

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：12101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610055

研究課題名(和文) 新手法を用いたラインガンマ線用コンプトンカメラによる宇宙暗黒物質の探索

研究課題名(英文) Search for dark matter with a Compton camera for line gamma rays

研究代表者

片桐 秀明 (Katagiri, Hideaki)

茨城大学・理学部・准教授

研究者番号：50402764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：511keVのラインガンマ線は、暗黒物質の対消滅反応の際に生成される陽電子が電子と対消滅することで放射されるため、暗黒物質の起源に制限をかけることができると考えられる。本研究では、シンチレーター結晶を用いた511keVのガンマ線に特化したコンプトン型の高感度カメラの実現可能性の検証を目的とした。様々なシンチレーター結晶と光検出器によるエネルギー分解能、角度分解能の実測を行い、その結果を用いて検出器シミュレーションによって性能を評価した結果、有効面積や角度分解能としては期待されるものが実現できる可能性は示唆できたが、チャンネル数が膨大になってしまうという課題が残った。

研究成果の概要(英文)：The origin of dark matter can be constrained by observation of 511keV line gamma rays produced by annihilation of positrons generated by dark-matter annihilation. The purpose of this study is to investigate the feasibility of scintillator-based sensitive Compton camera optimized for observation of 511keV gamma rays. The energy resolutions and the angular resolutions were measured by using various candidate scintillators and photon detectors. The detector simulation with the measurements of the scintillators was carried out, indicating large effective area with good angular resolution if a large number of readout channels are available.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ガンマ線 暗黒物質 コンプトンカメラ シンチレータ 陽電子

1. 研究開始当初の背景

暗黒物質の探査は、宇宙物理学の最も重要な課題の1つとして様々な手法を用いて世界中で研究が進められている。探査の手法の1つとして、暗黒物質の対消滅反応で生成する陽電子の空間分布を見る方法がある。陽電子は、電子との対消滅で生じる 511keV のガンマ線ラインによって分布を知ることができる。現在、最も感度の高い測定は、INTEGRAL 衛星 SPI 検出器による結果である (図 1)。

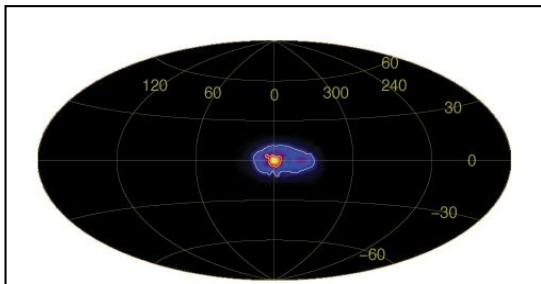


図 1 INTEGRAL 衛星・SPI 検出器による 511keV の分布 (Weidenspointer et al.+08)。銀河座標で、中心が銀河中心、銀河中心を通る水平面が、我々の銀河 (銀河系) となる表示となっている。

銀河中心から右方向に伸びた非対称な形状をしており、低質量 X 線連星 (LMXB) の分布とよく似ているため、LMXB 起源が優勢とされている (e.g. Weidenspointer et al.+08)。しかし、検出感度の問題で現在の検出範囲は銀経 ± 30 度以内に制限されており、様々な暗黒物質説も提唱されている。より確定的な議論をするためには、銀河中心からやや離れた領域にまで測定を広げ、LMXB や銀河中心からの距離に対する物質密度分布と詳細に比較する必要がある。物質密度や、LMXB の数密度を考慮すると、詳細な比較には 511keV に対する感度を SPI 検出器の 2 桁程度向上させる必要がある。研究代表者は、先行研究で福島第一原発に起因する放射能のホットスポットを高感度で可視化する技術を開発した。この技術は、検出感度が高いが角度分解能が悪いと思われていたシンチレーターによるコンプトンカメラに数学的な手法を適用して角度分解能を向上させる手法である。この手法を応用すれば、非常に高い感度で 511keV を探索する可能性が見込まれたため、本研究を開始した。

2. 研究の目的

511keV ラインに対し、SPI 検出器より 2 桁程度感度を向上させれば、銀河中心から離れた領域での観測に十分な感度となる。さらに、個別天体を分離するためには 1 度程度の分解能があるとよい。本研究では、検出効率の高いシンチレーターを用い、検出感度を SPI 検出器の 2 桁感度を向上させ、かつ先行研究の手法を用いて角度分解能を 1 度程度まで向上させた 511keV に特化したガンマ線カメラの実現可能性を探るのが目的である。

3. 研究の方法

サブ MeV ガンマ線を検出するには、そのエネルギー領域での物質との主要な素過程であるコンプトン散乱を利用するとよい。図 2 は 2 層の検出器の例である。1 層目でガンマ線がコンプトン散乱したときの損失エネルギー E_1 と、2 層目で光電吸収したときの吸収エネルギー E_2 を測り、運動学を用いることによって、散乱角 θ を決定することができる。

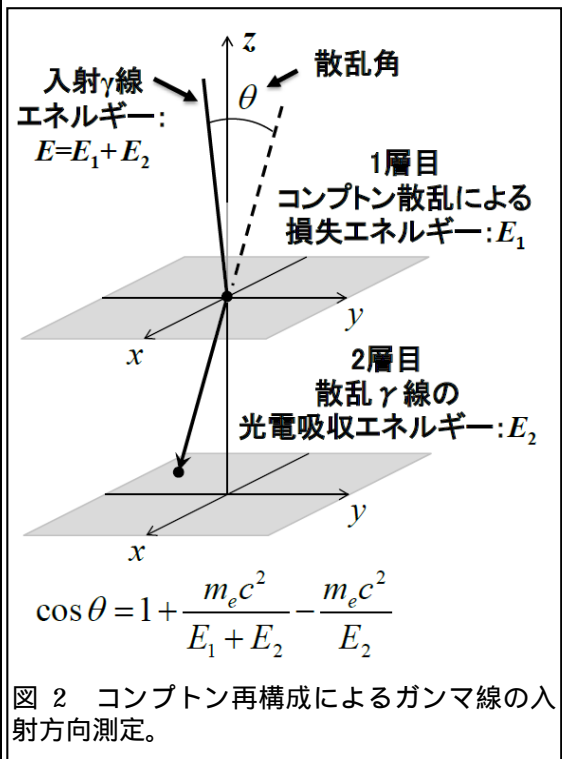


図 2 コンプトン再構成によるガンマ線の入射方向測定。

到来方向は 2 次元であるので、散乱角 θ のみではガンマ線到来方向は決定できないが、複数のガンマ線イベントを取得することによって、一意的に到来方向を決定できる。

上述のコンプトンカメラの原理からも分かるように、高い分解能を実現するには吸収体、散乱体のエネルギー分解能が高い必要がある。従来、シンチレーター結晶はエネルギー分解能が高くないため、サブ MeV 領域で角度分解能の高いコンプトンカメラを作るのは難しいと考えられてきた。そのため、特に宇宙観測では半導体検出器が主流となっている。しかし、上記は連続的なエネルギー分布を持つガンマ線源に対して適用される話であり、ラインガンマ線では少し事情が変わる。1 層目で散乱、2 層目で光電吸収のイベントを選べば、 $E_1 + E_2 = 511\text{keV}$ というエネルギー拘束条件を使うことができる。結晶ではエネルギー E の不定性 ΔE は E_1 の 1/2 乗に比例するため、低エネルギーほど不定性が小さい。

<30 度の散乱に限定すれば、 $E_1 < 100\text{keV}$ なので、 $E_2 = 511\text{keV} - E_1$ と置きかえてやることにより角度分解能が高まる。研究代表者が先行研究で開発したガンマアイは、エネルギー拘束条件をかけることによって、エネルギー分解能が悪い結晶から比較的高い角度分解能を得るといった数学的手法を利用して、ライン

ガンマ線に対して安価に高検出効率を維持しつつ、比較的高い角度分解能を実現することに成功した。本研究では上記のホットスポット測定で開発した手法を宇宙観測に応用し、特に 511keV という宇宙物理学的に重要なラインに特化したカメラの実現可能性を検討する。このようなカメラの実現可能性を評価するには、シンチレーター結晶が持つ特性をシミュレーションに入れて検出感度、角度分解能を評価する必要がある。本研究では次の2つを主に行った。

(1) 様々なシンチレーター結晶と光検出器によるエネルギー分解能、角度分解能の実測

角度分解能が実際にどの程度であるのかを調べるために、NaI(Tl)、CsI(Tl)、GAGG(Ce)、LuAGのような発光量が多い候補となる結晶といくつかの光検出器(光電子増倍管およびMPPC)を組み合わせてエネルギー分解能を実測し、それによって決まる角度分解能を評価した。

(2) GEANT4を用いた検出器シミュレーションによる有効面積および視野の評価

先行研究で環境モニター用に開発した高検出効率でエネルギー分解能の高い無機シンチレーターを用いたコンプトン型ガンマ線カメラ「ガンマイ」のコンセプトのもとに、511keVの銀河面地図を構築することに特化した高感度検出器を設計した。設計した検出器の詳細を以下で説明する。

まず、コンプトンカメラの1層目にはNaI(Tl)結晶を採用した。(1)の結果によりコンプトンカメラで達成される角度分解能が最も良いことが分かり、かつ安価でエネルギー分解能が高いためである。次に、2層目にはBGO結晶を採用した。これは、実効原子番号が大きく(〜74)密度が高いため、ガンマ線吸収効率が高く、有効面積を大きくすることが可能であるためである。結晶(立方体)のサイズとしては、3.81cmとした。この長さは、NaI(Tl)の511keVに対する散乱長となっている。これより厚いと多重散乱や光電吸収により、1回だけコンプトン散乱する確率が実質的に減少する。これより薄くしつつ散乱確率を落とさないためには、大面積にする必要があるが、読み出しチャンネル数の増大につながるため、許容される最大の厚さとした。要開発であるが、チャンネル数・コストを抑えるために、棒状シンチレーターの両端を読み出す方式も検討している。1層目 2層目の間の距離を>21.6cmとした。これは、角度分解能 10度()程度以下を達成するのに必要な層の距離で、離すほど有効面積は減少する。コンプトンカメラを覆うシールドとしては、荷電粒子を反同時計数法で除去するプラスチックシンチレーターと、中性子バックグラウンドを減衰させるためのポリエチレン遮蔽体で構成する。

4. 研究成果

(1) 様々なシンチレーター結晶と光検出器によるエネルギー分解能、角度分解能の実測

散乱角による角度分解能の依存性が実測として得られた(図3)。1インチのNaI(Tl)の光信号をスーパーバイアルカリ光電面を持つ光電子増倍管で読み出すと最も角度分解能が良好であった。511keVのガンマ線に対しては、散乱角を24度以内に限定すれば1度以下()の分解能が期待される。

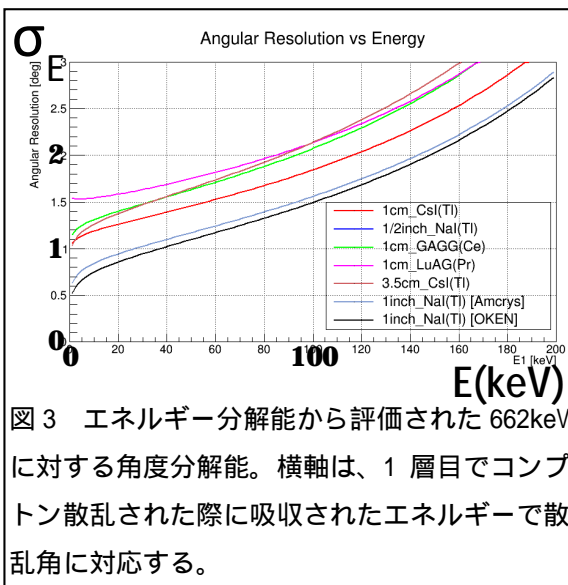


図3 エネルギー分解能から評価された662keVに対する角度分解能。横軸は、1層目でコンプトン散乱された際に吸収されたエネルギーで散乱角に対応する。

(2) GEANT4を用いた検出器シミュレーションによる有効面積および視野の評価

各層を構成する結晶数を2x2=4個、4x4=16個、8x8=64個、16x16=256個と変化させたときの検出器面積と有効面積の関係を図4に示す。検出器面積を大きくすると、コンプトン散乱したガンマ線が吸収体に入射する立体角が大きくなるため、有効面積が幾何面積

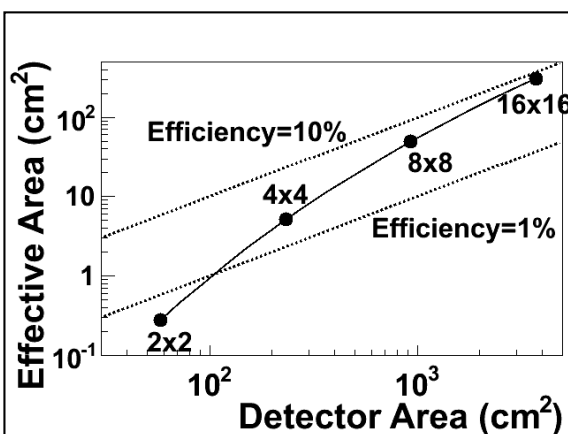


図4 GEANT4シミュレーションによる有効面積の評価。横軸が検出器の面積で縦軸が有効面積。縦軸・横軸は対数表示であることに注意。点線は、検出効率=(有効面積/検出器面積)が一定の場合。

以上に向上する。16×16個の結晶の場合の検出器はサイズが、60cm×60cm×30cm、重さが150kg程度(主要な重量を占める結晶のみ)であり、他のグループで提案されている検出器と同等以下である。この場合の有効面積は、308cm²である。511keVに関しては現在提案されている計画で最大規模であるASTROGAMと比較しても数倍の有効面積が実現できる。角度分解能に関しては10度、視野は約100度(FWHM)を実現できることも分かった。S(有効面積×観測視野)の比較では、INTEGRAL/SPIは視野が16度でS = 4.9cm²sr、本計画では691cm²srと圧倒的に大きい。コンプトンカメラ同士の比較では、視野は同程度なので主に有効面積で感度が決まるため、他のコンプトンカメラと比較してもSは最大である。ただし、このSを維持したまま角度分解能を1度程度まで上げるためには、結晶サイズを10分の1程度まで小さくする必要があり、読み出しチャンネル数が膨大になるため、実現するには課題が残った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

片桐秀明, 内田智久, 榎本良治, 加賀谷美佳, 佐藤亘, 田中真伸, 村石浩, 柳田昭平, 吉田龍生, 若松諒, 渡辺宝「I (ガンマアイ)による電子陽電子対消滅ラインガンマ線の探査」2015年大気球シンポジウム proceedings, isas15-sbs-036 (2015) (査読無)

[学会発表](計2件)

佐藤亘, 片桐秀明, 伊藤良和, 内田智久, 榎本良治, 加賀谷美佳, 佐藤一弘, 武田徹, 田中真伸, 村石浩, 細川正男, 吉田龍生, 若松諒, 渡辺宝, 和田清人, 他オープンソースコンソーシアム(Open-It)「無機シンチレータのエネルギー分解能の測定によるコンプトンカメラの角度分解能の評価」2015年秋季物理学会(大阪市立大学, 2015年9月)

W. Satoh, H. Katagiri, R. Enomoto, R. Hanafusa, M. Hosokawa, Y. Itoh, M. Kagaya, H. Muraishi, K. Satoh, T. Takeda, M. Tanaka, T. Uchida, K. Wada, R. Wakamatsu, T. Watanabe, T. Yoshida, Open-it consortium, "Evaluation of practical limit to angular resolution of a scintillator-based Compton gamma-ray camera by measurements of energy resolutions", Proceedings of International Conference on 15th International Congress of Radiation Research (ICRR2015) (Kyoto) (2015)

6. 研究組織

(1)研究代表者

片桐 秀明 (KATAGIRI, Hideaki)

茨城大学・理学部・准教授

研究者番号：50402764