

「ひとみ」衛星搭載軟ガンマ線検出器の実現

渡 辺 伸

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: watanabe@astro.isas.jaxa.jp



我々は、「ひとみ」衛星搭載の軟ガンマ線検出器(SGD)により、よい観測装置が実現していないために世界的にも観測が進んでいないsub-MeVの軟ガンマ線領域の高感度観測に挑もうとした。このSGDは、先代の日本の天文衛星「すざく」に搭載された硬X線検出器(HXD)の狭視野とアクティブシールドによる低バックグラウンド化のコンセプトを引き継ぎ、さらに日本発のSi(シリコン)/CdTe(テルル化カドミウム)半導体コンプトンカメラを使った高精度のコンプトンイメージングにより目標天体からのガンマ線とそのほかのバックグラウンド信号を区別する機能を持たせ、高感度観測と偏光観測を目指したものである。特にSGDのSi/CdTe半導体コンプトンカメラは、他に類を見ない高密度実装技術の結晶であり、実現に向けて困難が伴ったが、開発に成功し、観測にこぎつけることができた。観測データは、「かに星雲」の試験観測、約5000秒間のみとってしまったが、60-160 keVのガンマ線で偏光検出に成功した。

1. はじめに

「ひとみ」衛星での観測の柱の一つは、「過去最高の高感度かつ0.3キロ電子ボルト(keV)から600 keVと3桁以上に及ぶ広帯域観測」である。その観測を通して、巨大ブラックホールの探査や極限状態での物理の探究を行うという目的を我々は掲げていた。軟ガンマ線検出器(SGD)は、60-600 keVという「ひとみ」衛星のなかでは最も高いエネルギー帯域を担うために開発・搭載された観測装置である¹⁾。このエネルギー帯域での観測の難しさは、対象天体からの光子以外から生じるバックグラウンド信号が多いことに起因する。先代の日本のX線天文衛星「すざく」に搭載された硬X線検出器(HXD)では、BGOシンチレータのアクティブシールドと狭視野化というコンセプトにより、このバックグラウンド信号を区分・除去し、低いバックグラウンドレベルの実現と過去最高の感度を達成した。SGDは、このHXDの低バックグ

ラウンド化のコンセプトを引き継ぎ、さらに、主検出部に高精度のコンプトンイメージングが可能なSi/CdTe半導体コンプトンカメラを適用した。それにより、HXDでは見分けきれなかったバックグラウンド信号の選別と高感度の観測を目指したものである。また、主検出部のコンプトンカメラはコンプトン散乱を利用した偏光計としても利用できるため、軟ガンマ線偏光観測も可能である。

2. 観測機器コンセプトと構成

ミッションレベルの科学目的からSGDに求められたのは、「2-10 keV帯域で「かに星雲」の1/1000の明るさかつべき指数-1.7の天体スペクトルを、600 keVまで10個以上取得する」ことであった。そこから観測機器レベルの要求性能が以下のように決まった。

- 1) 100 keVでの有効面積20 cm²以上。
- 2) 宇宙X線背景放射(CXB)や他の天体からの混入を防ぐため、150 keVより低いエネ

ルギー帯域で視野が0.55度×0.55度以下。

- 3) 放射化バックグラウンドのラインガンマ線を除去するため、60 keVの半値幅で2 keVより良いエネルギー分解能。

そして、この要求性能を満たすよう、3台のコンプトンカメラで構成された観測装置を2台搭載すること、コンプトンカメラの幾何学的面積は25 cm²とすること、厚さ3 cmのBGOシンチレータでコンプトンカメラを囲って10度×10度の視野にした上で、リン青銅製のパッシブなコリメータ(ファインコリメータと呼ぶ)で0.55度×0.55度に視野を制限することという設計がなされた。

BGOシンチレータによるアクティブシールドは、信号処理、データ処理も含めて、硬X線撮像検出器(HXI)と共通の設計がなされている。SGDアクティブシールドには、1台あたりモジュール化されたBGOが25個搭載されており、CFRP製の筐体に取り付けられている(図1(a))。シンチレーション光の読み出しは、モジュールごとに付けられたアバランシェフォトダイオード(APD)で行う。

ファインコリメータは、サイズは異なるものの、「すぎく」HXDのリン青銅製ファインコリメータと同じコンセプトで作られている。薄板のリン青銅により、3.2 mm角で長さ30 cmの筒が格子状に形成されており、視野を0.55度×0.55度に制限している。

主検出部であるSi/CdTe半導体コンプトンカメラ

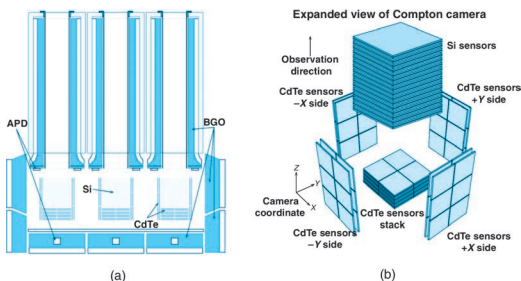


図1 (a) SGD-Sの概略図, (b) SGDコンプトンカメラのセンサー構成の拡大図¹⁾。

らは、コンセプト提唱以来、10年以上の開発期間を経て実現した日本発の検出器である²⁾。シリコン(Si)半導体とテルル化カドミウム(CdTe)半導体の位置検出可能な検出器を組み合わせることで並べたもので、Si検出器は主にコンプトン散乱の散乱体として、CdTe検出器はSiで散乱したガンマ線を光電吸収させる検出器として働く。Si半導体は散乱体検出器としては優れた性質を持ち、原子番号が小さいため、ガンマ線に対して光電吸収を起こす確率よりコンプトン散乱を起こす確率の方が高い。また、ドップラーブロードニングの効果が小さいため、より良いコンプトン再構成を行うことが可能である。一方、CdTe半導体は原子番号が大きく、密度も比較的大きいため、吸収体検出器として優れた性質を持つ。したがって、このSiとCdTeの組み合わせは最適であると言える。しかしながら、両方の半導体検出器を実現させた上で、信号処理LSIと組み合わせる撮像検出器として実現させ、さらに現実的な検出効率を得るために高密度に実装するなど、数多くの技術的ハードルが存在した。このSi/CdTe半導体コンプトンカメラは、ステップバイステップの開発研究でこれらのハードルを乗り越えることで初めて実現した検出器である。

SGDコンプトンカメラでは、有効面積の要求を満たすためにSi検出器は全体として厚さ2 cm程度必要ということが導き出された³⁾。この厚さ2 cmは100 keVのガンマ線の反応確率50%に対応し、0.6 mm厚のSiピクセル型素子を32層積層することとした。CdTe検出器は、このSiの積層検出器の周りをおよそ50%の立体角で取り囲む必要がある。そこで、Siの積層部の下部に0.75 mm厚のCdTeピクセル素子を8層、側面には2層のCdTe素子を4面に配置している。Si、CdTe素子とも3.2 mmのピクセルピッチを持ち、コンプトンカメラ1台あたりの読み出しチャンネル数は13312に及ぶ。電力の制限から1チャンネルあたり0.5 mW以下という低消費電力の制約の中で、

100–200e⁻ (ENC) というノイズ性能が要求されるため、SGD用に専用の読み出しLSI (VATA-SGD)を開発した。32層のSiピクセル検出器、80個のCdTeピクセル検出器、208個の読み出しLSIなどが高密度に実装され、12 cm×12 cm×12 cmの立方体の中に収まっている (図1(b))。

3. 地上試験と軌道上運用

フライト品の製造は、SGD1については2014年11月、SGD2については2015年1月に完了した。SGD1-S (S: センサー) とSGD2-Sと、それぞれのラジエータの写真を図2(a) に示す。

製造完了後、2014年11月から2015年3月にかけて、SGDサブシステムでの環境試験と動作性能確認試験、キャリブレーション試験が行われた。動作性能確認試験とキャリブレーション試験は、JAXA相模原キャンパスの大型恒温槽でSGD-SとSGD-AE (電気回路ボックス) を-27°Cに冷却し、密封線源によるガンマ線照射試験やテストパルスキャリブレーションを実行して検証した。環境試験のうち熱真空試験は、JAXA筑波宇宙センターの8 m熱真空チャンバーを用いて実施した。ラジエータ、ヒートパイプ、多層断熱材 (MLI) やヒーターなどSGDの熱制御系の機能確認を行うとともに、長時間測定を実施して地上でのバック

グラウンドデータの取得を行った。また、環境試験のうち機械環境試験 (振動試験、音響試験) も、JAXA筑波宇宙センターの各施設を用いて実施した。それぞれの試験の前後で機能確認試験を実施し、ダメージがないことを確認した。

一連のSGDサブシステム試験のあと、衛星システムに引き渡し、2015年4月にSGDを衛星に取り付けた。ASTRO-H衛星のサイドパネル上に搭載された様子を図2(b), (c) に示す。衛星搭載後は一連の衛星システムの総合試験の中で機能性能確認が行われ、衛星システム全体の環境試験に参加した。また、衛星システムの熱真空試験では長時間測定を実施し、再度、地上バックグラウンドデータの取得を行った。

軌道上でのSGDの立ち上げ運用は、打ち上げの約1ヶ月後、2016年3月15日より実施された。SGDでは高電圧 (コンプトンカメラのSiに230 V, CdTeに1000 V, APDに約400 V) が使われており、安全性を確認しながら、高電圧を徐々に上げていくという運用を行った。SGD1-Sが通常の観測モードになったのが2016年3月21日から、SGD2-Sが通常の観測モードになったのが2016年3月24日からである。結果として、SGD1では、超新星残骸のG21.5-0.9, 中性子星のRX J1856.5-3754と「かに星雲」、SGD2では、RX J1856.5-

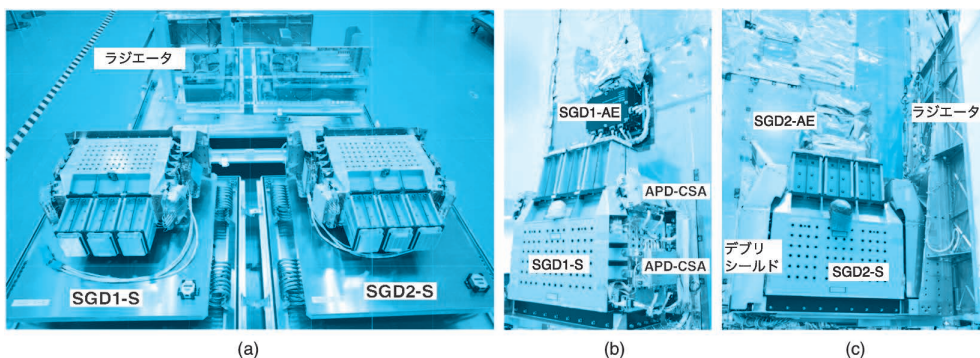


図2 (a) SGD1-SとSGD2-S, および、それぞれのラジエータの写真. (b) 衛星に取り付けられたSGD1-SとSGD1-AEの写真. (c) 衛星に取り付けられたSGD2-SとSGD2-AEの写真. SGD2-Sの側面にあるAPD-CSA (APD用電荷敏感増幅器) は、アルミ製のデブリシールドで覆われている. SGD2-AEは、MLIで覆われている¹⁾.

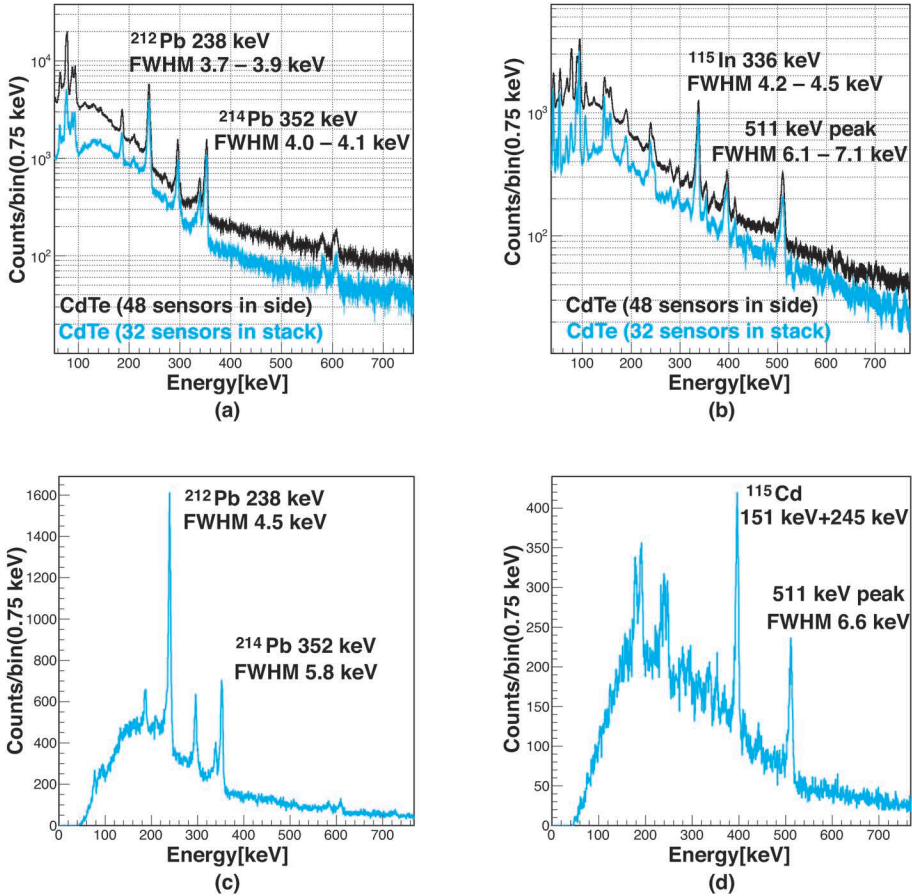


図3 (a) 地上試験で得られたコンプトンカメラのCdTeセンサーのシングルヒットスペクトル。側面の48個のCdTeセンサーと積層の32個のCdTeセンサーのスペクトルがそれぞれ黒と青で表示されている。(b) 軌道上で取得した側面(黒)と積層(青)のCdTeセンサーのスペクトル。(c) 地上試験で得られたコンプトンイベントのスペクトル。(d) 軌道上で取得したコンプトンイベントのスペクトル¹⁾。地上でも軌道上でも放射性物質からのラインガンマ線を半導体ガンマ線検出器の優れたエネルギー分解能で検出できている。地上で検出されているのは、自然起源放射性物質に起因するラインガンマ線。軌道上で検出されているのは、宇宙線陽子により生成された放射化物質に起因するラインガンマ線。

3754と「かに星雲」の試験観測が実施された。G21.5-0.9とRX J1856.5-3754は、SGDのエネルギー範囲では暗いため、軌道上のバックグラウンド特性を検証するためのデータとして使用可能である。一方で、「かに星雲」のみが天体からのガンマ線検出の検証に使える。「かに星雲」のSGDの有効観測時間は約5,000秒である。

4. 確認された性能

SGDのコンプトンカメラが地上および軌道上で正常に動作して、所定のエネルギー分解能が達成されていることは、放射性物質からのラインガンマ線を検出することで確認した。図3に地上、軌道上で得られたスペクトルを示す。地上では、自然起源放射性物質(^{212}Pb , ^{214}Pb など)に起因するラインガンマ線が検出されており、また、軌道

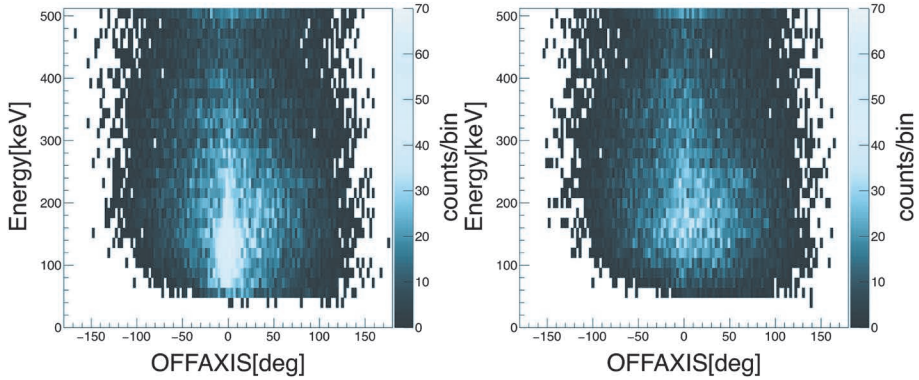


図4 コンプトン再構成イベントの2次元ヒストグラム。OFFAXISとエネルギーの関係を示す。左は「かに星雲」観測時。右は、バックグラウンド計測時。コンプトンカメラでは、コンプトン散乱と散乱されたガンマ線が吸収されたときのエネルギー情報からコンプトン散乱角を求めることができる。また、光軸方向からのガンマ線入射を仮定すると、コンプトン散乱の位置と吸収された位置からもコンプトン散乱角を求めることができる。この二つの散乱角の差として、OFFAXISが定義される。このOFFAXISが0に近いということは、光軸方向から入射したという仮定が成立、すなわち、目標天体からのガンマ線の可能性が高いことを意味する。左のプロットでは、OFFAXIS 0付近に明らかな超過が見られ、「かに星雲」からのガンマ線をコンプトンイメージングで選別できている⁴⁾。

上では宇宙線陽子によりコンプトンカメラ内の物質が放射化してできたラインガンマ線が検出されている。

コンプトンイメージングによる選別については、「かに星雲」の観測と「かに星雲」へ姿勢変更する前のデータとを比べることで評価・確認できた。図4にコンプトン再構成イベントのOFFAXISと再構成エネルギーの関係を表す2次元ヒストグラムを示す。OFFAXISは、コンプトンカメラ内で検出したエネルギー情報から計算されるコンプトン散乱角と、コンプトンカメラ内で信号を検出した位置情報から計算される散乱角（光軸方向からガンマ線が来ると仮定）との差で定義される。0に近いものほど目標天体からのガンマ線イベントである可能性が高く、0から外れたものほどバックグラウンドイベントの可能性が高い。図4にあるように、「かに星雲」観測時にはOFFAXISの0付近に超過が見られる。SGDでのバックグラウンドの主成分は、宇宙線陽子が検出器内の物質と反応することで生成される放射性物質から発生するガンマ線であり、光軸方向以外から来るものが多い。

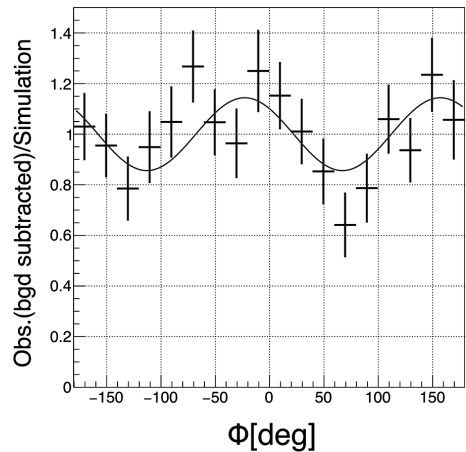


図5 SGDで観測し得られた「かに星雲」のモジュレーションカーブ⁴⁾。

そのため、コンプトンイメージングにより算出されるOFFAXISは、目標天体からのガンマ線とバックグラウンドガンマ線との選別に利用できる。コンプトンイメージングを使わないときは、このOFFAXISの情報は得られず、バックグラウンドイベントを選別・除去することができなかったが、SGDコンプトンカメラでは、この選別でS/Nを

向上させることが可能である。

わずかに約5,000秒の観測時間であったが、SGDのコンプトンカメラでコンプトン散乱を利用した偏光観測にも成功した。図5はSGDで得られた「かに星雲」のモジュレーションカーブ（コンプトン散乱の方位角分布，偏光ガンマ線だと偏りが出る）で，偏光度として $22 \pm 11\%$ ，偏光角として 111 ± 13 度を得た（エラーは1シグマ相当）。SGDによる「かに星雲」の偏光観測については，前号の小高氏の記事を参照されたい。また，このSGDの「かに星雲」の観測，偏光測定については，2018年に我々が中心となり，ひとみコラボレーションとして論文⁴⁾にまとめている。SGDコンプトンカメラのデータ解析手法については論文⁵⁾に，SGDコンプトンカメラの偏光測定能力の検証実験については論文⁶⁾にまとめている。詳細については，これらもご覧いただきたい。

謝 辞

SGDの実現は，さまざまな困難を克服し，達成されたものである。多くの大学院生，ポスドク，フランスのメンバーを含むSGDチームメンバーの皆様，SGDの設計，製造の主担当メーカーである三菱重工業，ほか，SGDの設計，製造，試験，ASTRO-H衛星の開発，試験，運用などに携わった全ての方に深く感謝したい。

参考文献

- 1) Tajima, H., et al., 2018, JATIS, 4, 021411
- 2) Takahashi, T., et al., 2004, New Astronomy Reviews, 48, 269
- 3) Watanabe, S., et al., 2014, NIM-A, 765, 192
- 4) Hitomi Collaboration, 2018, PASJ, 70, 113
- 5) Ichinohe, Y., et al., 2016, NIM-A, 806, 5
- 6) Katsuta, J., et al., 2016, NIM-A, 840, 51

Soft Gamma-ray Detector on Board the Hitomi Satellite

Shin WATANABE

*Institute of Space and Astronautical Science,
Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1
Yoshinodai, Chuo, Sagami-hara, Kanagawa 252-
5210, Japan*

Abstract: With the soft gamma-ray detector (SGD) onboard the Hitomi satellite, we aimed to realize high sensitivity observation of the sub-MeV soft gamma-ray region, which had not been performed in the world because a good observation instrument had not been developed. The SGD inherits the concept of low background with narrow FOV and active shielding of the hard X-ray detector (HXD) onboard the predecessor Japanese X-ray astronomical satellite "Suzaku." The SGD also has a function to distinguish between gamma rays from the target and other background signals with high precision Compton imaging by a Japan originated Si/CdTe semiconductor Compton camera. In particular, the SGD Si/CdTe semiconductor Compton camera utilizes a unique high-density assemble technology. It was difficult to develop, but it was finally completed and used for observations. Though the obtained data are limited to the test observation of Crab Nebula and the observation time is only about 5000 seconds, the polarization measurement of gamma-rays succeeded in the range of 60-160 keV.