

X線天文衛星ひとみ搭載SGDの  
偏光観測に向けたデータ処理の最適化

広島大学理学研究科 物理科学専攻  
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

M156007

幅田 翔

主査：深澤 泰司 副査：大川 正典

2016年2月

## 概要

2016年2月17日に打ち上げが行われた日本のX線天文衛星ひとみに搭載された軟ガンマ線検出器 (SGD) は、sub-MeV(数10keV - 数MeV)帯域を過去最高感度で観測することを目指す分光観測器である。SGDは、井戸型のアクティブシールドの中に主検出器の半導体コンプトンカメラを設置し、その視野を制限した「狭視野コンプトンカメラ」をコンセプトに設計されている。sub-MeV観測帯域はバックグラウンド要因が多く、他のエネルギー帯域に比べ感度の良い観測が困難である。そのため、アクティブシールドによるバックグラウンド除去に加え、コンプトン運動学を用いて入射光子の到来方向を制限し、バックグラウンドを徹底的に低減する。また、SGDが光子の到来方向制限に利用するコンプトン散乱は、入射光子の偏光角に依存した微分散乱断面積をもつため、偏光観測が可能となる。偏光観測からは、撮像や分光では得られない天体の物理量を知ることができ、重要な観測手段となる。SGDにより、従来よりも高感度の偏光観測が行われると期待される。

SGDから得られた観測データを用いてコンプトン運動学による到来方向制限(コンプトン再構成)を行うためには、光子反応順序の推定など複雑なアルゴリズムに基づいたデータ処理が要求され、そのためのソフトウェアも大規模なものとなるため、天体解析を行うために適切な処理が行われているのか実際の観測データを用いて検証することが重要である。

本研究では、SGDで実際に衛星軌道上で稼働していた全データを用いて、コンプトン再構成処理が正しく行われているのか検証を行った。コンプトン再構成における光子反応イベントの同定、反応順序の推定、さらにコンプトン散乱角の導出といった各手順において、その物理的な整合性について検討し、検出器開発中に用いられてきたアルゴリズムと比較するなど、詳細な検証をおこなうことによって、現状のデータ処理の問題点を抽出し、より最適なデータ処理を行う枠組みを構築することに成功した。このことにより、SGDの観測データを用いて行う天体解析が十分信頼できるものであると確認した。

さらに、本研究では、最適な処理を行った観測データを用いて偏光解析を試みた。コンプトン再構成処理で計算した光子の散乱方位角分布の異方性を調べることで偏光度と偏光方位角を制限することができる。SGDによる天体観測時間は非常に限られていたため、可能な限りSN比を向上させる必要がある。そこで、光子の反応順序や反応位置など特徴的なパラメータについて様々な組み合わせによるデータ選別を行い、それぞれのSN比を比較することで最適なデータ選別手法を模索。標準的な手法に比べて偏光解析の精度がどの程度向上するかを検討を行った。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>始めに</b>	<b>6</b>
1.1	高エネルギー天体からの X 線ガンマ線	6
1.2	国際 X 線天文衛星「ひとみ」	6
1.3	軟ガンマ線検出器 SGD	11
1.4	X 線ガンマ線の放射線吸収体との相互作用過程	13
1.5	sub-MeV 領域で観測される天体からの偏光	18
1.6	かに星雲	21
1.7	本研究の目的	24
<b>第 2 章</b>	<b>SGD 搭載コンプトンカメラを用いた X 線ガンマ線観測</b>	<b>25</b>
2.1	SGD 搭載狭視野半導体多層コンプトンカメラ	25
2.2	コンプトン再構成	27
2.3	コンプトンカメラによる X 線ガンマ線偏光観測	28
<b>第 3 章</b>	<b>SGD データ処理ソフトウェア検証</b>	<b>31</b>
3.1	データ処理ソフトウェア概要	31
3.2	コンプトン再構成ソフトウェア sgdevtid	34
3.3	sgdevtid の動作検証	37
3.3.1	sgdevtid 出力ファイル SFFa の検証	37
3.3.2	SGD 開発チーム開発コンプトン再構成ソフトウェアとの比較	42
3.3.3	sgdevtid 動作検証の結果と結論	51
<b>第 4 章</b>	<b>偏光解析に向けたデータ処理の最適化</b>	<b>52</b>
4.1	SGD 偏光観測に関する先行研究	52
4.2	偏光解析に向けたデータ処理方法の模索	54
4.2.1	解析するエネルギー範囲の制限	56
4.2.2	1 ヒット目位置の制限	58
4.2.3	他のコラムの制限範囲を模索する	59
4.3	偏光解析に向けたデータ処理最適化の結果と結論	60
<b>第 5 章</b>	<b>まとめと今後</b>	<b>61</b>

# 目次

1.1	天文衛星ひとみ。質量は約 2.7 t、発生電力は 3500 W。[1]	7
1.2	ひとみ衛星打ち上げの様子 [1]	8
1.3	X 線天文衛星ひとみ [1]	9
1.4	ひとみ運用スケジュール [1]	10
1.5	2016年3月20日以降の観測天体履歴。3月25日に、かに星雲の観測が行われた。[19]	10
1.6	ひとみ衛星に引き渡される際に撮影された SGD[1]	11
1.7	X 線ガンマ線領域の検出器感度。HXI と SGD の期待感度は緑線で表されている。[11]	12
1.8	SGD の概要図。緑が BGO、赤が Si、青が CdTe を表し、上部のファインコリメータで視野を狭めている。[12]	13
1.9	コンプトン散乱の概念図 [8]	15
1.10	入射エネルギー毎の微分散乱断面積。[11]	16
1.11	Doppler broadening effect の元素周期変化。横軸が原子番号、縦軸が検出器の角度分解能の広がり。[11]	17
1.12	Si, Ge, CdTe, HgI <sub>2</sub> の線吸収係数。低エネルギー側で卓越する光電効果、sub-MeV 領域で卓越するコンプトン散乱、高エネルギー側で卓越する電子対生成の 3 反応がプロットされている。[2]	18
1.13	シンクロトン放射モデル。磁場 $B$ に電荷 $q$ を持つ荷電粒子が進行方向を曲げられ、その加速度方向へ放射する。[13]	20
1.14	コンプトン散乱方位角の偏光角依存性 [4]	21
1.15	かに星雲を可視光から X 線まで合成した写真。外側の可視光部分はハッブル宇宙望遠鏡で、内側の X 線部分はチャンドラ X 線観測衛星で観測したもの。[13]	22
1.16	かに星雲のエネルギースペクトル [13]	22
1.17	回転駆動型パルサーの放射理論モデル (Kaspi et al., 2016)。放射領域の違う 3 つのモデルがある。[18]	23
1.18	かにパルサーに各モデルを適用した時に予想される X 線強度 (上)、偏光方位角 (中)、偏光度 (下)。モデルは polar cap (左)、caustic (中)、outer gap (右)。[18]	24
2.1	コンプトンカメラの外観。ただしこれは衛星搭載品ではなく性能評価のために複製されたエンジニアリングモデル品。	25
2.2	SGD 搭載コンプトンカメラの展開図。Si ピクセル検出器 (黄) と CdTe ピクセル検出器 (灰)。[16]	26
2.3	入射偏光光子のコンプトン散乱。方位角 $\phi$ は偏光ベクトルに対する散乱方向。[12]	29
2.4	モジュレーションカーブ。横軸が方位角 $\phi$ 、縦軸がカウントレート。[12]	29

2.5	散乱角とモジュレーションファクターの関係 [8]	29
3.1	SGD データのパイプラインプロセスの流れ	31
3.2	ウィルキンソン型 ADC のブロック図	32
3.3	sgdevtid のフローチャート	34
3.4	隣接した放射線検出ピクセル間での電荷拡散と、蛍光 X 線や反跳電子によるエネルギー拡散	35
3.5	横軸が各マージフラグ、縦軸が MATTYPE。全 SGD イベントを使用。	38
3.6	物理的にイベントが存在しえない領域 1 と領域 2。イベントが存在可能なのに 1 イベントも無かった領域 3。	39
3.7	40 keV と 100 keV のガンマ線に対する Si, CdTe, Ge の検出部の厚さと検出効率の関係。[17]	40
3.8	シグナルマージプロセスのフローチャート	41
3.9	不具合を修正後。横軸が各マージフラグ、縦軸が MATTYPE。	42
3.10	"NUMHITS" 比較	43
3.11	"CAMERAX" 比較	43
3.12	"CAMERAY" 比較	43
3.13	"CAMERAZ" 比較	43
3.14	"DISTANCE0" 比較	44
3.15	"COMPTON_TH" 比較	44
3.16	"COMPTON_PH" 比較	44
3.17	"OFFAXIS" 比較	44
3.18	"ENE_TOTAL" 比較	44
3.19	ヒット数比較。横軸が sgdevtid のヒット数、縦軸が ComptonSoft のヒット数。	45
3.20	ヒット数が異なるイベント例。sgdevtid では緑で 1 ヒット、ComptonSoft では青が 1 ヒット目、赤が 2 ヒット目と判定された。	46
3.21	横軸 $dis_1$ と縦軸 $dis_2$ の比較図。	47
3.22	ヒット順序が異なるイベント例。緑が Si 検出器、青が CdTe 検出器。	47
3.23	仕様の違いの影響を除外した"CAMERAX" 比較	49
3.24	仕様の違いの影響を除外した"CAMERAY" 比較	49
3.25	仕様の違いの影響を除外した"CAMERAZ" 比較	49
3.26	仕様の違いの影響を除外した"DISTANCE0" 比較	49
3.27	仕様の違いの影響を除外した"COMPTON_TH" 比較	50
3.28	仕様の違いの影響を除外した"COMPTON_PH" 比較	50
3.29	仕様の違いの影響を除外した"OFFAXIS" 比較	50
3.30	仕様の違いの影響を除外した"ENE_TOTAL" 比較	50
4.1	SPring-8 ビーム試験で得られた方位角分布。偏光角-90 deg のデータを使用。[12]	52
4.2	Geant4 で設計された SGD のジオメトリ。(左) SGD 1 台、(右) コンプトンカメラ 1 台。[15]	53
4.3	シミュレーションと実験結果の比較。黒が SP 実験、赤がシミュレーション。ASIC を通過して CdTe-Side に入射するイベントを除いている。下図が残差 (黒 - 赤)。左図が CdTe-Side の内側、右図が外側。[12]	54

4.4	SN 比の概念図 [23]	55
4.5	かに星雲観測時 (青) と、その前日観測時 (黒) の衛星軌道。赤領域は SAA。[19]	56
4.6	かに星雲観測 (赤) と前日バックグラウンド観測 (黒) の、エネルギースペクトル (上) と SN 比 (下)	57
4.7	SN 比 (黒)、MDP (赤) 分布。下限 30 keV から積分範囲を広げて計算している	57
4.8	1 ヒット目 CdTe-Bottom のイベントを除外したエネルギースペクトルと SN 分布	58
4.9	かに星雲観測 (赤) と前日バックグラウンド観測 (黒) における、OFFAXIS 分布 (上) と SN 分布 (下)	59
4.10	DISTANCE0 分布 (上) と SN 分布 (下)	60
4.11	SN 比 (黒)、MDP (赤) 分布。下限 0 mm から積分範囲を広げている。	60

# 表 目 次

1.1	これまで行われてきた、かに星雲の X 線ガンマ線偏光観測 [20] . . . . .	19
2.1	Si, CdTe ピクセル検出器の基本性能 . . . . .	27
3.1	SGD SFFa データコラム [2] . . . . .	33
3.2	Cd,Te の特性 X 線のエネルギーと割合。この他にも特性 X 線は放射されるが、それぞれ高い割合の 3 つを記載した。 [2] . . . . .	35
3.3	trace ファイルのコラム情報。この他にもコラムは存在するが、今回の検証に主に関連するものを記載。 . . . . .	37
3.4	sgdevtid と ComptonSoft . . . . .	42
3.5	各コラムの平均残差 . . . . .	44
3.6	ヒット数不一致イベントの数と割合 . . . . .	45
3.7	OCCURRENCE_ID:80654 のイベントのマージプロセスの違い . . . . .	46
3.8	ヒット順序不一致イベントの数と割合 . . . . .	47
3.9	OCCURRENCE_ID:80654 のイベントのヒット順序の違い . . . . .	47
3.10	SGD1CC1 の OCCURRENCE_ID:192216 のイベントの Step3 過程 . . . . .	48
3.11	SGD1CC1 の OCCURRENCE_ID:192216 のイベントの Step4 過程 . . . . .	48
3.12	ComptonSoft のヒット順序確定プロセス . . . . .	48
3.13	仕様の違いの影響を除外した各コラムの平均残差 . . . . .	50
4.1	エネルギーカット前と後の SN 比、MDP 値比較 . . . . .	58
4.2	1 ヒット目 CdTe-Bottom イベントの除外前と後の比較 . . . . .	58

# 第1章 始めに

## 1.1 高エネルギー天体からの X 線ガンマ線

宇宙には様々な天体、星間物質、星間ガスが様々なエネルギー状態で存在しており、それらはガンマ線から電波に至るまでの様々な波長の光を放っている。その中で天体からの放射は熱放射と非熱的放射の2つに分類される。熱放射はガス中で熱運動する自由電子が原子核と相互作用し、速度が変化する事により起こる熱制動放射である。非熱的放射には幾つかの機構が知られており、磁場中を光速に近いスピードで運動する電子が磁力線に巻き付いて螺旋運動する時に起こるシンクロトロン放射や、高速度の電子がエネルギーの低い光子にエネルギーを与える逆コンプトン散乱などが知られている。

現代宇宙物理学に残された大きな課題の一つは、sub-MeV 領域と呼ばれる数 10 keV から数 MeV の X 線ガンマ線エネルギー帯域における高感度観測である。ブラックホールや超新星残骸、銀河団といった高エネルギー天体はその粒子加速機構が明らかになっていない。このエネルギー帯では高温プラズマからの熱的放射が弱くなるため、非熱的放射が支配的となる転換領域となっており、低エネルギー帯観測に比べより詳細な構造を知ることが出来ると期待されている。近年、INTEGRAL 衛星の観測により、かにパルサーからのガンマ線偏光が確認された。そのガンマ線の偏光方向はジェットの本軸と平行であり、シンクロトロン放射を仮定すると、ジェットと垂直な方向に磁場が存在していることになる。このように、偏光観測は粒子加速の現場における磁場の構造を解明する手掛かりとなる。

X 線ガンマ線は宇宙空間においては吸収散乱を受け難いが、地球の大気に入ると吸収されてしまい地上から観測することは困難である。そこで気球、ロケット、人工衛星などの飛行体を用いて観測が行われてきた。1962 年ジャコニーがロケットでの観測によって宇宙からくる X 線の観測を行っており、これが X 線天文学の始まりとされている。また、天文衛星を用いた X 線観測は、1970 年に NASA が打ち上げた UHURU 以来、今日まで大きな発展を遂げてきた。

sub-MeV 領域の観測では光子のエネルギーが高いことから、検出器を構成する物質との相互作用が、光電吸収よりもコンプトン散乱の方が支配的となるため、従来の光電吸収型検出器では観測困難となっていた。また、宇宙線による検出器の放射化などで生じるバックグラウンドが高いため、検出感度は他の帯域に比べて悪い。そこで、この帯域での高感度観測を目的に開発されたのが、X 線天文衛星「ひとみ」搭載軟ガンマ線検出器 SGD (Soft Gamma-ray Detector) である。

## 1.2 国際 X 線天文衛星「ひとみ」

ひとみ (第 26 号科学衛星 ASTRO-H) は、日本の国際 X 線天文衛星である (図 1.1)。このプロジェクトは国際協力ミッションであり、国内の 28 の大学や研究機関、海外の 23 の大学や研究機関のグループが参加し、約 180 名の研究者がプロジェクトチームと連携していた。



図 1.1: 天文衛星ひとみ。質量は約 2.7 t、発生電力は 3500 W。[1]

ひとみ衛星は、2016年2月17日にH-IIA ロケット30号機(202型)で打ち上げが行われた(図1.2)。ロケットは計画通り飛行し、打ち上げの約14分15秒後に衛星を正常に分離。所定の軌道にひとみ衛星は投入された。



図 1.2: ひとみ衛星打ち上げの様子 [1]

開発の目的とその役割は大きく分けて以下の3つである。

1. 硬 X 線望遠鏡による初めての撮像分光観測
2. マイクロカロリメータによる超高分解能分光測定
3. 0.3-600 keV と 3 桁にも及ぶ、過去最高の高感度広帯域観測

この目標達成のため、「ひとみ」には4種類の観測システムが搭載されている。全ての観測システムが機能することで、3桁にも及ぶ広帯域において、「すざく」より10倍から100倍もの高感度観測を実現して、最大限の科学的成果を引き出すことが可能となる。

#### 軟 X 線分光観測

大面積かつ軽量の軟 X 線望遠鏡 Soft X-ray telescope(SXT) と、50 mK という極低温技術によって超高分解能分光を実現する軟 X 線分光検出器 Soft X-ray Spectrometer(SXS) を組み合わせて、超精密 X 線分光を実現。観測エネルギー帯域は 0.3-10 keV である。

#### 軟 X 線撮像観測

軟 X 線望遠鏡 SXT-I と、大面積低雑音 X 線 Charge coupled device(CCD) 素子を用いた軟 X 線撮像検出器 Soft X-ray Imager(SXI) を組み合わせ、広い視野を持ち観測の基本となる X 線撮像を実現。観測エネルギー帯域は 0.4-12 keV である。

#### 硬 X 線撮像観測

国産ナノ技術を駆使し、世界に先駆けて開発した硬 X 線望遠鏡 Hard X-ray telescope(HXT) と、「ひとみ」を目指して開発した新しい高効率のテルル化カドミウム (CdTe) 半導体素子に基づく硬 X 線撮

像検出器 Hard X-ray Imager(HXI) を組み合わせて、硬 X 線帯で初めての集光撮像を実現し、飛躍的な高感度を実現。観測エネルギー帯域は 10-80 keV である。

### 軟ガンマ線観測

独自のアイデアである狭視野半導体コンプトンカメラに基づいた超低雑音軟ガンマ線検出器 Soft Gamma-ray Detector(SGD) により、一桁以上の感度の向上と、ガンマ線偏光観測能力を実現。観測エネルギー帯域は 50-600 keV である。

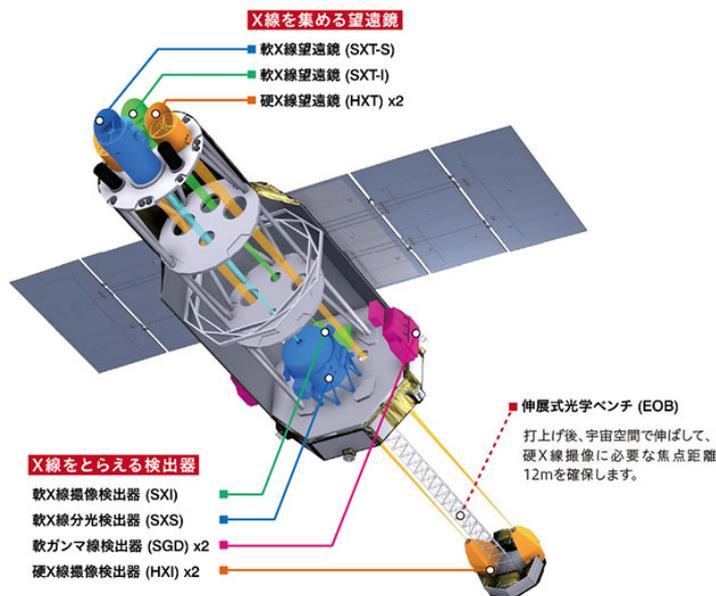


図 1.3: X 線天文衛星ひとみ [1]

2016年2月29日に、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、ひとみ衛星のクリティカル運用期間を終えたことを発表し、搭載機器の初期機能確認、較正観測を経て、運用が開始される予定であったが、3月26日に通信を途絶、4月28日に復旧は断念された。

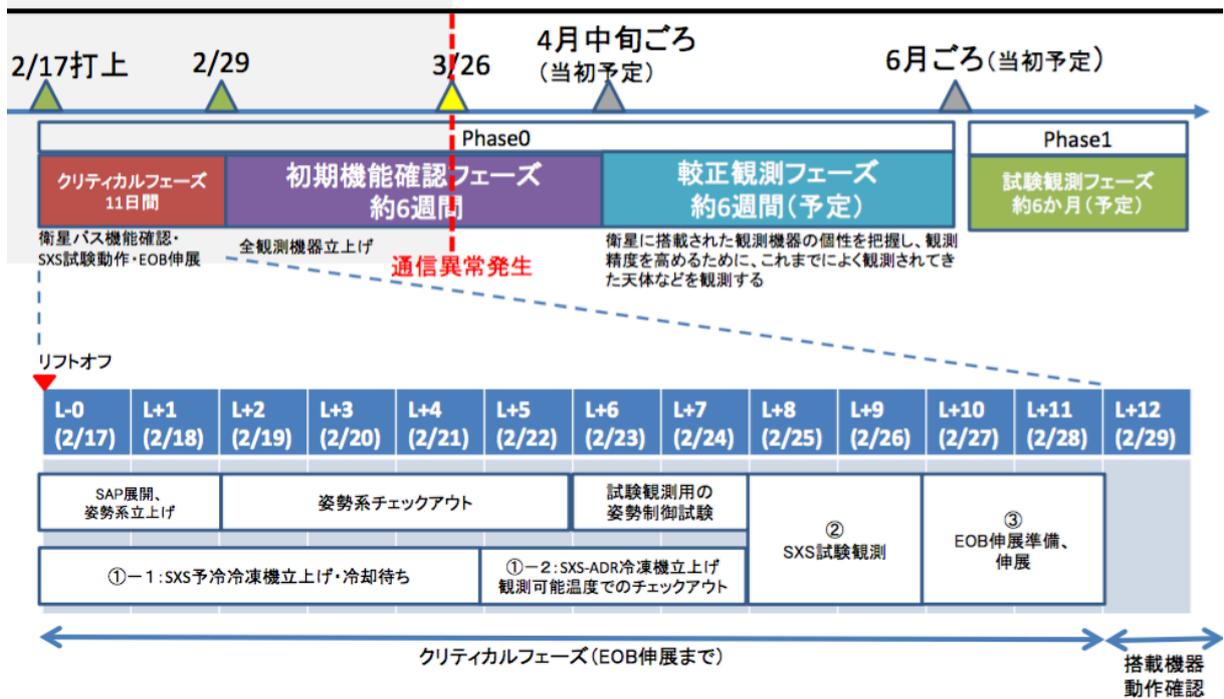


図 1.4: ひとみ運用スケジュール [1]

ひとみ衛星は通信途絶前の初期機能確認フェーズ期間中に、かに星雲の観測を行った (図 1.5)。本研究は、このデータを用いて解析を行ったものである。

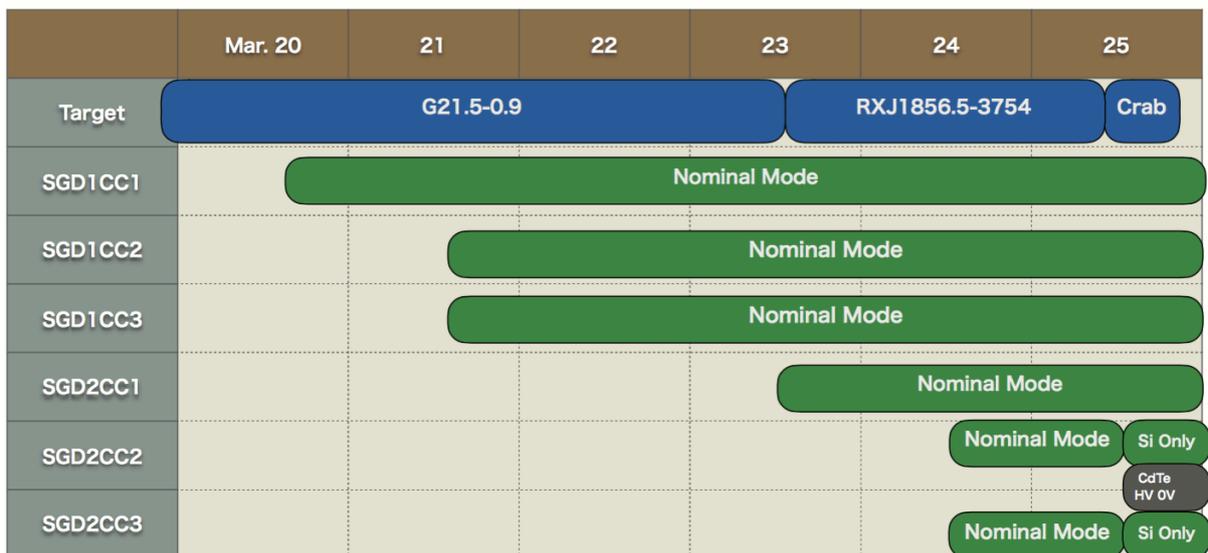


図 1.5: 2016年3月20日以降の観測天体履歴。3月25日に、かに星雲の観測が行われた。[19]

### 1.3 軟ガンマ線検出器 SGD

SGD は「ひとみ」に搭載されている 4 つの検出器の中で最も検出エネルギーが高い 50-600 keV を観測領域としており、衛星の側面に 2 台搭載される (図 1.6)。SGD の観測領域は、天体からの放射が熱的放射から非熱的放射が支配的となる転換領域であり、科学目標としては、ブラックホールや超新星残骸、銀河団などの粒子加速やそれに伴う比熱的放射の研究、電子・陽電子対消滅に伴う 511 keV のラインガンマ線の探査などが挙げられる。



図 1.6: ひとみ衛星に引き渡される際に撮影された SGD[1]

以下に、このエネルギー領域を観測する歴代の検出器と比較した SGD の感度を示す (図 1.7)。縦軸の  $\nu$  は入射 X 線の周波数、 $F_\nu$  はそのフラックスを表し、各実線は検出するために最低限必要な  $\nu F_\nu$  をプロットしている。1 MeV 付近では必要となる  $\nu F_\nu$  が高くなっており、他の帯域に比べて 2-3 桁も悪い。この理由は主に二つある。一つの理由は、観測天体からの信号と比較して、軌道上バックグラウンドが非常に大きいこと。二つ目の理由は、光子と検出器を構成する物質との相互作用が光電吸収からコンプトン散乱へと遷移するエネルギー帯域であることである。従来の光電吸収型検出器にとってコンプトン散乱は光子が元々持っていたエネルギーを知ることができず、バックグラウンドの要因となっていた。

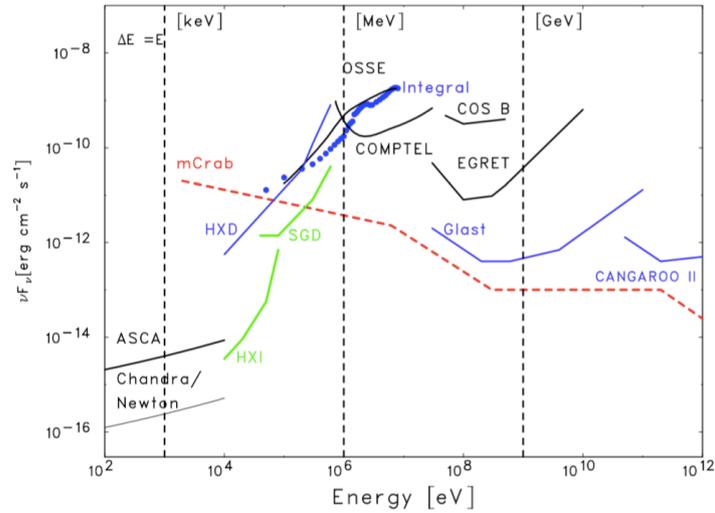


図 1.7: X 線ガンマ線領域の検出器感度。HXI と SGD の期待感度は緑線で表されている。[11]

SGD は宇宙科学研究所 (ISAS) / 宇宙航空開発機構 (JAXA) の高エネルギー宇宙研究物理学グループを中心に開発が進められ、広島大学や名古屋大学、東京大学などが密接に協力して共同研究を進めてきた。SGD は狭視野半導体多層コンプトンカメラという我が国独自のコンセプトにより開発され、井戸型の  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  結晶 (BGO) のシンチレータによる BGO アクティブシールドとリン青銅のファインコリメータにより視野を絞り、Si/CdTe 半導体積層コンプトンカメラが底に設置される。主検出部の半導体コンプトンカメラには高いエネルギー分解能を持つ Si ピクセル半導体検出器、検出効率が高い CdTe ピクセル半導体検出器を積層している。ファインコリメータによって特に低エネルギー ( $\leq 150$  keV) で観測天体外からの光子の混入を抑え、また BGO アクティブシールドとの反同時計数処理やコンプトン再構成によるバックグラウンド除去により、これまでにない高感度観測を目指している。以下に SGD の概要図を示す (図 1.8)。緑で示した BGO で主検出部を囲うような構造をしており、主検出部は赤の Si 検出器、青の CdTe 検出器で構成されている。コンプトンカメラを用いた X 線ガンマ線観測原理については § 2.1 で解説する。

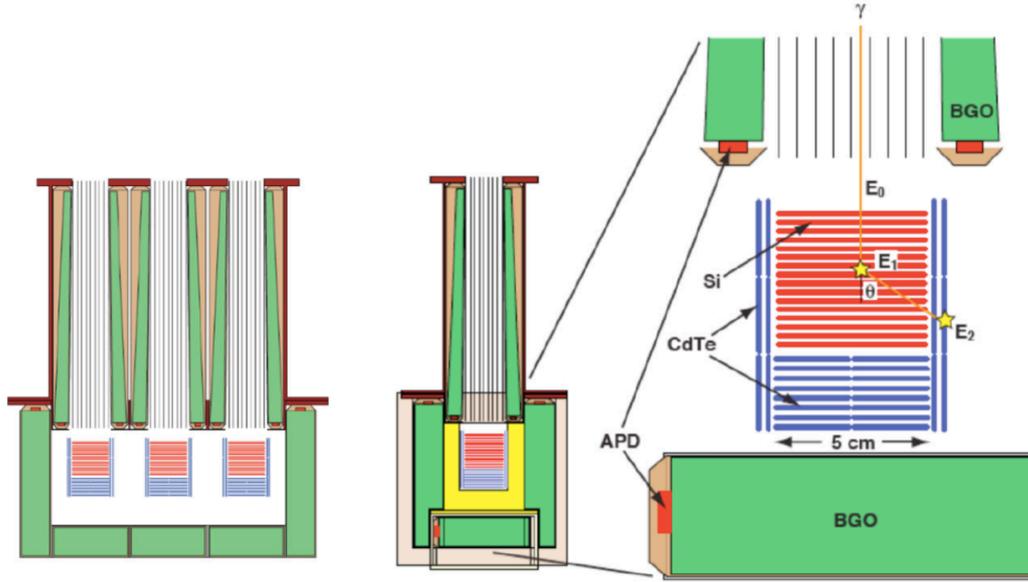


図 1.8: SGD の概要図。緑が BGO、赤が Si、青が CdTe を表し、上部のファインコリメータで視野を狭めている。[12]

## 1.4 X 線ガンマ線の放射線吸収体との相互作用過程

放射線検出器は X 線ガンマ線と放射線吸収体の相互作用を利用して観測を行う。SGD において重要な反応である、光電吸収とコンプトン散乱について説明する。

### 光電吸収

光電吸収は、入射してきた光子が吸収物質原子に束縛された電子と相互作用して完全に消滅する反応である。これによってエネルギーを得て原子殻から放出される原子を光電子と呼ぶ。ガンマ線のように十分に大きなエネルギーを持った光子が入射した場合、原子と最も強く結合している K 殻電子を光電子として放出する確率が最も大きくなる。この光電子は次のようなエネルギー  $E_{e^-}$  を持つ。

$$E_{e^-} = h\nu - E_b \quad (1.1)$$

ここで、 $E_b$  は光電子が最初に存在した原子殻の結合エネルギー、 $h$  はプランク定数、 $\nu$  は電磁波の周波数を表している。すなわち式 (1.1) は、入射する直前に光子が持っていた  $h\nu$  というエネルギーが束縛から解放するために、結合エネルギー分だけ失われ、残りのエネルギーを電子が持つ、ということを表している。[2]

光電吸収の吸収断面積  $\sigma$  は、規格化因子を無視すると近似的に以下の式で表すことが出来る。

$$\sigma \simeq \begin{cases} \frac{Z^5}{(h\nu)^{7/2}} & (E < m_e c^2) \\ \frac{Z^5}{h\nu} & (E > m_e c^2) \end{cases} \quad (1.2)$$

ここで、 $Z$  は原子番号、 $E$  は入射光子のエネルギー ( $= h\nu$ )、 $m_e$  は電子質量、 $c$  は真空での光速をそれぞれ表している。また、 $m_e c^2$  は電子の静止質量エネルギーであり 0.511 MeV である。式 (1.2) が示すように、反応断面積は放射線吸収体の原子番号の 5 乗に比例する。このためより多くの X 線ガンマ線を光電吸収により検出したい場合、原子番号の大きな元素を用いた吸収体が適していると言える。SGD では CdTe ( $Z_{Ge} = 48, Z_{Te} = 51$ ) を光電吸収体として用いている。[11]

光電吸収により光電子が放出されると、光電子が元々存在した電子軌道に一つ空席が出来る。ここに媒質中の自由電子や他の殻の電子が落ちることにより直ちに基底状態に戻る。この時、1 個以上の特性 (蛍光) X 線光子、またはオージェ電子が放出される。この X 線は発生した場所のすぐ近くで光電吸収作用をして再吸収されてしまうことが多いが、検出器外に逃げ出してしまふことがあり、これをエスケープと呼ぶ。

## コンプトン散乱

コンプトン散乱は入射光子と吸収体物質中の電子との間で起こる相互作用である (図 1.9)。エネルギー  $E$  を持つ入射光子はコンプトン散乱によって最初の方向から角度  $\theta$  だけ曲げられる。このとき、光子はそのとき持っているエネルギーの一部を最初に静止していた電子に与える。このように光子に衝突された電子を反跳電子と呼ぶ。光子入射方向と同じ方向に散乱した場合は前方散乱、反対方向に散乱した場合は後方散乱と呼ばれる。コンプトン散乱におけるエネルギー伝達と散乱角度の関係式は、エネルギー保存則および運動量保存則から導くことができ以下の式のように表せる。

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (1.3)$$

ここで、 $E'_\gamma$  は散乱後の光子のエネルギー、 $\theta$  は散乱角を表す。式 (1.3) より散乱角が大きいほどエネルギーが伝達されやすい。 $\theta = \pi$  という極端な場合でも、最初のエネルギーはいくらかは必ず散乱光子に留まる。SGD はコンプトン散乱体と光電吸収体の 2 種類の検出部を持っている。散乱体で落とすエネルギーを  $E_1$ 、吸収体で落とすエネルギーを  $E_2$ 、散乱角を  $\theta_K$  とするとそれぞれの関係は以下の式で表される。

$$\cos\theta_K = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \quad (1.4)$$

また、吸収体物質中の原子当たりのコンプトン散乱確率は散乱ターゲットの電子数に依存するので原子番号とともに直線的に増加する。このためより多くの X 線ガンマ線とコンプトン散乱させたい場合も、 $Z$  の大きな元素を用いたものが散乱体として適していると言える。[2]

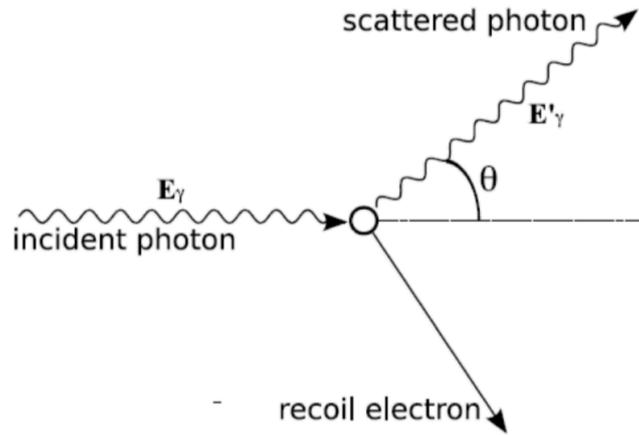


図 1.9: コンプトン散乱の概念図 [8]

散乱光子の微分断面積は、以下のクライン・仁科の式で与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left( \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 \left( \frac{E_\gamma}{E_\gamma} + \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} - 2\sin^2\theta\cos^2\phi \right) \quad (1.5)$$

ここで、 $r_e = e^2/m_e c^2$  は古典電子半径であり、 $\phi$  は入射ガンマ線の偏光方向に対する散乱の方位角である。この式より、入射光子の偏光方向に対して垂直方向に散乱されやすいことが分かる。SGDはこのコンプトン散乱方向が偏光方向に依存性を持つことを利用して偏光観測を実現している。入射ガンマ線が無偏光の場合は、方位角  $\phi$  を全方向に渡って平均を取ればよく、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left( \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 \left( \frac{E_\gamma}{E_\gamma} + \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} - 2\sin^2\theta \right) \quad (1.6)$$

となる。この微分散乱断面積を極座標表示したものが図 1.10 である。コンプトン散乱は低エネルギー極限ではトムソン散乱に一致し、散乱方向は前後で完全に対称になる。入射光子のエネルギーが高いガンマ線では前方散乱が支配的であるが、SGD 観測領域である 60-600 keV では大角度散乱の寄与が大きい。

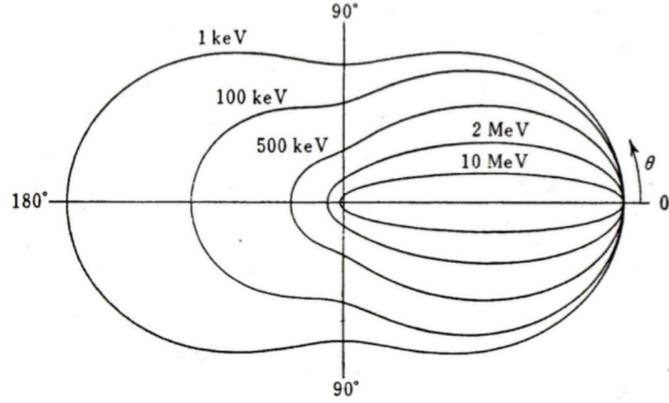


図 1.10: 入射エネルギー毎の微分散乱断面積。[11]

上述のコンプトン散乱では、電子が静止していることを仮定している。実際の電子は原子核周りで有限の運動量  $p_e$  を持っており、個々の電子の持つ運動量は一定でない。この影響で検出器の角度分解能が悪化する Doppler broadening effect が起こる。この効果によってコンプトン散乱式 (1.3) と式 (1.4) がどのように変更されるかを以下に示す。 $\|\mathbf{p}_e\| \ll m_e c$  の場合、散乱前の電子のエネルギーは非相対論的近似から、

$$E_e \sim m_e c^2 + \frac{\|\mathbf{p}_e\|^2}{2m_e} \quad (1.7)$$

となる。この式とエネルギー・運動量保存則から、散乱後の光子の持つエネルギー  $E'_\gamma$  と散乱角  $\theta_K$  は、

$$E'_\gamma = \frac{1}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2}(1 - \cos\theta_K)} \left( E_\gamma + \frac{(\mathbf{p}'_\gamma - \mathbf{p}_\gamma) \cdot \mathbf{p}_e}{m_e} \right) \quad (1.8)$$

$$\cos\theta_K = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} - \frac{c^2(\mathbf{p}'_\gamma - \mathbf{p}_\gamma) \cdot \mathbf{p}_e}{E_2(E_1 + E_2)} \quad (1.9)$$

ここで  $\mathbf{p}_\gamma, \mathbf{p}'_\gamma$  はそれぞれ散乱前、散乱後の光子の運動量である。式 (1.8) の第 2 項、式 (1.9) の第 4 項が Doppler broadening effect を考慮した補正項で、 $E'_\gamma$  と  $\theta_K$  は散乱前の電子の運動量が大きいくほど影響を受ける。

Doppler broadening effect は、原子の種類により電子の運動量が異なるため、元素の周期性に依存することが分かっている (図 1.11)。1 族や 2 族元素 (アルカリ金属、アルカリ土類金属) で影響が最も小さく、1 8 族元素 (希ガス) で最大になる。また、原子番号が大きいくほど影響が大きくなる傾向がある。

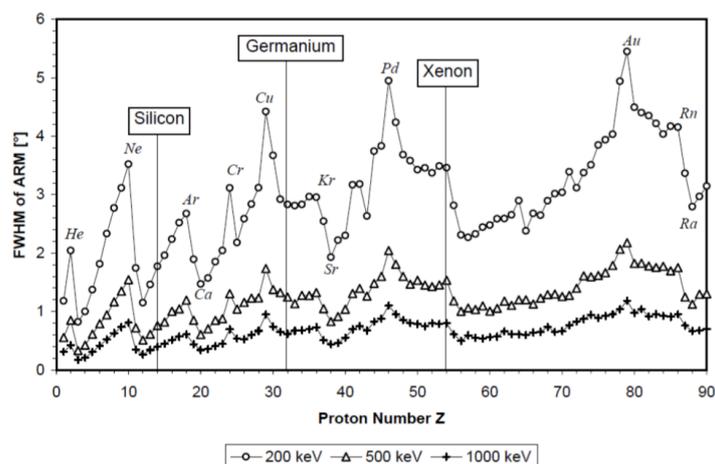


図 1.11: Doppler broadening effect の元素周期変化。横軸が原子番号、縦軸が検出器の角度分解能の広がり。[11]

これまでの議論で、

- 光電吸収確率は原子番号が大きいほど高い
- コンプトン散乱確率は原子番号が大きいほど高い
- Doppler broadening は原子番号が大きいほど、また元素の族が 18 族に近いほど影響が大きい

と述べた。これらの要素を総合的に検討した結果、SGD ではコンプトン散乱体として Si ( $Z_{Si} = 14$ ) を用いている。Si は 14 族元素であり原子番号が小さいため、他の元素と比べて Doppler broadening を起こしにくい。また、1 MeV 付近では光電吸収に対してコンプトン散乱の線吸収係数が卓越するため、吸収体として適切と言える (図 1.12)。

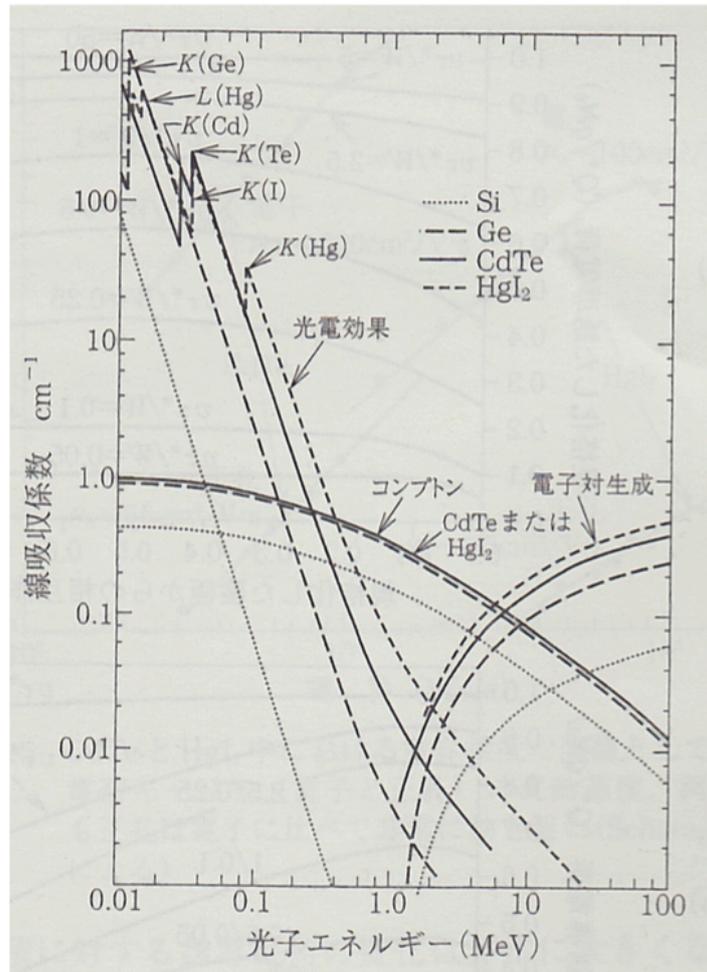


図 1.12: Si, Ge, CdTe, HgI<sub>2</sub> の線吸収係数。低エネルギー側で卓越する光電効果、sub-MeV 領域で卓越するコンプトン散乱、高エネルギー側で卓越する電子対生成の 3 反応がプロットされている。[2]

## 1.5 sub-MeV 領域で観測される天体からの偏光

電磁波は、進行方向に対して垂直方向に電場と磁場が振動している。磁場ベクトルは電場ベクトルに対して、常に進行方向を回転軸として右 90 度の方向を向いている。電磁波の性質を論じる時は電場ベクトルを代表させて論じることが多い。偏光とは電場が特定の方向に偏って振動している現象であり、電場ベクトルの軌跡によって直線偏光・円偏光・楕円偏光に分類される。電場ベクトルが振動する方向を偏光方向、電場ベクトルと進行方向を含む面を偏光面と呼ぶ。

天体から偏光した放射が観測されるということは、天体で放射された時点で偏光しているか、または元々無偏光であったが観測者に伝わる過程で偏光成分を持ったことを示唆している。従って、偏光は撮像観測による天体放射の空間分布や分光観測によるエネルギースペクトルとともに、天体の物理を探る上での重要な情報を与える。半導体多層コンプトンカメラは、これまで効率のよい観測手段が確立されていない X 線

ガンマ線の偏光観測にもその威力を発揮すると期待されている。

これまで、かに星雲の X 線ガンマ線偏光観測は様々な観測機によって行われてきた (表 1.1)。近年、INTEGRAL 衛星の観測により、かにパルサーからのガンマ線偏光が確認された。そのガンマ線の偏光方向はジェットの本軸と平行であり、シンクロトロン放射を仮定すると、ジェットと垂直な方向に磁場が存在していることが示唆される。このように、ガンマ線の偏光は粒子加速の現場における磁場の構造を反映しているため、その加速機構の解明などに大きな役割を果たす。

観測機名	Polarization fraction	Polarization angle
OSO-8	(15.7 ± 1.5) % @2.6 keV (18.3 ± 4.2) % @5.2 keV	(162 ± 3)° @2.6 keV (156 ± 7)° @5.2 keV
INTEGRAL/IBIS(200 - 800 keV)	>88 % @95 % C.L.(off peak)	(122 ± 8)°
INTEGRAL/SPI(100 - 1000 keV)	(46 ± 10) %	(123 ± 11)°
INTEGRAL/IBIS(300 - 450 keV)	(96 ± 34) % [2003-2007] → (98 ± 37) % [2012-2014]	(115 ± 11)° [2003-2007] → (80 ± 12)° [2012-2014]

表 1.1: これまで行われてきた、かに星雲の X 線ガンマ線偏光観測 [20]

SGD の観測エネルギー帯域である sub-MeV 領域で観測される天体からの偏光は大きく分けて 2 つの生成過程に分類される。

## シンクロトロン放射由来

シンクロトロン放射は、相対論的荷電粒子が磁場中で螺旋運動をする際に、ローレンツ力による加速度を受けることで生じる放射である。相対論的粒子の場合はビーミング効果によって運動方向に強く放射が収束される。磁場に向きがあるため、磁場の向きと垂直方向 (軌道面内) に直線偏光する。従って、偏光を観測することにより偏光角から磁場の向きが分かり、偏光度から磁場がどれだけ整列しているかが分かる。パルサーやパルサー星雲、超新星残骸、活動銀河核での観測による粒子加速の解明が進むと期待されている。

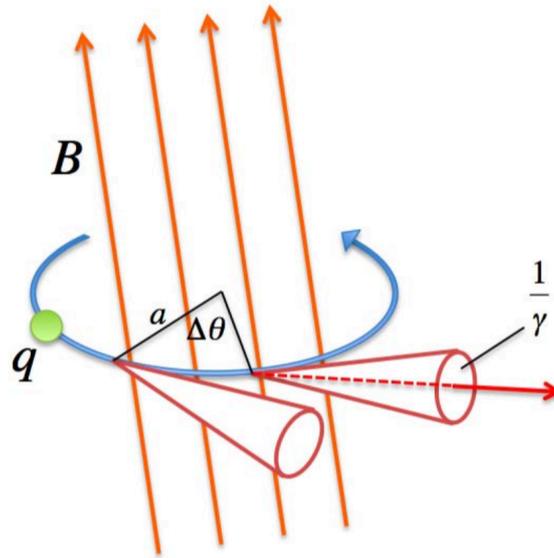


図 1.13: シンクロトロン放射モデル。磁場  $B$  に電荷  $q$  を持つ荷電粒子が進行方向を曲げられ、その加速度方向へ放射する。[13]

## コンプトン散乱由来

式 (1.5) よりコンプトン散乱の微分散断面積は偏光方向に依存する。このため、コンプトン散乱を経て視野方向に到来した光子を観測すると偏光が観測される可能性がある。入射光子が無偏光だった場合、コンプトン散乱後の偏光度  $\Pi$  は、

$$\Pi = \frac{\sin^2\theta}{\epsilon + \epsilon^{-1} - \sin^2\theta} \quad (1.10)$$

と表される。ここで  $\epsilon = E'_\gamma/E_\gamma$  である。コンプトン散乱由来の偏光であれば、その偏光度は一般に 10% 以下になる。エネルギースペクトル等の情報から、その放射機構がコンプトン散乱由来であると断定されれば、独自のパラメータである偏光角により、散乱体の形状や見込み角を制限できるため、ブラックホール連星など X 線連星の降着円盤のジオメトリを制限することが期待されている。

また、コンプトン散乱の低エネルギー極限を取るとトムソン散乱となる。トムソン散乱では電子のエネルギーは変化せず、光子の運動方向のみが変化する弾性散乱となる。トムソン散乱による偏光は、コンプトン散乱と同じ原理で測定できる。式 (1.5) において  $E_\gamma = E'_\gamma$  とするとトムソン散乱の断面積となり、やはり入射光子の偏光方向に対して垂直方向に散乱されやすいことが分かる。

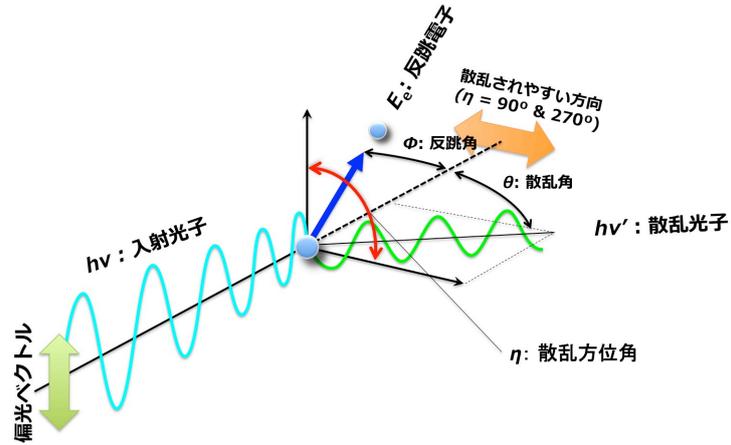


図 1.14: コンプトン散乱方位角の偏光角依存性 [4]

## 1.6 かに星雲

本研究では SGD によって観測された、かに星雲の観測データを用いる。この章では観測対象天体である、かに星雲について述べる。

かに星雲は、中心部にかにパルサーと呼ばれる中性子星をもつ超新星残骸であり、地球から約 2 kpc の距離にある。かに星雲の可視光から X 線までの合成写真を図 1.15 に示した。また、超新星自体は 1054 年に出現したことが中国や日本の文献に記録されており、SN1054 とも呼ばれている。かに星雲は未だに膨張し続けており、現在は地上から可視光で 5 分角 (約 3 pc) の大きさにまで広がっている。かにパルサーの半径 10 km、磁場は約  $10^{12}$  G であり、星本体を数千 km の磁気圏が覆っている。周期は 33 ms、スピンドウン光度  $L_s$  は  $\sim 5 \times 10^{38}$  erg/s である。

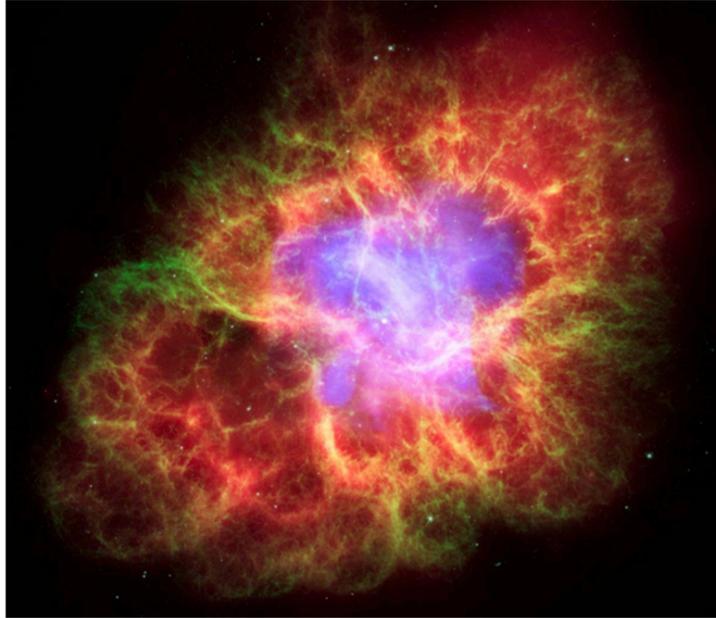


図 1.15: かに星雲を可視光から X 線まで合成した写真。外側の可視光部分はハッブル宇宙望遠鏡で、内側の X 線部分はチャンドラ X 線観測衛星で観測したもの。[13]

かにパルサーの強力な磁場と速い自転によって、電子・陽電子がパルサー風として吹き出し、ローレンツ因子は  $\gamma \sim 10^6$  にもなると言われている。パルサー風は、パルサーから  $10^{12} - 10^{13}$  km 離れた周囲と圧力が釣り合う位置で準静的な末端衝撃波を形成する。その衝撃波面で粒子加速を起こし、電子・陽電子が加速され、星間雲中の mG 程度の磁場と相互作用することでシンクロトロン放射をしている。図 1.16 に、かに星雲のエネルギースペクトルを示す。1 GeV 以下の X 線からガンマ線のスペクトルはシンクロトロン放射によって良く説明でき、それ以上のエネルギーでは逆コンプトン散乱で説明できる。かに星雲は X 線では安定して非常に明るく、エネルギースペクトルの形が単純であるため、X 線ガンマ線の観測装置の較正に頻繁に用いられる。ひとみ衛星も較正のために、かに星雲の観測を行った。

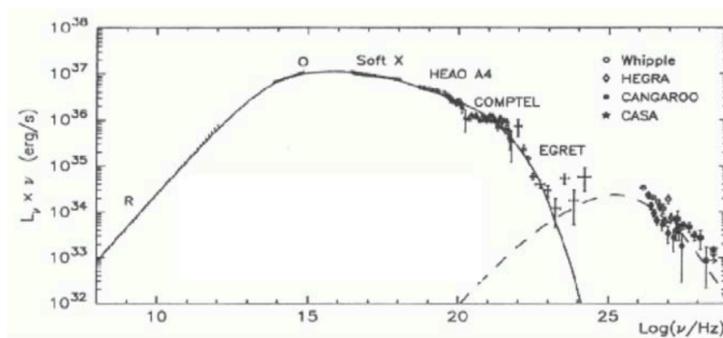


図 1.16: かに星雲のエネルギースペクトル [13]

かにパルサーは回転駆動型パルサーに分類される。回転駆動型パルサーとは、放射エネルギーが回転エネルギーによって賄われている中性子星のことで、周期が時間とともに長くなるパルサーである。図 1.17 は回転駆動型パルサーのモデルで、中心に中性子星があり、ラインは磁力線を表す。磁極近傍は polar cap 領域と呼ばれる。パルサーが高速回転しているため、外側の磁力線は光速近くまで達し、磁場が切れて電荷の無い領域 outer gap が出る。その円柱状の筒を light cylinder と呼ぶ。

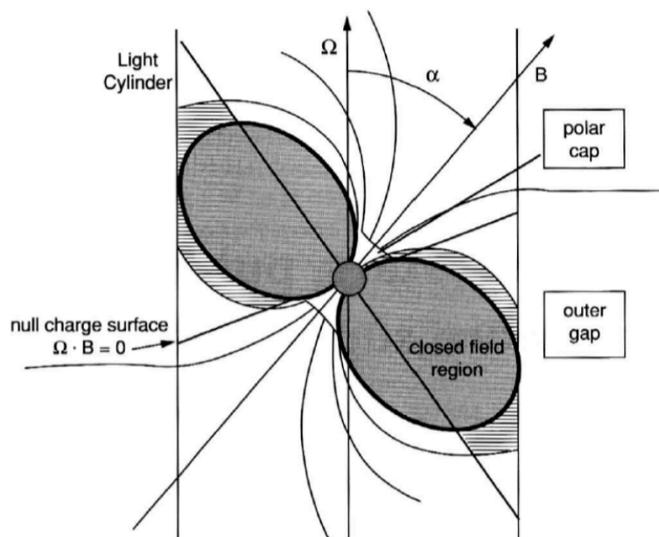


図 1.17: 回転駆動型パルサーの放射理論モデル (Kaspi et al.,2016)。放射領域の違う 3つのモデルがある。[18]

放射されるパルスは電波からガンマ線までの幅広いエネルギー帯域で輝いており、パルサーの磁気圏中で中性子星の磁力線に沿って運動する相対論的な粒子が強くビーミングすると考えられている。しかし、どの領域から放射が出ているか分かっておらず、これまでに3つの理論モデルが考えられてきた。1つ目のモデルは、polar cap 付近で磁力線に平行に磁場が生じ、そこで加速されながら磁場に巻き付いて放射する polar cap モデルである。2つ目のモデルは、outer gap 領域から放射する outer gap モデルである。3つ目のモデルは、極から light cylinder にかけての領域で放射される caustic モデルである (Dyks & Rudak 2003[21])。これまでの測光観測、分光観測、撮像観測では、どのモデルが正しいか決着が付いていない。図 1.18 に、各モデルをかにパルサーに適用した場合の偏光情報を示した。横軸がパルスフェーズであり、X線強度・偏光方位角・偏光度において、モデル毎に大きな差が出来ると理論予想されている。従って、偏光観測結果と理論予想を比較することで回転駆動型パルサーの放射領域を特定できる可能性がある。

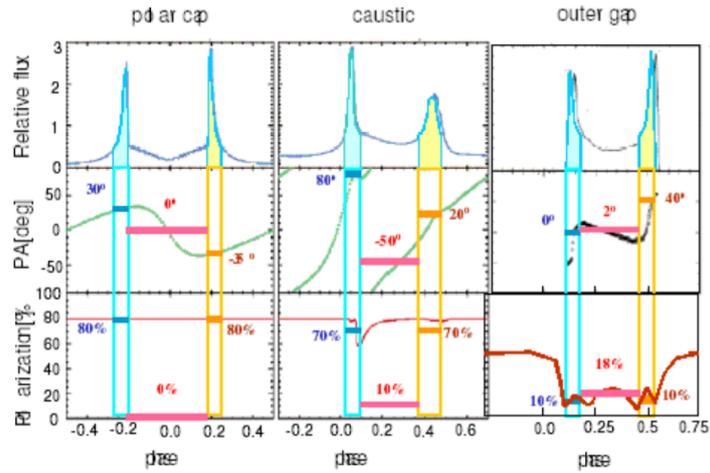


図 1.18: かにパルサーに各モデルを適用した時に予想される X 線強度 (上)、偏光方位角 (中)、偏光度 (下)。モデルは polar cap (左)、caustic (中)、outer gap (右)。[18]

## 1.7 本研究の目的

本研究では実際に「ひとみ」衛星軌道上で観測された、かに星雲の観測データを用いて SGD 観測データを解析を行った。観測により取得された生のデータは、入射光子のエネルギーを計算したり、コンプトン運動学に基づいて到来方向を制限するなどの複雑なデータ処理を行う。この処理を行うソフトウェアの動作検証を行い、正しい観測データを作成出来ているか確認する。また、SGD の光子検出原理であるコンプトン散乱は偏光方向に依存するため、優れた偏光計として比較的明るい天体での偏光観測の実現が期待されている。そこで、偏光観測に向けたデータ処理の最適化を模索し、かに星雲の観測データを用いてどのような処理を行うことで適切な偏光解析が行えるか調べた。

## 第2章 SGD 搭載コンプトンカメラを用いた X 線 ガンマ線観測

### 2.1 SGD 搭載狭視野半導体多層コンプトンカメラ

その構造はシリコン (Si) ピクセル半導体検出器をコンプトン散乱体と、テルル化カドミウム (CdTe) ピクセル半導体検出器を光電吸収体に用いた Si/CdTe 積層半導体検出器である。この2種類の検出器内で起こるコンプトン散乱について、コンプトン運動学を用いることにより入射光子の到来方向を制限する。これをコンプトン再構成と呼び、視野外からのバックグラウンド低減による検出感度向上に活用されている。

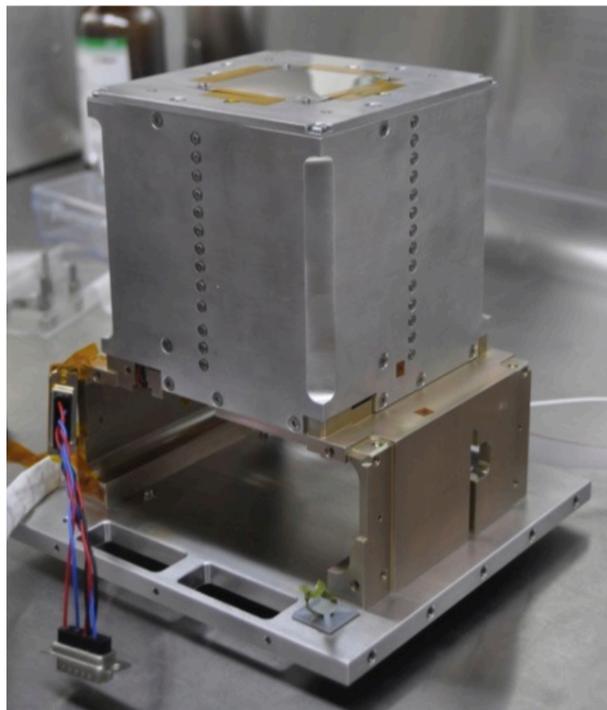


図 2.1: コンプトンカメラの外観。ただしこれは衛星搭載品ではなく性能評価のために複製されたエンジニアリングモデル品。

SGD 搭載コンプトンカメラ 1 台の構成は、Si ピクセル検出器を 3 2 層、その下に CdTe ピクセル検出器を 8 層積み重ね、この周囲を 2 層の CdTe ピクセル検出器の壁が四辺を囲う作りとなっている (図 2.2)。Si ピクセル検出器の大きさは 1 枚につき  $5.12 \times 5.12 \text{ cm}^2$  であり、3.2 mm 間隔で  $16 \times 16$  個の分割された電極を持つ。CdTe ピクセル検出器の大きさは 1 枚につき  $2.56 \times 2.56 \text{ cm}^2$  であり、3.2 mm 間隔で  $8 \times 8$  個の

分割された電極を持つ。Si層の下に積層されているCdTeピクセル検出器（CdTe-Bottomと呼ぶ）は1層あたり4枚を、Si層とCdTe-Bottom層の周囲を囲むCdTeピクセル検出器（CdTe-Sideと呼ぶ）は、1層あたり2×3枚を組み合わせる。

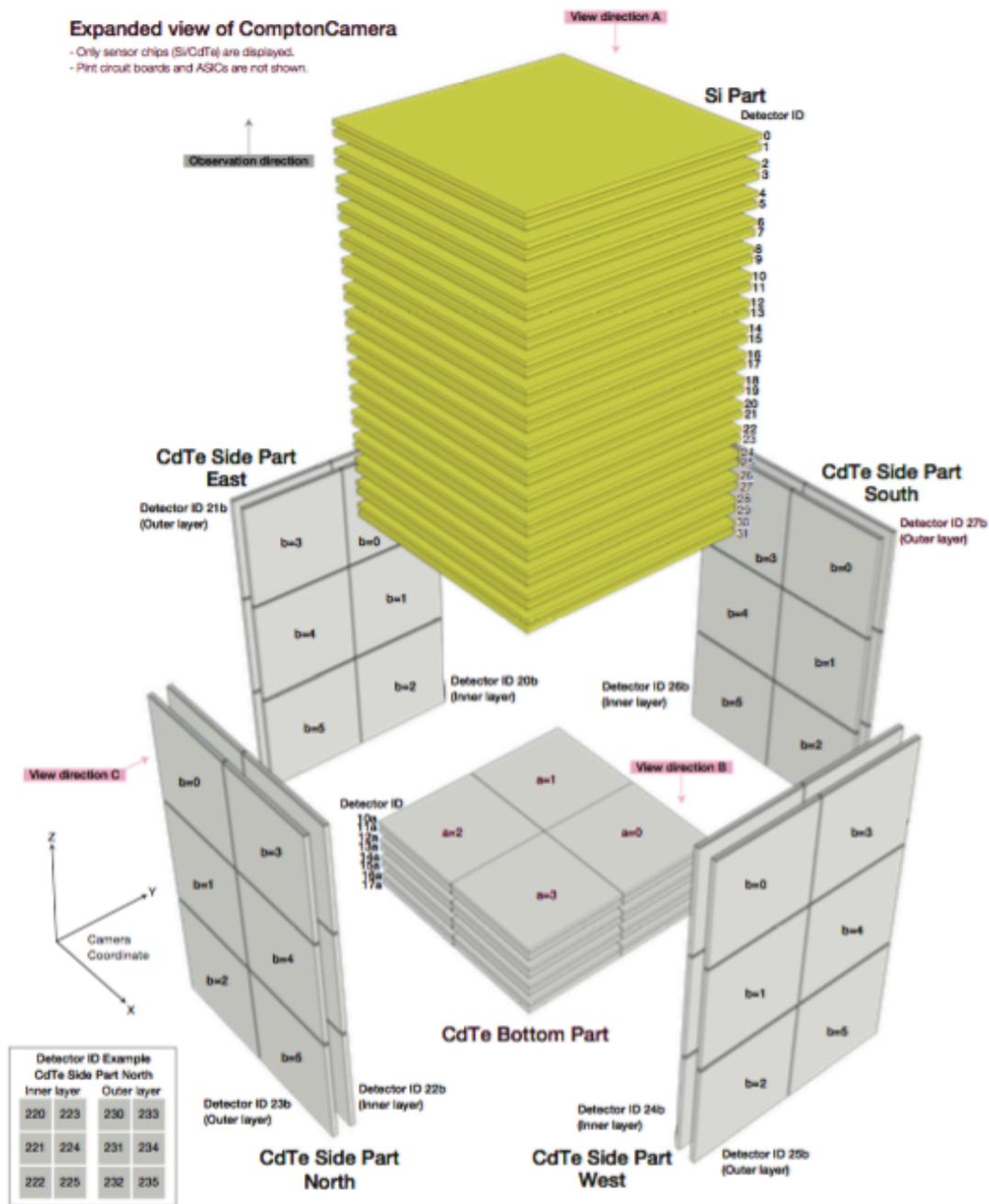


図 2.2: SGD 搭載コンプトンカメラの展開図。Siピクセル検出器（黄）とCdTeピクセル検出器（灰）。[16]

全てを合計すると、コンプトンカメラ1台につきSiピクセルは32枚8192ピクセル、CdTeピクセル

ルは 80 枚 5120 ピクセルとなり、SGD 2 台合わせて 7 万を超えるピクセルを読み出さなくてはならない。Si ピクセル検出器に掛ける逆バイアス電圧は 230 V、CdTe ピクセル検出器に掛ける逆バイアス電圧は 1000 V である。表 2.1 に Si ピクセル検出器と CdTe ピクセル検出器の性能について示した。これらのピクセル検出器と光子との相互作用を用いて (§ 1.4) コンプトンカメラは X 線ガンマ線を観測する。

	Si ピクセル検出器	CdTe ピクセル検出器
実効面積	$5.12 \times 5.12 \text{ cm}^2$	$2.56 \times 2.56 \text{ cm}^2$
ピクセル面積	$3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$	$3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$
ピクセル数	$16 \times 16$	$8 \times 8$
実効厚さ	0.60 mm	0.75 mm
印加電圧	230 V	1000 V
リーク電流	< 50 pA	< 50 pA
主検出部を構成する層数	32	8 (CdTe-Bottom) 4 方向に 2 層ずつ (CdTe-Side)

表 2.1: Si, CdTe ピクセル検出器の基本性能

## 2.2 コンプトン再構成

§ 1.4 で述べたように、コンプトン散乱体で落とすエネルギーを  $E_1$ 、光電吸収体で落とすエネルギーを  $E_2$ 、散乱角を  $\theta_K$  とするとそれぞれの関係は以下の式で表される。

$$\cos\theta_K = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \quad (2.1)$$

この式より、光子の到来方向は散乱角  $\theta_K$  の円錐（コンプトンコーン）上に制限される。一つのコンプトンコーンでは光源が存在する確率の重みはコーン上で一様となるが、同一光源からの複数の光子に対して同様のコーンを描いていくと、光源を交点として各コーンが交わる。このようにして光源方向を特定することが可能となる。

### 角度分解能

コンプトン再構成の精度は、散乱角の測定精度に強く依存している。コンプトンカメラの角度分解能の指標としてよく用いられるのが ARM (Angular Resolution Measure) である。ARM の定義は以下の式で表される。

$$\text{ARM} \equiv \theta_K - \theta_G \quad (2.2)$$

$\theta_G$  は光源位置と散乱・吸収位置を用いて幾何学的に求めた散乱角である。観測対象が天体の場合、十分に光源からの距離があるため、光子の入射方向は検出器に対して垂直と見なせる。理想的には  $\theta_K = \theta_G$  であり  $\text{ARM} = 0$  であるが、実際のコンプトンカメラでは様々な理由から  $\text{ARM} = 0$  付近がピークの分布となる。角度分解能としてこの ARM 分布の半値全幅 (FWHM) がよく用いられている。

ARM が悪くなる原因は主に以下の 3 つが挙げられる。

1. Doppler broadening による影響
2. エネルギーの測定誤差
3. 反応位置の測定誤差

1つ目の Doppler broadening については § 1.4 で既に述べた。SGD は Doppler broadening effect を起こしにくい Si を散乱体として用いている。2つ目のエネルギー測定誤差は、式 (2.1) よりコンプトン運動学的散乱角  $\theta_K$  にズレを生じさせる。散乱損失エネルギーの測定誤差を  $\Delta E_1$ 、光電吸収エネルギーの測定誤差を  $\Delta E_2$ 、式 (2.1) から  $f(E_1, E_2) = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2}$  とおくと誤差伝播則から、

$$\begin{aligned} \Delta(\cos\theta_K) &= \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial E_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial E_2}\right)^2} \Delta E_2^2 \\ &= \left(\frac{m_e c^2}{E_2^2} - \frac{m_e c^2}{(E_1 + E_2)^2}\right) \Delta E_2 - \frac{m_e c^2}{(E_1 + E_2)^2} \Delta E_1 \end{aligned} \quad (2.3)$$

と表される。この式から、エネルギー分解能を向上させ、 $\Delta E_1$  や  $\Delta E_2$  を小さくしなければ  $\theta_K$  は精度良く求まらないことが分かる。3つ目の反応位置測定誤差は、幾何学的散乱角  $\theta_G$  にズレを生じさせる。光子の検出位置が不確かである場合、 $\theta_G$  は散乱・吸収の反応位置から測定されるため精度が悪くなる。

## 2.3 コンプトンカメラによる X 線ガンマ線偏光観測

偏光観測では入射光子の偏光角と偏光度を正確に測定する必要がある。sub-MeV 領域の光は粒子性が非常に強いため、電波波長や可視光での偏光観測のように偏光板を用いた方法は不可能である。そこでこの領域での偏光観測には、光電吸収・ブラッグ反射・コンプトン散乱を用いた偏光計が用いられる。SGD はコンプトン散乱を用いた偏光計である。

クライン・仁科式 (1.5) より、入射光子の持つ偏光ベクトルの垂直方向に散乱されやすい ( $\because \phi = \pm 90$  deg で微分散乱断面積が最大)。このように、コンプトン散乱は入射光子からの偏光方向に依存する。従って、偏光したガンマ線の散乱方向の方位角分布を求めることで、入射光子の偏光度を測定することが出来る。

実際の偏光解析では、まず偏光ベクトルに対する散乱方向を方位角  $\phi$  のカウントレート分布  $n(\phi)$  を作成する。 $n(\phi)$  は三角関数に従い、モジュレーションカーブと呼ばれる。

$$n(\phi) = A \left\{ 1 + M_{obs} \cos 2 \left( \phi - \phi_0 - \frac{\pi}{2} \right) \right\} \quad (2.4)$$

ここで  $M_{obs}$  は、

$$M_{obs} = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} = \frac{1 - (N_{min}/N_{max})}{1 + (N_{min}/N_{max})} \quad (2.5)$$

と表され、モジュレーションファクターと呼ばれる。ここで、 $N$  は偏光入射光子に対して検出された散乱光子のカウントレートであり、その変調の中で最大値を  $N_{max}$ 、最小値を  $N_{min}$  とした。

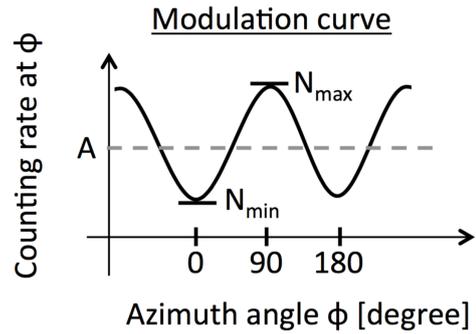
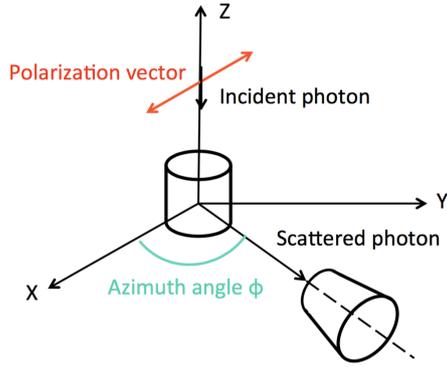


図 2.3: 入射偏光光子のコンプトン散乱。方位角  $\phi$  は 方位角  $\phi$  に対する散乱方向。[12]

図 2.4: モジュレーションカーブ。横軸が方位角  $\phi$ 、縦軸がカウントレート。[12]

観測により得られたモジュレーションカーブを式 (2.4) によりフィッティングし、得られる  $\phi_0$  が入射光子の偏光角となる。図 1.10 よりコンプトン散乱角は偏光だけでなく入射光子のエネルギーによって取り得る値が異なる。このため、観測されるモジュレーションファクター  $M_{obs}$  もエネルギーに依存する。(図 2.5) エネルギーが  $\sim 100$  keV の光子では散乱角が  $\sim 90$  deg 付近でピークを持つ分布となる。また、エネルギーが高くなるに従ってモジュレーションファクターが最大値をとる散乱角が小さくなっている。この現象は、高エネルギー光子では前方散乱が支配的となることから、コンプトンカメラでの偏光観測にとって有利に働く。

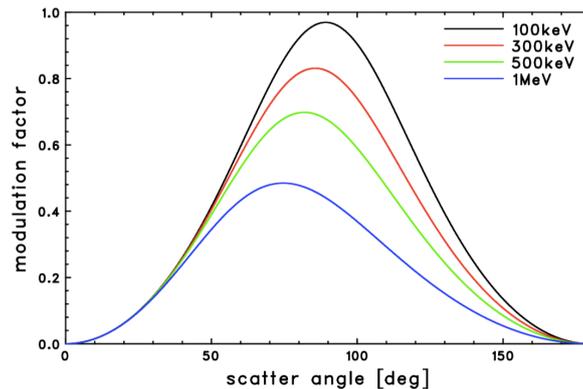


図 2.5: 散乱角とモジュレーションファクターの関係 [8]

入射光子の偏光度  $\Pi$  は、以下の式で算出することが出来る。

$$\Pi = \frac{1}{M_{100}} \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} = \frac{M_{obs}}{M_{100}} \quad (2.6)$$

ここで、 $M_{100}$  は 100%偏光の光子が入射した時のモジュレーションファクターである。この  $M_{100}$  は入射した偏光をどれほど装置が鈍さず検出するかを表す指標である。 $M_{100}$  が大きな偏光計の場合、偏光度  $\Pi$  が小さい時でも  $M_{obs}$  は大きな値となり、統計誤差の影響が相対的に小さく正確な観測が可能となる。よって、

$M_{100}$  がより大きいほど偏光計としての性能は良く、式 (2.5) より  $N_{min}/N_{max}$  が小さいほど  $M_{100}$  は 1 に近づき、偏光情報をよく保っていることを示す。 $M_{100}$  を大きくするためには、散乱体・吸収体のサイズを小さくしたり、散乱角を 90 度付近に制限する等の設計方法が考えられる。

実際の観測で偏光が検出できるか否かは、前述の  $M_{100}$  に加え、観測時間、天体信号強度、バックグラウンドによって決まる。検出器の偏光に対する観測感度の指標として、最小偏光感度 (Minimum Detectable Polarization; MDP) という値が用いられる。MDP は一般に 99% の信頼度で偏光観測が可能となる最低の偏光度で表される。MDP は以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
 \text{MDP}(99\%) &= \frac{4.29}{M_{100} \times R_S} \sqrt{\frac{R_S + R_B}{T}} \\
 &= \frac{4.29}{M_{100}} \sqrt{\frac{1}{R_S \times T} \cdot \frac{R_S + R_B}{R_S}} \\
 &\sim \frac{4.29}{M_{100}} \sqrt{\frac{1}{N}} \left( \because \frac{R_B}{R_S} \sim 0 \right)
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

ここで、 $R_S$ [counts/sec] は観測天体のカウントレート、 $R_B$ [counts/sec] はバックグラウンドレート、 $T$ [sec] は観測時間、検出粒子数  $N$ [counts] =  $R_S \times T$  である。MDP を小さくするためには、 $T, R_S, M_{100}$  を大きく、 $R_B$  を小さくすると良い。ここで、 $M_{obs}$  の統計誤差  $\sigma$  と MDP(99%) の間には以下の関係がある。

$$\text{MDP}(99\%) = 3.03 \times \sigma \tag{2.8}$$

この式から、MDP(99%) が分かれば、 $M_{obs}$  や偏光度の統計誤差を予想することが出来る。

## 第3章 SGD データ処理ソフトウェア検証

### 3.1 データ処理ソフトウェア概要

SGD の観測により取得された生のデータは、入射光子のエネルギーを計算したり、コンプトン運動学を用いて光子の到来方向を制限するなど複雑なデータ処理を行う。観測データに対しては大きく分けて ASIC データの展開、エネルギー較正、コンプトン再較正の3段階処理が行われる。これら一連のプロセスはパイプラインプロセスと呼ばれる。これらの処理をそれぞれ行うため、処理ソフトウェアが開発されている(図 3.1)。

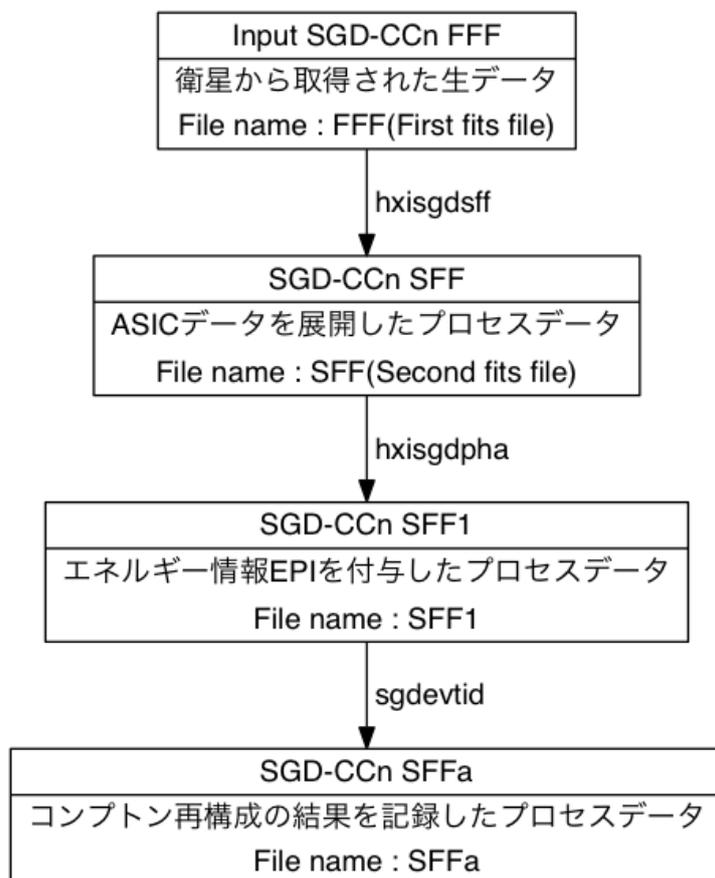


図 3.1: SGD データのパイプラインプロセスの流れ

まず最初にテレメトリから得られた ASIC の出力データを展開する。この処理を行うソフトウェアが

hxisgdsff である。その後、エネルギー較正を行う。エネルギー較正とは、得られた ADC 値をエネルギー値に変換する処理である。SGD には大量の取得信号を処理するために ASIC が用いられている。ノルウェーの GM-Ideas やアメリカ合衆国の SLAC などが共同で低雑音の信号読み出し ASIC として「VATA」シリーズが開発されており、SGD に搭載されている。この ASIC ではウィルキンソン型 ADC を搭載している。(図 3.2) ウィルキンソン型 ADC は、入力パルスとランプ電圧の波高を連続的に比較する。ランプ波形が入力パルスに到達するまでのクロック数がアナログ波高と同等となり、これを ADC 値としてアドレスレジスタに記録する。ADC 値では物理的意味を持たないのでエネルギー値に変換を行う。この処理を行うソフトウェアが hxisgdpha である。

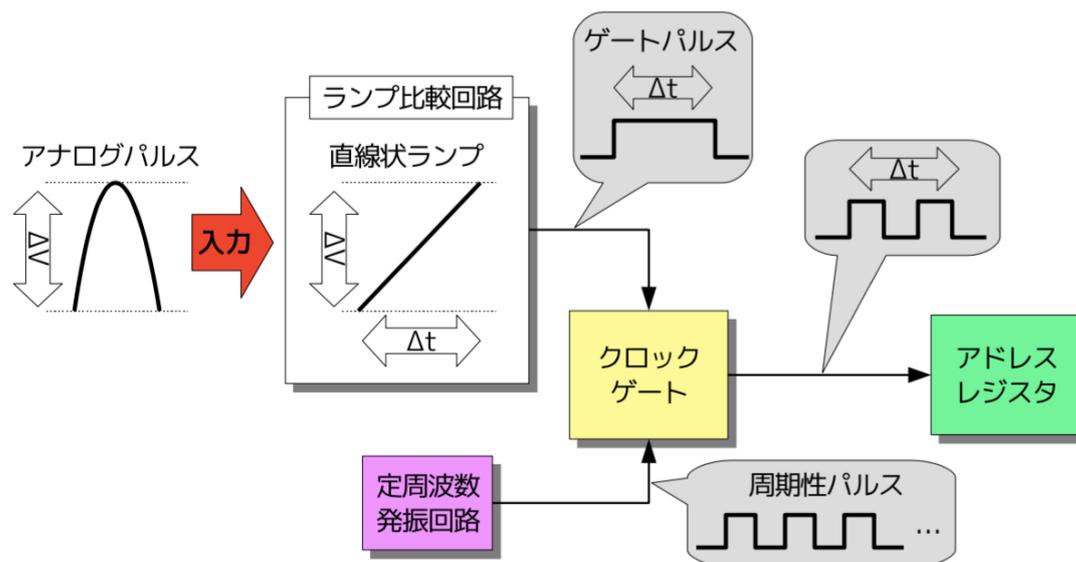


図 3.2: ウィルキンソン型 ADC のブロック図

最後に行うのがコンプトン再構成である。各ピクセルの取得エネルギー値から、入射光子が元々持っていたエネルギーや、どのように検出部で散乱されたかを算出する。この処理を行うソフトウェアが sgdevtid である。表 3.1 に、sgdevtid により出力されるデータに記録される情報について記述した。

ここで、本論文で用いる用語について説明する。コンプトンカメラで検出した 1 事象を「オカーレンス」、1 オカーレンス内で光子が放射線検出部と起こした各相互作用を「シグナル」と呼称する。観測で得られたオカーレンスに対して ID 番号を付けたものが表中の「OCCURRENCE.ID」、各オカーレンスで発生したシグナルの数が「NUMSIGNAL」として記録されている。基本的に 1 オカーレンスは 1 つの入射光子が起こす一連の相互作用を表す。しかし、同時に複数の光子が入射したり、そもそも光子が入射せず検出器内部で発生したノイズによりオカーレンスが形成される可能性もある。また、基本的にシグナルは 1 つの入射光子のコンプトン散乱・光電吸収に対応するが、隣接ピクセルからのチャージシェアリングや蛍光 X 線、反跳電子、検出器内部のノイズ等によってシグナルが形成される可能性もある。これらと区別するため次の用語も使用する。純粋な 1 光子が起こした各相互作用を「イベント」、1 イベント内で光子が放射線検出部と起こした各相互作用を「ヒット」と定義する。イベントやヒットの判定方法は § 3.2 で述べる。

SGD においては、特にこのコンプトン再構成プロセスが重要となるため、本研究では偏光解析を行う前

に sgdevtid が正しくデータプロセスを行っているかの検証を行った。

Column	Description and Values
TIME	Mission elapsed time; Time in seconds since 01 Jan 2014 00:00:00
OCCURRENCE_ID	Sequential Number for occurrence
CATEGORY	Data recorder priority; High=85 Medium=101 Low=117
FLAG_LCHKMIO	MIO received data; 0=ok 1=error
FLAG_CCBUSY	Compton Camera busy; 1=CC busy 0=CC not busy
FLAG_HITPAT_CC	Compton Camera hit pattern
FLAG_HITPAT	BGO shield hit pattern; Always 0 in cleaned events
FLAG_FASTBGO	Fast BGO shield hit pattern; Always 0 in cleaned events
FLAG_SEU	SEU flag; Always 0 in cleaned events
FLAG_LCHK	Length check flag; Always 0 in cleaned events
FLAG_CALMODE	Calibration mode flag; 1=calibration mode 0=other
FLAG_TRIGPAT	Trigger pattern
FLAG_TRIG	Trigger origin
LIVETIME	Time since previous occurrence; 24-bit counter, unit
PROC_STATUS	Record bad telemetry or bad values; Always 0 in cleaned events
STATUS	Occurrence status Flags
PI	Pulse Invariant; 0:2047
ENE_TOTAL	Sum of EPI for occurrence
NUMSIGNAL	Number of signals in occurrence
NUMHITS	Hit distribution; 1bits=1hits 2bits=2hits 3bits=3hits 4bits=4hits 5bits=escape
SEQ_HITS	Sequence of hits from CALDB; Values correspond to CALDB file ah_sgd_probseq_xxx.fits
DELCOMPTON	Value of DeltaG (for >2 hits); Error on difference between geometric and kinematic scattering angles
COMPTON_TH	Kinematic Compton scattering angle ( $\theta$ ); 0:180
COMPTON_PH	Kinematic Compton scattering angle ( $\phi$ ); -180:180
DISTANCE0	(mm) Distance between 1st two hits
OFFAXIS	Angle (degrees) between line of sight and Compton scattering angle
CAMERAX	1st hit coord camerax; -39:39
CAMERAY	1st hit coord cameray; -39:39
CAMERAZ	1st hit coord cameraz; -77:3
LIKELIHOOD	Likelihood of event; 0:1
RECO_STATUS	Reconstruction Status; Always 0 in cleaned events
MATTYPE	Material where the event originated: 1=Si Layer, 2=CdTe layer, 3=multiple layers.

表 3.1: SGD SFFa データコラム [2]

## 3.2 コンプトン再構成ソフトウェア sgdevtid

コンプトン再構成の原理については§ 2.2で述べた。この再構成プロセスを行うためのソフトウェア sgdevtid は、SGD 開発チームがその仕様をゴダード宇宙飛行センター (GSFC)/アメリカ航空宇宙局 (NASA) のソフトウェア開発チームグループに伝え、全世界に公開され解析に利用されることを目的として開発された。図 3.3 に示したように、sgdevtid のプロセスには大まかに分けて5つのステップがある。

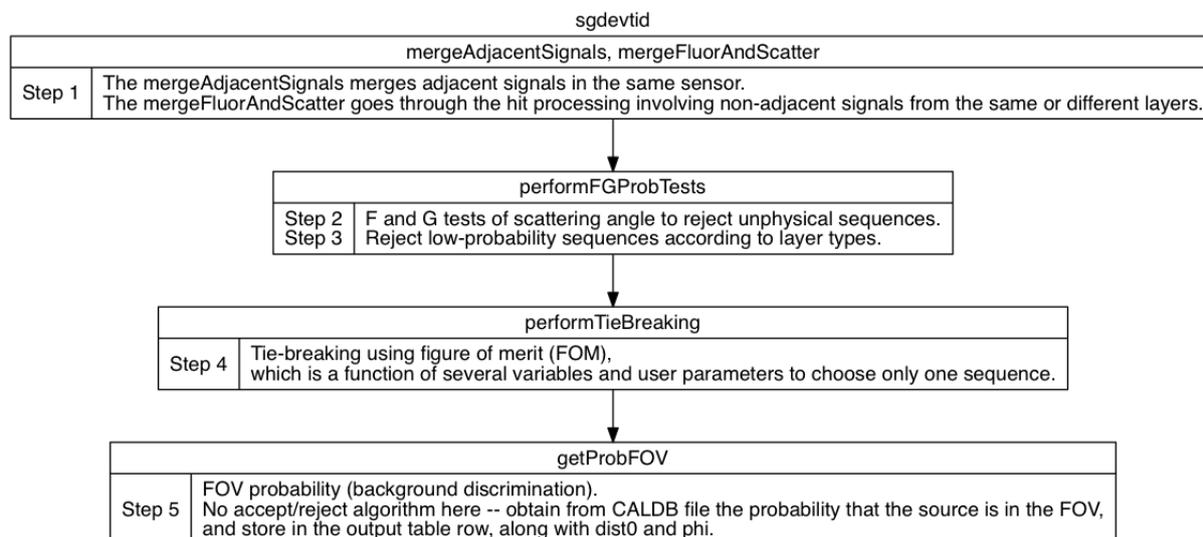


図 3.3: sgdevtid のフローチャート

Step1 では、チャージシェアリングや二次粒子による影響を補正する。正しくコンプトン再構成をするためには、各コンプトン散乱で検出部に落とすエネルギーを正確に測定する必要がある。このため、隣接ピクセル同士でのチャージシェアリングや、コンプトン散乱後に光電吸収されず検出外へ出ていくエスケープ、蛍光 X 線 (表 3.2)、反跳電子による影響を補正する必要がある (図 3.4)。下図に示したように、光子と相互作用した検出部の吸収エネルギーを  $E'_{\text{dep}}$ 、隣接した放射線検出ピクセル間で拡散したエネルギーを  $E_{\text{sha}}$ 、二次粒子により他の検出部に拡散したエネルギーを  $E_{\text{sec}}$  とすると、入射光子が検出部との相互作用で本来損失したエネルギー  $E_{\text{dep}}$  は、

$$E_{\text{dep}} = E'_{\text{dep}} + E_{\text{sha}} + E_{\text{sec}} \quad (3.1)$$

と表される。このように補正を行うには、元々の入射光子が散乱・吸収したと考えられる検出ピクセルでのシグナルに拡散したエネルギーを戻せば良く、この操作をマージと呼ぶ。実際には電荷拡散や二次粒子によるエネルギー拡散が 1 ヒット当たり複数回発生することも多く、電荷拡散が  $i$  回、二次粒子によるエネルギー拡散が  $j$  回だけ発生した場合、

$$E_{\text{dep}} = E'_{\text{dep}} + \sum_i E_{\text{shai}} + \sum_j E_{\text{secj}} \quad (3.2)$$

のように全ての拡散エネルギーをマージする必要がある。

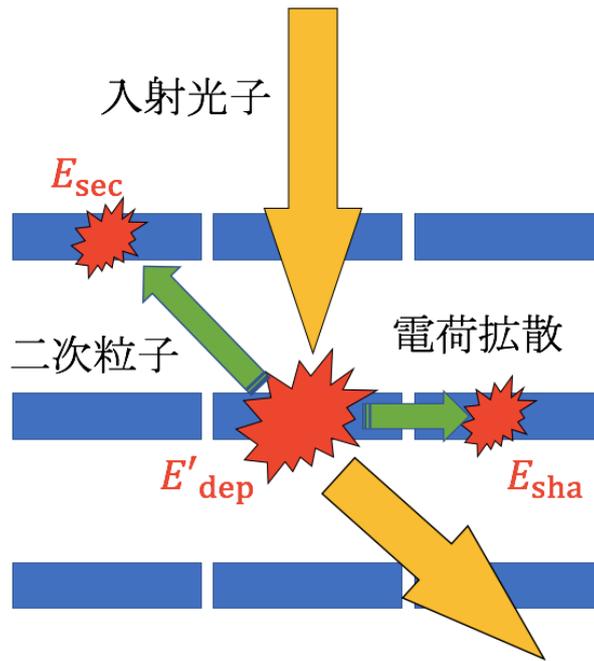


図 3.4: 隣接した放射線検出ピクセル間での電荷拡散と、蛍光 X 線や反跳電子によるエネルギー拡散

sgdevtid ではコンプトン再構成の前にまずこの処理を行っており、mergeAdjacentSignals 関数でチャージシェアリングの補正を、mergeFluorAndScatter 関数で蛍光 X 線の補正を行っている。この時点でマージしたシグナルがヒットであるとは限らない。入射光子が複数ある場合や、検出器ノイズの可能性があるのである。1つの入射光子によるイベントであるか判定するために以降の Step で判定していく。

特性 X 線	エネルギー [keV]	割合 [%]
$^{48}\text{Cd } K_{\alpha 1}$	23.174	46.1
$^{48}\text{Cd } K_{\alpha 2}$	22.984	24.5
$^{48}\text{Cd } K_{\beta 1}$	26.095	7.69
$^{52}\text{Te } K_{\alpha 1}$	27.472	46.2
$^{52}\text{Te } K_{\alpha 2}$	27.202	25.0
$^{52}\text{Te } K_{\beta 1}$	30.995	8.21

表 3.2: Cd,Te の特性 X 線のエネルギーと割合。この他にも特性 X 線は放射されるが、それぞれ高い割合の3つを記載した。[2]

Step2では、“F test”と”G test”を行う。どちらのテストも、マージしたシグナルのエネルギー値を用いてコンプトン再構成において物理的に有り得ないオカーレンスを排除する処理である。まず、“F test”について述べる。マージしたシグナルの数を  $n$  とすると、可能性のある  $n!$  通りのシーケンスから尤もらしいものを選ぶ。 $((\mathbf{r}_0, e_0), (\mathbf{r}_1, e_1), \dots, (\mathbf{r}_{n-1}, e_{n-1}))$  で表されるシーケンスが、 $n-1$  回のコンプトン散乱と最後に1回の光電吸収を起こすと仮定する。 $i(0 \leq i < n-1)$  番目の散乱の直前に入射光子が持っていたエネルギー

ギー  $E_i$  は  $E_i = e_i + e_{i+1} + \dots + e_{n-1}$  であり、散乱の直後に持つエネルギー  $E_{i+1}$  は  $E_{i+1} = e_{i+1} + \dots + e_{n-1}$  となる。この時、 $i$  番目のコンプトン運動学的散乱角  $\theta_{Ki}$  は、

$$\begin{aligned}\cos\theta_{Ki} &= 1 - \frac{m_e c^2}{E_{i+1}} + \frac{m_e c^2}{E_i} \\ &= 1 - \frac{m_e c^2}{E_{i+1}} + \frac{m_e c^2}{e_i + E_{i+1}}\end{aligned}\quad (3.3)$$

と表される。これらの  $n-1$  個全ての散乱角に対して  $-1 \leq \cos\theta_{Ki} \leq 1$  が満たされなければならない、この条件は、

$$f_i \equiv 2E_{i+1}^2 + 2E_{i+1}e_i - e_i m_e c^2 \geq 0 \quad (3.4)$$

となる。また、 $f_i$  のエネルギー分解能に由来する誤差は以下の式で表される。

$$\Delta f_i^2 = (4E_{i+1} + 2e_i)^2 \Delta E_{i+1}^2 + (2E_{i+1} - m_e c^2)^2 \Delta e_i^2 \quad (3.5)$$

$f_i + a\Delta f_i < 0$  を満たす  $i$  が一つでも存在している場合、そのオカーレンスは有り得ないと考え棄却する。 $a$  は調整可能なパラメータであり、パイプラインプロセスでは  $a = 3.0$  と設定している。

次に”G test”について述べる。シグナルの位置情報により幾何学的に散乱角を求めることが出来る。 $i$  番目の幾何学的散乱角  $\theta_{Gi}$  は以下のように表される。

$$\cos\theta_{Gi} = \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1}|} \cdot \frac{\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i|} \quad (3.6)$$

もしこれが1つの入射光子によるイベントの場合、 $\cos\theta_{Gi}$  と  $\cos\theta_{Ki}$  は一致しなければならない、この条件は、

$$g_i \equiv \cos\theta_{Gi} - \cos\theta_{Ki} = 0 \quad (3.7)$$

と表される。“F test”と同様にエネルギー分解能に由来する  $g_i$  の誤差  $\Delta g_i$  を計算することができる。 $g_i - b\Delta g_i < 0 < g_i + b\Delta g_i$  を満たさない  $i$  が一つでも存在している場合、そのオカーレンスは有り得ないと考え棄却する。 $b$  は調整可能なパラメータであり、パイプラインプロセスでは  $b = 3.0$  と設定している。次に Step3 では、確率の低いヒット順序候補を除外する。SGD には Si, CdTe-Bottom, CdTe-Side の3種類の検出部があるが、シミュレーションにより求めた各ヒット順序の確率がデータベースに記録されている。このデータベースを参照しながら、確率の低いヒット順序候補の除外を行う。以上で述べた Step2,3 を performFGProbTests 関数で行っている。

Step4 では、FOM(Figure of merit) を用いてヒット順序候補の除外を行う。FOM としては様々な量が提唱されているが、SGD においては狭視野コンプトンカメラというコンセプトに基づいて、再構成の結果と SGD の視線方向から計算される ARM (式 (2.2)) を FOM として用いる。sgdevtid では Step4 を performTieBreaking 関数で行っている。この Step までで、ヒット順序の確定プロセスは終了する。もし、Step2 から Step4 まででヒット順序が確定しなかった場合、それまでに残ったヒット順序候補からランダムに1つが選択される。

最後の Step5 では、これまでのステップで得られたヒット間距離や散乱方位角等の情報をもとに、光子が FOV(Field of view) の範囲から到来した可能性”LIKELIHOOD”を算出する。LIKELIHOOD 値は小さいほど確からしいことを表し、この値が天体方向からの光子とバックグラウンドを区別する指標となる。sgdevtid では Step5 を getProbFOV 関数で行っている。

### 3.3 sgdevtid の動作検証

コンプトンカメラを用いた X 線ガンマ線観測においては、特にコンプトン再構成プロセスが重要となるため、その処理を行う sgdevtid の動作検証は極めて重要である。検証を行うため本研究では、sgdevtid 出力ファイルの検証と、SGD 開発チームが独自に開発したコンプトン再構成ソフトウェア ComptonSoft との比較を行った。ComptonSoft は一戸修論 [15] で開発されたもので、SGD の各種性能評価試験において検証が重ねられてきた実績のあるソフトウェアである。sgdevtid はこの ComptonSoft を参考にしながら、ComptonSoft では取り入れることの出来なかったアルゴリズムを組み込んだ改良版コンプトン再構成ソフトである。

ここで、検証のために用いるデータについて述べる。今回は検証のために、かに星雲観測データを用いているが、公開されている観測データとは異なる処理を掛けているものである。通常の観測生データの処理では、ADC 値が低いなど、明らかにバックグラウンドと思われるシグナルは最初から除外してコンプトン再構成を行う。しかし、本検証ではソフトウェアが扱うオカーレンスを 1 つでも増やしたいので、全てのシグナルをプロセスしたデータを使用している。

#### 3.3.1 sgdevtid 出力ファイル SFFa の検証

§ 3.2 で述べたコンプトン再構成ソフト sgdevtid の動作検証のため、出力ファイルである SFFa データを調査した。sgdevtid にはデバッグや再構成プロセスの検証のために、プロセス経過を詳細に記録した trace ファイルを出力するオプションがある。trace ファイルのコラム情報について以下の表に示す (表 3.3)。

Column	Description and Values
M	Number of hits in occurrence
NUMPERM	Number of permutations
TEST_F	F test 1=pass 0=fail
TEST_G	G test 1=pass 0=fail
PROB	Sequence probability per permutation
FOM	Tie-breaking Figure of Merit per permutation
G_0	$\cos\theta_G(0) - \cos\theta_K(0)$
MERGE1_0	Merging in step 1_0 1=yes 0=no
MERGE1A_1A	Merging in step 1a_1a 1=yes 0=no
MERGE1A_1B	Merging in step 1a_1b 1=yes 0=no
MERGE1A_2	Merging in step 1a_2 1=yes 0=no
MERGE1A_3	Merging in step 1a_3 1=yes 0=no

表 3.3: trace ファイルのコラム情報。この他にもコラムは存在するが、今回の検証に主に関連するものを記載。

今回の検証では、マージプロセスが正しく行われているかの検証を行った。マージに関する trace ファイルコラムには主に以下の 5 つのコラムがある。

1. MERGE1\_0

チャージシェアリングにより生じたシグナルをマージした時、値が1となる。

2. MERGE1A\_1A

CdTe の蛍光 X 線が同一レイヤーに吸収され生じたシグナルをマージした時、値が1となる。

3. MERGE1A\_1B

CdTe の蛍光 X 線が別のレイヤーに吸収され生じたシグナルをマージした時、値が1となる。

4. MERGE1A\_2

CdTe の蛍光 X 線が Si に吸収され生じたシグナルをマージした時、値が1となる。

5. MERGE1A\_3

Si の反跳電子が他の検出部に吸収され生じたシグナルをマージした時、値が1となる。

これらの値と、表 3.1 の中の”MATTYPE”を見比べて、物理的に正しいマージが行われているかを調べる。MATTYPE はそのイベントにおいて、どこの SGD 検出部でヒットしたかを表す値であり、Si に 1 ヒットなら値は 1、CdTe に 1 ヒットなら値は 2、2 ヒット以上なら値は 3 を取る。各マージフラグと MATTYPE の 2 次元頻度分布を作成した (図 3.5)。

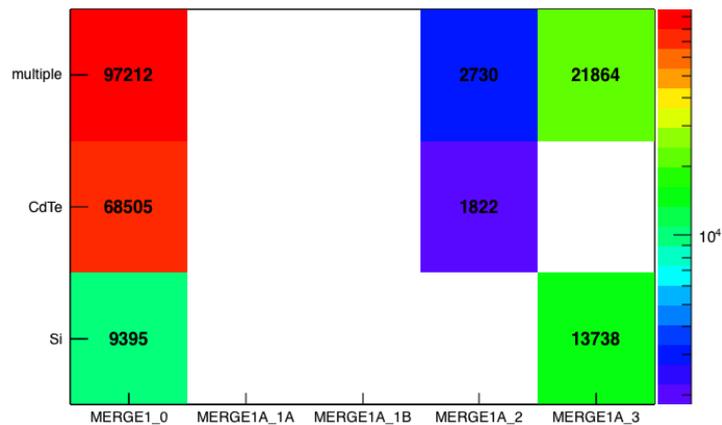


図 3.5: 横軸が各マージフラグ、縦軸が MATTYPE。全 SGD イベントを使用。

この図の中には、物理的にイベントが存在しえない領域がある。以下の図に示した 2 つの領域である (図 3.6)。まず青色で示した領域 1 のイベントは、MATTYPE より Si の 1 ヒットイベントである。MERGE1A\_1A・MERGE1A\_1B・MERGE1A\_2 のフラグが立つ場合、CdTe の蛍光 X 線によるシグナルのマージが行われるため、1 ヒットの場所は Si ではなく CdTe になるはずである。このため領域 1 にイベントが存在してはいけない。同様に緑色で示した領域 2 のイベントは、CdTe の 1 ヒットイベントである。MERGE1A\_3 のフラグが立つ場合、Si の反跳電子によるシグナルのマージが行われるため、1 ヒットの場所は CdTe でなく Si になるはずである。このため領域 2 にもイベントは存在してはいけない。

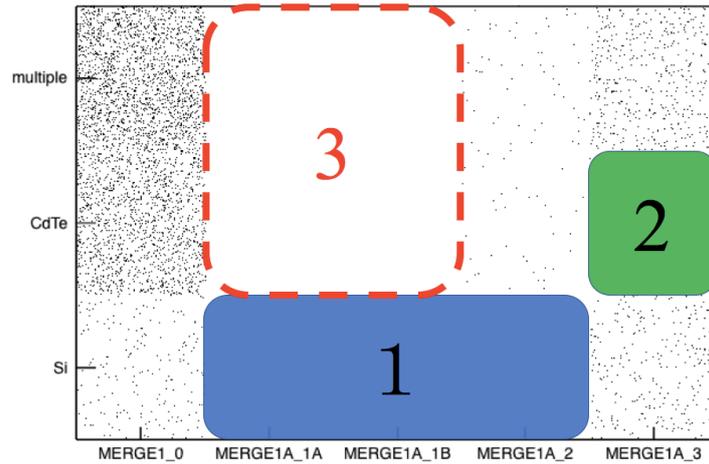


図 3.6: 物理的にイベントが存在しえない領域 1 と領域 2。イベントが存在可能なのに 1 イベントも無かった領域 3。

図 3.5 を見ると、領域 1 や領域 2 には 1 イベントも存在しておらず、明らかに物理的におかしなマージが行われていることは無いことが分かる。ところが、赤色で示した領域 3 に 1 イベントも存在しておらず不自然である。以下に Si と CdTe の検出部の厚さと検出効率の関係を示す (図 3.7)。表 2.1 より Si の実効厚さは 0.06 mm、CdTe の実効厚さは 0.75 mm であり、表 3.2 より CdTe の蛍光 X 線は 20 – 30 keV 程度である。左図を見ると 40 keV 光子の時点で、0.75 mm の CdTe の検出効率はほぼ 100 % となっている。右図の 100 keV 光子の検出効率と見比べると分かるが、入射光子のエネルギーが小さいほど、検出効率は上がる。このため、20 – 30 keV 程度の CdTe 蛍光 X 線は、同一レイヤー、または隣接レイヤーの CdTe に入射するとほぼ全てが検出されるはずである。従って領域 3 にイベント存在しないのは物理的に考えて不自然と言える。また、CdTe 蛍光 X 線が Si に飛来した MERGE1A\_2 について見ると、こちらではイベントが存在しており、検出効率が低いはずの Si では CdTe 蛍光 X 線を検出できていることになる。

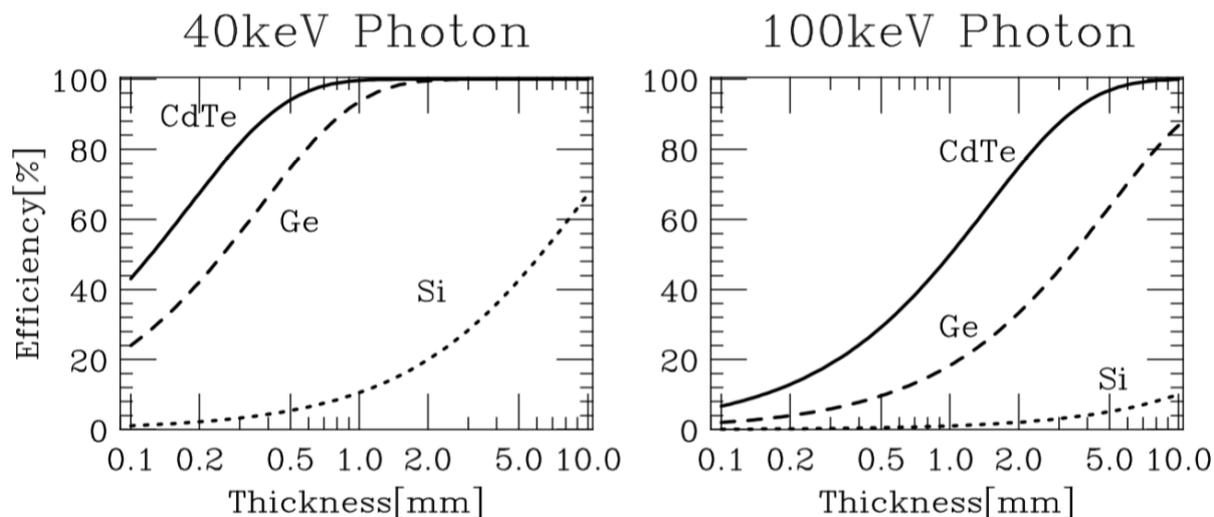


図 3.7: 40 keV と 100 keV のガンマ線に対する Si, CdTe, Ge の検出部の厚さと検出効率の関係。[17]

この不可解な現象を調査したところ、sgdevtid の不具合であることが分かった。図 3.3 の Step1 における、マージプロセスにおけるアルゴリズムのフローチャートを以下に示す (図 3.8)。sgdevtid ではシグナルのマージプロセスを行う際に、各 CdTe 蛍光 X 線のエネルギーを記録したデータベースにアクセスし (図中の "Fluorescence table")、シグナルのエネルギー値が分解能の範囲内で一致していれば蛍光 X 線由来であると判定する。データベースを参照する時に、必要なコラム名を sgdevtid で指定するが、データベースとソフトウェアの間でコラム名が一致していなかった。このため、MERGE1A\_1A, MERGE1A\_1B のプロセス時に正しくデータベースにアクセス出来ず、CdTe 蛍光 X 線によるシグナルであるという判定が不能であったためマージプロセスが正常に行われていなかった。

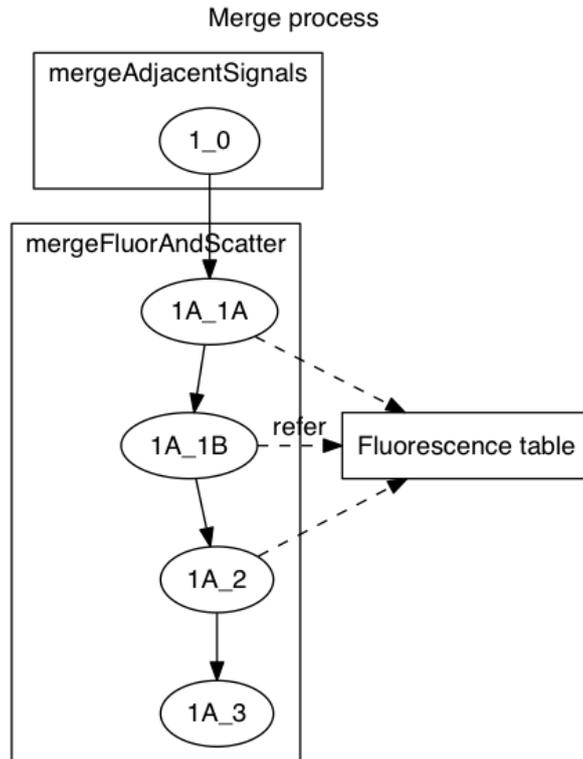


図 3.8: シグナルマージプロセスのフローチャート

この不具合を修正した結果を以下の図 3.9 に示す。図 3.6 における領域 3 にイベントが存在するようになっており、MERGE1A.1A, MERGE1A.1B が正しく処理されるようになったことが分かる。また、領域 1 や領域 2 には変わらずイベントが存在しておらず、物理的におかしのマージが行われていることは無い。今回の修正は CdTe にヒットしたイベントに影響するものであり、Si のみにヒットしたイベントには影響が無いはずである。この図の Si 1 ヒットに関するイベントを見ると（最下の 1 行）、どのビンも図 3.5 のイベント数と変化が無いことが分かり、正しく sgdevtid の修正が行われていることが示唆される。今後の解析ではこの不具合を修正して再プロセスした SFFa データを用いる。

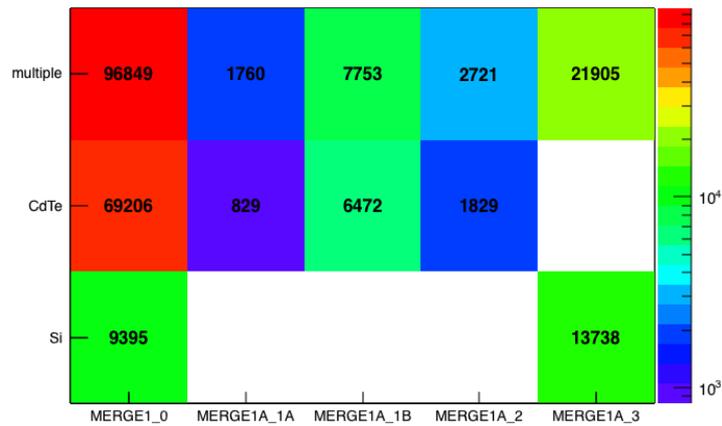


図 3.9: 不具合を修正後。横軸が各マージフラグ、縦軸が MATTYPE。

### 3.3.2 SGD 開発チーム開発コンプトン再構成ソフトウェアとの比較

次に、SGD 開発チームが地上試験等で用いてきた ComptonSoft (一戸修論 [15] で開発) と sgdevtid の比較解析を行った。ComptonSoft は、SGD の各種試験において検証が重ねられており [16]、これとの整合性を確認することでパイプラインプロセス出力データの健全性を確かめることが出来る (表 3.4)。

	ComptonSoft	sgdevtid
作成者	SGD 開発チーム	GSFC/NASA のソフトウェア開発チーム
概要	各性能評価試験において検証が重ねられた実績のあるコンプトン再構成ソフトウェア	ひとみ衛星のため作成され、ComptonSoft に組み込めなかったアルゴリズムを実装した改良版 ComptonSoft

表 3.4: sgdevtid と ComptonSoft

まず、今回の検証で主に用いるコラムについて述べる。表 3.1 の内、以下のコラムについて調べた。

1. NUMHITS

1 イベントで入射光子が検出器と相互作用した回数 (ヒット数)

2. CAMERAX, CAMERAY, CAMERAZ

1 ヒット目の検出器内座標位置

3. DISTANCE0

1 ヒット目と 2 ヒット目の距離

4. COMPTON\_TH

1 ヒットと 2 ヒットの位置関係から計算したコンプトン散乱角

## 5. COMPTON\_PH

1 ヒットと 2 ヒットの位置関係から計算したコンプトン散乱方位角

## 6. OFFAXIS

コンプトン運動学的散乱角と幾何学的散乱角の差 (ARM 値)

## 7. ENE.TOTAL

全ヒットのエネルギー合計 (入射光子が本来持っていたエネルギー)

各コラムについての頻度分布を両者で作成し、残差を調べた。以下に各コラムの頻度分布比較図と残差を示す。Crab 観測データにおける全ての SGD データを合計して解析している。黒が sgdevtid 出力データ、赤が ComptonSoft 出力データを表し、頻度分布の下に sgdevtid を 0% 基準とした残差図を示した。この比較解析では、sgdevtid と ComptonSoft で同一の観測データを用いているため、放射線計測などでよく用いられる計数  $N$  に対する統計誤差  $\sqrt{N}$  で誤差を評価することは不適切である [22]。このため、今回の解析では誤差の評価を行っていない。

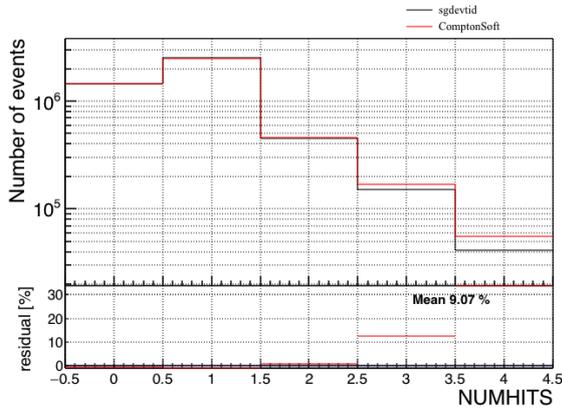


図 3.10: "NUMHITS" 比較

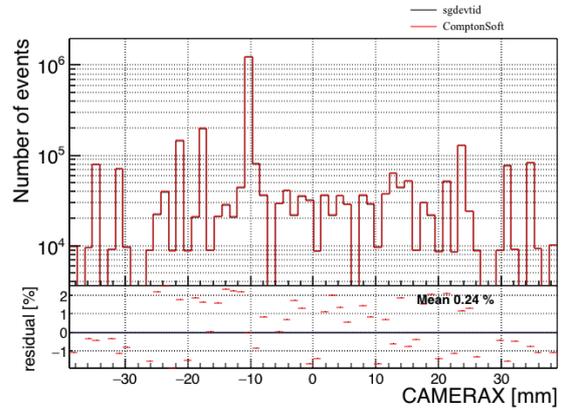


図 3.11: "CAMERAX" 比較

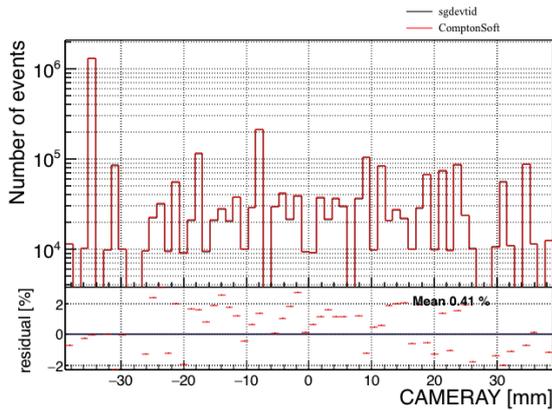


図 3.12: "CAMERAY" 比較

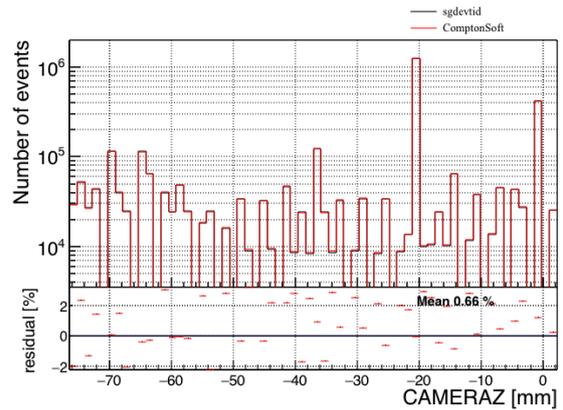


図 3.13: "CAMERAZ" 比較

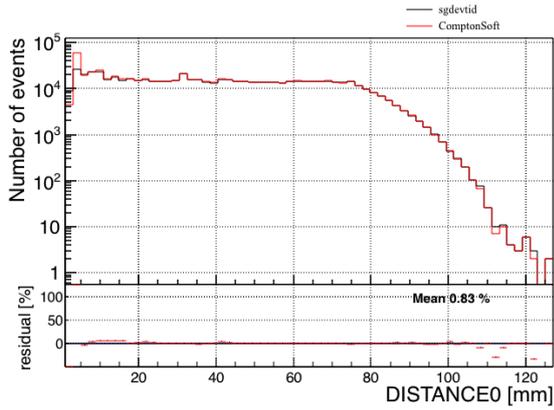


図 3.14: "DISTANCE0" 比較

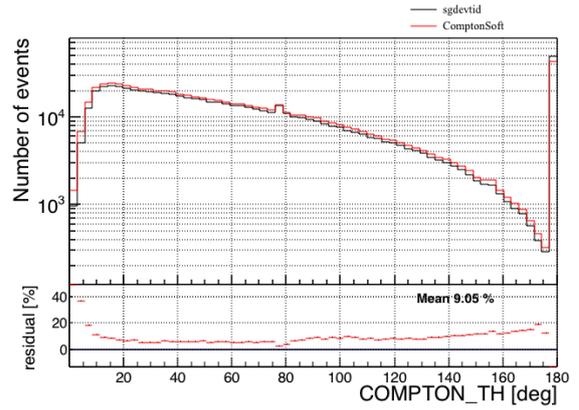


図 3.15: "COMPTON\_TH" 比較

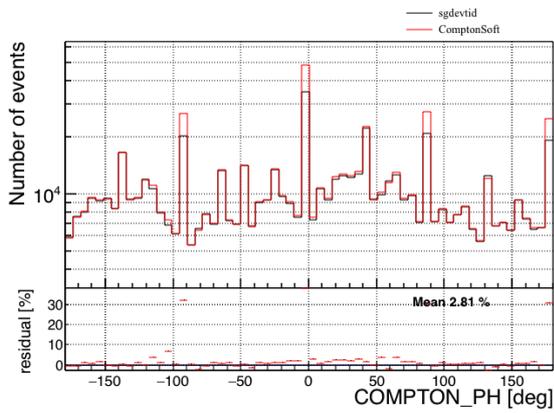


図 3.16: "COMPTON\_PH" 比較

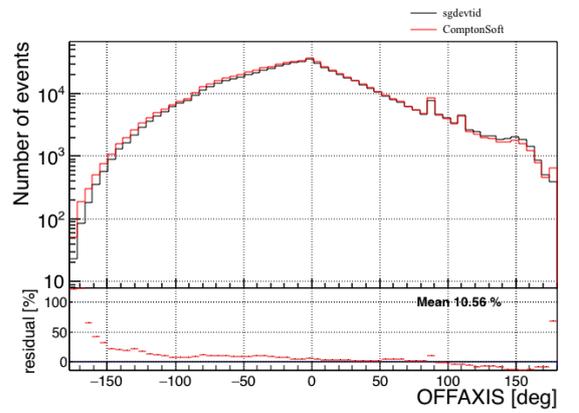


図 3.17: "OFFAXIS" 比較

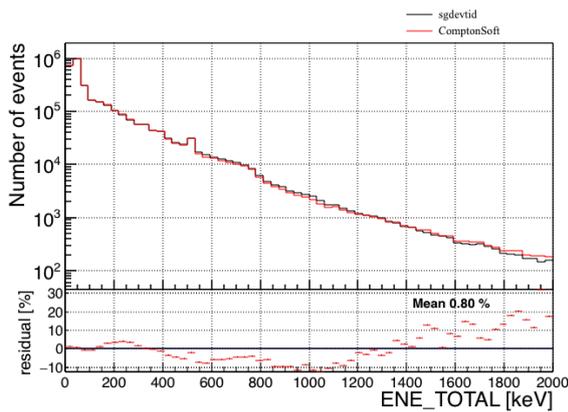


図 3.18: "ENE\_TOTAL" 比較

Column	平均残差 [%]
NUMHITS	9
CAMERAX	0.2
CAMERAY	0.4
CAMERAZ	0.7
DISTANCE0	0.8
COMPTON_TH	9
COMPTON_PH	3
OFFAXIS	10
ENE_TOTAL	0.8

表 3.5: 各コラムの平均残差

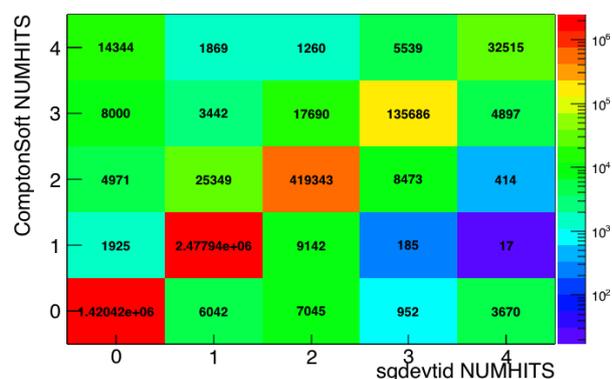
平均誤差が1%を大きく超えるコラムや、全体としての平均誤差は小さいが局所的に残差が大きくなっているコラムが存在している。この原因について調べた。各データやソースコードを比較解析したところ、大きく分けて以下の2点が異なり、表 3.5 の残差を生み出していることが分かった。

1. ヒット数 NUMHITS が仕様の違いにより異なる
2. ヒットの順序が仕様の違いにより異なる

この2点について、それぞれ考察を行う。

## ヒット数の違い

両者のデータを比較すると、同じイベントでもヒット数が異なる場合があることが分かった。以下にヒット数を比較した2次元頻度分布を示す(図 3.19)。多くのイベントが  $y = x$  上に存在し、sgdevtid と ComptonSoft でヒット数が一致しているが、それ以外の所にもイベントが存在している。ヒット数が一致しないイベントは全体の約2.7%であった(表 3.6)。



	イベント数	割合 [%]
全イベント	4,611,127	100
ヒット数不一致イベント	125,226	2.7

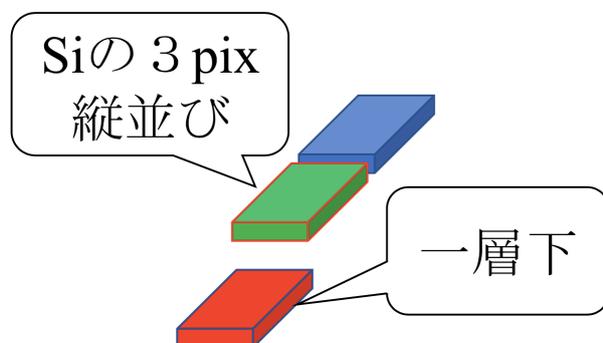
表 3.6: ヒット数不一致イベントの数と割合

図 3.19: ヒット数比較。横軸が sgdevtid のヒット数、縦軸が ComptonSoft のヒット数。

ヒット数が異なる原因は、シグナルをマージする際のアルゴリズムが異なっているためである。ヒット数が異なる1イベントについて抜き出して考察を行う。SGD1CC1のOCCURRENCE\_IDが80654のイベントは、sgdevtidでは1ヒット、ComptonSoftでは2ヒットと判定された。このイベントはY軸方向に連なって3シグナルが存在しており、Yの値が最小のシグナルのみ1層下のピクセルで発生している。このうちどこをヒット位置とするかで判断が別れており、sgdevtidでは中間の緑で1ヒット、ComptonSoftでは青が1ヒット目、赤が2ヒット目と判定されている。マージプロセスを調べてみると、sgdevtidでは、最初にmergeAdjacentSignals関数によって隣接ピクセルの上層2シグナルのうち、ADC値の高い緑ピクセルにマージを行い(青→緑)、次に赤シグナルが緑から放出されたSi反跳電子であると判定され緑ピクセルにマージされる(赤→緑)。これに対してComptonSoftでは、隣接ピクセルマージの前段階にSi反跳電子によるマージがまず行われる(緑→赤)。この理由はComptonSoftでは、各ピクセルに振られている読み出しID番号の若いピクセルから注目して、周辺に拡散したエネルギーが存在しないかを探索するため

ある。3つのピクセルの中で赤のピクセルが最も ID 番号が若いため、ComptonSoft は最初に赤とその付近でシグナルを検出していた緑とのエネルギー・位置関係を調べ、Si 反跳電子であると判定してマージを行った。その後、赤と青のピクセル関係を調べてエネルギー拡散が起こったものではないと判定し、マージが行われず2ヒットとなった。

このように、マージプロセスの仕様の違いによって両方でヒット数が異なってしまうことがある。



	sgdevtid	ComptonSoft
ヒット数	1	2
1 ヒット目位置	緑	青
2 ヒット目位置		赤
マージ 1 回目	1.0 (青 → 緑)	1A.3 (緑 → 赤)
マージ 2 回目	1A.3 (赤 → 緑)	

図 3.20: ヒット数が異なるイベント例。sgdevtid では緑で1ヒット、ComptonSoft では青が1ヒット目、赤が2ヒット目と判定された。

表 3.7: OCCURRENCE\_ID:80654 のイベントのマージプロセスの違い

## ヒット順序の違い

次に1イベント内のヒットの順序に関して比較を行う。ヒット数が  $N$  の時、考えられるヒット順序は  $N!$  通りである。このうち、どのヒットの順番を採用したか両方で調べる。まず、前述のヒット数の違いによる影響を除外するため、両者のデータで同じ NUMHITS と判定されたイベントを選ぶ。今回の検証では、特に後述の偏光解析で重要となるため、両方で2ヒットと判定されたイベントを用いた。

2ヒットの場合考えられるヒット順序は2通りとなる。ここで、ヒット順序の一致不一致を判定するためのパラメータとして以下の2つを導入する。

- sgdevtid の1ヒット目と、ComptonSoft の1ヒット目の距離  $dis_1$
- sgdevtid の1ヒット目と、ComptonSoft の2ヒット目の距離  $dis_2$

例えば  $dis_1 < dis_2$  の場合、各1ヒット目が近いことを示しヒット順序が一致していることが示唆される。逆に  $dis_1 > dis_2$  の場合、ヒット順序が不一致であることが示唆される。以下に  $dis_1$  と  $dis_2$  を比較した2次元頻度分布を示す (図 3.21)。  $dis_1 \sim 0$  のヒット順序が一致しているイベントと、  $dis_2 \sim 0$  のヒット順序が真逆になっているイベントが存在していることが分かる。全2ヒット判定イベントに対して、ヒット順序が不一致なイベントは約1.3%存在していた。

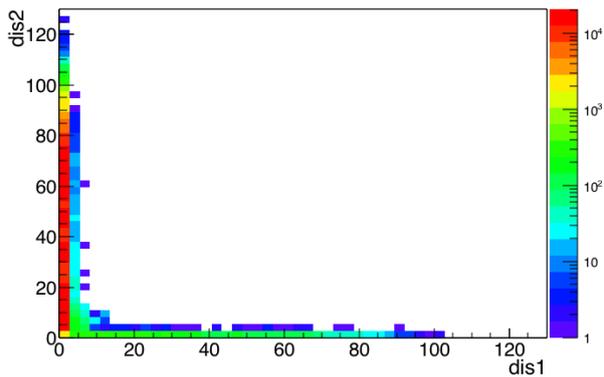


図 3.21: 横軸  $dis_1$  と縦軸  $dis_2$  の比較図。

	イベント数	割合 [%]
両者 2 ヒット判定イベント	419,137	100
ヒット順序不一致イベント	5,250	1.3

表 3.8: ヒット順序不一致イベントの数と割合

ヒット順序が異なるイベントが存在するのは、ヒットの順番を決めるアルゴリズムが異なっているためである。ヒット順序が異なる 1 イベントについて抜き出して考察を行う。SGD1CC1 の OCCURRENCE\_ID が 192216 のイベント (図 3.22) は、sgdevtid では CdTe-Side のピクセルが 1 ヒット目で CdTe-Bottom のピクセルが 2 ヒット目と判定され、ComptonSoft では CdTe-Bottom のピクセルが 1 ヒット目で CdTe-Side のピクセルが 2 ヒット目と判定されていた (表 3.9)。ここで解析のため、sgdevtid が採用したヒット順序を a 順序、ComptonSoft が採用したヒット順序を b 順序と呼ぶことにする。

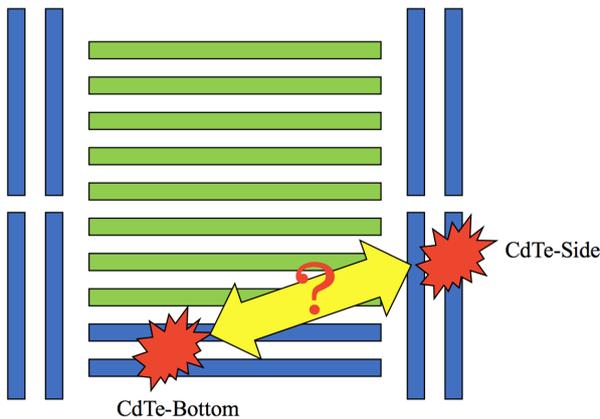


図 3.22: ヒット順序が異なるイベント例。緑が Si 検出器、青が CdTe 検出器。

	sgdevtid	ComptonSoft
ヒット数	2	2
1 ヒット目場所	CdTe-Side	CdTe-Bottom
2 ヒット目場所	CdTe-Bottom	CdTe-Side

表 3.9: OCCURRENCE\_ID:80654 のイベントのヒット順序の違い

それぞれのヒット順序決定過程を追ってみる。まず、sgdevtid では § 3.2 で述べたように、Step2 で”F test” や”G test” を行い、どちらのテストも通過した場合、Step3 の確率の低いヒット順序パターンの除外を行う。シミュレーション結果から各順序パターンの発生確率”PROBHITS” が調べられており、a 順序の CdTe-Side から CdTe-Bottom の 2 ヒットは 1.4%、b 順序の CdTe-Bottom から CdTe-Side の 2 ヒットは 8.6% である。sgdevtid のパラメータの中には、どれほどの確率以上のヒット順序パターンを採用するか決定する閾値”sequence probability threshold”が存在しており、この値は 1.0% と設定されている。つまり、発生確率が 1.0% 以上のヒット順序パターンならば採用されるため、a 順序と b 順序は共に Step3 を通過す

ることになる。

順序	PROBHITS[%]	sequence probability threshold[%]	採用されるか？
a	14	10	採用する
b	86	10	採用する

表 3.10: SGD1CC1 の OCCURRENCE\_ID:192216 のイベントの Step3 過程

次に行われる Step4 では FOM として OFFAXIS 値 (ARM 値) を比較することで尤もらしいヒット順序候補を選ぶ。OFFAXIS は検出器 Z 軸に対する光子の入射角を表し、視野方向に近い、つまり OFFAXIS が 0 deg に近い程、天体方向からの光子である確率が高いと言える。a 順序では OFFAXIS が 33.2394 deg、b 順序では 49.1804 deg と計算され、より視野方向近くから入射しているのは a 順序となる。従って sgdevtid では a 順序が尤もらしいと判定され採用されている。

順序	OFFAXIS[deg]	採用されるか？
a	33.2394	採用する
b	49.1804	採用しない

表 3.11: SGD1CC1 の OCCURRENCE\_ID:192216 のイベントの Step4 過程

これに対して ComptonSoft のヒット順序決定過程を追ってみる。Step3 ではシミュレーション結果から各順序パターンの発生確率”PROBHITS” が調べられている、と述べたがその際に各放射線検出部には検出部 ID として”SEQUENCE” 値が振られており、Si は 0、CdTe-Bottom は 1、CdTe-Side は 2、と設定されている。SGD では BGO アクティブシールドやファインコリメータにより、視野外からの光子混入を防ぐ設計がなされているため (図 1.8)、1 ヒット目は Si または CdTe-Bottom になる確率が高い。実際、表 3.10 で示した様にシミュレーション結果でも、a 順序の確率は b 順序に対して約 0.17 倍と非常に低い。このため、ComptonSoft では以下の条件をヒット順序決定のために課している。

$$(1 \text{ ヒット目の SEQUENCE 値}) < (2 \text{ ヒット目の SEQUENCE 値}) \quad (3.8)$$

つまり、a 順序の CdTe-Side から CdTe-Bottom へのヒットは確率が低いため ComptonSoft では棄却され、b 順序の CdTe-Bottom から CdTe-Side のヒットが採用される (表 3.12)。このように、ヒット順序確定プロセスの仕様の違いによって両方でヒット順序が異なってしまうことがある。

順序	ヒット	SEQUENCE 値	採用されるか？
a	1 ヒット目 CdTe-Side	3	採用しない
	2 ヒット目 CdTe-Bottom	2	
b	1 ヒット目 CdTe-Bottom	2	採用する
	2 ヒット目 CdTe-Side	3	

表 3.12: ComptonSoft のヒット順序確定プロセス

以上で述べた、仕様の違いによりヒット順序が異なるイベントを除外して各コラムの平均残差を調べる。

両方で2ヒットと判定されたイベントを抽出しているので、“NUMHITS”のコラムは完全に一致することが自明なため、それ以外のコラムについて以下に示す。黒がsgdevtid出力データ、赤がComptonSoft出力データを表し、頻度分布の下にsgdevtidを0%基準とした残差図を示す。各コラムは平均残差が1%未満で一致しており、sgdevtidとComptonSoftは仕様の違いの影響を除外すれば、殆ど同様のコンプトン再構成を行っていることが分かった。

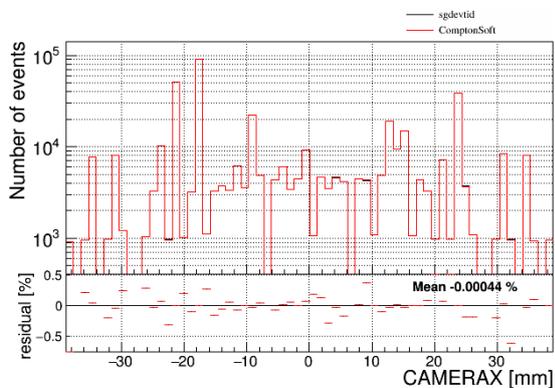


図 3.23: 仕様の違いの影響を除外した”CAMERAX”比較

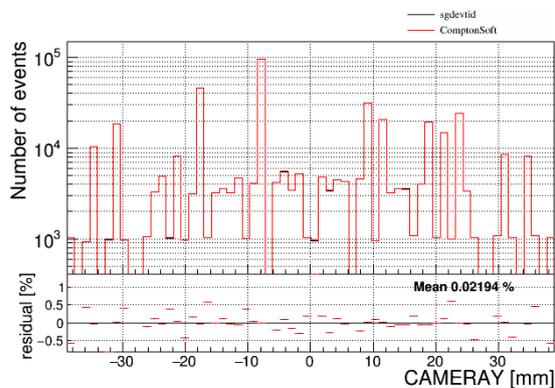


図 3.24: 仕様の違いの影響を除外した”CAMERAY”比較

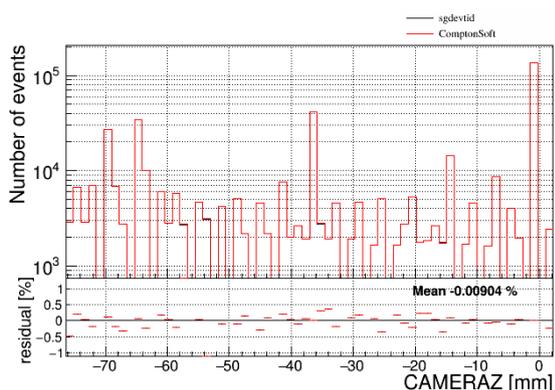


図 3.25: 仕様の違いの影響を除外した”CAMERAZ”比較

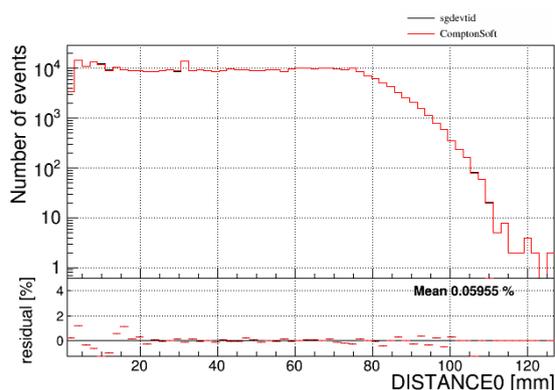


図 3.26: 仕様の違いの影響を除外した”DISTANCE0”比較

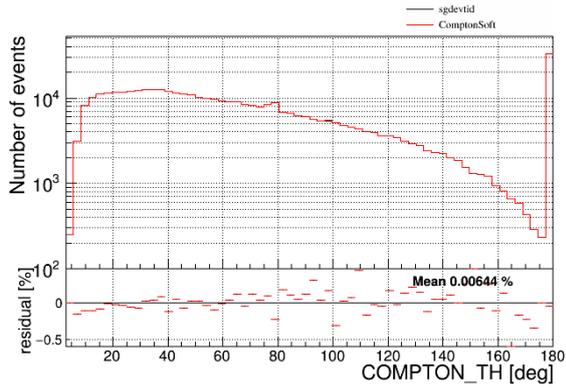


図 3.27: 仕様の違いの影響を除外した”COMPTON\_TH”比較

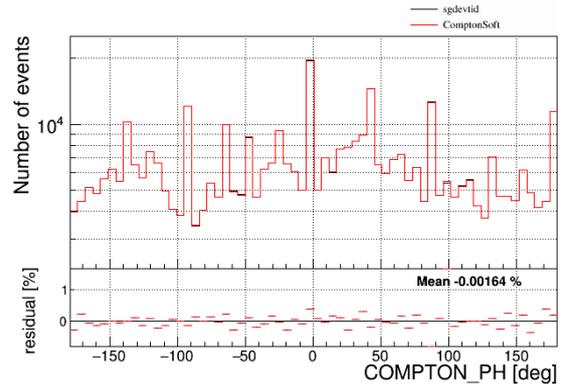


図 3.28: 仕様の違いの影響を除外した”COMPTON\_PH”比較

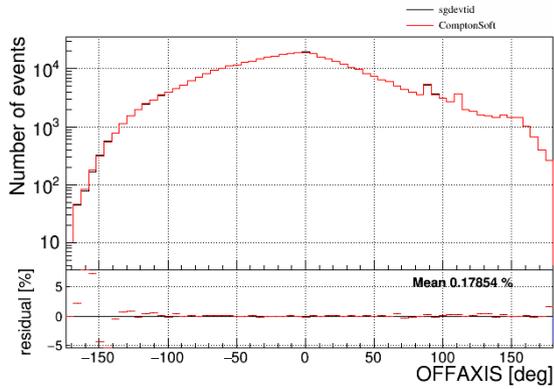


図 3.29: 仕様の違いの影響を除外した”OFFAXIS”比較

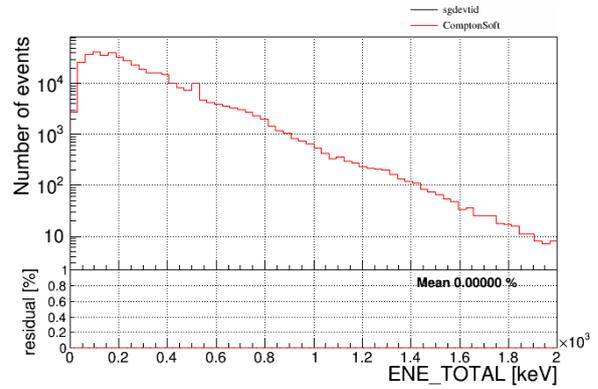


図 3.30: 仕様の違いの影響を除外した”ENE\_TOTAL”比較

Column	全イベントの平均残差 [%]	仕様の違いの影響を除外した平均残差 [%]
NUMHITS	9	0
CAMERAX	0.2	-0.0004
CAMERAY	0.4	0.02
CAMERAZ	0.7	-0.009
DISTANCE0	0.8	0.06
COMPTON_TH	9	0.006
COMPTON_PH	3	-0.002
OFFAXIS	10	0.2
ENE_TOTAL	0.8	0

表 3.13: 仕様の違いの影響を除外した各コラムの平均残差

### 3.3.3 sgdevtid 動作検証の結果と結論

ひとみ衛星のために様々なデータ処理ソフトウェアが GSFC/NASA のソフトウェア開発チームによって新しく作成されたが、そのうち SGD において特に重要なプロセスであるコンプトン再構成を行うソフトウェア sgdevtid の動作検証を行った。

まず始めに出力データ SFFa の検証解析を行った (§ 3.3.1)。この検証により CdTe 蛍光 X 線が CdTe ピクセルに当たった場合のマージプロセスにおいて不具合を発見し、sgdevtid プログラムの該当箇所を修正、物理的に正しいデータが出力されるようになったことを確認した。

次に SGD 開発チームが開発し、SGD の各種性能評価試験において検証の重ねられてきた実績のある再構成ソフトウェア ComptonSoft との比較を行った (§ 3.3.2)。同様のデータを2つのソフトウェアに入力し、出力データの各コラム情報を比較解析すると両者に差があることが確認された。検証の結果、判明した差が生まれる原因としては、ヒット数が異なる場合があること、そしてヒット順序が異なる場合があることである。ヒット数が一致しないイベントは全体の2.7%確認され、その要因はマージプロセスの仕様の違いによって説明できた。ヒット順序が一致しないイベントは、両方のソフトウェアで共に2ヒットと判定されたイベントのうち1.3%確認され、その要因はヒット順序確定プロセスの違いによって説明できた。仕様の違いの影響を除外して各コラムを比較すると、全てのコラムで平均残差が1%未満で一致していることが分かった。従って、sgdevtid は仕様の違いの影響を除外すれば、実績のある ComptonSoft とほぼ同じコンプトン再構成を行っていることが分かった。

以上の動作検証によって、sgdevtid は軌道上で得られた SGD 観測データに対して、正しくコンプトン再構成処理を行っていると考えられる。

## 第4章 偏光解析に向けたデータ処理の最適化

SGD はコンプトン散乱方向の偏光依存性を用いて偏光観測することが出来ると期待されている。本章では、X線偏光観測の実現に向けてどのように観測データを処理するのが最適であるかを考察する。

### 4.1 SGD 偏光観測に関する先行研究

ここでまず、これまで行われてきた SGD を用いた偏光観測に関する先行研究をまとめる。

SGD での偏光観測のためには検出器シミュレータが必要となる。以下に SPring-8 の偏光ビーム試験で得られたコンプトン散乱方位角分布を示す (図 4.1)。これは偏光方向が検出器の XY 平面に対して方位角-90 deg となるように照射した観測データであり、式 (2.4) から予想されるサインカーブからずれた形になっている。検出器の無偏光ビームに対する応答が各方位角に対して一定であればサインカーブに従うモジュレーションカーブとなるが、SGD は検出器が同心円状でないため一定にならないためである。このため、無偏光に対する方位角分布を事前に作成して、得られた観測データとの比を取ることによってモジュレーションカーブを取得する。放射線源を用いて検出器の無偏光応答を取得することも原理的には可能だが、広いエネルギー範囲で全検出ピクセルに渡って十分な統計の方位角分布を作成するには膨大な時間が必要となり現実的ではない。そこで、SGD の偏光観測では検出器のシミュレータを用いて無偏光に対する応答を取得する。

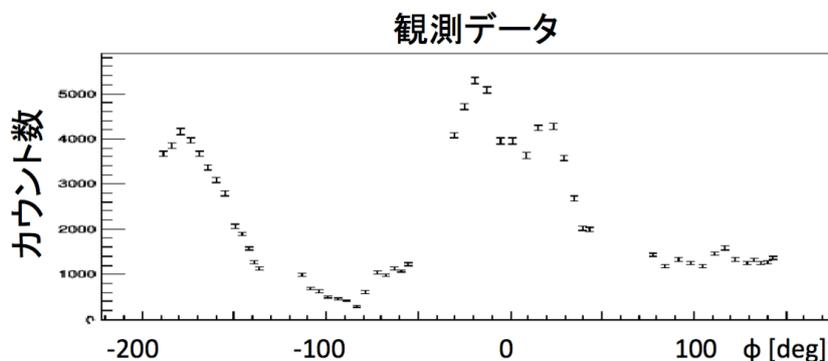


図 4.1: SPring-8 ビーム試験で得られた方位角分布。偏光角-90 deg のデータを使用。[12]

本研究で用いた検出器シミュレータは、モンテカルロ法を用いたシミュレーションツールである Geant4 を用いて行っている。Geant4 とは、粒子（陽子、電子、光子など）が物質中を通過する際に生じる相互作用をモンテカルロ法を用いて正確にシミュレーションする大規模ソフトウェア・パッケージである。高エネルギー物理学におけるシミュレーションの世界基準ツールキットであるが、加速器や宇宙、宇宙線、医療の分野でも世界的に使われている。Geant4 のツールキットにより SGD コンプトンカメラのジオメトリを設

計し、ガンマ線を照射してシミュレーションを行う (図 4.2)。検出器シミュレータのジオメトリは一戸修論 [15] で開発され、その後の各種 SGD 性能評価で検証が進められている。シミュレーションをする際は、ガンマ線のエネルギー、偏光角、偏光度、発生光子数、照射位置、照射サイズ、照射方向のパラメータを設定して行う。

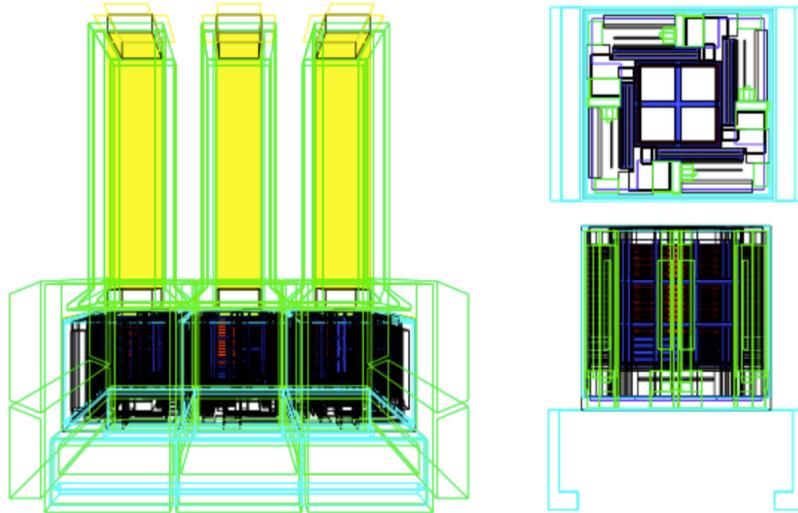


図 4.2: Geant4 で設計された SGD のジオメトリ。(左) SGD 1 台、(右) コンプトンカメラ 1 台。[15]

枝廣修論 [12] で、各シミュレーションパラメータの調整が行われている。以下に 122 keV、偏光角-91.5 deg の偏光ビームに対するシミュレーションと SPring-8 実験のモジュレーションカーブ比較図を示す (図 4.3)。黒が実験結果、赤がシミュレーション結果を表しており、検出器シミュレータは十分に実験結果を再現出来ている。

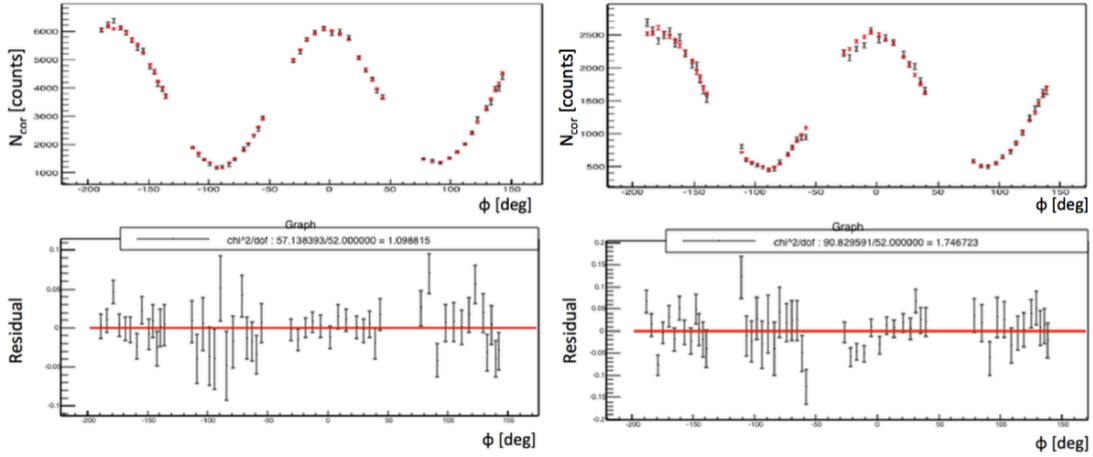


図 4.3: シミュレーションと実験結果の比較。黒が SP 実験、赤がシミュレーション。ASIC を通過して CdTe-Side に入射するイベントを除いている。下図が残差 (黒 - 赤)。左図が CdTe-Side の内側、右図が外側。[12]

## 4.2 偏光解析に向けたデータ処理方法の模索

偏光解析では、コンプトン散乱の異方性を十分に検出するために、限られた光子統計の中で可能な限り SN 比や MDP 値を良くするデータ処理を行う必要がある。本研究では、SGD を用いた偏光解析のために最も適切なデータ処理方法を模索し、それは物理的にどのように説明できるのかを考察していく。

### SN 比

ここでまず、放射線観測の質を表す SN 比 (信号/ノイズ比) について述べる。SN 比とは、観測したいシグナル  $S$  の高さを、シグナルの誤差  $N$  で割った値である (図 4.4)。天体観測における  $N$  とは、天体からの信号カウンタ数のポワソン揺らぎと、観測天体以外からの X 線信号・検出器が軌道上の荷電粒子により放射化したことによる放射線信号・宇宙線等のバックグラウンド信号のポワソン揺らぎや統計誤差が挙げられる。本研究における偏光解析の場合、 $N$  を生じさせる最も大きな要因は天体信号とバックグラウンドのポワソン揺らぎなので、信号の計数を  $C_s$ 、バックグラウンドの係数を  $C_b$  とすると、

$$S/N \simeq \frac{C_s}{\sqrt{C_s + C_b}} \quad (4.1)$$

と近似できる。SN 比が大きな値であるほど理想的な観測状況であることを表し、シグナルの検出効率を改善し  $S$  を増加させたり、上で挙げたバックグラウンドの除去率を向上させて  $N$  を減少させることによって向上させることが出来る。偏光解析では SN 比を改善することで、バックグラウンドによりモジュレーションカーブが鈍されてしまうことを防ぐことが出来る。このため本研究では、偏光解析に向けて SN 比を改善させるために、適切なデータ処理方法を模索する。

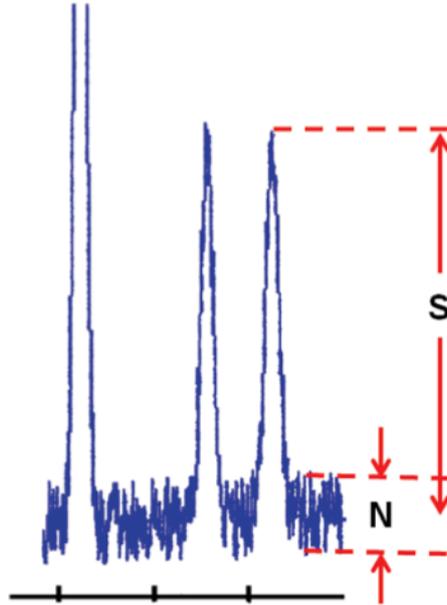


図 4.4: SN 比の概念図 [23]

## 解析に使用するデータについて

SGD は天体観測と同時にバックグラウンドを測定することは出来ない。このため、天体観測時と出来るだけ近い軌道条件で、かつ天体等の光源方向に向いていない時間をバックグラウンドとして使用する必要がある。

本研究では衛星の初期機能確認フェーズ中に取得された、かに星雲の観測データと、その観測の 24 時間前に取得された観測データを用いる。かに星雲観測の 24 時間前には図 1.5 で記したように、RXJ1856.5-3754 と呼ばれる知られている中で最も太陽系に近い中性子星を観測している。この天体は SGD の観測エネルギー帯域と異なる放射をしているため、バックグラウンドデータとして用いることが出来る。下図は各観測時における衛星軌道を表し、横軸が経度、縦軸が緯度である (図 4.5)。青四角がかに星雲観測時、黒四角が前日観測時の軌道であり、両者はほぼ同一の軌道を通過している。以下で述べるが、軌道上のバックグラウンド源はその軌道付近の地磁気に依存するため、かに星雲観測時に発生してしまうバックグラウンド N は前日観測データとほぼ同等と考えることが出来る。このため、前日データを用いて観測中のバックグラウンドを評価する。式 (4.1) に従って今回の解析における SN 比は、かに星雲観測データのあるエネルギー  $E$  でのイベント数を  $C_c(E)$ 、前日のバックグラウンドデータのイベント数を  $C_b(E)$  とおくと、

$$S/N = \frac{C_c(E) - C_b(E)}{\sqrt{C_c(E)}} \quad (4.2)$$

という計算で評価した。

赤で着色した領域は南大西洋磁気異常帯 (SAA: South Atlantic Anomaly) を表す。SAA とは、南緯  $31^\circ$  のブラジルから大西洋上空に存在し、宇宙線である荷電粒子の数が大きく跳ね上がる (粒子数が他エリアの約 1000 倍) 領域である。その原因は地磁気を中心と地球の中心とのずれにあり、地磁気によるシールド

が弱く、また荷電粒子が地磁気によって捕縛されることによるものである。100 - 200 MeV のエネルギーを持った陽子が検出器自体と反応すると、放射線同位体を形成し、検出器自体が放射性バックグラウンド源となってしまう [24]。このため解析では、検出器が多数の荷電粒子を受け取ってしまう SAA 内やその付近を通過する時間帯を除外している。

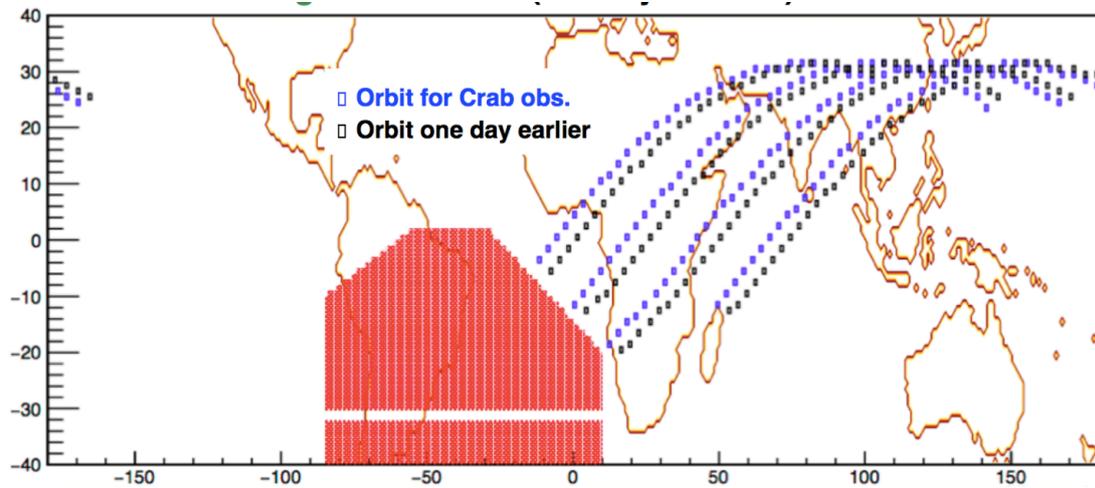


図 4.5: かに星雲観測時（青）と、その前日観測時（黒）の衛星軌道。赤領域は SAA。[19]

#### 4.2.1 解析するエネルギー範囲の制限

データ処理の始めとして、まず解析から SN 比の悪いエネルギー領域を除外する。以下にかに星雲観測データと前日バックグラウンド観測データのエネルギースペクトルと、そのエネルギーでの SN 比分布を示す (図 4.6)。赤がかに星雲観測データ、黒が前日データを表す。この図を見ると、まず 20 keV 以下の低エネルギー側で天体データと前日データ両方のレートが低く、SN 比が悪くなっていることが分かる。この理由としては、低エネルギー側では信号の検出効率が低いためであると考えられる。このため、エネルギー範囲の下限を 30 keV と決めた。

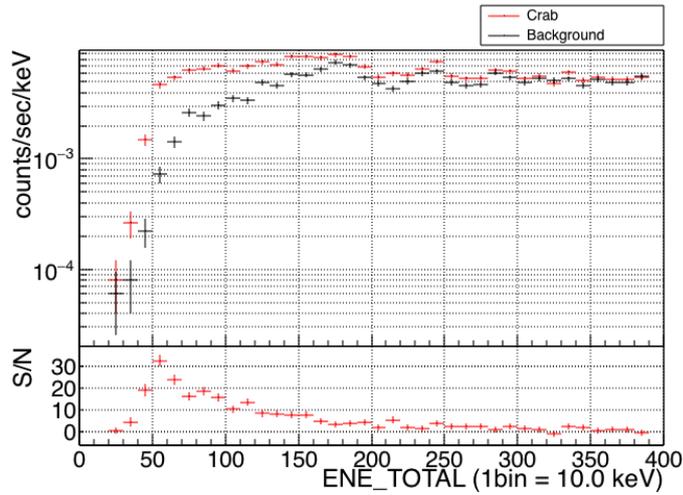


図 4.6: かに星雲観測 (赤) と前日バックグラウンド観測 (黒) の、エネルギースペクトル (上) と SN 比 (下)

次にエネルギー領域の上限を決める。200 keV 以上の高エネルギー側では天体のシグナルが小さくなっていくために SN 比が悪化していると考えられる。偏光解析においては、SN 比を大きくするだけでなく、MDP 値を最小にすることを考えなければならない。以下に下限の 30 keV から上限エネルギーを広げながら SN 比、MDP をプロットした図を示す (図 4.7)。下図より、上限エネルギーが 160 keV 付近で MDP が最小になっていることが分かる。このため本解析では、エネルギー範囲の上限を 160 keV と決めた。30 - 160 keV にエネルギー範囲を制限した結果を表 4.1 に示す。SN 比や MDP 値が共に改善しており、偏光解析に向けた適切なデータ処理であると考えられる。

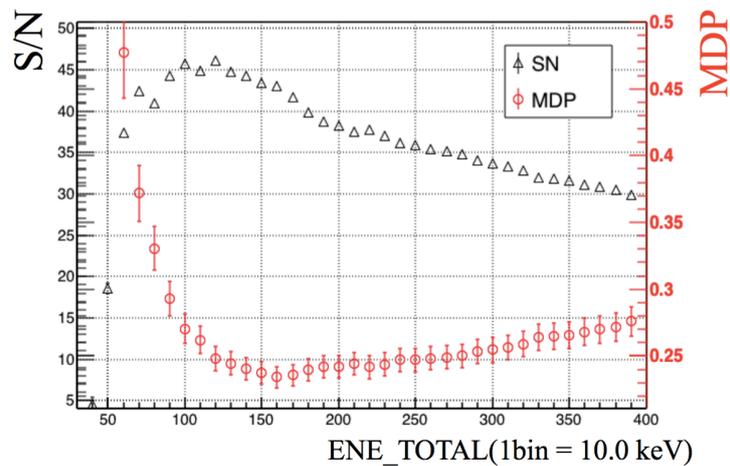


図 4.7: SN 比 (黒)、MDP (赤) 分布。下限 30 keV から積分範囲を広げて計算している

エネルギー領域	SN 比	MDP
全範囲	25.45 ± 0.01	0.31 ± 0.01
0 - 400 keV	29.93 ± 0.01	0.28 ± 0.01
30 - 160 keV	42.42 ± 0.03	0.239 ± 0.008

表 4.1: エネルギーカット前と後の SN 比、MDP 値比較

#### 4.2.2 1 ヒット目位置の制限

SGD のジオメトリから考えて、天体からの入射光子は Si か CdTe-Bottom に最初にヒットする可能性が最も高い。このため図 4.6 では 1 ヒット目が Si か CdTe-Bottom のイベントを選んでスペクトルを作成しているが、この 1 ヒット目位置に関しても SN 比や MDP の観点から考察を行う。

以下に CdTe-Bottom が 1 ヒット目であるイベントを除外したエネルギースペクトルと、そのエネルギーでの SN 比分布を示す (図 4.8)。表 2.1 で述べたように SGD 主検出部において、Si は上側に 3 2 層、CdTe-Bottom は下側に 8 層存在している。比較的多くの入射光子が検出器上側で吸収されてしまうため、天体から遠い下側までシグナルが届かずに SN 比が悪化することが予想される。また、CdTe は基本的に光電吸収することを想定して配置されており、コンプトン散乱で光子から受け取るような低いエネルギーに対してはエネルギー分解能が悪い。エネルギー分解能が悪いと § 2.2 で述べたように、角度分解能が悪化してしまいコンプトン再構成の精度が下がることが予想される。

CdTe-Bottom カット前と後の SN 比、MDP 値を比較するとカット後の方が両者が改善していることが分かった (表 4.2)。従って 1 ヒット目の場所を Si に制限することは、偏光解析に向けて適切なデータ処理であると考えられる。

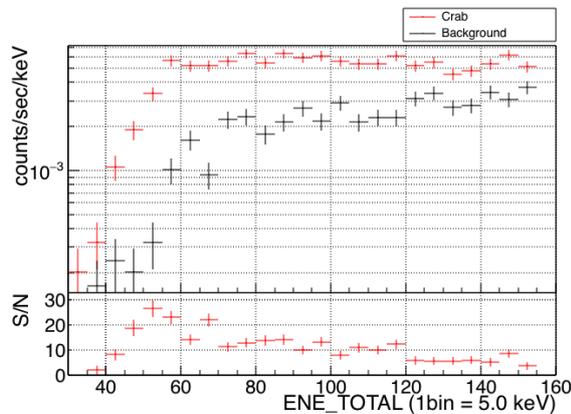


図 4.8: 1 ヒット目 CdTe-Bottom のイベントを除外したエネルギースペクトルと SN 分布

	SN 比	MDP
CdTe-B カット前	42.42 ± 0.03	0.239 ± 0.008
CdTe-B カット後	48.04 ± 0.04	0.229 ± 0.008

表 4.2: 1 ヒット目 CdTe-Bottom イベントの除外前と後の比較

### 4.2.3 他のコラムの制限範囲を模索する

#### OFFAXIS の制限

幾何学的散乱角とコンプトン運動学的散乱角の差を表す”OFFAXIS” の制限を試みる。以下に、かに星雲観測データと前日データの OFFAXIS 分布と SN 分布を示す (図 4.9)。OFFAXIS が大きい場合、天体以外から入射したバックグラウンドである確率が高いことを表すため、OFFAXIS 値が大きくなるほど SN 比が悪くなると予想されるが、今回のデータではイベントが存在する広い範囲でシグナルが卓越している。従って、OFFAXIS の範囲は制限しないことが適切なデータ処理であると考えられる。

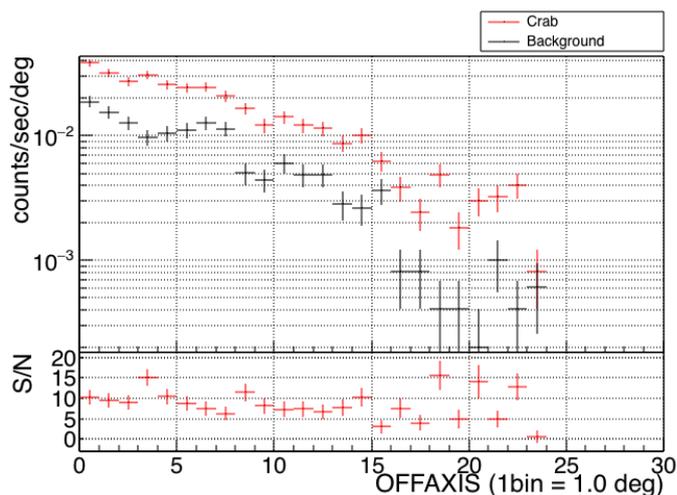


図 4.9: かに星雲観測 (赤) と前日バックグラウンド観測 (黒) における、OFFAXIS 分布 (上) と SN 分布 (下)

#### DISTANCE0 の制限

次に 1 ヒット目と 2 ヒット目の距離”DISTANCE0” の制限を行う。以下に、かに星雲観測データと前日データのヒット間距離分布を示す (図 4.10)。天体から入射し Si ピクセルでコンプトン散乱された光子は、多くの場合近くのピクセルと再び相互作用を起こす。DISTANCE0 が大きくなるように、遠くまでどのピクセルとも相互作用せずに飛ぶことは少ない。従って、DISTANCE0 が大きくなるほどシグナルが少なくなり SN 比が悪化すると予想され、図 4.10 を見ると確かに DISTANCE0 が大きいほど SN 比が小さい。右に示した図 4.11 は DISTANCE0 の下限を 0 mm として 120 mm まで距離上限を少しずつ変化させた SN 比、MDP 分値を示す。SN 比は DISTANCE0 が大きいと若干悪化しているが、MDP 値は誤差の範囲内で変化がほぼ無い。このため今回のデータでは、DISTANCE0 の範囲は制限しないことが適切なデータ処理であると考えられる。

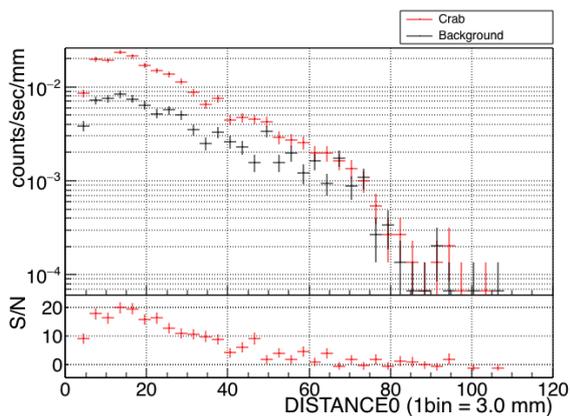


図 4.10: DISTANCE0 分布 (上) と SN 分布 (下)

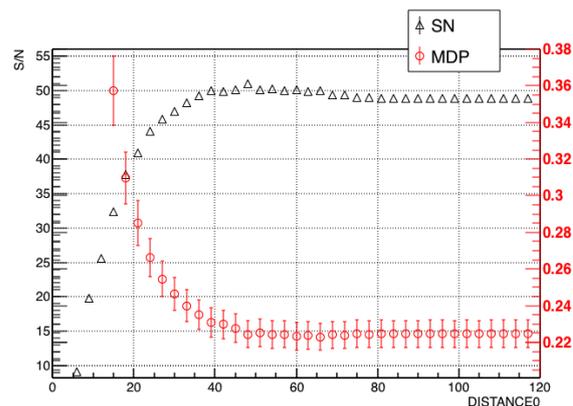


図 4.11: SN 比 (黒)、MDP (赤) 分布。下限 0 mm から積分範囲を広げている。

以上で述べたように”OFFAXIS”、“DISTANCE0” のコラムは制限をしないことが適切であると結論付けたが、観測時間や光子統計が多かった場合には有効なデータ処理手法となる可能性はある。

### 4.3 偏光解析に向けたデータ処理最適化の結果と結論

SGD を用いた X 線偏光解析に向けてデータ処理方法の最適化を行った。この解析で用いたデータの健全性は § 3 で確認を行っている。適切なデータ処理の指針として SN 比と MDP を用い、SN 比が大きいほど、MDP が小さいほど優れた処理手法として採用した。

かに星雲の観測データと、その観測の 2 4 時間前のデータを用いて解析を行い、解析に用いるべきエネルギー範囲を制限した。また、CdTe-Bottom は SN 比が小さく、エネルギー分解能も Si ほど良くはないため 1 ヒット目の場所から除外すると、SN 比や MDP が改善することが分かった。次に各コラムの解析範囲の制限を試みた。今回の解析では上限下限の設定には至らなかったが、光子統計が多ければ有効なデータ処理手段となる可能性はある。今回のデータ処理最適化検証によって、初期データの状態から SN 比は約 1.9 倍に増加させ、MDP 値は約 0.7 倍まで減少させることに成功した。今後の X 線検出器に向けても、更に適切なデータ処理方法について模索を続けることは重要となる。

## 第5章 まとめと今後

本研究では、2016年2月17日に打ち上げが行われた日本の X 線天文衛星ひとみに搭載された、軟ガンマ線検出器 (SGD) の観測データを用いて、

1. コンプトン再構成ソフトウェア sgdevtid の動作検証
2. X 線偏光解析に向けたデータ処理の最適化

の2つを行った。

コンプトン再構成は SGD において特に重要となるプロセスであるため、その処理を行う sgdevtid の動作検証は様々な角度から行った。まずは sgdevtid の出力データ SFFa のマージプロセスを検証し、CdTe の蛍光 X 線のためのマージが正常に行われていないことを発見した。sgdevtid ではシグナルのマージプロセスを行う際に、各 CdTe 蛍光 X 線のエネルギーを記録したデータベースにアクセスするが、データベースとソフトウェア間の中でコラム名が一致しておらず、CdTe 蛍光 X 線のマージが行われていなかった。この不具合を修正して作成した新たなデータを解析すると、物理的に正しいマージが行われていることが確認できた。次に、SGD 開発チームが作成し性能評価に使用していた ComptonSoft との比較を行った。両者には仕様の違いがあり、これによって出力データに差が出ていた。検証で判明した差の原因は2つあり、ヒット数が異なる場合があること、ヒット順序が異なる場合があることである。これらの仕様の違いは処理プロセスを追うことで説明できるものであり、仕様の違いの影響を除外して比較すると両者は全てのコラムで1%未満で一致していた。この検証によって、sgdevtid は正しくコンプトン再構成を行っていることが示唆された。

次に SGD を用いた X 線偏光解析に向けてデータ処理の最適化を行った。どのような処理が最適であるかの指標として SN 比と MDP の2つを導入し、実際に SN 比を大きく MDP を小さくする最適なデータ処理方法を模索した。解析エネルギー範囲を制限し、SN 比やエネルギー分解能の悪い CdTe-Bottom を1ヒット目の場所から除外することで、SN 比は約1.9倍に増加させ、MDP 値は約0.7倍まで減少させることに成功した。この他のコラムについても解析範囲の制限を試みたが、今回の検証では上限や下限の決定には至らなかった。しかし、光子統計が今回使用したデータよりも多い観測には有効なデータ処理手法となる可能性もある。今後の X 線検出器開発にも向けて、更に適切なデータ処理方法を模索し続けていくことは重要となる。

## 謝辞

本論文の作成にあたって、非常に多くの方々にお世話になりました。指導教員の深澤泰司先生には解析のための多くの助言を頂き、非常に多くの事を学ばせて頂きました。ひろたかさん、大野さん、宇宙研の内田さん、研究に協力して頂いた皆さん、物理事務の皆さん、本当に有難う御座いました。次のひとみ衛星プロジェクトの成功をお祈りして、謝辞とさせていただきます。

平成 28 年 2 月

幅田 翔

## 関連図書

- [1] ASTRO-H プロジェクトサイト  
<http://astro-h.isas.jaxa.jp/>
- [2] Glenn F.Knoll 共訳:神野郁夫, 木村逸郎, 阪井英次 オーム社  
放射線計測ハンドブック 第4版
- [3] 小高裕和 東京大学大学院 2008年  
Si/CdTe 半導体コンプトンカメラ試作機の開発と性能評価
- [4] 東京工業大学 超小型 硬X線偏光観測衛星 TSUBAME の開発  
[http://www.hp.phys.titech.ac.jp/yatsu/tsubame\\_science/hxcp.html](http://www.hp.phys.titech.ac.jp/yatsu/tsubame_science/hxcp.html)
- [5] 道津匡平 広島大学大学院 2011年  
修士論文 X線衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線観測装置用 Si-Pad センサーの基礎特性評価
- [6] 上野一誠 広島大学 2012年  
卒業論文 ASTRO-H 搭載宇宙軟ガンマ線観測用 Si センサーの軌道上放射線損傷による影響
- [7] ASTRO-H SGD team  
ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector Preliminary Design Review
- [8] 青野博之 東京大学大学院 2009年  
修士論文 Si/CdTe コンプトンカメラによるガンマ線イメージング実験
- [9] 高橋忠幸  
CdTe/CdZnTe を用いた硬X線・ガンマ線イメージングセンサー
- [10] Takahashi, T., et al. "The ASTRO-H X-ray astronomy satellite", \*Proc. SPIE\*.  
9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray,914425.
- [11] 古井俊也 広島大学 2013年  
卒業論文 X線天文衛星 ASTRO-H 搭載コンプトンカメラの搭載同等品の性能評価
- [12] 枝廣育美 広島大学 2016年  
ASTRO-H 衛星搭載 軟ガンマ線検出器コンプトンカメラを用いた偏光ビーム試験
- [13] 河野貴文 広島大学 2012年  
卒業論文 すざく衛星搭載 WAM の軟γ線地食観測による Crab Nebula の長時間変動解析

- [14] Takayuki Yuasa, The University of Tokyo  
SpaceWire-to-GigabitEtherUser Guide
- [15] 一戸悠人 東京大学大学院 2013 年  
修士論文 ASTRO-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
- [16] 内田悠介 東京大学大学院 2015 年  
修士論文 ASTRO-H 衛星搭載 軟ガンマ線検出器の地上較正試験による性能評価
- [17] 渡辺伸 東京大学大学院 2001 年  
テルル化カドミウム (CdTe) 半導体を用いた硬 X 線・ガンマ線撮像用ピクセル検出器の開発
- [18] 米谷光生 広島大学大学院 2012 年  
宇宙硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球の放球中の中性子バックグラウンド評価
- [19] Hiroyasu Tajima September 24, 2016 Japan Physical Society Meeting Miyazaki University, Japan  
X 線衛星「ひとみ (ASTRO-H)」搭載 軟ガンマ線検出器の軌道上動作
- [20] Hiroyasu Tajima November 14-15, 2016 Hitomi Crab workshop SLAC, USA  
Observations of Gamma-ray Polarization of Crab Nebula
- [21] J.Dyks and Alice K. Harding  
RELATIVISTIC EFFECTS AND POLARIZATION IN THREE HIGH-ENERGY PULSAR MODELS, 2003
- [22] KEK 放射線科学センター  
[http://rcwww.kek.jp/egsconf/2010-course/comp\\_rad\\_phys\\_2010.pdf](http://rcwww.kek.jp/egsconf/2010-course/comp_rad_phys_2010.pdf)
- [23] Separation Science  
<https://www.sepscience.com/Japan/Articles/2751-/SN>
- [24] 中本創 広島大学 2006 年  
X 線観測衛星『すざく』搭載 XIS 検出器のバックグラウンドの研究