出器 (XRPIX2b) の基礎特性の性能評価として、まずエネルギー分解能の測定を行った。図1に示すように、素子を載せたサブボードと読み出しの SEABAS ボードを接続し、恒温槽内 (-60°C) において、半導体素子に 130V の高電圧を印加し、 ^{241}Am の X 線を測定して評価を行った。その結果、エネルギー分解能 (σ_E) は 13.9 keV のエネルギーにおいて 0.8 keV, 17.7 keV のエネルギーにおいて 1.1 keV, 20.7 keV のエネルギーにおいて 1.6 keV であった(図2)。次に、素子に印加する電圧を変えて、素子内の空乏層が完全空乏化する印加電圧を調査した。その結果、約 50V で完全空乏化することを確認した(図3)。素子の厚みから計算した理論値は約 47V で一致している。

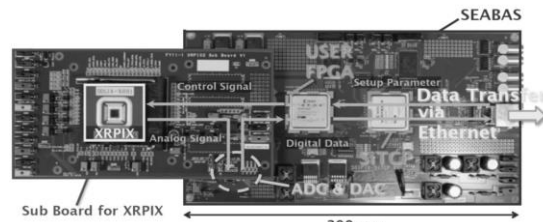


図1: XRPIX2b を設置したサブボードと読み出しボードを接続した測定システム (SOIPIX プロジェクト資料から引用)。

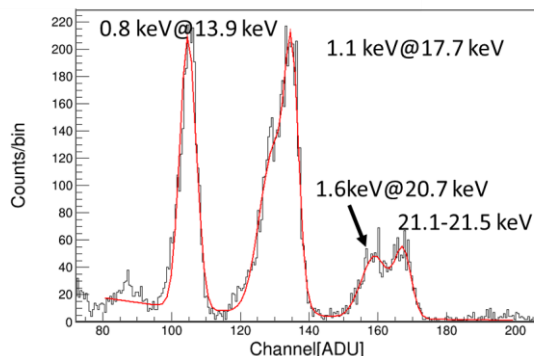


図2 ^{241}Am を測定した際のエネルギースペクトル

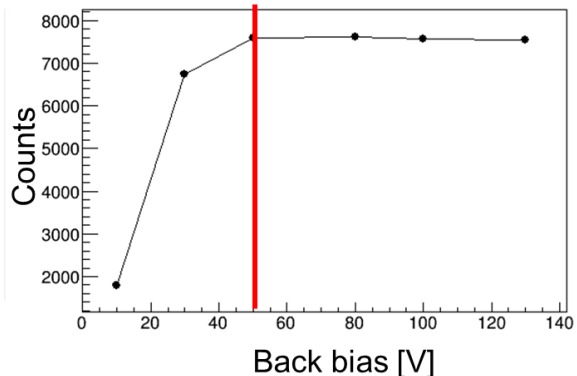


図3 印加電圧と X 線のイベント数

(2) 小型プロトタイプの開発と測定試験およびシミュレーション結果との比較

コンプトンカメラは一般に散乱部と吸収部の2つの検出部から構成される。図4にプロトタイプを示す。散乱部に XRPIX2b、吸収部には CsI (Tl) 結晶シンチレータを採用した。散乱部と吸収部は別々の読み出しボードを使用するため、2つのボードを同期する必要がある。それぞれのボードにはFPGAが搭載されているため、ユーザが目的に合わせて自由にロジックを変更することができる。散乱部でコンプトン散乱、吸収部で光电吸収を同時に起こしたイベントを取得するために、タイミングの同期およびアクシデンタルイベントを除外するためのトリガシステムを開発した(図5)。

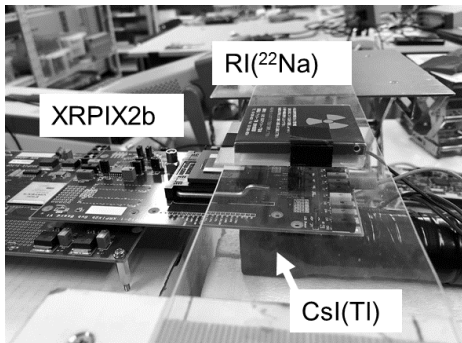


図4 小型プロトタイプ検出器

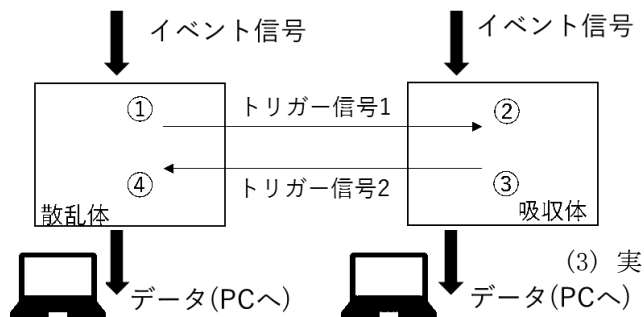


図5 同期システムの概要

(3) 測定試験およびGeant4を用いたシミュレーション結果との比較

今回の測定試験では、ガンマ線の散乱方向が90度となるように検出器と線源を配置し、長い電子飛跡が得られる条件で測定を行った(511 keVのガンマ線が90度散乱した場合に予想される電子飛跡の飛程は約300μm程度)。図6に測定試験でのセットアップを示す。オフライン解析プログラムでは、反応したピクセルの数やエネルギーによる選別などによって偶発事象を除き、反応したピクセルのデータを用いて電子の飛び出した方向を推定するプログラムを開発した。また、シミュレータ(Geant4)を用いて、シミュレーションと実証試験の結果を比較した。図7に実測とシミュレーションで得た電子飛跡のイメージと、飛跡から推測した電子の反跳方向を示す。その結果、電子飛跡のイメージおよび電子の反跳方向が実測とシミュレーションと一致していることを確認できた。このことから、今回開発したプロトタイプ検出器によって、511 keVガンマ線がコンプトン散乱を起こした際の電子飛跡の検出に成功し、基本的な原理実証試験を達成できた。今後、ガンマ線の入射角度や散乱角を変えた場合の測定を実施する。

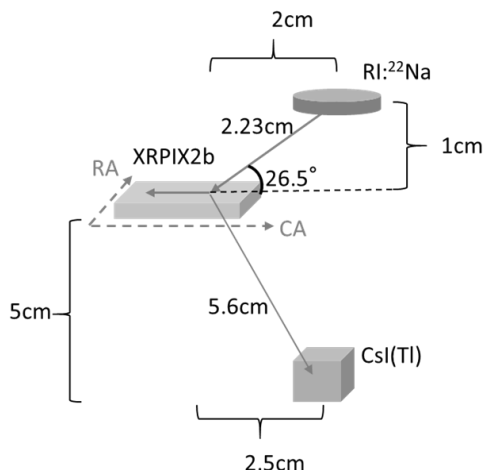


図6 測定セットアップ

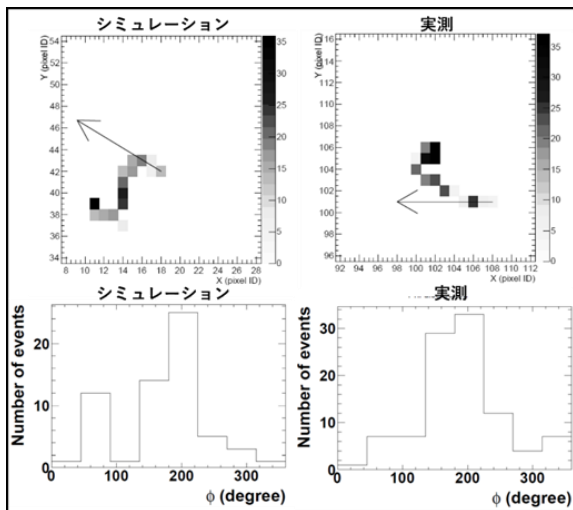


図7 シミュレーションと実測で得た電子飛跡のイメージと反跳方向の分布

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計2件)

- ① M. Kagaya, H. Katagiri, N. Tojo, et al., “Evaluation of the detection capability of the recoil-electron tracks of 511-keV gamma rays with an advanced Compton camera using an SOI-pixel sensor”, IEEE NSS-MIC 2018 (Sydney, Australia), Nov. 2019

② 加藤凌, 片桐秀明, 加賀谷美佳, 他, 「SOI ピクセルセンサーを用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラの反跳電子飛跡検出の性能評価」、日本物理学会 2019 年春季大会 (九州大学) 2019 年 3 月

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：片桐 秀明

ローマ字氏名：(KATAGIRI, hideaki)

研究協力者氏名：鶴 剛

ローマ字氏名：(TSURU, takeshi)

研究協力者氏名：新井 康夫

ローマ字氏名：(ARAI, yasuo)

研究協力者氏名：武田 彩希

ローマ字氏名：(TAKEDA, ayaki)

研究協力者氏名：東城 直美

ローマ字氏名：(TOJO, naomi)

研究協力者氏名：加藤 凌

ローマ字氏名：(KATO, ryo)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。