修士論文タイトル:ARTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器におけるコンプトン再構成アル ゴリズムの開発

氏名:一戸悠人 (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 高橋研究室)

要旨:

数10keV から数100MeVの軟ガンマ線とよばれる帯域は、高エネルギー宇宙物理現象、 特に非熱的放射や核ガンマ線の謎を探る上で非常に重要な帯域である。しかし、この帯域 は軌道上バックグラウンドが高いなど、様々な困難のため、周りの帯域に比べて現在まで に到達された感度が低く、「軟ガンマ線の感度ギャップ」と呼ばれている。

2015年打ち上げ予定のASTRO-H衛星(図1)に搭 載される軟ガンマ線検出器(SGD)は、狭視野コン プトンカメラという全く新しいコンセプトの検出 器で困難を克服し、従来の10倍以上の感度を達成 する事を目標とする。コンプトンカメラでは、検 出器内で複数回反応したガンマ線の反応位置とエ ネルギーを用いて、コンプトン散乱の運動学によ りガンマ線の入射方向を制限する(コンプトン再構

成)。この制限と、アクティブシールドの視線方向が矛盾するイベントを

バックグラウンドとして除去する事により、極限まで低 いバックグラウンドと高いS/N比を達成する。

SGDは112枚の半導体イメージャからなる複雑な検出 器であるが、これまでに素子ごとに要求性能を満たす事 は確認されており、現在はエンジニアリングモデル (EM、図2)で試験や検証を行う段階にある。実際に打ち 上げられるフライトモデルの製造に先立ち、EMの段階 でなされなければならないのは、1. 複雑な検出器が実際 にハードウェアとして正しく動作することの実証、2. 現 在の設計で予期した感度を達成できる事の検証、であ る。感度を検証するためには、有効面積と軌道上バック



グラウンドを見積もる必要がある。そのためには最新の設計情報に基づくSGDのシミュ レータと、SGDのコンプトンカメラという複雑な検出器に適用しうるコンプトン再構成ア ルゴリズムの両方が必須であるが、このどちらも現在までに存在していなかった。

本研究では、まずEMを用いた実験を行った。読み出し回路のパラメータの調整を行い、検出器として用いるにあたって何よりも重要なエネルギー較正アルゴリズムを新しく開発し、10000を超えるコンプトンカメラの全チャンネルに適用した (図3)。これによりエネルギー分解能1.6%@662keVを達成し、EMが検出器として動作する事を実証した。ま

た、100時間に渡る連続動作試験を行い、実際の検出器が連続安定動作する事を検証した。



図3: CC EM1で得られた152Eu のエネルギースペクトル。光電吸収ピークのみを用いる従来のエネルギー 較正を適用したもの(左)、本論文で開発した新しいアルゴリズムを適用したもの(右)。ラインのエネルギー が正しく得られるようになった。





図4: 夫敏結果と取新の設計情報によって構築したgeant4ベースのモンテカルロシミュレータのジオメトリ。

また、実験結果と最新の設計情報に基づいて、SGDのモンテカルロシミュレータを開発 した (図4)。これにより検出器内での物理素過程を詳細に調べる事が初めて可能となった ため、検出器で発生しうるシグナルの特徴を物理的観点から考察する事によって、SGDの コンプトンカメラという複雑な検出器に適用しうるコンプトン再構成アルゴリズムを開発 し、狭視野コンプトンカメラのコンセプトに基づくバックグラウンド除去アルゴリズムを 明確化した。

新しく開発したアルゴリズムの妥当性を検証するために、EMの実験データにアルゴリ ズムを適用した。ガンマ線源が正しくイメージングできる事、及び角度分解能がエネル



図5: SGD CC EM1の実機データに新しく開発したア ルゴリズムを適用して得られたイメージ。137Cs線源 (662keV)を0°、20°、40°、60°、80°のそれぞれの位置 に設置し、別々に照射したデータを重ね合わせたも の。

ギーに応じて変化する事がシミュレーションともコンシステントである事を実証した。また、イメージングが0°から80°という広い角度範囲に渡って行える事を実証し、現在のデザインとアルゴリズムによって視野外からのバックグラウンドが除去できる根拠を示した (図5)。更に、実験データにバックグラウンド除去を適用する事に成功し、ピークのカウント数の比、いわばS/N比が、実際に向上する事を示した(図6)。



図6: 133Ba(左)線源と137Cs(右)線源を用いた実機データに狭視野コンプトンカメラのコンセプトのバックグ ラウンド除去を適用したもの。黒が適用前、赤が適用後。散乱成分のため視線方向(線源の方向)から到来し ていないと考えられるイベントが抑えられ、結果的に散乱成分とピークのカウントの比、いわばS/N比が向 上している。

以上によってアルゴリズムの妥当性とそれに基づくコンセプト通りのバックグラウンド除 去の実現可能性を実験的に検証したことに加え、1.33MeV のガンマ線源のイメージング に成功し、SGDの観測帯域を大幅に拡張できる可能性がある事を新たに指摘 (図7)、ま た、適切にイベント処理を行えば通常の観測のみならずイメージング観測もできる可能性 がある事を指摘した。

recument Description

has been observed for the GSO-NXB, especially during the early phase of the



図7: 60Co線源の1.33MeVガンマ線を用いた実験の実機データによって描いたイメージ(左)と、この実験データに Figure 8.5: Comparison of the in-orbit detector background of the PIN/GSO, normalized by the バックグラウンド除去を適用したス命なたしに伝転, 黒th 薄眉前 th赤衣液の用後)A, SGPの組え帯域AQKeVp609KgV存DS. Dotted lir 大幅に越える1.33MeVのガンマ線が拒任や、40gmCジシダd州のジアジラヴジジド除去できている事が分かる。

ミュレータを用いて、アルゴシリeretgの正確性、12-70 で原理的限界を考察した。bitconstative of the experi roughly estimated by comparing the background level with celestial source i の発地がある事、全体的には高い確率で正しく事構成できるのです。 licated by dotted lines. Below 30 keV, the level is smaller than 10 mCrab, whi り、アルゴリズムには一部改良の ている事を示した。また、えweinsitivityとherterをhertの現在の設計のSQD1にアルゴリズuLute of 3% is ac 適用した時の有効面積を見積もりな業要求性能である20cm2@100keVを実際に満たす事を Since the long-term variation of both PIN-NXB and GSO-NXB can be ex-検証した (図6)。 be stable, the main uncertainties of the background come from temporal and

> As shown in Fig. 8.6 the PIN-NXB displays significant sh niationa Effective Area [cm2] 25 20 15 10 5 10² Initial Energy [keV]

factor of 3, anti-correlated with COR affects the flux of incoming considered to originate in the s nic-ray particles and materials sur R>6, a standard value used in the the amplitude decreases to a fact B, its spectral shape also change 1 at a higher energy range, Kokul variation differs for different energy west energy range a rapid decline) a similar anti-correlation with t to be properly handled in the ba

図8: 本研究で開発したアルゴリズムをシミュレーションデータに適用する事によって見積もった有効面積 (点源)。現在の検出器デザインと本研究で開発したアルゴリズムを用いる事により、要求性能である >20cm2@100keV を満たす。

本研究により、最新の設計に基づくシミュレータ、そして実験とシミュレーションの両 面から検証されたコンプトン再構成アルゴリズムが確立、バックグラウンド除去を行える 事と有効面積の要求性能を満たす事が示された。以上をもって、SGDのコンセプトに基づ くバックグラウンド除去と、それに基づく高感度観測の目処が立った。