

# 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

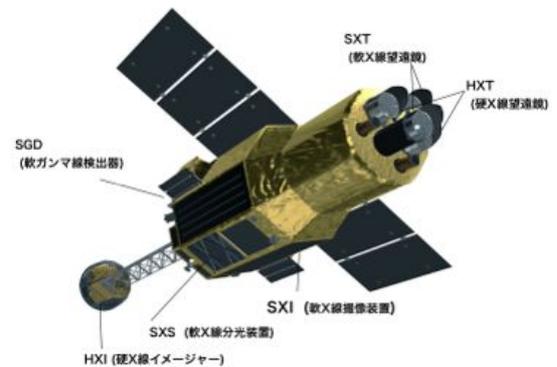


図1 ASTRO-H 衛星

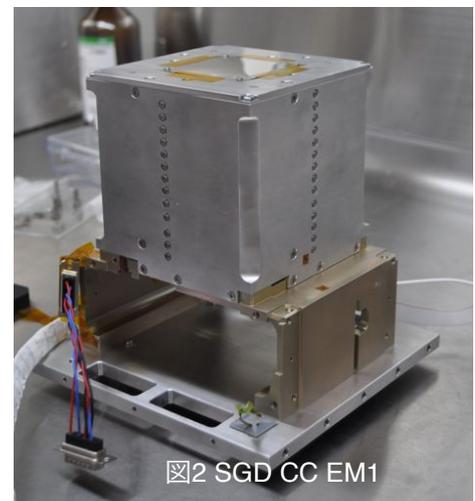


図2 SGD CC EM1

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。

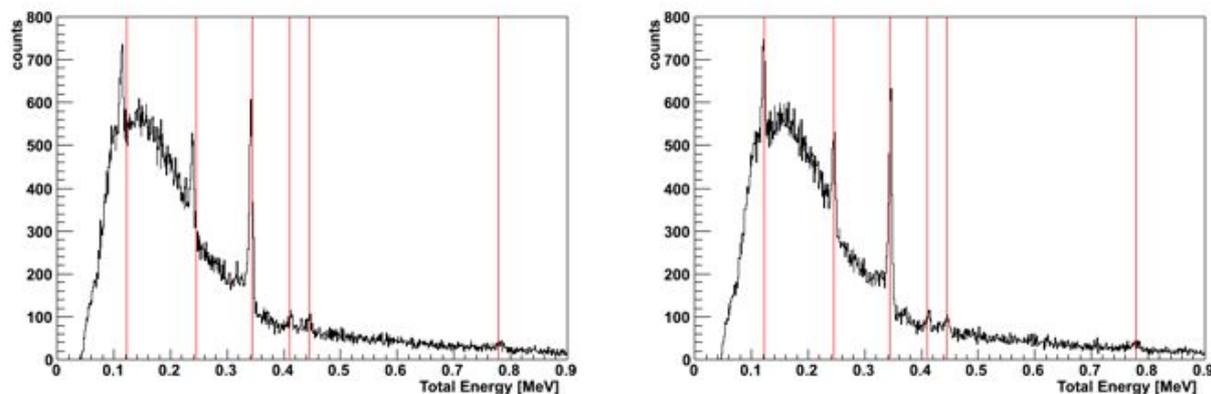


図3: CC EM1で得られた $^{152}\text{Eu}$  のエネルギースペクトル。光電吸収ピークのみを用いる従来のエネルギー較正を適用したもの(左)、本論文で開発した新しいアルゴリズムを適用したもの(右)。ラインのエネルギーが正しく得られるようになった。

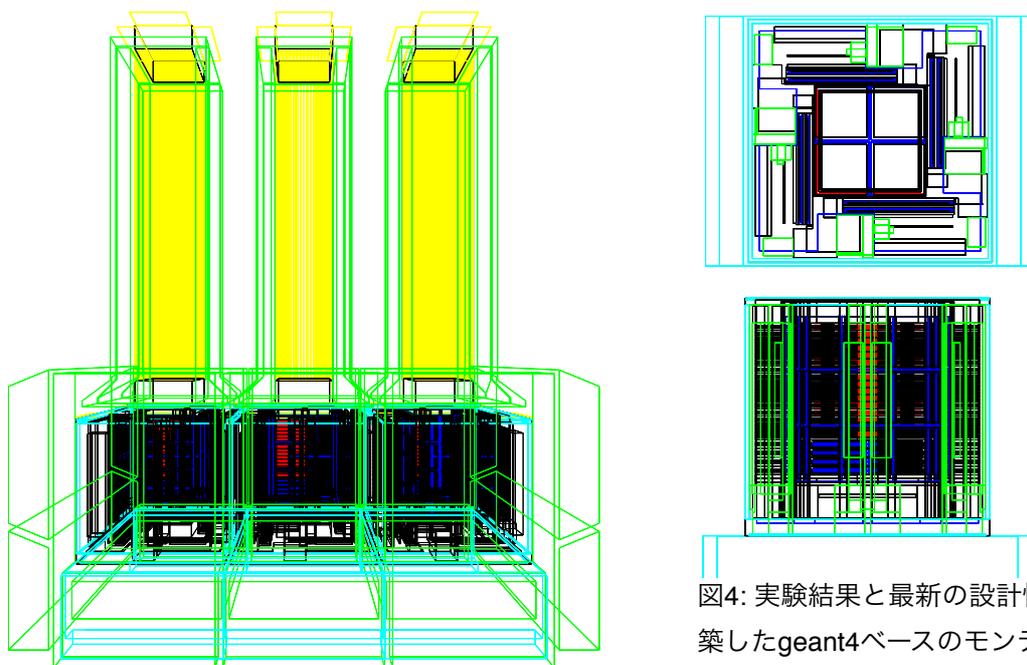


図4: 実験結果と最新の設計情報によって構築したgeant4ベースのモンテカルロシミュレータのジオメトリ。

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ギー

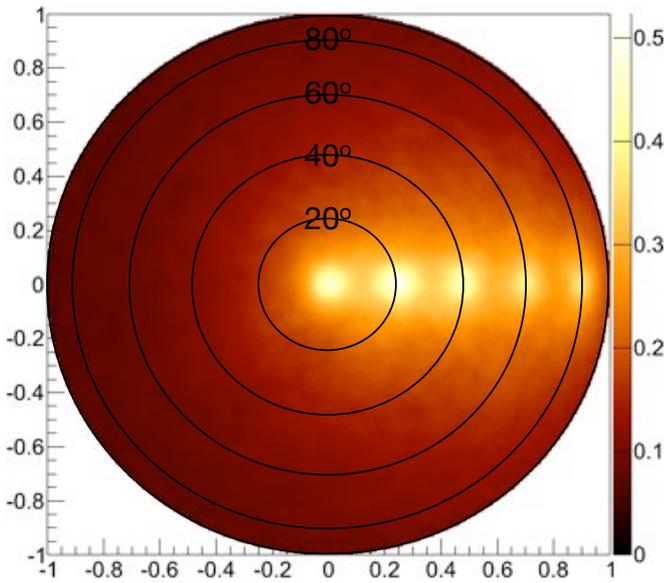


図5: SGD CC EM1の実機データに新しく開発したアルゴリズムを適用して得られたイメージ。137Cs線源(662keV)を0°、20°、40°、60°、80°のそれぞれの位置に設置し、別々に照射したデータを重ね合わせたもの。

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、ピークのカウンタ数と散乱成分のカウンタ数の比、いわばS/N比が、実際に向上する事を示した(図6)。

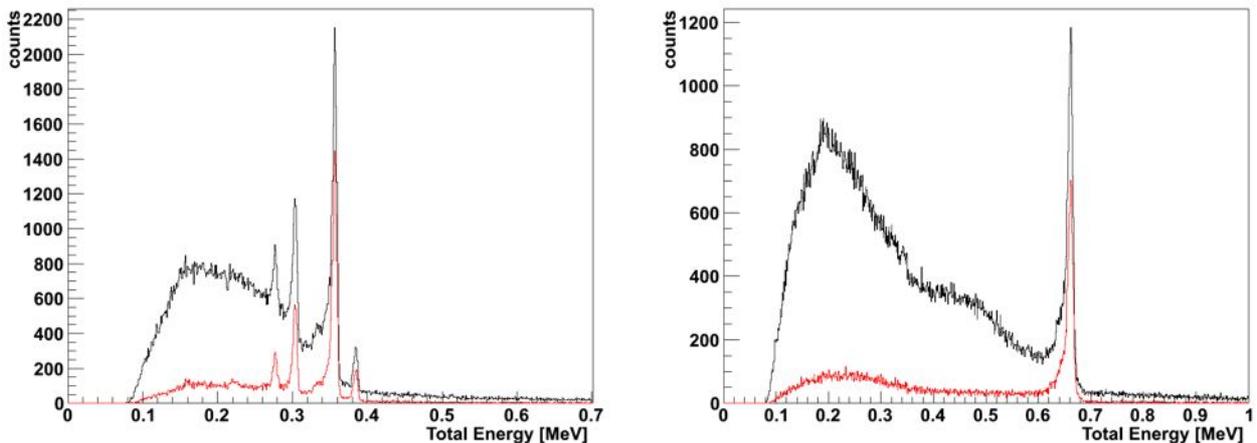


図6: 133Ba(左)線源と137Cs(右)線源を用いた実機データに狭視野コンプトンカメラのコンセプトのバックグラウンド除去を適用したもの。黒が適用前、赤が適用後。散乱成分のため視線方向(線源の方向)から到来していないと考えられるイベントが抑えられ、結果的に散乱成分とピークのカウンタの比、いわばS/N比が向上している。

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。

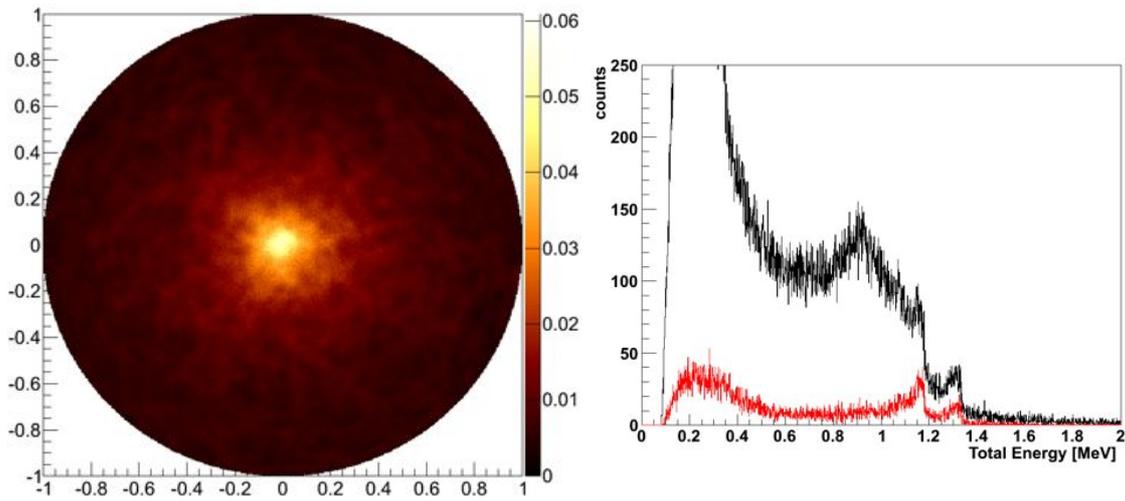


図7:  $^{60}\text{Co}$ 線源の1.33MeVガンマ線を用いた実験の実機データによって描いたイメージ(左)と、この実験データにバックグラウンド除去を適用したスペクトル(右、黒：適用前、赤：適用後)。SGDの狙う帯域40keV- 600keVを大幅に越える1.33MeVのガンマ線が正しくイメージング、バックグラウンド除去できている事が分かる。

アルゴリズムの妥当性は実験的に確認されたが、更なる改良を目指し、自ら開発したシミュレータを用いて、アルゴリズムの正確性、そして原理的限界を考察した。これにより、アルゴリズムには一部改良の余地がある事、全体的には高い確率で正しく再構成できている事を示した。また、シミュレーションを用いて現在の設計のSGDにアルゴリズムを適用した時の有効面積を見積もり、要求性能である $20\text{cm}^2@100\text{keV}$ を実際に満たす事を検証した(図6)。

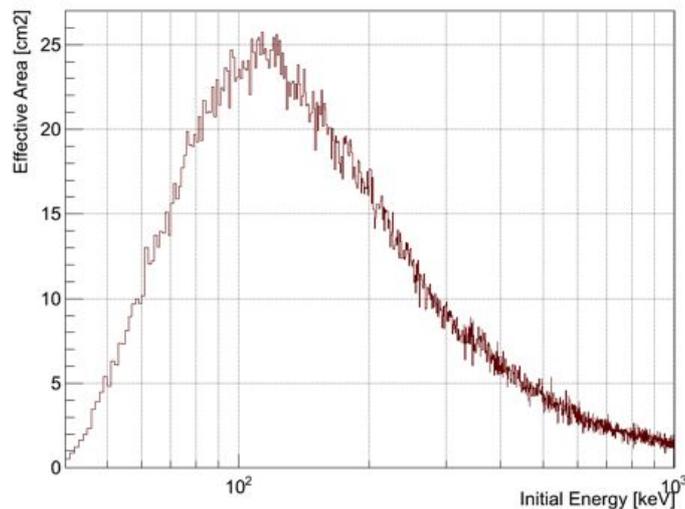


図8: 本研究で開発したアルゴリズムをシミュレーションデータに適用する事によって見積もった有効面積(点源)。現在の検出器デザインと本研究で開発したアルゴリズムを用いる事により、要求性能である $>20\text{cm}^2@100\text{keV}$ を満たす。

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。