

γI (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

片桐秀明, 加賀谷美佳, 佐藤亘, 柳田昭平, 吉田龍生, 若松諒 (茨城大学),
 榎本良治 (東京大学宇宙線研究所), 村石浩, 渡辺宝 (北里大学),
 内田智久, 田中真伸 (KEK)

概要

本講演では、511keV 電子陽電子対消滅ラインガンマ線を高感度で探査し銀河面地図を構築する計画を提案する。先行研究で開発した無機シンチレーターを用いたコンプトンカメラによるガンマ線イメージング技術を応用し、特に暗黒物質探査に特化した大有効面積の検出器を GEANT4 を用いて設計した。

1 はじめに

陽電子は、元素合成や宇宙線と星間物質の相互作用、さらには暗黒物質の対消滅などで生成されることが期待されている。陽電子は、電子との対消滅で生じる 511keV のラインガンマ線でトレースできる。よって、511keV の高感度の探査は様々な天体現象を研究する新たなプローブとなり得る。本講演では、特に暗黒物質の探査に特化した超高感度ガンマ線カメラの実現可能性について議論したい。

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、暗黒物質の対消滅で生成が予想される陽電子の空間分布を見る方法がある。現在、最も感度の高い測定は、INTEGRAL 衛星 SPI 検出器による 511keV の観測である [1] (図 1)。図 2 は銀経方向の空間分布であり、低質量 X 線連星 (LMXRB) Ia 型超新星、暗黒物質の起源などが議論されている [2]。しかし、検出感度の問題で空間分布が精度よく測定されているのは銀経 ± 20 度以内に制限されている。より確定的な議論をするためには、銀河系の 511keV の大域的な構造を高感度で探査し、LMXRB 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、LMXRB 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 検出器より少なくとも 1 桁以上向上させる必要があると考えられる。

我々は、先行研究で福島第一原発に起因する放射性セシウム (662 keV) を高感度でイメージング可能なカメラ「 γI (ガンマアイ)」を開発した [3]。具体的には、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カメラである。この手法を応用すれば、かつてない感度で 511 keV を探索する可能性に気づき、511 keV に特化した検出器の基礎開発、設計を行った。その結果、511 keV においては、比較的小規模な検出器でも大規模な将来計画を凌ぐ有効面積を持つ設計があり得ることをシミュレーションによって実証できた (後述)。本講演では、設計した 511 keV の銀河面地図を構築することに特化した超高感度検出器について議論したい。

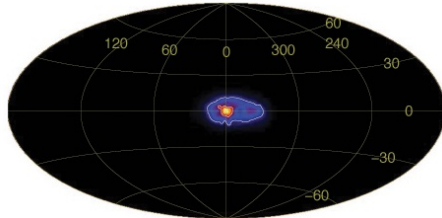


図1 INTEGRAL 衛星・SPI 検出器の5年間の観測による511keVの分布 [1]。銀河座標による表示で、分布の中心が銀河中心。

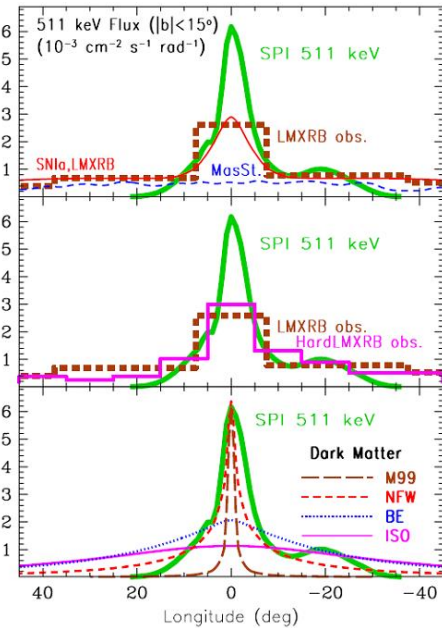


図2 511keVの銀経分布 [2]。中心にピークを持つ緑の太い実線 (SPI 511keV) が観測結果。

2 暗黒物質探査に特化した検出器の設計

2.1 国内・国外の研究動向

現在、最大感度で観測を続けている SPI 検出器と、サブ MeV のエネルギー帯で提案されている将来計画について述べる。将来計画に関しては ASTRO H 以外はまだ計画段階である。

- SPI 検出器 [4] 2002年に打ち上げられた大型の INTEGRAL 衛星 (欧) に搭載されている符号化マスクつきゲルマニウム検出器である。現時点で最大の検出感度を誇る (511 keV の有効面積は 75 cm² 程度)、2016年までは観測されるが、観測データは前述 (図1) の結果の倍程度しか蓄積されないため、前述の観測結果が大きく改善されることはない。
- SDG 検出器 [5] 2016年打ち上げ予定の Astro H 衛星 (日本) に搭載される半導体コンプトンカメラ。600 keV 以下が観測可能であるが、高エネルギー帯での有効面積が大きいため、現実的な天体の観測としては数 100 keV 以下が主要である (511 keV の有効面積は 3 cm² 程度)。
- ASTROGAM [6] 現在、ヨーロッパを中心に提案されている次世代の大型ミッション。60 cm×60 cm の面積で 70 層ものシリコンストリップ検出器を重ねた半導体多重コンプトンカメラである (重量は 300 kg)。511 keV での有効面積は、180 cm² 程度。検出器の規模としては、現在観測中のフェルミ・高エネルギーガンマ線衛星に匹敵する (フェルミ衛星は 700 億円)。
- CAST [7] SDG 検出器の技術を継承・発展させて、小型衛星に搭載 (重量は 200 kg 程度) する計画。ASTROGAM 同様、72 層のシリコンストリップ検出器で 30 cm×30 cm を覆う。511keV 有効面積としては 60cm² 程度を想定している。
- SMILE [8] 京都大学が中心となって進めているガス検出器を用いたアドバンストコンプトンカメラ。

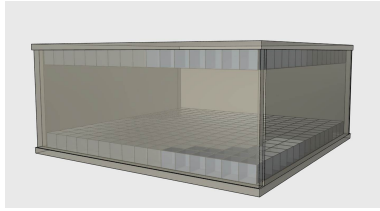


図3 先行研究で設計した検出器。1層目をNaI(Tl)結晶、2層目をBGO結晶で構成する。周囲をプラスチックシンチレーターで覆う。光検出器は光電子増倍管を想定した。

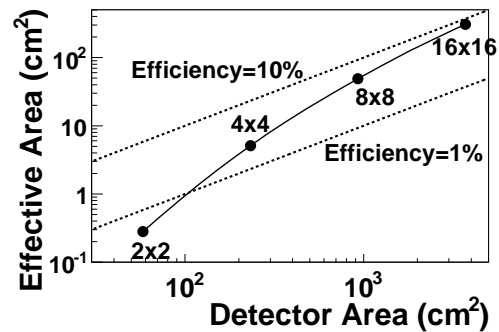


図4 GEANT 4シミュレーションによる有効面積の評価。横軸が検出器の面積で縦軸が有効面積。縦軸・横軸は対数表示であることに注意。点線は、効率 = (有効面積/検出器面積) が一定の場合。

現在、30 cm×30 cm×30 cm のガス検出器で 300 keV に対し、1cm² の有効面積がある。将来的には ~10cm² の検出器を数台搭載した衛星観測を想定している。バックグラウンド除去能力が高いため、有効面積に対する検出感度は高い。ただし、ガスであるが故に散乱体の厚みを十分確保するのが難しいため、同一の吸収体を仮定したときの有効面積が半導体、シンチレーターと比較して低くなる。

本提案での特徴、他の研究との相違点は、(a) 511keV というサイエンスが期待できるラインガンマ線に焦点を絞り、検出器を最適化する (b) シンチレーターの高検出効率を生かして、有効面積を最大化する (本計画では重量 150 kg の 16 × 16 検出器の場合、> 300 cm² の有効面積が実現可能；後述) ということである。本計画では、有効面積の最適化のために、角度分解能を敢えて犠牲にする (典型的に 10° 程度)。他のプロジェクトでは、角度分解能は 10° 以下を目指しており、明るい点源を分解するには有利なので、この点においては相補的である。

2.2 GEANT4 シミュレーションによる 511keV ガンマ線に特化した検出器の設計

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「ガンマアイ」のコンセプトをもとに、511keV の銀河面地図を構築することに特化した超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。図3に概念図を示す。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。先行研究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っており、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、3.81 cm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 >21.6 cmとした。これは、角度分解能 10°(σ)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。上記の条件で、各層を構成する結晶数を $2 \times 2=4$ 個, $4 \times 4=16$ 個, $8 \times 8=64$ 個, $16 \times 16=256$ 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、有効面積が格段に向上する。 16×16 個の結晶の場合の検出器はサイズが、 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 、重さが 150 kg 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、 308 cm^2 である。 511 keV 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° 、視野は約 100° (FWHM) を実現できることも分かった。 $S\Omega$ (有効面積 \times 観測視野) の比較では、INTEGRAL/SPI は視野が 16° で $S\Omega = 4.9 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ 、本計画では $691 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ 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 $S\Omega$ は最大である。

3 まとめ

先行研究で開発した無機シンチレーターを用いたコンプトンカメラによるガンマ線イメージング技術を応用し、特に暗黒物質探査に特化した大有効面積の検出器を GEANT4 を用いて設計した。他の将来計画と同規模以下の検出器を想定した場合でも、有効面積が 300 cm^2 を超える設計が可能であることが示せた。今後、感度計算および設計の最適化のためには、詳細なバックグラウンドの情報が必要である。異なる測定器による既存の測定などがあるが、シミュレーションのみで精度のよいバックグラウンドの再現は不可能なので、簡易検出器で上空バックグラウンドを測定して、感度の導出や検出器の最適化を行い、十分な感度を持った科学観測が可能かどうか検証していきたい。

謝辞

511 keV に特化した検出器の基礎開発・設計は、JSPS 科研費 26610055 の助成を受けたものです。対消滅線の理論的な考察では青山学院大の大平 豊さん、上空バックグラウンドに関しては広島大 PoGO Lite チーム (特に水野 恒史さん) 気球実験の具体的な内容は JAXA の吉田 哲也さん、山形大の郡司 修一さんに貴重な助言を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Weidenspointner, G., Skinner, G., Jean, P., et al. 2008, Nature, 451, 159
- [2] Prantzos, N., Boehm, C., Bykov, A. M., et al. 2011, Reviews of Modern Physics, 83, 1001
- [3] Kagaya, M., Katagiri, H., Enomoto, R., et al. 2015, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 804, 25
- [4] Vedrenne, G., Roques, J.-P., Schönfelder, V., et al. 2003, A&A, 411, L63
- [5] Takahashi, T., Mitsuda, K., Kelley, R., et al. 2014, Proceedings of the SPIE, 9144, 914425
- [6] <http://astrogam.iaps.inaf.it/>
- [7] Nakazawa, K., Takahashi, T., Ichinohe, Y., et al. 2012, Proceedings of the SPIE, 8443, 84430E
- [8] Tanimori, T., Kubo, H., Takada, A., et al. 2015, ApJ, 810, 28