

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

Performance of Si/CdTe Semiconductor Compton Telescope  
for detecting polarization of gamma-rays

(ガンマ線偏光の検出を目的とした  
Si/CdTe 半導体コンプトン望遠鏡の性能評価)

氏名 内田悠介

X線、ガンマ線天文学において、偏光観測は未開の領域である。偏光は、天体自身の内部構造や放射領域の環境、特に磁場に関する情報を与えるが、X線やガンマ線で偏光を精度よく観測することは難しく、これまで、ほとんど観測が行われて来なかった。本論文では、数 10 keV から数 100 keV のエネルギー領域で、高い感度でスペクトルを取得すると同時に、偏光観測を行うことを目的に、Si/CdTe コンプトン望遠鏡という新しいコンセプトで開発された軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector: SGD) について、軌道上観測や打ち上げ前の加速器実験を通じて得られた結果のもと、その性能評価を行う。さらに、かに星雲の偏光観測結果に基づいて、パルサー星雲における偏光について数学的モデルを構築し、議論する。

SGD が搭載された、X線天文衛星ひとみ (ASTRO-H) は、0.3–600 keV という 3 桁の広帯域を 4 種類の異なる検出器で同時に観測し、宇宙の成り立ち・極限状態での物理法則を検証解明することを目的として 2016 年 2 月に打ち上げられた。極めて残念なことに、衛星は打ち上げ後約 1 ヶ月で機能停止してしまったが、そのわずかな時間に SGD の立ち上げが行われ、かに星雲の観測をすることができた。SGD は、有効時間にしてわずか 5000 秒の観測結果から、かに星雲のスペクトルをとらえ、さらに、99.3% の有意度で偏光検出に成功した。これは、SGD が、最近開発されつつある他の衛星や気球用の検出器に比べ、数 10 から数 100 分の 1 の観測時間で信号を捉えられることを意味し、その高い感度を実証できた。本論文においては、SGD のエネルギー較正、スペクトル応答、さらに SPring-8 のシンクロトロン放射光を用いた偏光能力の評価共に、軌道上で得られたデータに基づいて、コンプトン望遠鏡としての性能や軌道上バックグラウンドについてまとめる。これらのデータは、将来のガンマ線ミッションにおいて極めて重要な情報である。

本研究によりかに星雲から得られた偏光度は、60–160 keV のエネルギー領域で 22% であった。この値は、従来の理論計算の結果より低い。我々は新たに、磁気流体力学 (MagnetoHydroDynamics: MHD) の手法を用い、従来の星雲内での流れの速度と磁場にもとづいた計算に加え、放射領域の各所でのシンクロトロン冷却、そしてローレンツブーストの効果をとりこんだ新しい計算を行った。

以下に、本論文の内容を個別にまとめる。

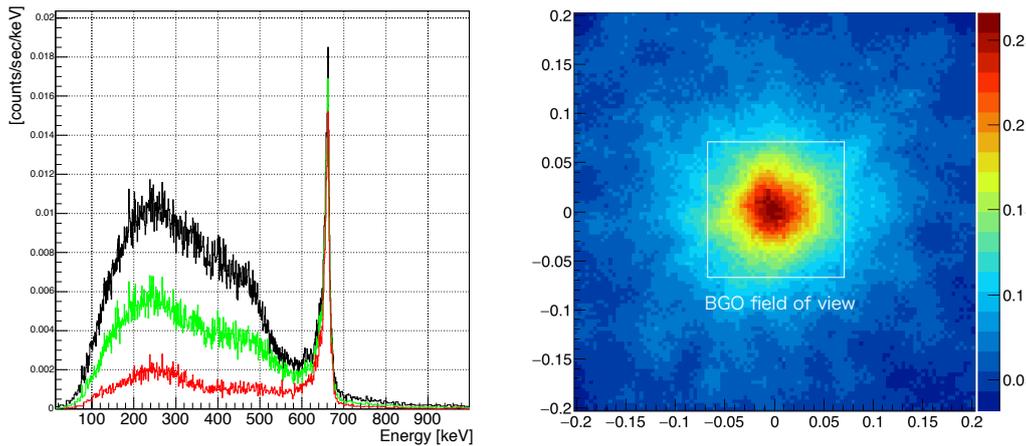


図1 左: コンプトン再構成により得られたスペクトル。 $^{137}\text{Cs}$ を照射したSGD1CC1で得られたものである。各スペクトルは、黒がコンプトン再構成に成功した全てのデータであり、緑がアクティブシールドによる反同時係数で減らされた残りであり、赤がそのうち視野内からの放射を選択したものである。 $^{137}\text{Cs}$ のピーク662 keVより低いエネルギーに存在する散乱成分などが顕著に低下してく様子がわかる。右: コンプトン再構成により得られたイメージ。662 keV ピーク付近のデータのみで作成した。白枠は、BGO アクティブシールドが制限するコンプトンカメラの視野である。

## 1. SGD の性能評価

SGD は、数 10 keV から数 100 keV のエネルギー領域での従来の衛星搭載用検出器と比べ同帯域で 1桁高い感度・2%に迫るエネルギー分解能を目指し、独自の“狭視野半導体コンプトンカメラ”をコンセプトに開発が進められてきた。我々は、このコンセプトの実証のため、地上試験や軌道上での試験観測を通じて検出器の性能評価を行った。

コンプトン再構成は入射した光が検出器内で散乱・吸収されたエネルギーと位置の情報から行う。各反応位置でのエネルギーのずれが 1 keV に達すると、求まる散乱角は 5 度ずれることから、エネルギー決定精度はコンプトン再構成において重要となる。SGD のエネルギー較正結果は、511 keV に対し SGD1 それぞれで SGD2 で 2% を切るエネルギー分解能となった。さらに、 $^{137}\text{Cs}$  を照射し 662 keV のピークをコンプトン再構成により得た。コンプトンカメラはコンプトン再構成により求めた散乱角から入射光の到来方向を決定することが可能である。そのため、アクティブシールドによる反同時係数と入射光の到来方向を制限することにより、視野内からの入射光を選択しスペクトルを作成することができる。図 1 は、視野内にある  $^{137}\text{Cs}$  からの 662 keV に対するバックグラウンド除去を段階的に行った結果である。この結果は、SGD は自身で視野内からの入射光を選ぶことが可能であると実証し、SGD の“狭視野コンプトンカメラ”の新しいコンセプトが確立されたことを示した。

## 2. SGD の検出器応答と偏光感度

我々は検出器の応答を求め、偏光観測に対する感度を導出した。天体からの放射を模擬し得られた結果とモデルを比較する際に検出器応答は必要となる。また、偏光した入射光子が検出器内でどのような方位角分布となるか知るためには無偏光状態での方位角分布を求める必要がある。そのため、検出器を再現するためにモンテカルロシミュレータ開発をし、それに伴うパラメータ調整は単色光を用いた評価が比較しやすいことから、SPring-8 での 122.2 keV と 194.5 keV のエネルギーの 100% 直線偏光ビームを照射した実験結果を利用した。検出器感度につながる Si 検出器の表面部における不感層、CdTe 検出器の電化収集効率について実験結果と合うようにパラメータ調整を行い、Si/CdTe 検出器での反応数を検出器各層あわせた。偏光感度に関しては、偏光検出器の精度を示すモジュレーションファクタ  $Q_{100}$  を求めた。SPring-8 で行われた単色光 122.2 keV の照射実験の結果と、シミュレーションの無偏光状態の方位角分布からもとめたモジュレーションカーブを図 2 に示す。偏光角にかかわらず 122.2 keV の単色光で、 $Q_{100} \sim 0.55\text{--}0.58$  を得た。

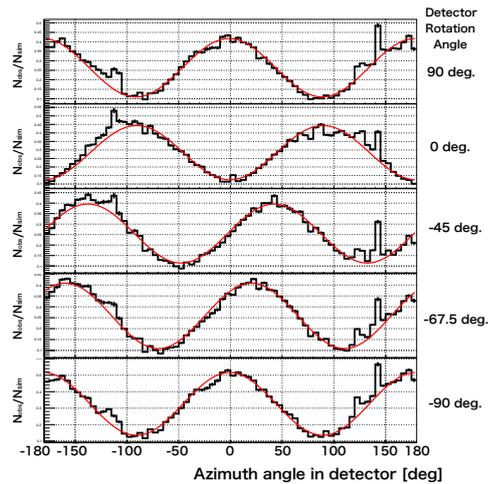


図2 122.2 keVでのコンプトンカメラの各偏光角に対するモジュレーションカーブ。実験データは100%直線偏光した単色光である。検出器自身を傾けることにより偏光角を変えており、上から90, 0, -45, -67.5, -90度となっている。赤線は、フィットの結果であり、偏光角にかかわらずモジュレーションファクタは $Q \sim 0.55-0.58$ となった。

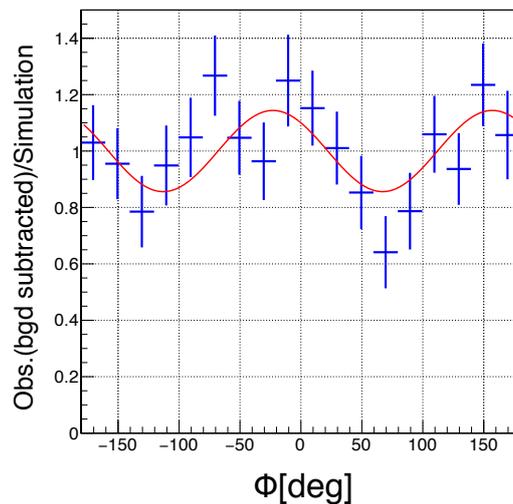


図3 かに星雲からの放射によるモジュレーションカーブ。青点がデータであり、赤線が偏光度22%で偏光角67.02度を示す曲線である。青線のエラーバーは $1\sigma$ を示す。

### 3. SGDによるかに星雲の観測と偏光測定結果について

かに星雲の有効時間にしておよそ5000秒の観測結果から、かに星雲の放射モデルと、バックグラウンドの推定を行った。我々はわずかなデータから最適なバックグラウンドを見積もるべく、かに星雲観測1日前のほぼ同軌道のデータを利用した。かに星雲の放射を冪分布と仮定して、スペクトル指数を2.1としシミュレーションをすると、normalization  $N = 8.23$ でフラックスが2-10 keVで $1.89 \times 10^{-8}$  erg/s/cm<sup>2</sup>と求まり、そのスペクトルの構造をよく再現することが出来た。

我々は解析の結果、図3に示すモジュレーションカーブを得て、かに星雲の偏光の程度を99.3%の有意度で60-160 keVのエネルギー帯域において偏光度22%、偏光角67.02度と求めた。この結果はPoGO+やINTEGRAL/SPIなどの他の観測結果に匹敵する。わずか5000秒と他の衛星検出器に比べ数10から数100分の1の観測時間で高い有意度で偏光を検出することができた。

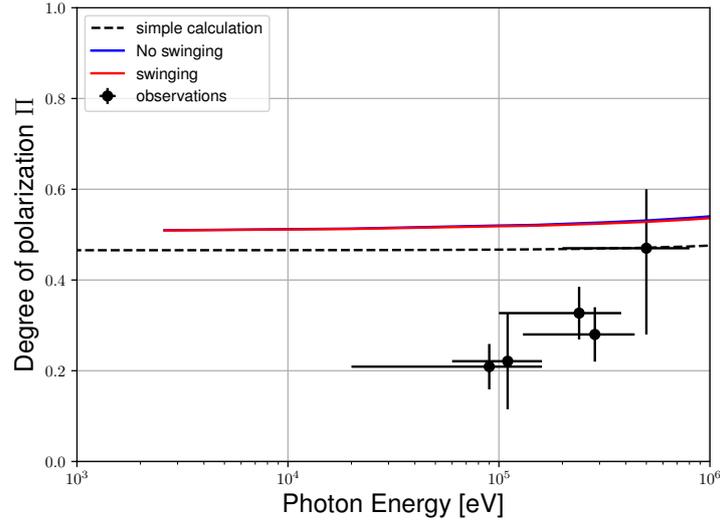


図4 かに星雲における偏光度のエネルギーに対する変化を示す。黒点が各観測により得られたデータであり、点線が one zone model を利用して求めた偏光度である。青線は Kennel and Coroniti (1984) により導出された MHD の計算結果に加え、IC などによるパルサー風内での電子の冷却 Atoyan and Aharonian (1996) を考慮した結果。赤線はさらに、電磁波の Lorentz boost を考慮した結果。

得られた偏光度が、かに星雲を模擬した MHD の計算結果からどの程度正しいのかを見積もった。かに星雲はパルサー風星雲でのシンクロトン放射で輝いており、この放射光の分布を再現することを目指した。これまでにも、磁場と電子のエネルギー分布をパルサー風星雲内で全て同じとして計算した one zone model が存在するが、これを利用して偏光度を求めると、観測値より高い 48% となる。そこで、Kennel and Coroniti (1984) が考案した 1 次元の MHD による星雲内での流れの速度と磁場の計算結果を利用し、そこに電子のエネルギー分布が逆コンプトン散乱などによりパルサー風内で冷却することを考慮した計算 (Atoyan and Aharonian, 1996) を取り込み、図 4 の青線の結果を得た。この結果は高エネルギー側で偏光度が高くなる様子を再現している。さらに、新たな要素として Lorentz boost による影響を含めて、3 次元でのかに星雲を模したジオメトリでシンクロトン放射の分布を作成した。その結果、図 4 の赤線に示す通りその効果が薄いことがわかり、観測を説明するためには、乱流を取り込むなど別の物理量を取り込む必要があることを示した。

## 参考文献

- A. M. Atoyan and F. A. Aharonian. On the mechanisms of gamma radiation in the crab nebula. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 278(2):525–541, 1996. doi: 10.1093/mnras/278.2.525. URL <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/278.2.525>.
- C. F. Kennel and F. V. Coroniti. Confinement of the Crab pulsar's wind by its supernova remnant. *ApJ*, 283: 694–709, August 1984. doi: 10.1086/162356.