

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14743

研究課題名（和文）暗黒物質探査に特化した究極の電子飛跡型コンプトンカメラの開発

研究課題名（英文）Development of an ultimate electron-tracking Compton camera to search of dark matter

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） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、sub-MeV～MeVガンマ線の計測に特化した電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発を目的としている。本研究では、京都大学でX線観測用に開発された素子を用いてプロトタイプコンプトンカメラを作成し、電子飛跡検出性能の評価を行った。511 keVのガンマ線を用いた測定試験において、電子が素子表面に沿って反跳した場合には、想定される線源の位置に再構成できていることを確認することができた。しかし、電子が素子の深さ方向に角度をもって反跳した場合、再構成がうまくいかないことが明らかになった。これらの結果から、電子飛跡検出型コンプトンカメラに適した素子の構想を検討し、新たな素子の開発に着手した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で狙っているSub-MeV～MeVのエネルギー領域は、宇宙線と装置との相互作用によって内部で発生するガンマ線などの影響によりバックグラウンドが多いことが問題となっている。これらの問題に対して、コンプトン散乱による反跳電子の飛跡を検出することでバックグラウンドの低減を試みる。この技術を用いた宇宙観測が実現できれば、これまで観測感度が低かったエネルギー領域での高感度観測により、新たな観測結果を得られる可能性がある。また、このガンマ線可視化技術は、福島第一原発事故による放射能汚染地域の環境モニタリングや、核医学施設における核医学診断等など様々な分野で応用することができるという社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop an electron track Compton camera specialized for the measurement of sub-MeV to MeV gamma rays. We developed a prototype Compton camera using an SOI pixel semiconductor detector, which were developed by Kyoto University for X-ray observation. We evaluated the detection performance of recoiled electron tracks. In the measurement tests using 511 keV gamma rays, we succeeded to estimate a gamma-ray source position when the electrons recoil along the surface of the sensor. However, when the electrons recoil at an angle in the direction of the depth of the sensor, the reconstruction did not work well. From these results, we discussed the concept of a suitable sensor for an electron tracking Compton camera, and we have been developing a novel sensor.

研究分野：素粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理に関連する実験

キーワード：Sub-MeVガンマ線 電子飛跡検出型コンプトンカメラ SOIピクセル半導体検出器

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。暗黒物質は自己重力によって密集する場所が存在し、そこでは暗黒物質が対消滅を起こして陽電子を生成すると考えられている。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。銀河中心の方向は INTEGRAL 衛星の SPI 検出器によってこれまでよく観測されているが、511 keV のガンマ線が天体由来なのか暗黒物質由来の成分を含む他の成分であるかは解明されていない。

511 keV を含む sub-MeV ガンマ線観測にはコンプトンカメラが適している。コンプトンカメラは散乱部と吸収部の2層で構築され、散乱部でコンプトン散乱を起こし、ほぼ同時に吸収部で光電吸収したガンマ線のエネルギーと反応位置から、コンプトン散乱運動学によりガンマ線の到来方向を円環で推定する(図1左)。さらに複数の円環を重ね合わせることで、線源の位置を特定できる。しかし、従来型のコンプトンカメラでは、円環の重ね合わせによって、線源ではない部分も重なり、虚像が発生するという問題点がある。これを解決する手法として電子飛跡コンプトンカメラがあり、コンプトン散乱によって発生した反跳電子の飛跡をとらえることでガンマ線の到来方向を円弧で推定できるため、バックグラウンドとなる円環の重なりを減らすことができる(図1右)。さらに、検出部に半導体検出器を用いれば、優れたエネルギー分解能により、ラインガンマ線検出に最適な検出器となる。しかし、これまでの半導体技術では 10 μm 程度の微細な検出器がなく、半導体で電子飛跡を捕らえることは困難であった(511 keV のガンマ線がシリコン中でコンプトン散乱した時の反跳電子の飛程は、散乱角が 30 度の場合約 40 μm 程度)。そこで本研究では、Silicon On Insulator (SOI) ピクセル 3次元半導体検出器に着目した。この検出器は、SOI 積層ウエハ技術を用いて、センサーと読み出し回路を一体化させたシリコン半導体検出器で、10 μm 程度の微細なピッチを実現しており、これを用いることで 511 keV のガンマ線の反跳電子の飛跡を検出できると着想した。

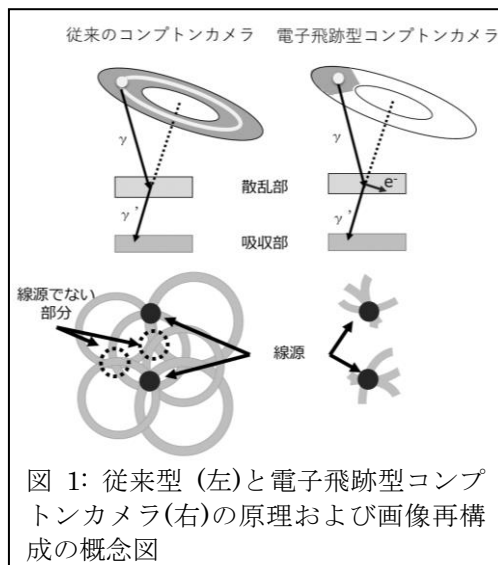


図 1: 従来型(左)と電子飛跡型コンプトンカメラ(右)の原理および画像再構成の概念図

2. 研究の目的

本研究では、暗黒物質探査に焦点を絞り、511 keV ラインガンマ線観測に特化した電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発を行う。プロトタイプとして散乱層には、既存の SOI ピクセル半導体検出器を搭載し、コンプトン散乱で弾き飛ばされた反跳電子の検出性能およびコンプトンカメラの性能を評価する。これらの結果をもとに、sub-MeV ガンマ線観測に特化した SOI ピクセル半導体検出器の設計を行う。また、宇宙観測に用いる際には吸収部も半導体検出器を利用することを検討しており、CdTe 半導体検出器を用いた吸収層の検出部の開発も行う。

3. 研究の方法

本研究では、プロトタイプとして散乱部に SOI ピクセル半導体検出器、吸収部に CsI (Tl) 結晶シンチレータを用いたコンプトンカメラを開発した(図2)。散乱層には X 線観測用に京都大学で開発された XRPIX2b を用いた。XRPIX2b は 30 μm×30 μm の微細なピクセルを持ち、ピクセルに閾値を超えた信号が入るとトリガー信号が出力され、ガンマ線の入射ごとにデータを取得できる。XRPIX2b はサブボードに搭載して読み出し用のフラッシュ ADC ボード(SEABAS ボード)に接続した。吸収体には、3.5 cm 角の CsI (Tl) 結晶シンチレータを用いた。今回のプロトタイプ検出器では、コンプトン事象を効率よく測定するための感度を優先して結晶シンチレータを採用した。結晶シンチレータは光電子増倍管に接続して検出カウンタを作成し、プリンプ、読み出し用のフラッシュ ADC ボード(ADC-SiTCPV2 ボード)に接続した。コンプトンカメラは、散乱部と吸収部で同時に検出された信号を取得する必要があるため、2つの読み出しボードを接続して、FPGA のファームウェアを改良して時間同期システムを構築した。

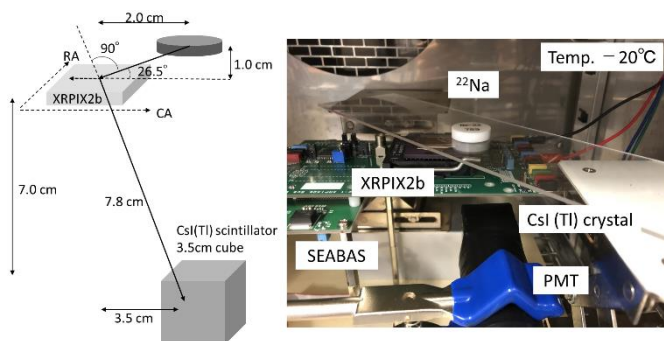


図 2: プロトタイプコンプトンカメラ

電子飛跡検出性能の評価にはプロトタイプコンプトンカメラを用いた実測と、Geant4 シミュレーションを用いて比較を行った。線源には 511 keV を放出する ^{22}Na を使用した。ガンマ線を様々な方向から入射させ、散乱角の依存性などを調査した。

図 3 は実測およびシミュレーションで得られた電子飛跡のイメージである。本研究で使用した素子は、エネルギー閾値を超えた信号がピクセルに入射した際にトリガー信号を出力することが可能なため、閾値を超えた信号が検出された際に、全ピクセルを調査し、信号が検出されたピクセルが複数連なって飛跡を構成しているような領域を探した。また、イベントの選別として、エネルギーの制約を設け、電子の反跳角 α (反跳電子と散乱ガンマ線の方のなす角) を幾何学的に求めた値、コンプトン運動学で求めた場合の差が小さいイベントを選び、データを選別した。最終的に残ったイベントの電子飛跡のイメージから、電子の反跳方向を推定した。初めに、最も大きなエネルギーが検出されたピクセルをブラックピークであると決め、そこから最も距離が遠いピクセルを反応点と推定した (図 4 の(a))。そして反応点の周辺 8 ピクセルで検出されたエネルギーの大きさの重みづけをして反跳方向を推定した (図 4 の(b))。推定した反跳方向と、各検出部で得たエネルギーおよび反応点、ガンマ線の散乱方向の情報からコンプトン運動学でガンマ線の入射方向を計算した。

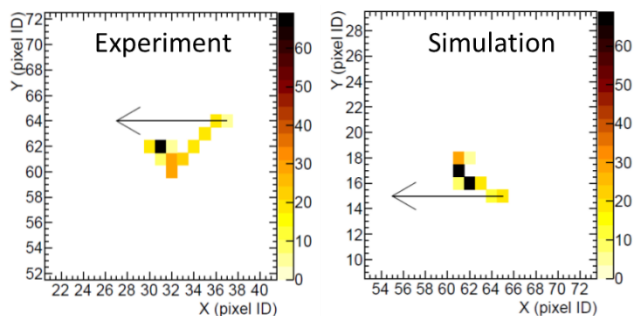


図 3: 電子飛跡のイメージ。矢印は推定した反跳方向を示している。

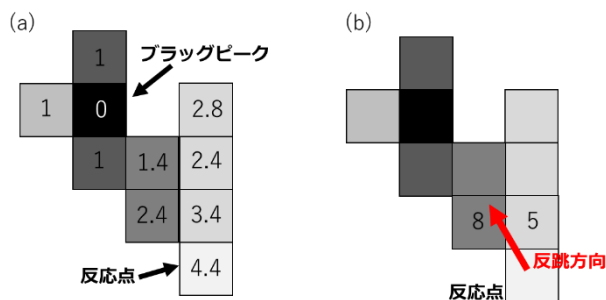


図 4: 電子の反跳方向の推定方法の概略図

4. 研究成果

作製したプロトタイプコンプトンカメラを用いて、511 keV ガンマ線による反跳電子の検出性能について評価した。

まず初めに散乱角 θ を変えながら測定を行い、電子飛跡のイメージを用いて推定した電子の反跳方向の分布を図 5 に示す。この時、電子は素子の表面に沿って電子が反跳することを予想して装置のセットアップを決定した。この結果から、散乱角が 45 度から 90 度までの大角度での散乱の場合は、電子の反跳方向をピークから特定することができるが、散乱角が 30 度の場合、電子の飛程は約 $40 \mu\text{m}$ となるため、飛跡を構成するピクセルが ~ 2 つとなり、反跳方向を正しく推定できなかった。そのため、現在のプロトタイプでは散乱角 45 度 (飛程は約 $100 \mu\text{m}$) が検出限界であることが明らかになった。

次に、電子の反跳方向が検出面上で斜めになる場合の測定を行った。素子のピクセルの形状が格子状であるため、斜めに電子が走った場合に反跳方向を推定できるのかどうかを評価した。この時の素子表面での電子の反跳方向を回転角 ϕ とし、0 度、30 度、45 度、60 度の場合で測定を行った。この評価の結果、どの角度においてもおおむね想定される方向に反跳方向を推定することができた (図 6)。

最後に、電子が素子の深さ方向に反跳した場合の測定を行った。この場合、測定で得られる飛跡のイメージは、深さ方向に進ん

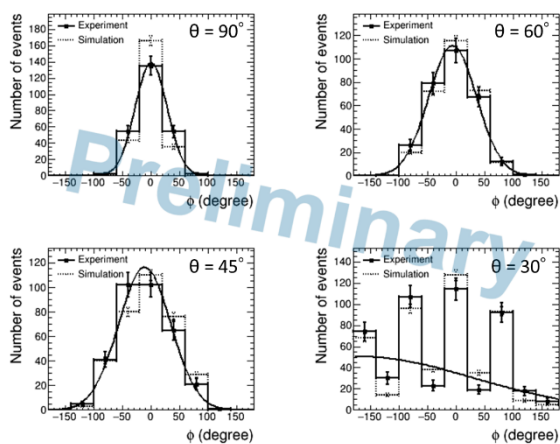


図 5: 散乱角ごとの電子の反跳方向の分布

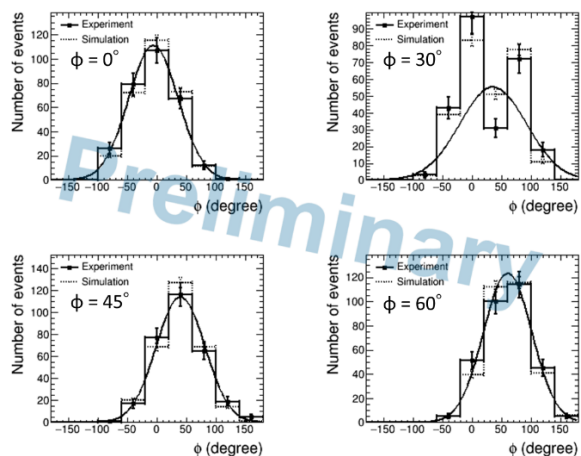


図 6: 回転角ごとの電子の反跳方向の分布

だ電子の飛跡をピクセル面上に投影させたものになるため、傾斜角 ψ が小さくなるほど、投影された飛跡の長さは短くなる。しかし、実測の結果では、投影された飛跡の長さはあまり変化がなかった。これは、反跳した電子が電場の影響をうけてうねりながらシリコン中を進むためであると考えられる。この影響もあり、ピクセルのイメージを用いて推定した電子の反跳方向は誤った方向となっており、反跳角 α の分布が系統的にずれてしまう問題が発生した。そのため、図 7 の $\psi = 60$ 度、 45 度、 30 度の測定結果に関しては、反跳角のイベント選別を行わずに反跳方向を推定した。そのため、ピークが広がってしまい、反跳方向の推定精度が悪くなっていることがわかる。

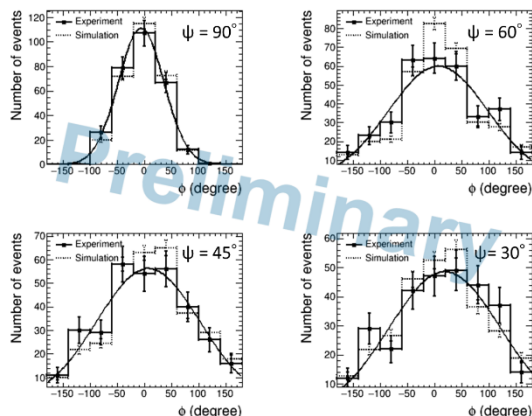


図 7: 傾斜角ごとの電子の反跳方向の分布

また、得られた電子飛跡の反跳方向と、エネルギー、反応点の位置から、コンプトン運動学を使って、ガンマ線の到来方向を逆投影法によって再構成したものを図に示す。この時の実験条件は散乱角 90 度、回転角 0 度、傾斜角 90 度で測定を行った。(a)は測定で得られたデータを従来型のコンプトンカメラの手法で再構成したものである。(b)は電子の反跳方向の情報を使って再構成したもので、(c)は(b)の線源の部分を広げたものである。従来型のコンプトンカメラでは、ガンマ線の到来方向を散乱角 θ の円環で再構成するが、今回は散乱部に 1 つの検出器、吸収体に 1 つの検出器しか設置していないため、古典コンプトンカメラの手法で得た再構成画像は円環状になり、これだけで線源の位置を特定することは困難であった。一方、電子飛跡検出型コンプトンカメラの場合、ガンマ線の到来方向は一意に決まるため、同じセットアップでも、線源の位置を再構成することに成功しており、線源を設置した位置 ($63.5^\circ, 0^\circ$) と同じ位置 ($61.2 \pm 0.4^\circ, -0.5 \pm 0.3^\circ$) にガンマ線源があることを推定することができた。また、様々な位置に線源を設置した場合でもガンマ線の位置を再構成することができたが (図 9)、線源のない位置に虚像が現れていることから、画像再構成の方法についても今後改良していく必要がある。

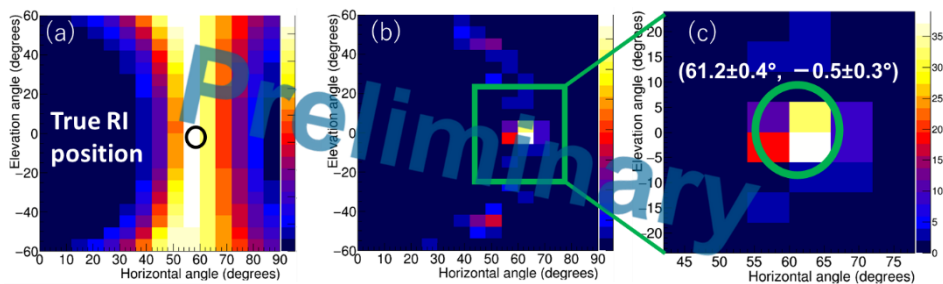


図 8: 逆投影法によるガンマの再構成画像

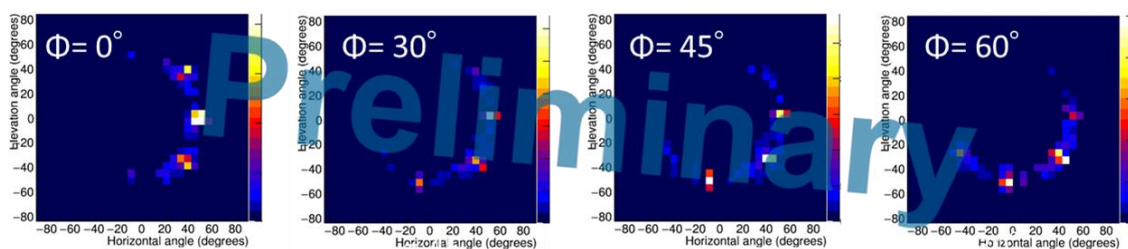


図 9: 様々な位置に線源を設置した場合のガンマの再構成画像

これらの結果から、SOI ピクセル半導体検出器が電子飛跡検出型コンプトンカメラの散乱体として有用であることを確認することができた。また、既存の素子における電子飛跡の検出性能の定量的な評価を行うことができ、本研究で開発したプロトタイプコンプトンカメラでは、傾斜角が小さい場合に電子の反跳方向を推定することが難しいということが明らかになった。今回の評価結果を踏まえ、深さ方向に反跳した電子の反跳方向も捉えることができる、新たな素子の開発に取り組んでいる。高時間分解能を実現することで、固体のシリコン半導体検出器でもタイムプロジェクションチェンバーのような使い方ができるのではないかと考えており、素子の試作を行っている。また、プロトタイプコンプトンカメラでは、実験室で取り扱い可能なレベルの放射能強度の線源で測定を行うために、高感度な結晶シンチレータを吸収層に搭載したが、将来的に、吸収層も半導体検出器にする必要があることから、CdTe 半導体検出器を用いた検出部の開発も行っている。本研究の期間では、先に述べた新しい素子の設計の機会があったため、そちらを優先して開発を行ったが、本研究の予算で測定、評価に必要な部材の購入ができたため、今後も引き続き CdTe 半導体検出器の開発を進めていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 M. Kagaya, H. Katagiri, R. Kato, N. Tojo, A. Takeda, K. Shimazoe, T. G. Tsuru, T. Tanaka, M. Uenomachi, L.Zhang
2. 発表標題 Detection of recoil electron tracks using an S01 pixel sensor for an advanced Compton camera
3. 学会等名 2021 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加賀谷美佳, 片桐秀明, 加藤凌, 東城直美, 武田彩希, 鶴剛, 田中孝明, 島添健次, 上ノ町水紀, Lan Zhang
2. 発表標題 S01PIXを用いた sub-MeV ガンマ線観測用の電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Kato, Hideaki Katagiri, Mika Kagaya, Naomi Tojo, Tomohisa Uchida, Ayaki Takeda Takeshi Tsuru
2. 発表標題 Performance evaluation of recoil electron track detection with an electron tracking Compton camera using an S01 pixel sensor
3. 学会等名 12th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detector (HSTD12) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤凌, 片桐秀明, 加賀谷美佳, 東城直美, 新井康夫, 武田彩希, 鶴剛
2. 発表標題 S01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電子反跳角依存性の評価
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究協力者	片桐 秀明 (Katagiri Hideaki) (50402764)	茨城大学 (12101)	
研究協力者	鶴 剛 (Tsuru Takeshi) (10243007)	京都大学 (14301)	
研究協力者	武田 彩希 (Takeda Ayaki) (40736667)	宮崎大学 (17601)	
研究協力者	新井 康夫 (Arai Yasuo) (90167990)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (82118)	

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
---------	---------