

ETCC のバックグラウンド除去性能の評価

宮本 奨平 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

現在の sub-MeV、MeV ガンマ線領域における天体の観測は他の波長領域に比べて進んでいない。原因として、このエネルギー帯特有の相互作用 (コンプトン散乱) によるイメージングの困難さが挙げられる。それに加えて、宇宙線と検出器筐体との相互作用で生まれるガンマ線や、銀画面や銀河系外からの拡散ガンマ線がバックグラウンドとなり、本来観測したい事象との分離が困難であるといった問題もある。我々のグループは、このような観測的な課題を克服し、優れた感度で全天の観測を行うことを目指し、電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron Tracking Compton Camera:ETCC) の開発を行っている。ETCC はコンプトン散乱によって散乱された電子を検出するためのガス検出器と、散乱ガンマ線を検出するシンチレータを有する。ガス検出器によって、粒子の単位長さあたりのエネルギー損失率を得ることができる。これは粒子識別に利用でき、ガス検出器中で止まった電子のみを選択的に取り出せるため、中性子や荷電粒子、ガス検出器中で止まらなかった電子の事象などによるバックグラウンドを効率的に除去できる。我々は ETCC のバックグラウンド除去性能を実証するために、高雑音環境を作り出すビーム実験を行い、ガンマ線源の測定を行った。その結果、我々の ETCC はバックグラウンドを一桁落とし、ガンマ線源を検出、撮像することに成功した。これによって、ETCC はバックグラウンドを非常に効果的に除去できることが実証された。さらに、ETCC の撮像能力と、今回実証されたバックグラウンド除去性能から MeV ガンマ線の偏光観測への可能性も拓かれた。

1 MeV ガンマ線天文学の課題

MeV ガンマ線天文学においては、高エネルギー現象に起因する数々の天体現象を観測することができる。しかし、現在の MeV ガンマ線天文学においてこれらの観測はあまり進んでいない。

その原因の一つとしてイメージングの困難さが挙げられる。MeV 領域のガンマ線と物質の相互作用はコンプトン散乱が優勢になる。コンプトン散乱したガンマ線は到来方向の情報を持たずイメージングが非常に困難である。さらに、ガンマ線は透過性が高いために集光することも難しい。もう一つの原因として、バックグラウンドの多さがあげられる。検出器外部で散乱したガンマ線や、中性子、陽子などの宇宙線や、高エネルギー粒子が地球大気や検出器と相互作用することによって放射されるガンマ線がバックグラウンド源となる。

COMPTEL (Compton Telescope) は、大量に飛来する宇宙線によって衛星自身がガンマ線や中性子を放射し、これによるバックグラウンドを除去できな

かった。図 1 は、検出した事象をバックグラウンドを考慮してシミュレーションした結果である。横軸は二層ある検出器が反応した時間差である (G. Weidenspointner et al. 2001)。宇宙から来るガンマ線の事象は赤色で塗られた部分で、大部分はバックグラウンドが検出されていることがわかる。このバックグラウンドによって、COMPTEL の検出感度は、実験室の測定で得られる検出感度より 2 桁も悪くなってしまった。MeV ガンマ線天文学においては、これらのバックグラウンドを効率的に落とすことが課題である。

2 ETCC のバックグラウンド除去方法

我々は、ガスを用いたコンプトンカメラ、電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) の開発を行っている (図 2)。この検出器は、ガス検出器とそれを取り囲むシンチレータからなる。ガス中でコンプトン散

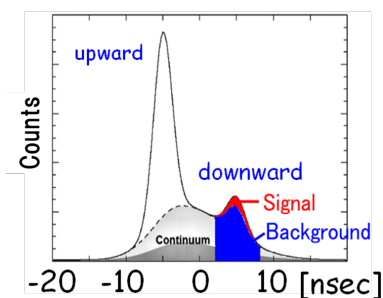


図 1: バックグラウンドを考慮した時の COMPTEL が検出する事象の分布 (G. Weidenspointner et al. 2001)

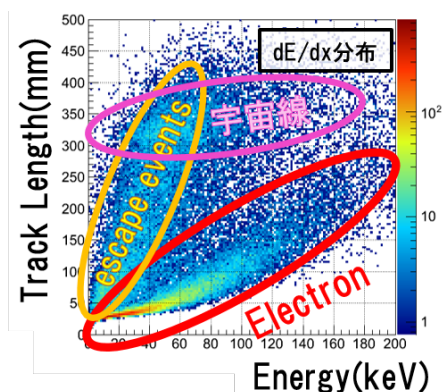


図 3: dE/dx 分布

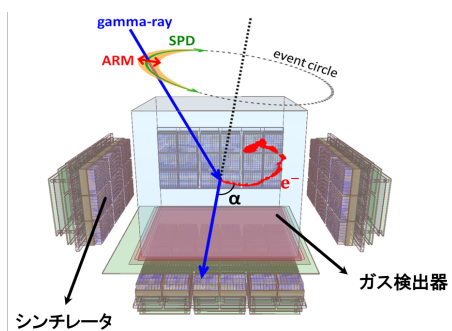


図 2: ETCC のイメージ

乱を起し、散乱電子の飛跡とエネルギーを測定し、散乱ガンマ線の吸収点とエネルギーをシンチレータで測定する。

ETCC はガス中を飛翔する粒子のエネルギーと飛跡を測定するため、単位長さあたりのエネルギー損失率 (dE/dx) を求めることができる。図 3 は測定によって得られた dE/dx 分布である。この図から、ガス中で止まった電子とガス外部へ逃げて行った電子、そして宇宙線粒子による事象とを識別することができる。 dE/dx 分布からガス中で止まった電子の事象を選択的に抜き出すことでバックグラウンドの中から、効率的にコンプトン散乱による事象を選び出すことができる。

3 ETCC のバックグラウンド除去性能の実証

MeV ガンマ線領域ではバックグラウンドの除去が課題の一つである。そこで我々は ETCC のバックグラウンド除去能力が、気球高度または宇宙空間における高雑音環境下でも通用するものであることを実証するために、ビーム実験を行った。

気球高度や宇宙空間で大量に飛来するガンマ線や中性子、陽子などを生成するために、140MeV まで加速した陽子ビームを水に照射した。これによって、中緯度での気球高度 (40km) と同程度のガンマ線、中性子比 (3:1) で、約 5 倍のレートの高雑音環境を生成することに成功した。さらに、0.8 MBq のガンマ線源 ^{137}Cs を ETCC の 70 cm 前方に設置し、ETCC がこのような雑音の中から ^{137}Cs の 662 keV ガンマ線を検出し、その位置を撮像できるか実験を行った。

実験で得られたデータのうち dE/dx 分布から (図 4 上)、ガス検出器中で止まった電子と、ガス検出器から逃げた電子、陽子や中性子などの粒子が識別できていることが分かる。この分布からガス中で止まった電子による事象のみを選び出すことで、バックグラウンドを効率的に落とすことができる (dE/dx カット)。 dE/dx カットをかける前後でスペクトルの違いをプロットしたものが図 4 下である。この図から、 dE/dx カットによってバックグラウンドを 1 桁程度落とせ、662keV のガンマ線を検出できている。バックグラウンドが減った結果、S/N も改善している。

図 5 は、バックグラウンドを dE/dx カットで落と

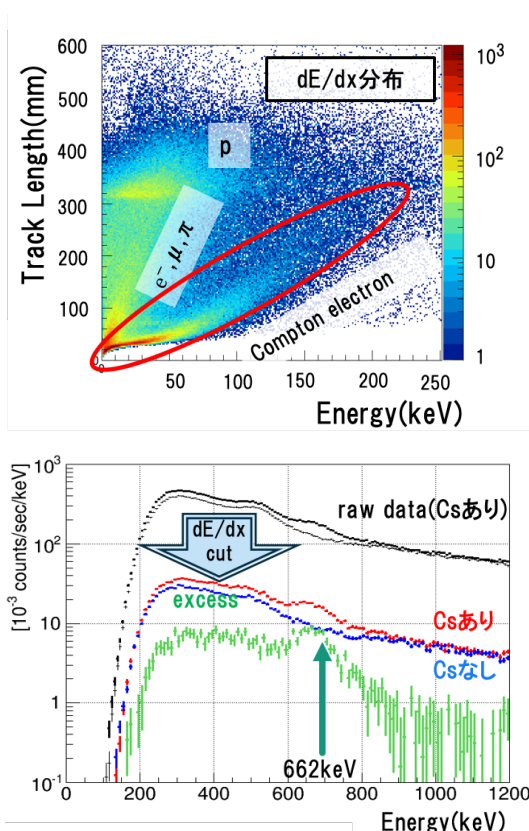


図 4: ビーム実験での dE/dx 分布 (上) とエネルギースペクトル (下)

したデータを用いてイメージングを行った結果である。この図から、ガンマ線源を設置した位置に事象が集中していることが分かる。さらに、線源を置いた位置と、それと $y = 0$ に対称な位置のスペクトルを取り出した図を図 5 右下に示す。線源を置いた位置のスペクトルに 662 keV のピークが現れている。つまり、ETCC は大量のバックグラウンドを取り除き、ガンマ線源を検出し撮像することに成功した。

次に、高雑音環境における ETCC の有効面積を検証した。ETCC の有効面積をプロットしたものが、図 6 である。オレンジの星が今回の実験、紫の丸が実験室での値である。バックグラウンドビーム実験から得られた有効面積は、低雑音環境下の測定で得られる有効面積とほぼ一致した。つまり、ETCC は高雑音環境下でも検出効率を落とさずに測定を行っている。通常のコンプトンカメラの手法では、検出効率を落とさずに天体からのガンマ線をイメージ

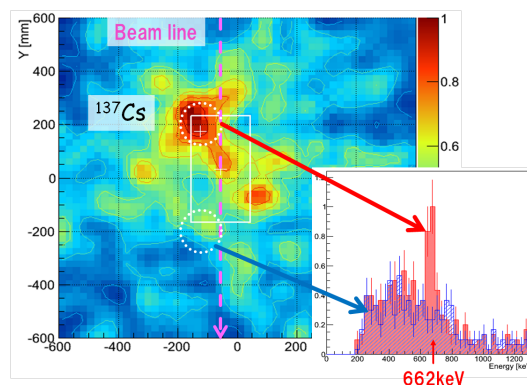


図 5: バックグラウンドを落としイメージングした図

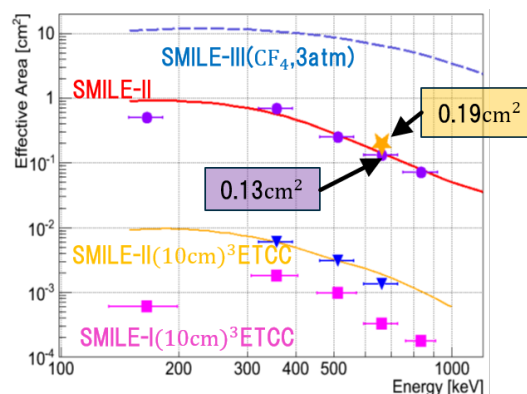


図 6: ETCC の有効面積

グすることが困難である。ETCC の手法はガンマ線の観測に非常に有効である。

データ収集レートと不感時間の関係が図 7 である。気球高度でのデータ収集レートは 100 Hz 以下であると考えられる。このグラフの相関から気球実験での不感時間は 20%程度と予想される。つまり、ETCC は気球実験においても、不感時間がさほど大きくなるらない。

4 ETCC のガンマ線偏光観測への可能性

コンプトン散乱は直線偏光に対して散乱方向に異方向性があるので、散乱角の分布の違いを観測することでガンマ線の偏光観測が原理的には可能である。しかし、偏光を観測するためにはバックグラウンドを

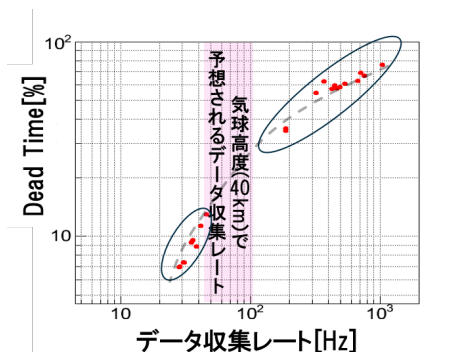


図 7: ETCC のデータ収集レートと不感時間の関係

できるだけ落とし、観測天体からのガンマ線を観測する必要がある。視野から到来するガンマ線をバックグラウンドの偏光も含めて平均化する従来のガンマ線偏光観測器では、暗い天体だといくら時間をかけてもバックグラウンドや近くの明るい天体からのガンマ線によって偏光は観測できない。

バックグラウンドの除去については、今回のビーム実験の結果から ETCC のバックグラウンド除去方法が非常に有効に働くと考えられる。さらに ETCC のイメージング能力によって観測天体以外から届いたガンマ線を取り除くことができる。結果としてバックグラウンドを減らすことにつながるのである。

一方 ETCC はイメージング能力によって観測天体のガンマ線だけを観測することができるので、時間をかけることで S/N を上げることができ、偏光を観測できるのである。

図 8 は ETCC でガンマ線の偏光を観測すると想定した Geant 4 によるシミュレーション結果である。ETCC のモジュレーションファクターは 0.5 前後であり、シミュレーションでは偏光観測器としての性能が十分得られている。ETCC は暗い天体であっても偏光を観測できる。ETCC の偏光観測についての可能性は、シミュレーションと観測で現在調査中である。

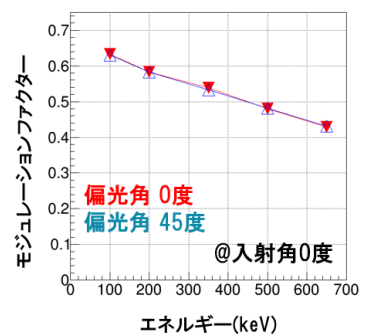


図 8: モジュレーションファクターのシミュレーション結果

5 まとめ

MeV ガンマ線天文学においては、バックグラウンドの除去が非常に大きな課題である。ETCC の持つバックグラウンド除去能力が気球高度または宇宙における雑音環境下でも通用することを実証する必要があった。そこで我々はビーム実験によって高雑音環境を作り出しガンマ線源の検出、撮像が可能かどうか検証する実験を行った。

結果としては、ガンマ線や中性子、陽子などが大量に飛来する高雑音環境下で、ETCC はガンマ線を検出しその位置を撮像することに成功した。さらに、検出効率を下げることなく測定でき、不感時間もたとえ気球高度であったとしてもさほど大きくはならないことが示された。

ETCC のバックグラウンド除去性能とイメージング能力を利用することで、MeV ガンマ線の偏光観測に非常に有効である可能性も生まれてきた。これについては現在測定とシミュレーションで検証中である。

Reference

- G. Weidenspointner et al.(2001) A&A
- P. von Ballmoos et al.(2012) Exp. Astron.