

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

広島大学大学院 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研究室

M143315

枝廣 育実

主査 水野 恒史 副査 平谷 篤也

2016年2月

概要

軟ガンマ線検出器 (SGD) は、2015 年度打ち上げ予定の X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載される検出器の一つで、60~600 keV の帯域において過去最高感度での観測を目的とした分光観測器である。主検出部は狭視野半導体多層コンプトンカメラであり、コンプトン運動学を用いて入射ガンマ線の到来方向に強い制限を与えてバックグラウンドを除去する。SGD のコンプトンカメラはコンプトン散乱を積極的に観測に利用する設計となっており、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持つため、散乱の異方性を用いて偏光観測ができる。SGD の観測ではその感度の高さから、現実的な観測時間で偏光の情報を得る事ができ、磁場や散乱体などの他の手段では得られない物理量を得る事ができると期待されている。

SGD の観測において、天体の偏光を議論するためには信頼できる偏光応答が必要である。それにはまず、衛星搭載品または同等品を用い、偏光信号を照射した実証試験・較正試験を行わなければならない。また、SGD はそのジオメトリが複雑であり、コンプトンカメラ 1 台に搭載される読み出しピクセル数が 13312 個と多く、各ピクセルのノイズののりやすさなどの個性や、パッシブな物質による寄与、実機のジオメトリがもつ設計図からのわずかなずれなどが散乱の異方性の測定に影響を与えうる。これら偏光測定に影響を与える要素全てを実験的に調べることは現実的ではなく、モンテカルロシミュレーションを用いて偏光応答を構築する必要がある。そこで本論文では、コンプトンカメラの偏光測定能力の実証と、モンテカルロシミュレーター (検出器シミュレーター) の検証・較正のため、2015 年 11 月 12~14 日に SPring-8 の BL08W において単色直線偏光ビームを用い、衛星搭載品と同一設計のコンプトンカメラによる偏光ビーム試験を行った。試験に用いたビームのエネルギーは 122.2, 194.5 keV の 2 種類で、偏光角は最も詳細にデータ取得を行ったピクセルにおいて、 -91.5 , -69.0 , -46.5 , -1.5 , 88.5 deg で取得した。実機のデータ取得状況やエネルギー分解能などを検出器シミュレーターに取り込み検証を進め、実験データとシミュレーションのわずかなずれは系統誤差 (1.0~4.5%) として評価した。実験データ解析によりモジュレーションファクターは 122.2 keV で 0.665 ± 0.013 、194.5 keV では 0.607 ± 0.014 と得られ、各偏光角、エネルギーで相対値 3% 以内のばらつきでモジュレーションファクターを得る事ができ、シミュレーションによる理想的な場合の数値と同等の結果を実機のコンプトンカメラを用いた実験により得る事ができた。

目次

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| 第 1 章 | はじめに | 1 |
| 第 2 章 | コンプトンカメラ | 2 |
| 2.1 | コンプトンカメラの原理 | 2 |
| 2.1.1 | コンプトン散乱 | 2 |
| 2.1.2 | コンプトン再構成 | 3 |
| 2.1.3 | コンプトンカメラによる偏光観測 | 5 |
| 2.2 | ASTRO-H 衛星 軟ガンマ線検出器 (SGD) | 10 |
| 2.2.1 | SGD 搭載 狭視野半導体多層コンプトンカメラ | 13 |
| 2.2.2 | コンプトンカメラのデータ処理 | 15 |
| 2.2.3 | コンプトンカメラのイベントデータ | 16 |
| 第 3 章 | SPring-8 偏光測定試験に向けた準備試験 | 18 |
| 3.1 | 準備試験概要 | 18 |
| 3.1.1 | 実験セットアップ | 18 |
| 3.2 | 基本パラメータ取得および設定 | 21 |
| 3.2.1 | 読み出しのできないチャンネル | 21 |
| 3.2.2 | ストレンジチャンネル | 21 |
| 3.2.3 | トリガー信号があってもシグナルの取得をしないチャンネル | 24 |
| 3.3 | ASIC のエネルギー較正 | 25 |
| 3.3.1 | テストパルス試験 | 26 |
| 3.3.2 | テストパルス試験結果とエネルギー較正結果 | 27 |
| 3.4 | ^{57}Co 無偏光データを用いたシミュレーターの検証 | 31 |
| 第 4 章 | SPring-8 偏光測定試験 | 35 |
| 4.1 | 試験概要 | 35 |
| 4.1.1 | SPring-8 BL08W | 35 |
| 4.1.2 | 実験セットアップ | 36 |
| 4.1.3 | ビーム試験概要 | 37 |
| 4.2 | 試験当日の実施項目及び Quick Look 解析 | 39 |
| 4.2.1 | ビーム軸アライメント調整 | 39 |
| 4.2.2 | モジュレーションカーブ | 42 |

| | | |
|--------------|-----------------------------------|-----------|
| 第 5 章 | データ解析時詳細パラメータ設定とシミュレーターの検証 | 45 |
| 5.1 | 実験データ解析時詳細パラメータ設定 | 45 |
| 5.1.1 | スレッシュホールド設定 | 45 |
| 5.1.2 | ASIC のエネルギー較正 | 47 |
| 5.1.3 | パラメータ設定後のモジュレーションカーブ | 47 |
| 5.2 | シミュレーターパラメータ調整と動作検証 | 50 |
| 5.2.1 | 入射エネルギーの設定 | 50 |
| 5.2.2 | エネルギー分解能の設定 | 50 |
| 5.2.3 | ビームサイズの設定 | 53 |
| 5.2.4 | ビーム軸と検出器との傾きの設定 | 55 |
| 5.3 | モジュレーションカーブの形状に影響するパラメータ | 56 |
| 第 6 章 | コンプトンカメラ偏光応答 | 62 |
| 6.1 | FTOOLS を用いたコンプトン再構成 | 62 |
| 6.1.1 | FTOOLS を用いたイベントセレクションによる整合性 | 62 |
| 6.2 | シミュレーターによる実験データの再現 | 63 |
| 6.2.1 | 実験とシミュレーションデータの比較結果のまとめ | 67 |
| 6.3 | ビーム試験により得られた偏光応答 | 71 |
| 第 7 章 | まとめ | 75 |
| 付 録 A | SGD シミュレーター | 76 |
| A.1 | Geant4 を用いたシミュレーション | 76 |
| A.2 | 本研究で用いた検出器シミュレーター | 76 |
| 付 録 B | | 77 |
| B.1 | 偏光測定データと検出器シミュレーションデータの比較結果 | 77 |
| 付 録 C | 投稿論文に向けた追解析 | 81 |
| C.1 | 再設定したパラメータ | 81 |
| C.1.1 | 偏光角の設定 | 81 |
| C.1.2 | ビーム軸と検出器の傾きの設定 | 81 |
| C.1.3 | ビームサイズの設定 | 81 |
| C.2 | 比較結果 | 82 |
| C.3 | 再設定したパラメータによる偏光応答 | 86 |
| C.4 | SGD による天体観測の模擬 | 87 |

目次

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1.1 | 入射ガンマ線のエネルギーごとのコンプトン散乱の微分散乱断面積。エネルギーが大きくなるほど前方散乱が支配的となる。 [6] | 3 |
| 2.1.2 | コンプトン再構成の概念図。(左) 最も単純な1回のコンプトン散乱と光電吸収により得られるコンプトンコーン(赤の円錐)。(右) 複数のコンプトンコーンによって光子の到来方向が得られる | 3 |
| 2.1.3 | ARM の定義 | 4 |
| 2.1.4 | 光子の散乱の様子。入射光子の偏光ベクトルに垂直な方向に散乱されやすい。方位角 ϕ は入射光子の偏光ベクトルに対する散乱方向。 [12] | 7 |
| 2.1.5 | モジュレーションカーブ(方位角 ϕ に対するカウントレート(またはカウント数)) | 7 |
| 2.1.6 | 散乱角 θ に対する散乱の異方性の分布。入射エネルギーが大きくなるにつれて分布のピークが低角度側に变化する。 [12] | 8 |
| 2.1.7 | SGD の観測により得られると予想されるエネルギーに対するモジュレーションファクター。 [16] | 9 |
| 2.1.8 | (上) 観測データの方位角分布 (SP8 ビーム試験時の偏光角 -90 deg のデータ)、(中) 検出器シミュレーターによる無偏光に対する応答、(下) 観測データを検出器シミュレーターの無偏光に対する応答で割ることにより得られたモジュレーションカーブ。(青) 検出器シミュレーターのパラメータ調整前、(橙) 調整後。設定したパラメータは第 3,5 章参照。 | 10 |
| 2.2.1 | ASTRO-H 衛星の外観と搭載検出器 [11] | 11 |
| 2.2.2 | ASTRO-H 衛星搭載検出器の観測エネルギー領域 | 11 |
| 2.2.3 | X 線・ガンマ線領域を観測帯域とする検出器の検出感度 [10] | 12 |
| 2.2.4 | SGD1 台の概略図。コンプトンカメラ 3 台(赤:Si 半導体, 青:CdTe 半導体)の周囲を 25 本の BGO アクティブシールド(緑)で囲い、ファインコリメータ(黒の縦線部)で視野を絞る。 | 12 |
| 2.2.5 | SGD 搭載コンプトンカメラ。32 層の Si 検出器(黄)とその下層に 8 層の CdTe 検出器(CdTe-Bottom)、周囲に計 8 層の CdTe 検出器(CdTe-Side)。 | 14 |
| 2.2.6 | コンプトンカメラのデータ処理の概要。一番小さい四角が 1 枚の ASIC を表し、Si と CdTe-Bottom では 8 枚、CdTe-Side では 6 枚で 1 系統のデジチェーンに接続される。さらに本文中に記載した様に 1 つにまとめられ、データ読み出しを行う SGD-DPU(後述)と通信する。 | 15 |
| 2.2.7 | 本試験で用いたコンプトンカメラのシステム構成の概略図 | 16 |
| 3.1.1 | 実験セットアップ。SPring-8 ビーム試験時は恒温槽と AE, DPU は実験ステーション内(第 4.1.1 節参照)に設置される。 | 19 |
| 3.1.2 | 恒温槽内の写真 | 19 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1.3 | 実験セットアップの全体図。写真は SPring-8 前室での試験時。 | 19 |
| 3.1.4 | コンプトンカメラの構成。(左) コンプトンカメラを視野方向から見た場合、(右) コンプトンカメラの視野方向に対し、垂直方向から見た場合。(青)Si(Layer ID 0~31)、(緑)CdTe-Bottom(Layer ID 100 ~107)、(橙)CdTe-Side(Layer ID 200~207)。 | 20 |
| 3.1.5 | 視野方向からコンプトンカメラを見た際の Si のピクセル位置の記載方法。(赤)=(2,2)、(橙)=(1,1)、(緑)=(-1,-1) とする。 | 20 |
| 3.2.1 | Si のヒット位置分布。(左) 正常に読み出しができる Si レイヤー、(右)DC の不調により読み出しができない ASIC が含まれる Si レイヤー | 21 |
| 3.2.2 | 左上から右向きに、Layer ID の順に 32 枚の Si のヒット位置分布並べた。白くなっている 8 箇所は読み出しができない部分 (Layer ID 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15)。 | 21 |
| 3.2.3 | ASICID 45 での 400~700 keV のシングルヒットイベントの頻度分布 | 22 |
| 3.2.4 | (左)Layer ID 200(CdTe-Side) におけるストレンジチャンネルの分布。(右) ^{57}Co を全面照射した際の Layer ID 200(CdTe-Side) におけるヒット位置分布 (ASIC 8×8 ピクセルの周囲の白い部分はガードリングなどの不感部分)。 | 23 |
| 3.2.5 | 最終的にシミュレーターに組み込んだストレンジチャンネルの位置分布。 | 24 |
| 3.3.1 | Si (ASIC ID 0, Channel ID 6) におけるテストパルスデータのヒストグラム | 28 |
| 3.3.2 | Si (ASIC ID 0, Channel ID 15) におけるテストパルスデータのヒストグラム | 28 |
| 3.3.3 | Si (ASIC ID 0, Channel ID 15) における DAC 値と ADC 値の較正曲線。(左) ビットシフト前、(右) ビットシフト後。 | 28 |
| 3.3.4 | CdTe (ASIC ID , Channel ID 15) における DAC 値と ADC 値の較正曲線。(左) ビットシフト前、(右) ビットシフト後。 | 29 |
| 3.3.5 | ASIC ID 33 の ^{133}Ba のエネルギースペクトル。赤はエネルギー較正に用いたエネルギー、緑はエネルギー較正に用いていないエネルギー | 31 |
| 3.4.1 | Si 32 層全体のヒット位置分布。(左) ^{57}Co を照射した実験データ、(右) シミュレーションデータ | 32 |
| 3.4.2 | 全 Si-CdTeS イベントにおける、(横軸)Si でのデポジットエネルギー、(縦軸) CdTe-S でのデポジットエネルギー。(左) 実験データ解析、(右) シミュレーションデータ解析。黒線は表 3.4.1 でのエネルギーのセレクション値。 | 33 |
| 3.4.3 | Si-CdTeS イベントの方位角分布の比較。(上)Azimuth 分布。縦軸は normalised counts。((黒) 実験データ、(赤) シミュレーションデータ)、(中) 残差、(下) 残差を統計誤差でわつたもの | 34 |
| 4.1.1 | BL08W と実験ステーション A のレイアウト [26] | 35 |
| 4.1.2 | CC に組み付けた 4 つの駆動ステージの (左) 概略図と (右) 写真 (X ステージ (水色), Z ステージ (赤), Y 回転ステージ (青), Z 回転ステージ (黄緑))。ビームはステージの座標系で-Y の方向から入射する。 | 36 |
| 4.1.3 | 視野方向からコンプトンカメラを見た時の Si のビーム照射位置。照射ビームのエネルギーは (左)122 keV, (右)193 keV。入射ビームの偏光角は (緑)-90 deg, (橙)0, -90 deg, (赤)0, -90, -45, -67.5, 90 deg。 | 39 |
| 4.2.1 | ビーム照射位置と対象ピクセルのカウントレートの関係 | 40 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2.2 | ビーム偏光角 0 deg(Y 軸回転ステージ 0 deg) 時の Si 1 枚目 (緑) と 32 枚目 (赤) における (2,2) のカウントレート。(左)X ステージ動作時、(右)Z ステージ動作時。 | 41 |
| 4.2.3 | ビーム偏光角-90 deg(Y 軸回転ステージ-90 deg) 時の Si1 枚目 (緑) と 32 枚目 (赤) における (2,2) のカウントレート。(左)X ステージ動作時、(右)Z ステージ動作時。 | 41 |
| 4.2.4 | QL 解析時のモジュレーションカーブ。(左)122 keV ビーム、(右)193 keV ビームで、(黒) 実験データと (赤) シミュレーションデータ。上から順にビームの偏光角が -90, -67.5, -45, 0, 90 deg | 44 |
| 5.1.1 | (左) 各チャンネルのバックグラウンドデータ取得時のシグナル数のヒストグラム。(赤) スレッシュホールド設定前、(青) スレッシュホールド設定後。(右) ノイズがのりやすいピクセルの例 (ChannelID 7360 のバックグラウンドデータのエネルギースペクトル)。赤線は設定したスレッシュホールド値。 | 46 |
| 5.1.2 | シグナル数分布の比較。(緑) 実験データでスレッシュホールド設定前、(青) 実験データでスレッシュホールド設定後、(赤) シミュレーションデータで実験解析と同じスレッシュホールドを設定。 | 46 |
| 5.1.3 | 解析時スレッシュホールド設定後のモジュレーションカーブ。(左)122 keV ビーム、(右)193 keV ビームで、(黒) 実験データと (赤) シミュレーションデータ。上から順にビームの偏光角が -90, -67.5, -45, 0, 90 deg | 49 |
| 5.2.1 | エネルギーに対する分解能 σ を式 5.2.1 でフィッティングしている。(左)Si、(右)CdTe。 | 51 |
| 5.2.2 | (左)Si と (右)CdTe-Bottom の 1 シグナルイベントのエネルギースペクトル。(青)122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) の実験データ、(赤)122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) のシミュレーションデータ、(緑)122.2 keV | 52 |
| 5.2.3 | (左)Si と (右)CdTe-Bottom の 1 シグナルイベントのエネルギースペクトル。(青)194.5 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) の実験データ、(赤)194.5 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) のシミュレーションデータ、(緑)194.5 keV | 53 |
| 5.2.4 | (左)(青)Si の全ピクセルでのスペクトル(図 5.2.2(左)(青)と同じ)、(紫) ビームを照射している 32 層 \times 1 ピクセル ((2,2) 位置) のスペクトル、(緑) 周囲で散乱して入射したと考えられる 32 層 \times 1 ピクセルのスペクトル。(右)Si のレイヤーごとのスペクトル。Layer ID (赤)0, (緑)1, (水色)19, (青)31 | 53 |
| 5.2.5 | ビーム形状 (顕微鏡を用いても形状を確認しづらく、測定誤差は大きい) | 54 |
| 5.2.6 | 偏光度 100%, 122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) 照射時の Si-CdTeS イベントの Azimuth 分布。ビームサイズは (緑)0.1 mm \times 0.1 mm、(黒)1 mm \times 1 mm、(赤)2 mm \times 2 mm。 | 54 |
| 5.2.7 | (上) 偏光角 -90 deg, エネルギー 122.2 keV, (2,2) 照射した際に、(黒) 検出器に垂直に照射、(赤) 傾けて照射した場合の比較。縦軸は全イベント数で正規化している。(下) 残差 (黒-赤) | 56 |
| 5.3.1 | コンプトンカメラの中心位置に 122.2 keV, 偏光角 -90 deg のガンマ線を照射した場合のシミュレーションによるモジュレーションカーブ | 57 |
| 5.3.2 | 図 5.3.1 のモジュレーションカーブを (左)Inner-Side と (右)Outer-Side に分けた。(赤) は図 5.3.1 のフィット結果のサインカーブである。 | 58 |
| 5.3.3 | 偏光度 100%, 偏光角 -90 deg のシミュレーションにおける方位角 ϕ に対する散乱角 θ の分布。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。各ピンのエン트리数で正規化している。 | 58 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.3.4 | 122.2 keV, -90 deg, (2,2) に照射した際のモジュレーションカーブ。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。(赤) は全データのフィット結果のサインカーブ。 | 59 |
| 5.3.5 | ビーム照射位置に対する CdTe-Side の距離による散乱角の違い。距離 A,B の時のとりうる散乱角の範囲が $\Delta\theta_A, \Delta\theta_B$ | 59 |
| 5.3.6 | 散乱角の違いによるモジュレーションカーブ。(上左)0 \sim 60, (上右)60 \sim 80, (中左)80 \sim 100, (中右)100 \sim 120, (左下)120 \sim 180 deg。(122 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) に照射、全てのチャンネルで読み出し可) | 60 |
| 5.3.7 | 実際のコンプトンカメラの読み出し状態を反映させた 122.2 keV, -90 deg, (2,2) に照射した際のモジュレーションカーブ。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。(赤) は全データのフィット結果のサインカーブ。 | 60 |
| 6.2.1 | (上)122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) の Inner-Side のモジュレーションカーブ。(黒) 実験データ、(赤) 偏光角 -90 deg のシミュレーションデータ。(下) 残差 (黒-赤)。青い領域でのずれが大きい。 | 64 |
| 6.2.2 | コンプトンカメラの読み出し部分 (ASIC) も含むジオメトリの俯瞰図 [15] | 64 |
| 6.2.3 | (上)122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) のモジュレーションカーブ。(黒) 実験データ、(赤) 偏光角 -90 deg のシミュレーションデータ。ASIC を通過して CdTe-Side に入射する方位角を除いている。(下) 残差 (黒-赤)。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。 | 66 |
| 6.2.4 | 偏光角のずれ $\Delta\phi_0$ により形成される周期的な残差 | 66 |
| 6.2.5 | (上)122.2 keV, 偏光角 -91.5 deg, (2,2) のモジュレーションカーブ。(黒) 実験データ、(赤) 偏光角 -91.5 deg のシミュレーションデータ。ASIC を通過して CdTe-Side に入射する方位角を除いている。(下) 残差 (黒-赤)。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。 | 67 |
| 6.2.6 | (上)122.2 keV, 偏光角 -1.5 deg, (2,2) のモジュレーションカーブ。(黒) 実験データ、(赤) 偏光角 -1.5 deg のシミュレーションデータ。ASIC を通過して CdTe-Side に入射する方位角を除いている。(下) 残差 (黒-赤)。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。 | 71 |
| 6.3.1 | 本試験のコンプトンカメラで得られたモジュレーションカーブ。上から順に偏光角 $-91.5, -69.0, -46.5, -1.5, 88.5$ deg。(左)122.2 keV、(右)194.5 keV。青線は式 6.3.1 のフィッティング関数であり、赤線はフィッティングにより得られた ϕ_0 を示している。 | 72 |
| 6.3.2 | 122 keV, 偏光角 -90 deg の平行光全面照射のシミュレーションによるモジュレーションカーブ | 74 |
| A.2.1 | 記述しているジオメトリ。(左)SGD1 台、(右) コンプトンカメラ 1 台。 [8] | 76 |
| B.1.1 | 122.2 keV, 偏光角 -91.5 deg | 77 |
| B.1.2 | 122.2 keV, 偏光角 -69.0 deg | 77 |
| B.1.3 | 122.2 keV, 偏光角 -46.5 deg | 78 |
| B.1.4 | 122.2 keV, 偏光角 -1.5 deg | 78 |
| B.1.5 | 122.2 keV, 偏光角 88.5 deg | 78 |
| B.1.6 | 194.5 keV, 偏光角 -91.5 deg | 79 |
| B.1.7 | 194.5 keV, 偏光角 -69.0 deg | 79 |

| | | |
|--------|---|----|
| B.1.8 | 194.5 keV, 偏光角 -46.5 deg | 79 |
| B.1.9 | 194.5 keV, 偏光角 -1.5 deg | 79 |
| B.1.10 | 194.5 keV, 偏光角 88.5 deg | 80 |
| | | |
| C.2.1 | 122.2 keV, 偏光角 -91.4 deg | 82 |
| C.2.2 | 122.2 keV, 偏光角 -68.9 deg | 82 |
| C.2.3 | 122.2 keV, 偏光角 -46.4 deg | 83 |
| C.2.4 | 122.2 keV, 偏光角 -1.4 deg | 83 |
| C.2.5 | 122.2 keV, 偏光角 88.6 deg | 83 |
| C.2.6 | 194.5 keV, 偏光角 -91.4 deg | 84 |
| C.2.7 | 194.5 keV, 偏光角 -68.9 deg | 84 |
| C.2.8 | 194.5 keV, 偏光角 -46.4 deg | 84 |
| C.2.9 | 194.5 keV, 偏光角 -1.4 deg | 84 |
| C.2.10 | 194.5 keV, 偏光角 88.6 deg | 85 |
| C.4.1 | 60~100 keV のシミュレーションによるモジュレーションカーブ | 88 |
| C.4.2 | 100~200 keV のシミュレーションによるモジュレーションカーブ | 88 |

目次

| | | |
|-------|--|----|
| 2.2.1 | SGD の要求性能 | 13 |
| 2.2.2 | SGD 搭載コンプトンカメラの Si 検出器、CdTe 検出器 1 枚の仕様 | 14 |
| 3.2.1 | 最終的にシミュレーターに組み込んだストレンジチャンネルの個数 | 23 |
| 3.2.2 | trigger disable にしたチャンネルの個数 | 25 |
| 3.3.1 | 入力した各検出器でのテストパルス | 27 |
| 3.3.2 | ASIC ID 0 における較正点の補間 | 30 |
| 3.4.1 | 実験データとシミュレーションデータの解析条件 | 32 |
| 4.1.1 | 実験ステージ A におけるパラメータ [26] | 36 |
| 4.1.2 | 使用した駆動ステージ | 37 |
| 4.2.1 | 122 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件 | 42 |
| 4.2.2 | 193 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件 | 43 |
| 4.2.3 | 表 4.2.1,4.2.2 によるセレクション後の Si-CdTeS イベント | 44 |
| 5.1.1 | 再評価したエネルギー分解能 | 47 |
| 5.1.2 | FM 品のエネルギー分解能 [9] | 47 |
| 5.1.3 | 122 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件 | 48 |
| 5.1.4 | 193 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件 | 48 |
| 5.1.5 | 表 5.1.3,5.1.4 によるセレクション後の Si-CdTeS イベント | 49 |
| 5.2.1 | ビーム試験データフィッティング結果 (ともに偏光角-90 deg、(2,2) のデータ) | 50 |
| 5.2.2 | シミュレーターに組み込んだエネルギー分解能に関するパラメータ | 51 |
| 5.2.3 | 水平方向のビームサイズ | 54 |
| 5.2.4 | 鉛直方向のビームサイズ | 54 |
| 5.2.5 | 水平方向の傾き | 55 |
| 5.2.6 | 鉛直方向の傾き | 55 |
| 5.3.1 | フィッティング結果 | 57 |
| 6.1.1 | 122.2 keV, (2,2) 照射データの Si-CdTeS イベントの比較 | 63 |
| 6.2.1 | 122.2 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件 | 65 |
| 6.2.2 | 122.2 keV, (2,2) データのモジュレーションカーブのフィッティング結果 | 67 |
| 6.2.3 | 122.2 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件 | 68 |
| 6.2.4 | 194.5 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件 | 69 |
| 6.2.5 | 実験データとシミュレーションデータの比較 | 70 |

| | | |
|-------|-----------------------------------|----|
| 6.3.1 | 本試験のコンプトンカメラにより得られた偏光応答 | 73 |
| 6.3.2 | フィッティング結果 | 74 |
| C.2.1 | 実験データとシミュレーションデータの比較 | 86 |
| C.3.1 | 本試験のコンプトンカメラにより得られた偏光応答 | 87 |
| C.4.1 | シミュレーションと解析の条件 | 88 |
| C.4.2 | フィッティング結果 | 88 |
| C.4.3 | フィッティング結果 | 88 |

第1章 はじめに

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 の軟ガンマ線エネルギー帯域における高感度の天体観測と、同エネルギー帯での偏光観測である。sub-MeV 領域では高温プラズマからの熱的放射が弱くなり、制動放射やシンクロトロン放射、逆コンプトン散乱などの非熱的放射が支配的となる転換領域となっており、このエネルギー帯での観測はブラックホールや超新星残骸、銀河団での粒子の加速機構の解明の手がかりとなる。また偏光の情報に加わると、撮像では得る事のできない天体の磁場構造や幾何学構造を知ることができ、放射機構や粒子加速現場を強く制限することができる。

高エネルギーの粒子は地上に届く前に大気で散乱されるため、衛星や気球などの飛翔観測機器を用いて行われる。sub-MeV 領域の観測では光子のエネルギーが高いことから、光子と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が支配的となり、従来の光電吸収型検出器では検出効率が下がる要因となっていた。さらに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く、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研究・開発されたのが、2015 年度打ち上げ予定の X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 [1][2] 軟ガンマ線検出器 (SGD)[3][4][5] である。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、徹底したバックグラウンド除去により過去最高感度での観測を目的とする分光観測機である。加えて SGD の検出原理であるコンプトン散乱の散乱断面積は光子の偏光方向に依存するため、低バックグラウンドのコンプトンカメラである SGD は優れた偏光計にもなっており、比較的明るい天体では偏光観測も期待される。

SGD の偏光科学観測では信頼できる偏光応答が必要である。SGD はそのジオメトリが複雑であり、またコンプトンカメラ 1 台あたりピクセル検出器が 13312 個搭載され、それらの個性が散乱の異方性の測定に影響を与えるため、モンテカルロシミュレーションを用いて偏光応答を評価する必要がある。また、衛星搭載品 (Flight Model; FM) と同一設計のコンプトンカメラを用いた偏光データ取得試験はこれまでにこなわれておらず、コンプトンカメラによって得られる偏光情報取得の状況やその精度を知りたい。本論文は、SPring-8 において 122.2 keV, 194.5 keV の単色直線偏光ビームを用いて衛星搭載品と同じ構成の試作機のコンプトンカメラによる偏光ビーム試験を行い、実験による偏光応答と検出器シミュレーターによる偏光応答との比較によって検出器シミュレーターの検証と、コンプトンカメラによって得られる偏光情報取得の精度を評価した。まず第 2 章ではコンプトンカメラの検出原理、偏光観測について説明する。第 3 章では SPring-8 での偏光ビーム試験に向けた準備試験について、第 4 章では SPring-8 での偏光ビーム試験について、それぞれの試験項目や解析手法、結果を述べる。第 5 章では検出器シミュレーターの検証のため詳細なパラメータ設定と、本研究で使用したコンプトンカメラのジオメトリやデータ読み出し状況によるモジュレーションカーブへの影響を調べた。第 6 章では SPring-8 偏光ビーム試験データによる偏光応答と検出器シミュレーターによる偏光応答の比較によって検出器シミュレーターの再現精度の評価と、実験により得られた偏光情報の取得精度を評価する。

第2章 コンプトンカメラ

2.1 コンプトンカメラの原理

コンプトンカメラとはコンプトン散乱を積極的に観測に用いるというコンセプトのもと開発された検出器であり、コンプトン散乱を起こしやすい散乱体の検出器と、光電吸収を起こしやすい吸収体の検出器を用い、反応位置と落としたエネルギーによりガンマ線の到来方向を制御する(コンプトン再構成)。バックグラウンドとなっていたコンプトン散乱を積極的に観測に用いることで検出感度の向上にも繋がる。ここではコンプトンカメラの動作原理やコンプトンカメラによる偏光観測について述べる。

2.1.1 コンプトン散乱

コンプトン散乱は光子と電子との相互作用の一つである。光子が物質に入射した際に、原子核に弱く束縛された外核の電子により散乱を生じることがある。入射光子のエネルギーが比較的高い場合には、この過程は近似的に入射光子と静止した自由電子との散乱として取り扱うことができ、この現象をコンプトン散乱と呼ぶ。コンプトン散乱において、入射光子は散乱角 θ の方向へ曲げられ、エネルギーの一部を静止電子へと受け渡す。ここで、入射ガンマ線のエネルギーを E_γ 、ガンマ線の散乱角を θ 、電子の静止質量エネルギーを $m_e c^2$ とすると、散乱後のガンマ線のエネルギー E'_γ は

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (2.1.1)$$

と表される。コンプトン散乱の微分散乱断面積は古典電子半径を $r_e = e^2/m_e c^2$ とすると

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 \left(\frac{E_\gamma}{E'_\gamma} + \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} - 2\sin^2\theta \cos^2\phi \right) \quad (2.1.2)$$

と表され、これは Klein-Nishina の式と呼ばれる。ここで ϕ 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。第 2.1.3 節でコンプトンカメラの偏光観測について述べるが、このようにコンプトン散乱が偏光方向に依存性を持つことを利用しているのである。入射ガンマ線が無偏光の場合は、方位角 ϕ を全方位に渡って平均をとればよく、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} \right)^2 \left(\frac{E_\gamma}{E'_\gamma} + \frac{E'_\gamma}{E_\gamma} - 2\sin^2\theta \right) \quad (2.1.3)$$

となる。図 2.1.1 に入射ガンマ線のエネルギーごとの散乱角分布を示す。数 100 keV 以上の高エネルギーのガンマ線では前方散乱が支配的であるが、SGD の狙うエネルギー帯域である 60-600 keV では大角度散乱の寄与が大きいので、大角度散乱の光子も検出できる設計となっている。

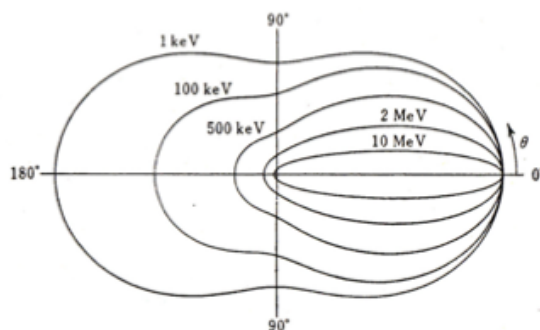


図 2.1.1: 入射ガンマ線のエネルギーごとのコンプトン散乱の微分散断面積。エネルギーが大きくなるほど前方散乱が支配的となる。 [6]

2.1.2 コンプトン再構成

コンプトンカメラへ入射した光子の情報を得るには、散乱体と吸収体での光子の反応位置と、各反応で光子が落としたエネルギーの情報から運動学を用いて再構成を行う。図 2.1.2 にコンプトン再構成の概念図を示した。散乱体でエネルギー E_1 を落とし、吸収体でエネルギー E_2 を落とした場合 (図 2.1.2(左))、光子の到来方向は散乱角 θ を用いて

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \quad (2.1.4)$$

と制限できる。よって、光子の到来方向は散乱角 θ の円錐の円環上に制限され、この円錐をコンプトンコーンと呼ぶ (図 2.1.2 の赤い円錐)。複数の入射光子によりコンプトンコーンを描くことができると、コンプトン再構成が正しく行われているならば、それらの円環が濃く交わる交点ができ、その交点が高確率で光子の到来方向となる (図 2.1.2(右))。

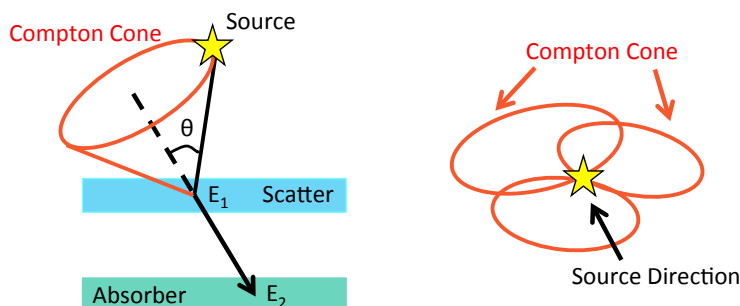


図 2.1.2: コンプトン再構成の概念図。(左) 最も単純な 1 回のコンプトン散乱と光電吸収により得られるコンプトンコーン (赤の円錐)。(右) 複数のコンプトンコーンによって光子の到来方向が得られる

入射光子のエネルギーが高い場合は、複数回のコンプトン散乱の後に光電吸収が生じるイベントもある。2回以上の散乱においても対応する散乱角とエネルギーに対して式 2.1.4 を用いることができ、複数散乱の光子もコンプトン再構成を行うことにより検出効率を上げることができる。N 回のコンプトン散乱後に光電吸収をするイベントについて、その n 番目の散乱角 θ_n は

$$E = \sum_{i=1}^N E_i \quad (2.1.5)$$

$$\cos\theta_n = 1 - \frac{m_e c^2}{\sum_{i=n+1}^N E_i} + \frac{m_e c^2}{\sum_{i=n}^N E_i} \quad (2.1.6)$$

と表され、式 2.1.6 から分かるように、コンプトン再構成をする際は各散乱時のエネルギーが正確にわかる必要がある。よって、コンプトン散乱後に光電吸収されずに検出器外にエスケープするイベントや、蛍光 X 線のような二次的な粒子による影響があると正しいコンプトン再構成を行うことはできない。

光子の到来方向を制限する方法は、上記のようなコンプトン運動学により制限可能な光子を用いて行うだけでなく、放射線源の位置が既知であれば光子の散乱・吸収位置を用いて幾何学的に入射方向を得る事もできる。ここで、コンプトン運動学により得られる散乱角を θ_K 、幾何学的に求まる散乱角を θ_G とし、コンプトンカメラの角度分解能の評価基準に用いる基準である ARM (Angular Resolution Measure) = $\Delta\theta$ を定義する (図 2.1.3)。

$$\Delta\theta \equiv \theta_K - \theta_G \quad (2.1.7)$$

ARM は $\Delta\theta=0$ 付近をピークに持つ分布となり、その半値全幅 (Full Width Half Maximum; FWHM) を角度分解能の評価に用いる。

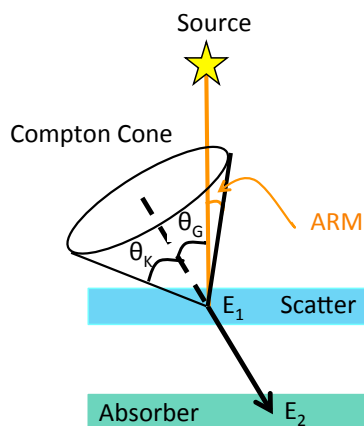


図 2.1.3: ARM の定義

ARM が悪くなる原因には大きく 2 つ挙げられ、1 つ目はエネルギー分解能の影響による θ_K のずれである。 θ_K の不確かさは式 2.1.4 の右辺を $f(E_1, E_2)$ とおくと、誤差伝搬則から、

$$\begin{aligned}\Delta\cos\theta_K &= \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial E_1}\right)^2 \Delta E_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial E_2}\right)^2 \Delta E_2^2} \\ (\Delta\cos\theta_K)^2 &= \left(\frac{m_e c^2}{E_2^2} - \frac{m_e c^2}{(E_1 + E_2)^2}\right) \Delta E_2^2 - \frac{m_e c^2}{(E_1 + E_2)^2} \Delta E_1^2\end{aligned}\quad (2.1.8)$$

となる。ここで $\Delta E_1, \Delta E_2$ はエネルギーの測定誤差であることから、ARM のばらつきに対するエネルギー分解能の寄与は、エネルギーが高いほど影響が小さくなる。ARM が悪くなる 2 つ目の原因は、光子の検出位置の不確かさによる θ_G のずれである。 θ_G は反応位置のみで決定するため、ピクセルサイズに起因して誤差が生じる。

エネルギー分解能、位置分解能の優れた検出器を使用し、ARM は極力小さくしたい。ただし、仮にエネルギー分解能、位置分解能が 0 となる理想的な検出器を用いても ARM は 0 とはならず、有限の値を持つ。これはコンプトン散乱を考える際に、電子の”静止”を仮定していることに起因し、実際には電子も運動量を持つため厳密には式 2.1.4 は成り立たず、電子の運動量によって角度分解能の広がりを引き起こす [7]。これは Doppler broadening effect と呼ばれ、コンプトン散乱前の電子の運動量を \mathbf{p}_e とすると、 $|\mathbf{p}_e| \ll m_e c$ 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、

$$E_e = m_e c^2 \longrightarrow E_e = m_e c^2 + \frac{|\mathbf{p}_e|}{2m_e} \quad (2.1.9)$$

となり、式 2.1.1 と 2.1.4 は

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2}(1 - \cos\theta)} \longrightarrow E'_\gamma = \frac{1}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2}(1 - \cos\theta)} \left(E_\gamma + \frac{(\mathbf{p}'_\gamma - \mathbf{p}_\gamma) \cdot \mathbf{p}_e}{m_e} \right) \quad (2.1.10)$$

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \longrightarrow \cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_2} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} - \frac{c^2(\mathbf{p}'_\gamma - \mathbf{p}_\gamma) \cdot \mathbf{p}_e}{E_2(E_1 + E_2)} \quad (2.1.11)$$

となる。ここで $\mathbf{p}_\gamma, \mathbf{p}'_\gamma$ は散乱前後の光子の運動量である。Doppler broadening effect の効果は原子番号 Z とともに大きくなる。よって、コンプトンカメラの角度分解能は低エネルギーでは Doppler broadening effect の寄与が大きく、エネルギーが高くなるにつれてよくなるが、そのうちに検出器の位置分解能やエネルギー分解能の寄与が大きくなる。

本研究では第 6 章でコンプトン再構成後のデータを用いた解析を行っている。コンプトン再構成のアルゴリズムは一戸修論 [8] で開発され、その後 SGD の各種試験において検証が重ねられており (内田修論 [9] など)、ASTRO-H 衛星打ち上げ後に使用されるソフトウェアに組み込まれる信頼されたアルゴリズムを用いている。プロセスの詳細については第 6.1 節で述べる。

2.1.3 コンプトンカメラによる偏光観測

sub-MeV 領域で観測される天体からの偏光の生成過程は大きく分けて 2 つ挙げられる。

コンプトン散乱由来

光子は電子とのコンプトン散乱に伴い偏光する。第 2.1.1 節と同様のコンプトン散乱の状況を考えた場合、無偏光の入射光子のコンプトン散乱後の偏光度 Π は

$$\Pi = \frac{\sin^2\theta}{\epsilon + \epsilon^{-1} - \sin^2\theta} \quad (2.1.12)$$

となる [12]。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%程度以下になる [13]。そのため、数 10%以上の偏光度が検出されると、その放射機構は後述のシンクロトロン放射に限られる。一方で、 $\sim 10\%$ 以下の偏光度が検出されるとその放射機構はコンプトン散乱由来かシンクロトロン放射由来となる。エネルギースペクトルなど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できれば、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の制限をできるため、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集中し、磁場と垂直方向に強い偏光を示すこととなる。偏光観測により偏光角が得られると磁場の向きが分かり、磁場が整列しているほど偏光度は大きくなる。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をよりよく理解することができる。

以上より偏光観測では入射光子の偏光角と偏光度を正確に測ることが大切である。コンプトンカメラによって観測を行う場合、コンプトン散乱の微分散乱断面積は入射光子の偏光方向に依存し(式 2.1.2)、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という性質から(図 2.1.4 [12])、コンプトン散乱の異方性を調べることで偏光の測定ができる。また散乱角 $\theta=90$ deg の場合が最も異方性が大きい。偏光ベクトルに対する散乱方向を方位角 ϕ とし、方位角のカウントレート(またはカウント数)の分布を作成すると、モジュレーションカーブと呼ばれる三角関数に従う分布を得ることができる。ただし、SGD の観測ではそのジオメトリやピクセルの個性などの影響により、単に方位角 ϕ に対してカウント数をとるだけではモジュレーションカーブを得る事はできず、検出器の無偏光に対する応答で観測データを割ることでモジュレーションカーブを得る。散乱の異方性を測定する際に影響する要素を知るためには、衛星搭載品または同等品を用いて偏光信号を照射した実証試験・較正試験が必要である。しかし、これらの要素全てを実験的に調べることは現実的ではなく、さらに様々なエネルギーでの偏光応答が必要となるため、モンテカルロシミュレーションを用いて偏光応答を構築する必要がある。検出器シミュレーターについては後述する。図 2.1.5 は偏光角 0 deg の光子を入射した場合のモジュレーションカーブを模式的に示したもので、方位角 0, 180 deg でカウントレートが最小 (N_{min}) となり、方位角 90 deg でカウントレートが最大 (N_{max}) となる。ここで、方位角に対するカウントレートを $N(\phi)$ とすると、入射光子の偏光角が ϕ_0 の時、モジュレーションカーブは

$$N(\phi) = A \left(1 + M_{obs} \cos 2 \left(\phi - \phi_0 - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (2.1.13)$$

と表される。ここで M_{obs} は

$$M_{obs} = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} \quad (2.1.14)$$

であり、モジュレーションファクターと呼ばれる。観測により得られたモジュレーションカーブを式 2.1.13 によりフィッティングし、得られる ϕ_0 が入射光子の偏光角となる。偏光度 100% の入射光に対するモジュレーションファクター M_{100} が分かっていると、入射光子の偏光度 Π は

$$\Pi = \frac{M_{obs}}{M_{100}} \quad (2.1.15)$$

として得ることができる。この式から、 M_{obs} が大きいほど、小さな偏光度 Π の信号でも検出しやすくなることがわかる。

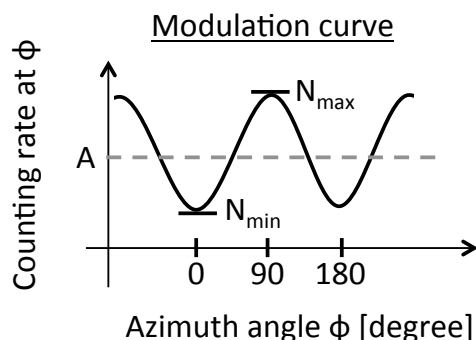
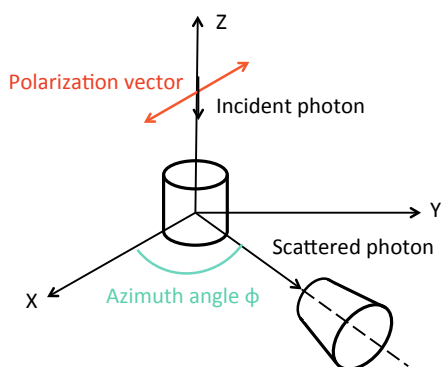


図 2.1.4: 光子の散乱の様子。入射光子の偏光ベクトルに垂直な方向に散乱されやすい。方位角 ϕ は入射光子の偏光ベクトルに対する散乱方向。 [12]

図 2.1.5: モジュレーションカーブ (方位角 ϕ に対するカウントレート (またはカウント数))

コンプトン散乱は入射エネルギーによってとりうる散乱角が異なるため (図 2.1.1)、同じ検出器を用いても入射エネルギーによってモジュレーションファクターが異なる。図 2.1.6 は入射エネルギーごとの散乱角に対するモジュレーションファクターの分布である。図からわかるように ~ 100 keV では散乱角は ~ 90 deg でピークを持つため、低エネルギー領域では大角度散乱を効率よく検出できるとよい。また、散乱角によって散乱の異方性の大きさが異なるため、 ~ 90 deg 付近の散乱角だけのイベントをセレクションすると、検出器全体のモジュレーションファクター (散乱角 θ で積分した場合) よりも大きなモジュレーションファクターを得る事ができると言える。

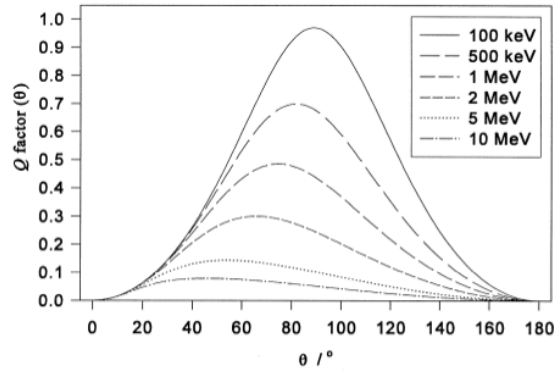


図 2.1.6: 散乱角 θ に対する散乱の異方性の分布。入射エネルギーが大きくなるにつれて分布のピークが低角度側に变化する。[12]

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。そこで、検出器の偏光に対する感度の指標として、最小偏光感度 (Minimum Detectable Polarization; MDP) がしばしば用いられる。MDP は一般に 99% の信頼度で偏光の検出が可能となる (統計的に無偏光と区別できる) 最低の偏光度で表される。具体的には以下で計算される [12]。

$$\text{MDP}(99\%) = \frac{4.29}{M_{100} \times R_S} \sqrt{\frac{R_S + R_B}{T}} \quad (2.1.16)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{4.29}{M_{100}} \sqrt{\frac{1}{R_S \times T} \cdot \frac{R_S + R_B}{R_S}} \\ &\sim \frac{4.29}{M_{100}} \sqrt{\frac{1}{N}} \quad \left(\because \frac{R_B}{R_S} \sim 0 \right) \end{aligned} \quad (2.1.17)$$

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] は観測時間であり、検出光子数 N [counts] = $R_S \times T$ である。MDP を小さくするためには、 M_{100} が大きく、 T が大きく、 R_S が大きく、 R_B が小さいとよい。ここで、 M_{obs} の統計誤差 σ と MDP(99%) の間には、数学的に

$$\text{MDP}(99\%) = 3.03 \times \sigma \quad (2.1.18)$$

という関係があり、MDP(99%) が分かれば、 M_{obs} については天体の偏光度の統計誤差を予想することができる。

ASTRO-H/SGD による偏光観測で期待されるモジュレーションファクターは、モンテカルロシミュレーションを用いて予想されており、Si でコンプトン散乱、CdTe で光電吸収された Si-CdTe イベントにおいて、エネルギーに依存するが、40~60 % 程度である。これはサイエンスワーキング・グループより、SGD MDP Calculation Tool [16] の入力データとして公開されている (図 2.1.7 参照)。本研究のビーム試験ではモジュレーションファクターのエネルギー依存性も評価するため、122 keV と 193 keV のビームを使用している。

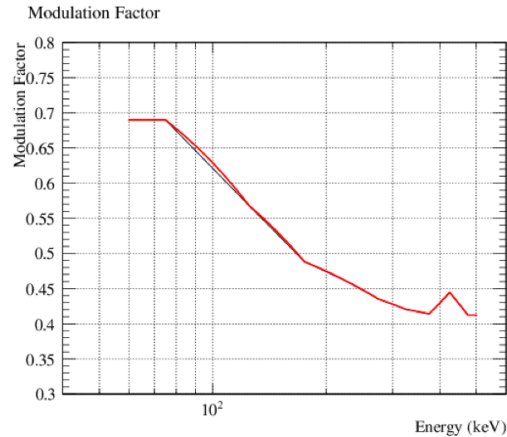


図 2.1.7: SGD の観測により得られると予想されるエネルギーに対するモジュレーションファクター。[16]

ここで、SGD での観測において、天体信号から偏光の情報を得るために検出器シミュレーターが必要な理由について述べる。先に述べたように、SGD の観測データのみでは天体の偏光情報 (偏光角, 偏光度) を正しく得る事はできない。図 2.1.8(上) はコンプトンカメラにより得られる観測データの方位角分布の例である (SPring-8 偏光ビーム試験における方位角 -90 deg のデータ)。検出器の無偏光に対する応答が各方位角に対して一定となる検出器であれば (上) の分布は式 2.1.13 に従うモジュレーションカーブとなるが、SGD コンプトンカメラの無偏光に対する応答 (図 2.1.8(中)) は検出器が同心円状でないことを反映して方位角に対して一定ではなく、サインカーブからずれている。そこで観測データを無偏に対する光応答で割る事により (下) モジュレーションカーブを取得する。放射性同位体を用いて検出器の無偏光に対する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検出器の全面に渡りデータを取得するためには膨大な時間が必要となり現実的ではない。そこで、ASTRO-H/SGD の観測では検出器シミュレーターを用いて無偏光に対する応答を取得する。図 2.1.8(中) には検出器シミュレーターに設定するコンプトンカメラの (青) パラメータ調整前と (橙) 調整後の無偏光に対する応答を載せた。設定するパラメータについては第 3 章、第 5 章を参照して欲しい。検出器シミュレーターにきちんと検出器のパラメータを設定できていないと、同じ観測データであっても得られるモジュレーションカーブの形状に違いが現れ (図 2.1.8(下) は (上) を (青) と (橙) で割った結果)、検出器シミュレーターにコンプトンカメラの状況をきちんと反映させなければ正しい偏光情報を得る事ができない。ASTRO-H/SGD の観測に用いる検出器シミュレーターの偏光応答の確立のためには、コンプトンカメラのどのような個性がモジュレーションカーブに影響しうるかを知る必要があり、本研究において SPring-8 偏光ビーム試験データと検出器シミュレーターとの比較により調整を進めた。

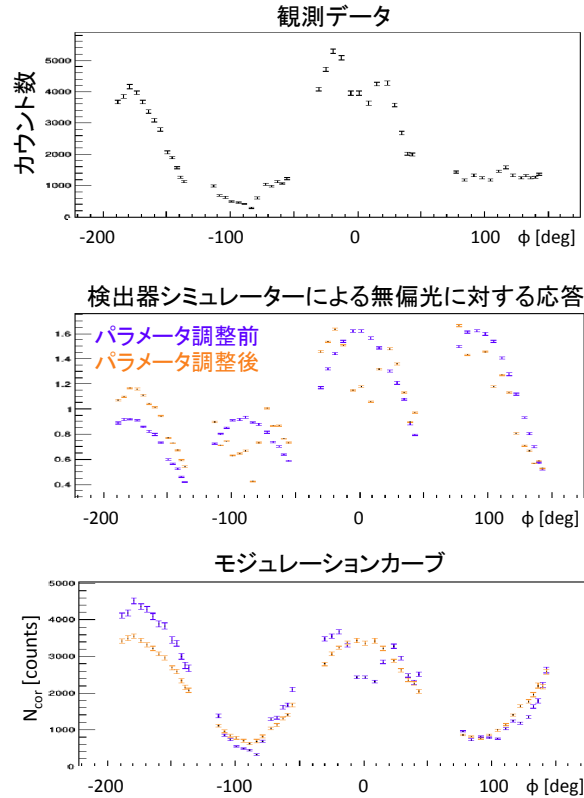


図 2.1.8: (上) 観測データの方位角分布 (SP8 ビーム試験時の偏光角 -90 deg のデータ)、(中) 検出器シミュレーターによる無偏光に対する応答、(下) 観測データを検出器シミュレーターの無偏光に対する応答で割ることにより得られたモジュレーションカーブ。(青) 検出器シミュレーターのパラメータ調整前、(橙) 調整後。設定したパラメータは第 3,5 章参照。

2.2 ASTRO-H 衛星 軟ガンマ線検出器 (SGD)

2015 年度打ち上げ予定の国際 X 線天文衛星 ASTRO-H は、2008 年 10 月 1 日より正式にプロジェクトとして出発した我が国 6 番目の X 線衛星である。開発の目的とその役割は以下のように大きく 3 つあり、

1. 硬 X 線望遠鏡によるはじ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 キロエレクトロンボルトから 600 キロエレクトロンボルトと、3 桁以上にもおよぶ、過去最高の高感度広帯域観測

である [1][2]。上記の目標達成のため、ASTRO-H 衛星には 4 つの検出器 (軟 X 線分光撮像検出器 (Soft X-ray Spectrometer; SXS), 軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager; SXI), 硬 X 線撮像検出器 (Hard X-ray Imager; HXI), 軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector; SGD)) と 2 つの望遠鏡 (軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope; SXT), 硬 X 線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope; HXT)) が搭載されており、宇宙の高エネルギー現象の解明を目指している。

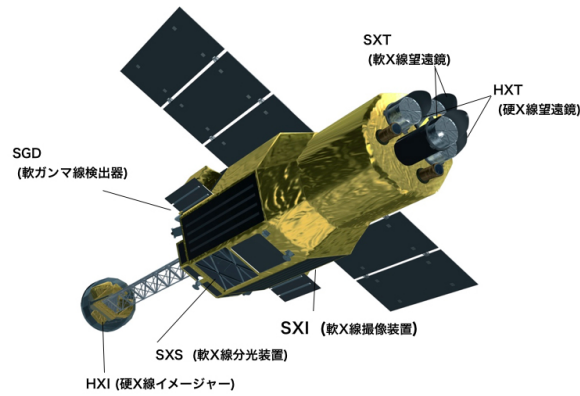


図 2.2.1: ASTRO-H 衛星の外観と搭載検出器 [11]

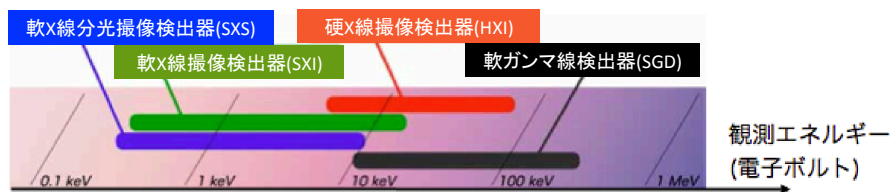


図 2.2.2: ASTRO-H 衛星搭載検出器の観測エネルギー領域

軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector; SGD) は ASTRO-H 衛星に搭載される 4 つの検出器の中で最も検出エネルギーが高い 60-600 keV を感度にもち、ASTRO-H 衛星の側面に 2 台搭載される。軟ガンマ線帯域の観測では、ガンマ線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ため、従来の光電吸収型検出器ではコンプトン散乱はバックグラウンドの要因となる。図 2.2.3 に X 線・ガンマ線領域を観測帯域とする検出器の感度を載せた。青は現在運用中の検出器であり、黒の SGD, HXI は ASTRO-H 衛星に搭載される検出器で、予想感度が示してある。sub-MeV 領域での検出感度が他の帯域に比べて悪いため、これまでの観測は他の帯域と比べると十分とは言えず、SGD による観測が期待される。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、SGD の科学観測の目標として、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非熱的放射の研究、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。

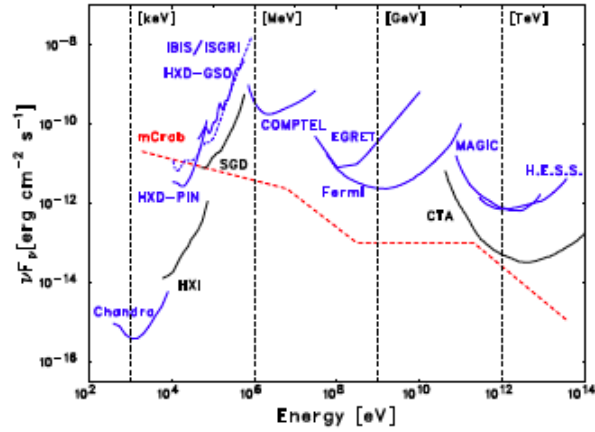


図 2.2.3: X 線・ガンマ線領域を観測帯域とする検出器の検出感度 [10]

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 (図 2.2.4)。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 (≥ 150 keV) で観測対象の天体外からの天体の混入を抑え、また BGO アクティブシールドとの反同時係数処理によりバックグラウンド除去し、さらに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の観測を目指している。

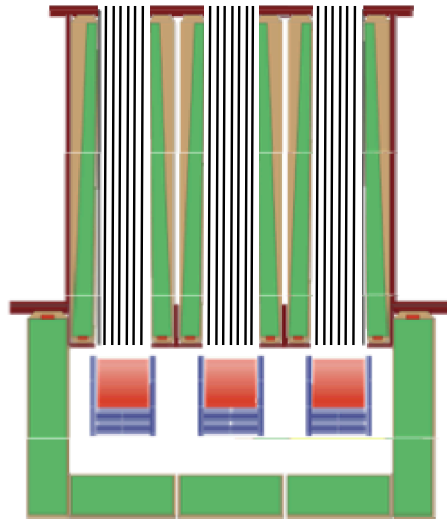


図 2.2.4: SGD1 台の概略図。コンプトンカメラ 3 台 (赤:Si 半導体, 青:CdTe 半導体) の周囲を 25 本の BGO アクティブシールド (緑) で囲い、ファインコリメータ (黒の縦線部) で視野を絞る。

表 2.2.1: SGD の要求性能

| | |
|----------|-------------------------------------|
| エネルギー帯域 | 60 – 600 keV |
| エネルギー分解能 | ≤ 4 keV (FWHM) @ 60 keV |
| 有効面積 | ≥ 20 cm ² @ 100 keV |
| 視野 | 0.6 deg × 0.6 deg |
| 動作温度 | -20 °C |

2.2.1 SGD 搭載 狭視野半導体多層コンプトンカメラ

SGD 搭載のコンプトンカメラは宇宙科学研究所 (ISAS)/宇宙航空の開発機構 (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などが密接に協力して共同研究を進めてきた [17][18][19][20][8][9][21][22][23]。その構造は Si ピクセル半導体検出器を散乱体、CdTe ピクセル半導体検出器を吸収体に用いた Si/CdTe 積層半導体コンプトンカメラである。Si は原子番号が小さいため Doppler broadening effect を起こしにくく、~50 keV 以上でコンプトン散乱を起こしやすい。CdTe は原子番号が大きいため ~300 keV 程度まで光電吸収が支配的となる。本試験で使用したコンプトンカメラは、SGD 搭載品と同一設計で製作されており、偏光ビーム試験で得られた知見はフライト品の偏光応答を構築する際に大いに参考となる。

SGD 搭載コンプトンカメラ 1 台の構成は、Si ピクセル半導体検出器が 32 層 (以降では Si と記載する)、その下層に CdTe ピクセル半導体検出器が 8 層 (以降では CdTe-Bottom と記載する)、それらの周囲に CdTe ピクセル半導体検出器が 2 層ずつ 4 方向に設置され、計 8 層 (以降では CdTe-Side と記載する) で囲う構造となっている (図 2.2.5)。Si 1 層は 3.2 mm × 3.2 mm のピクセルサイズで 16 個 × 16 個の電極を持ち、5.12 cm × 5.12 cm の大きさである。CdTe-Bottom は CdTe 検出器 4 枚で 1 層を構成し、CdTe-Side は CdTe 検出器 6 枚で 1 層を構成している (図 2.2.5) (Si は検出器 1 枚で 1 層を構成するのに対し、CdTe-Bottom, CdTe-Side は検出器が 4 枚または 6 枚で 1 層を構成していることに注意してほしい)。CdTe 検出器 1 枚も同様に 3.2 mm × 3.2 mm のピクセルサイズであり、8 個 × 8 個の電極を持ち、2.56 cm × 2.56 cm の大きさである。Si 検出器にかけるバイアス電圧は約 230 V であり、CdTe 検出器は約 1000V である。表 2.2.2 に Si 検出器 1 枚 (=1 層) と CdTe 検出器 1 枚の仕様を示す。

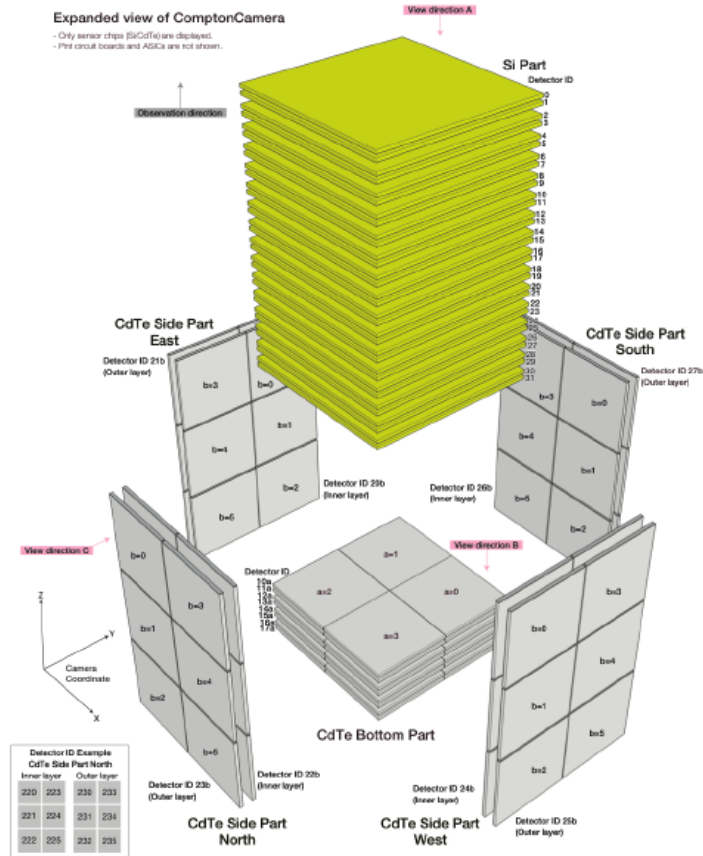


図 2.2.5: SGD 搭載コンプトンカメラ。32 層の Si 検出器 (黄) とその下層に 8 層の CdTe 検出器 (CdTe-Bottom)、周囲に計 8 層の CdTe 検出器 (CdTe-Side)。

表 2.2.2: SGD 搭載コンプトンカメラの Si 検出器、CdTe 検出器 1 枚の仕様

| | Si 検出器 | CdTe 検出器 |
|---------|-------------------|-------------------|
| 実効面積 | 5.12 cm × 5.12 cm | 2.56 cm × 2.56 cm |
| ピクセルサイズ | 3.2 mm × 3.2 mm | 3.2 mm × 3.2 mm |
| ピクセル数 | 16 × 16 | 8 × 8 |
| 実効厚さ | 0.60 mm | 0.75 mm |
| バイアス電圧 | 230 V | 1000 V |
| リーク電流 | < 50 pA | < 50 pA |

1 台のコンプトンカメラで読み出すチャンネル数 (ピクセル数) は、(Si : 16 個 × 16 個 × 32 層)+(CdTe-Bottom : 8 個 × 8 個 × 4 枚 × 8 層)+(CdTe-Side : 8 個 × 8 個 × 6 枚 × 8 層)=13312 個である。1 万を超える多量のチャンネルを読み出すために、208 枚の低ノイズ多チャンネル同時読み出し Application Specific IC(ASIC) を用いて 64 チャンネルずつ読み出しを行っている。さらに Si と CdTe-Bottom では ASIC 8 枚ご

とに、CdTe-Side では ASIC 6 枚ごとにまとめられ、デジチェーン接続をしている。デジチェーンは 28 系統あり、系統ごとにデータ取得やレジスタ設定が行われる。デジチェーンは Si 4 系統、CdTe-Bottom 1 系統、CdTe-Side 2 系統ごとに、ASIC Deriver Bord(ADB) によって計 4 系統にまとめられ、さらに ASIC Control Board(ACB) に接続している。ACB 上には ASIC の信号処理を行うための FPGA(Field-Programmable gate array; CC FPGA) があり、ADB に制御信号を送る。制御信号を受けた ADB はデジチェーンごとに ASIC に制御信号を送る。

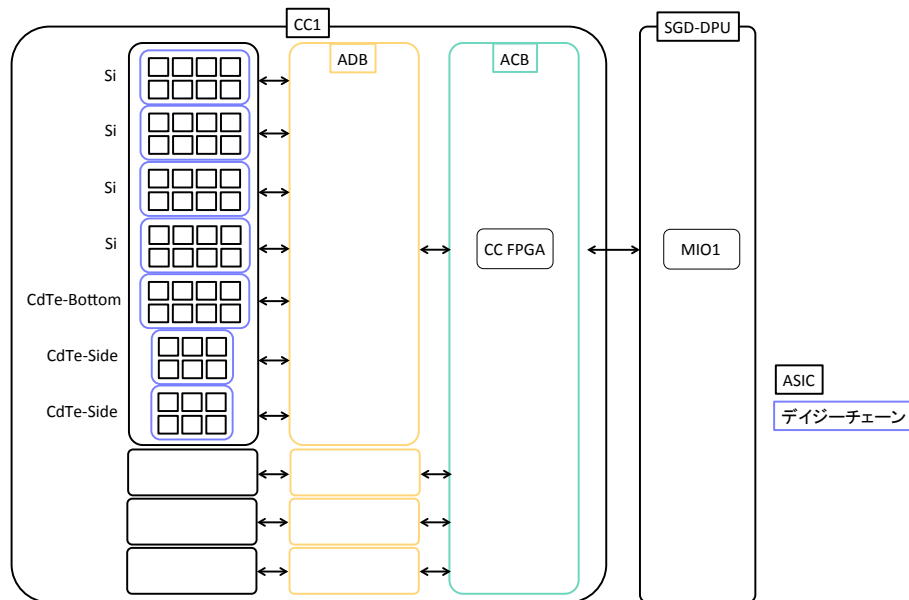


図 2.2.6: コンプトンカメラのデータ処理の概要。一番小さい四角が 1 枚の ASIC を表し、Si と CdTe-Bottom では 8 枚、CdTe-Side では 6 枚で 1 系統のデジチェーンに接続される。さらに本文中に記載した様に 1 つにまとめられ、データ読み出しを行う SGD-DPU(後述) と通信する。

2.2.2 コンプトンカメラのデータ処理

本試験で用いたコンプトンカメラのシステム構成について述べる。図 2.2.7 に本試験でのシステム構成の概要を示した [24]。SGD1 台はコンプトンカメラ 3 台と BGO シールドから構成され、CC3 台と BGO シールドを制御するシステムが構築されているが、本試験ではコンプトンカメラ 1 台のみで BGO シールドは搭載していない点や、SGD 実機のシステム構成と異なる。本試験のシステム構成は以下である。

SGD-S(Sensor)

検出器部分。主検出部であるコンプトンカメラ (CC1)、その読み出しのための ASIC を載せた Front-End Card(FEC) からなる。ASIC は ASTRO-H SGD 用に開発された、同時多チャンネル読み出しが可能な低電力、低ノイズのアナログ ASIC VATA450.3 [25] を使用している。

SGD-AE(Analog Electronics)

コンプトンカメラの電源制御を行う CPMU(Camera Power Management Unit) からなる。コンプト

ンカメラの高電圧 (HV) は、Si 用 HV と CdTe 用 HV のモジュールをセットした HV-CC から供給され、CPMU により制御される。

SGD-DPU(Data Processing Electronics)

コンプトンカメラの動作モードの制御やデータ読み出し、CPMU を制御する Mission I/O(MIO) となる。MIO は FPGA により制御される。

SGD-DE(Digital Electronics)

SGD-DPU と地上系との通信を行う。SGD 全体の状態を記録した HK(House Keeping) データを含むデータ処理を行い、パケットデータとして送信する。パケットデータや地上系からの CC を制御するコマンドの通信は、次世代宇宙通信技術である SpaceWire を利用して行う。

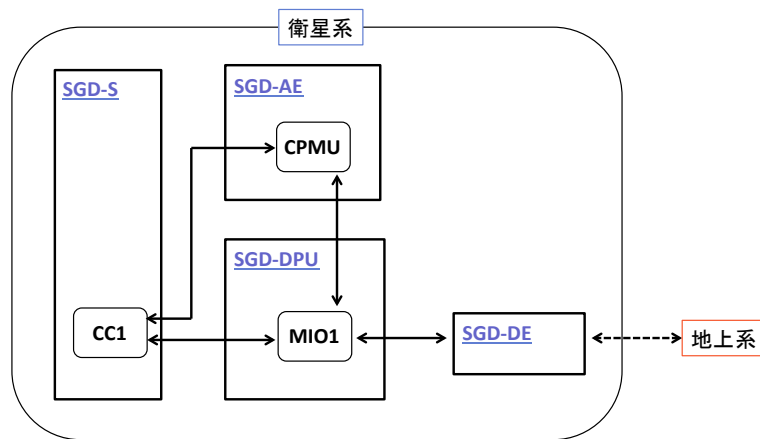


図 2.2.7: 本試験で用いたコンプトンカメラのシステム構成の概略図

2.2.3 コンプトンカメラのイベントデータ

取得データに含まれる情報について述べる。解析に用いる主な情報は以下である。

OccurenceID

コンプトンカメラ内で生じた 1 事象に対してつく番号。

Local Time

トリガ検出時の MIO1 のローカルタイム。32bit カウンタであり、1 カウンタは $25.6\mu\text{sec}$ である。

FLAG

イベントデータ取得時に発行された各種信号をまとめたもの。6bit の Trigger や 32bit の TriggerPattern などが含まれ、本データ解析では以下の 2 つ

- Length Check(LCHK)

各 ASIC のデータ内容と、その長さに矛盾があるもの。

- pseudo trigger

ある周波数でランダムに入力された信号。上空での Dead Time を調べる際に用いられる。

のフラグがついたイベントは解析から除いている。

NumberOfAllHitChannels

1 オカーレンス中のコンプトンカメラ内での反応回数。ここにはノイズシグナルや光子の偶然同時シグナルも含まれる。

CommonModeNoise

各オカーレンスごとに、各 ASIC 内の全てのチャンネルからのシグナルに同相で乗るノイズ。解析時には各シグナルの ADCValue から差し引く。

ChannelID

ASIC 内での 0-63 までのチャンネル番号。

ASICID

エネルギーデポジットのあった ASIC の番号。ChannelID と組み合わせることで、13312 個のどのチャンネルでの反応であったかが一意に決まる。

ADCValue

1 オカーレンス中の各シグナルのデポジットエネルギーに比例する電荷量。

ここで本文中の「イベント」と「オカーレンス」、「ヒット」と「シグナル」の使い分けについて述べる。データ取得により得られた raw data(上記のデータ)におけるコンプトンカメラ内の 1 事象を「オカーレンス」、1 オカーレンス中の 1 つないしは複数のコンプトンカメラ内の反応を「シグナル」と呼ぶ。これは、raw data におけるシグナルにはノイズや光子の偶然同時によるシグナルが含まれるためであり、コンプトン再構成後の、ノイズを除去し、純粋な 1 光子によるコンプトンカメラ内での 1 事象を「イベント」、1 イベント中のコンプトンカメラ内での反応を「ヒット」と定義する。本文中では「イベント」を「オカーレンス」と同義で用いることがあるが、「ヒット」と「シグナル」は厳密に区別して使用しているので注意してほしい。

第3章 SPring-8 偏光測定試験に向けた準備試験

コンプトンカメラの偏光応答を得るため、SPring-8 において直線偏光ビームによる偏光測定試験を行う。試験に用いるコンプトンカメラは、SGD 搭載品のコンプトンカメラと同一設計である。SPring-8 で偏光試験を行う前に、実験室で可能なモンテカルロシミュレーターの解析パラメータ調整や、コンプトンカメラのエネルギー較正などを行い、実験データとシミュレーションデータとの比較を行った。準備試験は宇宙科学研究所 高橋研究室の実験室において進めた。

3.1 準備試験概要

準備試験で行うべき項目は大きく以下の3つである。

各ピクセルのデータ読み出し状況の確認

コンプトン散乱を用いた偏光観測は散乱の異方性の測定をすることで情報が得られる。もしノイズが乗りやすいピクセルやデータ読み出しができないピクセルがあれば疑似偏光が生じうるためモンテカルロシミュレーターに取り込む必要がある。よってコンプトンカメラのデータ取得状況を調べた。

ゲイン補正 (ASIC のエネルギー較正)

データ取得の際に得られるのはデポジットエネルギーに比例する電荷量 ADC 値であり、対応するエネルギー eV に変換したい。コンプトンカメラ 1 台に搭載されるピクセル検出器 13312 個に対し、エネルギー較正曲線を作成した。

実験データとシミュレーションデータとの比較

上記2つが完了し、シミュレーターにコンプトンカメラのパラメータの取り込みが完了すれば、実験データとシミュレーションデータとの比較を行うことができる。もし解析結果のずれが大きい場合は原因を探り、パラメータ調整を行う必要がある。本研究で用いたモンテカルロシミュレーターは小高修論 [19] において開発、その後検証が進められ、SGD のジオメトリ情報を含むソースコードは Compton Soft[27] として公開されている。モンテカルロシミュレーターの詳細は付録を参照してほしい。

3.1.1 実験セットアップ

準備試験時の実験セットアップを図 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 に載せる。実験セットアップは SPring-8 試験時でも同様である。コンプトンカメラは軌道上環境の動作温度である -20°C に冷却する必要があるため恒温槽を用いてコンプトンカメラの冷却を行う。コンプトンカメラの取得データは DE と Gbit Ethernet により通信を行い地上系のデータレシーバーに送られる。また、コンプトンカメラのパラメータ設定などは地上系

PC からコマンド送信を行い制御する。恒温槽内のコンプトンカメラに組み付けている自動ステージについては、第 4.1.2 節を参照してほしい。

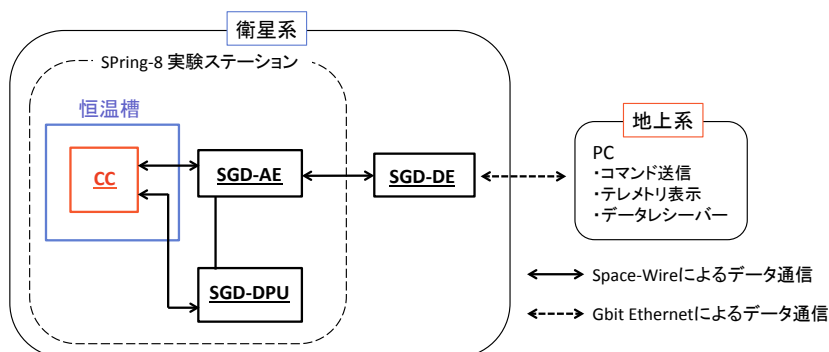


図 3.1.1: 実験セットアップ。SPring-8 ビーム試験時は恒温槽と AE, DPU は実験ステーション内 (第 4.1.1 節参照) に設置される。

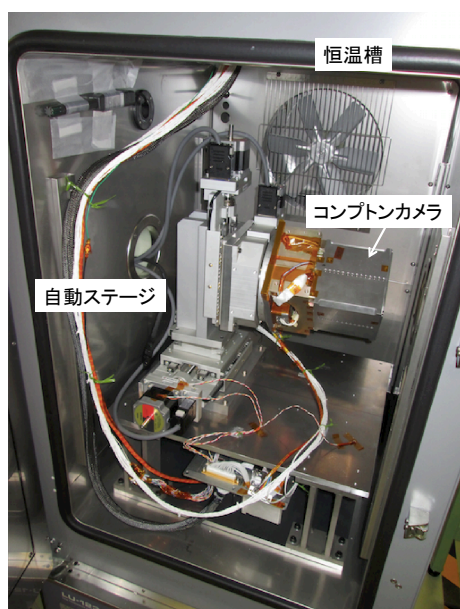


図 3.1.2: 恒温槽内の写真

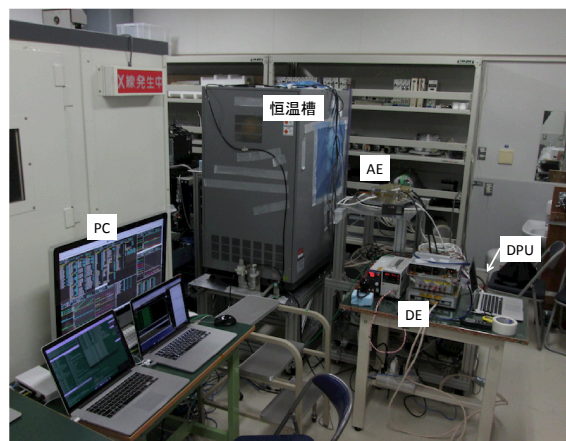


図 3.1.3: 実験セットアップの全体図。写真はSPring-8 前室での試験時。

ここで、コンプトンカメラの構造とレイヤー番号 (Layer ID)、本論文で記載する方位角 ϕ と散乱角 θ の定義を述べる。図 3.1.4 に (左) コンプトンカメラを視野方向から見た図と、(右) コンプトンカメラを視野方向に対して垂直方向から見た図を載せた。図に記載した座標系は検出器の持つ座標系である。それぞれの Layer ID は、Si が Z_camera の大きい方から順に 0~31、CdTe-Bottom が Z_camera の大きい方から順に 100~107、CdTe-Side が 200~207 である。方位角 ϕ は視野方向から検出器を見て右向きを正、つまり -X_Camera 方向を 0 度、反時計回りを正として -180 ~180 deg で定義し、散乱角 θ は -Z_Camera 方向を 0 度として 0~180 deg で定義する。また、方位角、散乱角ともに、ピクセル検出器の中心位置座標を用いて計算を行っており、検出位置はピクセルサイズ 3.2 mm×3.2 mm の範囲内で不定性がある。検出器の読み

出し線が各 Layer の四隅にまとめられているため、CdTe-Side は Si と CdTe-Side の真横ではなく、 π 型のように構成されている (図 3.1.4(左))。よって光子の入射位置ごとに、ジオメトリによって検出可能なコンプトン散乱の方位角は異なる。また、図 3.1.4(右) について、CdTe-Bottom は ASIC を 4 枚、CdTe-Side は 6 枚の ASIC により 1 層を形成するため、各 Layer の ASIC の周囲にはガードリングなどの不感部分が存在する (図 2.2.5, 3.2.3 参照)。

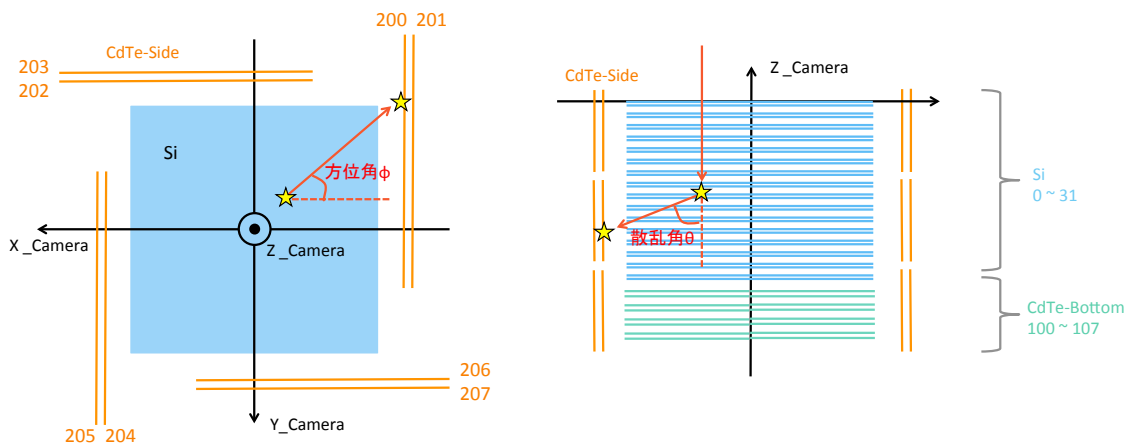


図 3.1.4: コンプトンカメラの構成。(左) コンプトンカメラを視野方向から見た場合、(右) コンプトンカメラの視野方向に対し、垂直方向から見た場合。(青)Si(Layer ID 0~31)、(緑)CdTe-Bottom(Layer ID 100 ~107)、(橙)CdTe-Side(Layer ID 200~207)。

また、視野方向からコンプトンカメラを見た際の Si のピクセル位置の記載方法について述べる。図 3.1.5 はコンプトンカメラを視野方向からみた際の Si 層であり、図 3.1.4(左) と対応している。Si は 16 個 \times 16 個のピクセルが並んでおり、Si の中心位置を原点と考え、図 3.1.5 の右向きと上向きを正とし、(赤)のピクセルは右に 2 個、上に 2 個の位置であることから (2,2) と記載する。同様に (橙)のピクセルは (1,1)、(緑)のピクセルは (-1,-1) とする。この記載方法で、以降のビーム照射位置や Si のファーストヒット位置のセレクションなどを記述する。

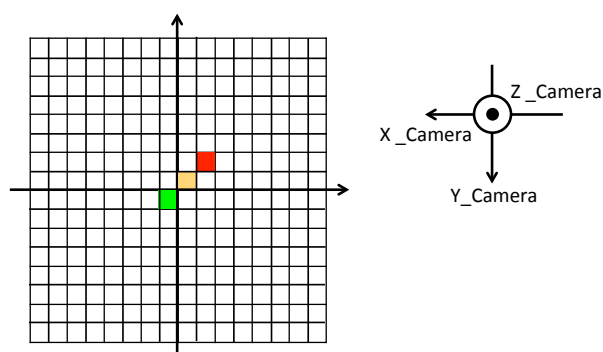


図 3.1.5: 視野方向からコンプトンカメラを見た際の Si のピクセル位置の記載方法。(赤)=(2,2), (橙)=(1,1), (緑)=(-1,-1) とする。

3.2 基本パラメータ取得および設定

コンプトンカメラの偏光測定は散乱の異方性を用いて検出するため、ノイズなピクセルやパッシブな物質の寄与を考慮してシミュレーションを行わなければならない。したがってコンプトンカメラの基本パラメータを取得し、その設定をシミュレーションデータ解析時のパラメータに反映させた。

3.2.1 読み出しのできないチャンネル

本試験で用いるコンプトンカメラはDCの不調により読み出しができないASICがSi層に8つ存在する。図3.2.1 読み出しができるレイヤーと、DCの不調により読み出しができないASICが含まれるレイヤーを示した(図3.2.1は ^{57}Co を(3,2)付近にコリメートして照射した実験データのヒット位置分布)。図3.2.2のように、読み出しができないASICはSiのLayer ID 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15に存在する。シミュレーションデータ解析では該当箇所でのシグナルは解析に用いない設定とした。

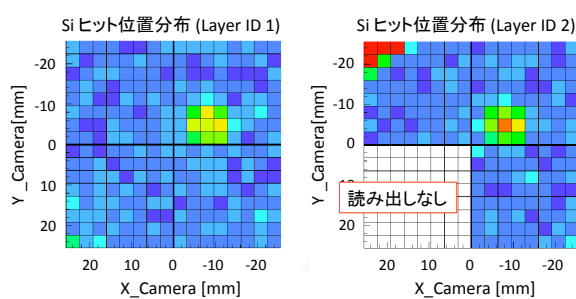


図 3.2.1: Si のヒット位置分布。(左) 正常に読み出しができる Si レイヤー、(右)DCの不調により読み出しができないASICが含まれる Si レイヤー

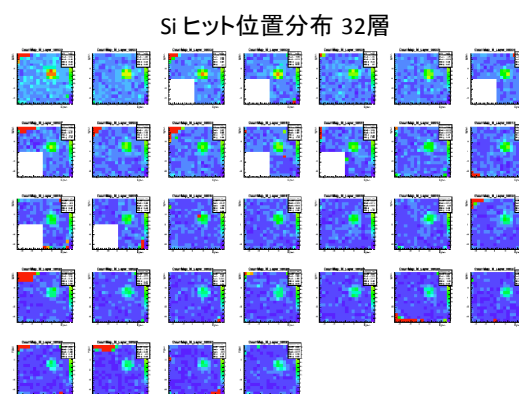


図 3.2.2: 左上から右向きに、Layer ID の順に 32 枚の Si のヒット位置分布並べた。白くなっている 8 箇所は読み出しができない部分 (Layer ID 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15)。

3.2.2 ストレンジチャンネル

CdTe 検出器において、ゲインが正しくないストレンジチャンネルの存在が確認された。ストレンジチャンネルは、ファンアウトボードとのパンプ接合の不良が原因と考えられており、読み出しが正常なピクセルであればエネルギーに比例する ADC 値が取得できるが、ストレンジチャンネルではデポジットエネルギーが高い場合でも、低 ADC 値のシグナルとして出力される。ストレンジチャンネルでは正しいデポジットエネルギーが取得できないため、シミュレーションデータ解析時にはストレンジチャンネルでのシグナルは取り扱わないこととした。ストレンジチャンネルの選定方法は以下の通りであり、ストレンジチャンネルは同じ ASIC 内の他チャンネルに比べ、高いエネルギーのイベントが少なくなることを利用している。記載したストレンジチャンネル探索のアルゴリズムは、SGD 衛星搭載品の動作検証における報告を参考に行った。

1. ^{22}Na の全面照射データについて、各ピクセルにおける 400~700 keV のシングルヒットのイベント数を取得し、各 ASIC ごとにヒストグラムを作成する (図 3.2.3)
2. 各 ASIC のヒストグラムの平均値を求め、それを N とする
3. 各チャンネルのイベント数に対し、 $N - 4\sqrt{N}$ より小さいものをストレンジチャンネルとする

図 3.2.3 に例として ASIC ID 45 のイベント数のヒストグラムを載せた。この場合はイベント数が 0 となっている 6 個のピクセルがストレンジチャンネルと選定される。

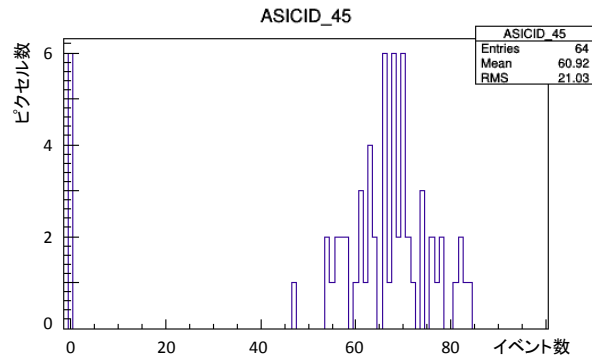


図 3.2.3: ASICID 45 での 400~700 keV のシングルヒットイベントの頻度分布

図 3.2.4(左) は上記アルゴリズムで選定された Layer ID 200(CdTe-Side) におけるストレンジチャンネルの分布図であり、(右) は ^{57}Co の全面照射時の Layer ID 200(CdTe-Side) のヒット位置分布である。図 3.2.4(右) の分布を作成する際はセレクションをかけていないため、ヒット位置分布は Z_Camera が小さくなるにつれてカウント数が滑らかに減少する分布が期待される。しかし、ところどころカウント数が少ないピクセルの存在が確認でき、(左) のストレンジチャンネルの分布位置と一致することがわかる。よってストレンジチャンネルはシミュレーションデータ解析時に取り除くようにした。ビーム試験データ解析時に上記の選定方法では選定しきれなかったストレンジチャンネルの存在が確認されたため、そのようなチャンネルに関しては別途確認し、ストレンジチャンネルのリストに追加した (最終的に選定した個数は表 3.2.1、位置は図 3.2.5)。

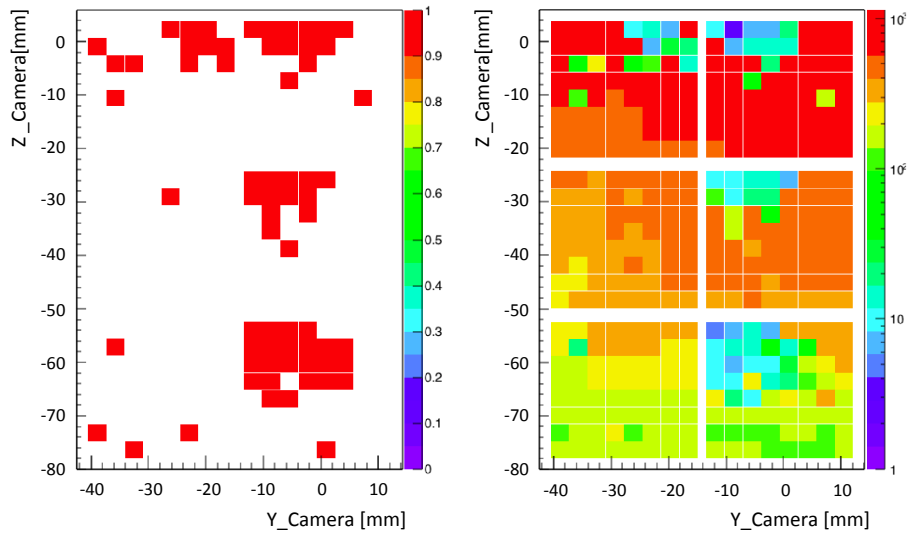


図 3.2.4: (左)Layer ID 200(CdTe-Side) におけるストレンジチャンネルの分布。(右) ^{57}Co を全面照射した際の Layer ID 200(CdTe-Side) におけるヒット位置分布 (ASIC 8×8 ピクセルの周囲の白い部分はガードリングなどの不感部分)。

表 3.2.1: 最終的にシミュレーターに組み込んだストレンジチャンネルの個数

| Layer ID | ストレンジチャンネルの個数 [個] |
|----------|-------------------|
| 200 | 71 |
| 201 | 20 |
| 202 | 69 |
| 203 | 53 |
| 204 | 2 |
| 205 | 12 |
| 206 | 76 |
| 207 | 56 |
| 計 359 | |

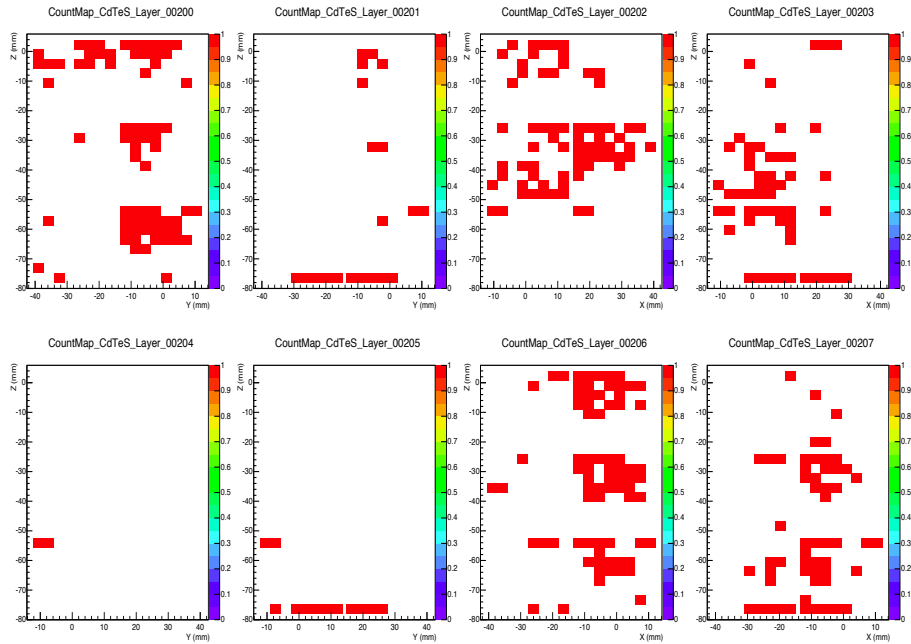


図 3.2.5: 最終的にシミュレーターに組み込んだストレンジチャンネルの位置分布。

3.2.3 トリガー信号があってもシグナルの取得をしないチャンネル

コンプトンカメラの各チャンネルでの読み出しは、ASICによって多チャンネルを同時に読み出す。各ピクセルでのシグナルを読み出す際は、検出器での誘導電荷を電圧信号に変換、増幅を行い、整形増幅後にスレッシュホールドを越えた場合にTA部においてトリガー信号を出力し、VA部にサンプルホールド信号を送る。VA部でホールドされた波高値はAD変換され、ADC値として出力される。ここで、各ピクセルにおけるデータ取得時の設定として、トリガー信号を受け取った場合でもシグナルの取得をしない設定にすることができる。本研究で用いたコンプトンカメラは、過去の試験時にトリガーレートが高く、ノイズが乗りやすいピクセルなど、正常な動作をしないピクセルについてはトリガー信号を受けてもシグナルの取得を行わない設定としていた。以降ではこの設定を行ったチャンネルを「trigger disableにしたチャンネル」と記載する。本試験中でもこの設定は継続して用いたため、シミュレーションデータ解析時はtrigger disableにしたチャンネルを取り除いて解析を行った。ただし、trigger disableチャンネルであっても、他のピクセルによりトリガー信号が出力され、trigger disableチャンネルにも誘導電荷がある場合はtrigger disableにしたチャンネルのシグナルは取得される。よって、trigger disableにしたチャンネルについては実験データ解析時にもそのシグナルを用いないこととした。表3.2.2にtrigger disableにしたチャンネルの各検出器における個数を載せたが、CdTe-Sideのtrigger disableにしたチャンネル48個のうち、26個はストレンジチャンネルとしても選定されている。

表 3.2.2: trigger disable にしたチャンネルの個数

| Layer | trigger disable にしたチャンネルの個数 [個] |
|-------------|---------------------------------|
| Si | 28 |
| CdTe-Bottom | 1 |
| CdTe-Side | 48 |
| 計 77 | |

3.3 ASIC のエネルギー較正

イベントデータ取得時に得られる ADC 値を、対応するエネルギー eV に変換したい。13312 個のチャンネルそれぞれに個性があるため、各チャンネルごとにエネルギー較正曲線を作成しなければならない。コンプトンカメラのエネルギー較正の方法には以下のように大きく 3 つある [9]。

1. 光電吸収ピークのみを用いる方法

放射線同位体を用いてスペクトルを作成し、光電吸収ピークの ADC 値とエネルギーを対応づける方法である。複数の線源により、複数の ADC 値とエネルギーの対応関係を取得できれば、任意の曲線によりエネルギー較正曲線が得られる。しかしこの方法は SGD のコンプトンカメラでのエネルギー較正手法には向いていない。その理由として、

1. ADC 値とエネルギーの対応を得るために必要な統計数を各ピクセルで貯めるには多大な時間が必要
2. 高エネルギーのガンマ線はコンプトン散乱が優勢となり、較正点を得づらい
3. 低エネルギーのガンマ線は Si や CdTe-Bottom, CdTe-Side の下層に届きづらい

ためである。

2. 光電吸収ピークとコンプトン散乱を利用する方法

SGD のコンプトンカメラを用いた先行研究において、SGD コンプトンカメラの特徴であるコンプトン散乱を用いてエネルギー較正を行う方法が開発された [8]。これは上記の光電吸収ピークのみを用いる方法の問題点を全て解決する手法である。3 つの Step により行われ、以下に簡単にその方法を記載する。

Step1

放射線同位体の光電吸収ピークを用いて大まかなエネルギー較正曲線を作成する

Step2

入射ガンマ線のエネルギー (放射同位体のガンマ線エネルギー) を E として 2 ヒットイベントを考え、コンプトン散乱によるデポジットエネルギーを E_1 、光電吸収エネルギーを E_2 とした場合、

$$E = E_1 + E_2$$

が成り立つ。ここで、Si で散乱し、CdTe で光電吸収が生じたとすると、Step 1 の較正において高エネルギー側のエネルギー較正が正しいと仮定すると、Si のデポジットエネルギーを $E - E_2$

とし、較正点として扱うことができる。また、CdTe-CdTe の 2 ヒットイベントの場合もデボジットエネルギーの低いイベントの較正点を得る事ができる。

Step3

Step2 において、低エネルギー側のエネルギー較正が完了した。今度はこの較正曲線を用いて CdTe の高エネルギー側を較正する。

Step2 と Step3 を繰り返し行うことでエネルギー較正点を増やして精度をあげ、任意の関数でフィッティングすることによりエネルギー較正曲線が得られる。

3. ASIC のテストパルスと光電吸収ピークを用いる方法

簡便に、かつ迅速にエネルギー較正を行うため、SGD 用に開発された ASIC VATA 450.3 にはテストパルスを用いて ASIC 内のキャリブレーションを行う機能がある。ASIC に取りつけられたテストパルス生成器により、全チャンネルに対してある入力電荷を与え、テストパルスデータとして取得される ADC 値との対応関係を得る事で較正を行うことができる。テストパルスの入力電荷量 Q は

$$Q = Q_{max} \frac{1}{127} (b_0 + 2b_1 + 4b_2 + 8b_3 + 16b_4 + 32b_5 + 64b_6) \quad (3.3.1)$$

と表される。ここで Q_{max} は入力可能な最大の電荷量であり、 $b_0 \sim b_6$ はビットを表し、0 または 1 である。以降ではテストパルスによる入力電荷を DAC 値と記載する。ASIC 内の 64 チャンネルには同じコンデンサーによりテストパルスが入力されるため、ASIC 内で DAC 値と ADC 値の較正ができれば、64 チャンネルのゲインを DAC 値により揃えることができる。そして、各 ASIC の DAC 値とエネルギーの較正ができると、全チャンネルの ADC 値とエネルギーの較正が完了する。DAC 値とエネルギーの較正については、最初に記載した 1 番の線源の光電吸収ピークを用いる方法が利用でき、各 ASIC でゲインがそろっているため、64 チャンネルでイベントデータを足し合わせて DAC 値のスペクトルを作成することができ、光電吸収イベントの統計を比較的貯めやすい。

本修論では上記 3 番の ASIC のテストパルスを用いる方法によりエネルギー較正を行った。以降ではテストパルスによるエネルギー較正について述べる。

3.3.1 テストパルス試験

テストパルス試験の概要について述べる。テストパルス試験では全チャンネルに対し様々な電荷量で入力をするが、全てのチャンネルに細かい DAC 値の刻み幅 (ステップ間隔) で電荷を入力するには時間がかかるため、表 3.3.1 の様に電荷を入力した。各 ASIC のうち Channel ID 15 と 40 ではステップ間隔を 1 とし、細かいデータを取得し、その他の全チャンネルではステップ間隔を大きくしてデータを取得した。

表 3.3.1: 入力した各検出器でのテストパルス

| | Si | | CdTe | |
|----------|--------|-------------------|--------|-------------------|
| | 全チャンネル | Channel ID 15, 40 | 全チャンネル | Channel ID 15, 40 |
| 最小 DAC 値 | 2 | 2 | 5 | 2 |
| 最大 DAC 値 | 37 | 44 | 77 | 80 |
| ステップ間隔 | 7 | 1 | 18 | 1 |
| 較正点数 | 6 | 43 | 5 | 79 |

3.3.2 テストパルス試験結果とエネルギー較正結果

まず大まかなエネルギー較正の概要を述べる。最初にテストパルス試験データを用いて各チャンネルで ADC 値と DAC 値の較正を行い、ここで得られる ADC 値から DAC 値への較正曲線を $f(\text{ADC})$ (各チャンネル 13312 個分) とする。 $f(\text{ADC})$ の作成が完了すると、各 ASIC 内の 64 チャンネルは DAC 値でゲインがそろうため、各 ASIC で線源を用いて DAC 値とエネルギーの較正を行う。ここで得られる DAC 値からエネルギーへの較正曲線を $g(\text{DAC})$ (各 ASIC 208 個分) とすると、各ピクセルにおける ADC 値からエネルギーへのエネルギー較正曲線は、 $g(f(\text{ADC}))$ として得る事ができる。ここでのエネルギー較正手法は内田修論 [9] における衛星搭載品を用いた試験でのデータ解析手法に則っている。

これからテストパルス試験データ解析方法、結果について述べる。

Step1 入力電荷 (DAC 値) に対応する ADC 値を求める

テストパルスとして入力された電荷は、その値に比例する ADC 値に変換されて出力される。テストパルスのヒストグラムを作成すると、図 3.3.1 のように入力した DAC 値に対し、対応する ADC 値を中心とするガウス分布が得られる。図 3.3.1 は Si でテストパルスを入力した際のヒストグラムであり、ステップ間隔 7 で 6 つの DAC 値で電荷を入力した (表 3.3.1 参照) ため、6 つのピークができています。それぞれのピークをガウシアンでフィッティングを行い、DAC 値に対する ADC 値を求めた。また、DAC 値のステップ幅を 1 としてテストパルスを入力した Channel ID 15 (図 3.3.2) と 40 についても、同様にそれぞれのピークをガウシアンでフィッティングを行い、DAC 値と ADC 値との関係を求めた。

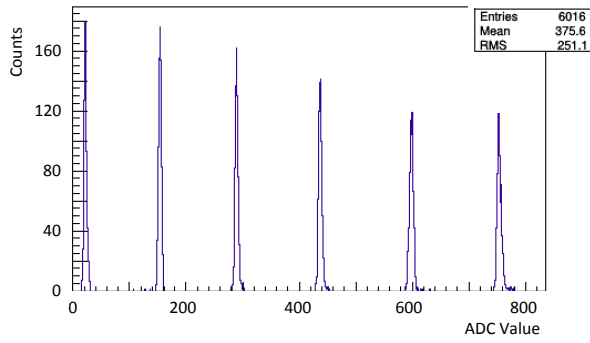


図 3.3.1: Si (ASIC ID 0, Channel ID 6) におけるテストパルスデータのヒストグラム

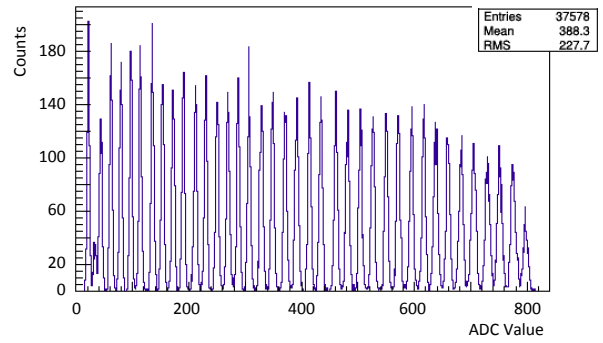


図 3.3.2: Si (ASIC ID 0, Channel ID 15) におけるテストパルスデータのヒストグラム

Step2 DAC 値のビットシフト

DAC 値と ADC 値の関係を 3 次関数でフィッティングを行い、その残差を確認すると、16 点や 8 点ずつといった規則的な段差が生じる (図 3.3.3, 3.3.4(左))。これは DAC 値の入力ビットと、生成されるテストパルスの出力電圧との非線形性によるためだと考えられる [23]。そこでこの影響を考慮するため、DAC 値の入力ビットに以下のような補正係数 $t_0 \sim t_6$ を与える。

$$Q = Q_{max} \frac{1}{127} (t_0 b_0 + 2t_1 b_1 + 4t_2 b_2 + 8t_3 b_3 + 16t_4 b_4 + 32t_5 b_5 + 64t_6 b_6) \quad (3.3.2)$$

理想的には $t_0 \sim t_6$ は 1 であるが、補正係数を求めて与え、ビットシフト後の DAC 値に対する ADC 値の較正曲線を 3 次関数により再びフィッティングを行うと、残差の改善が確認される (図 3.3.3, 3.3.4(右))。

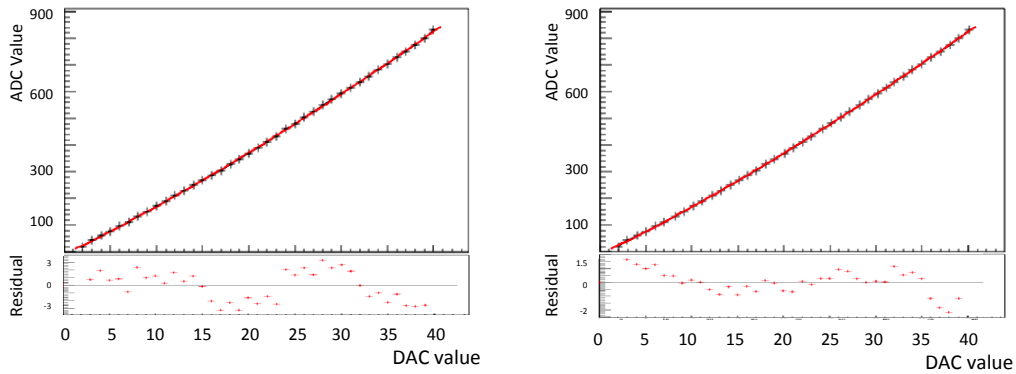


図 3.3.3: Si (ASIC ID 0, Channel ID 15) における DAC 値と ADC 値の較正曲線。(左) ビットシフト前、(右) ビットシフト後。

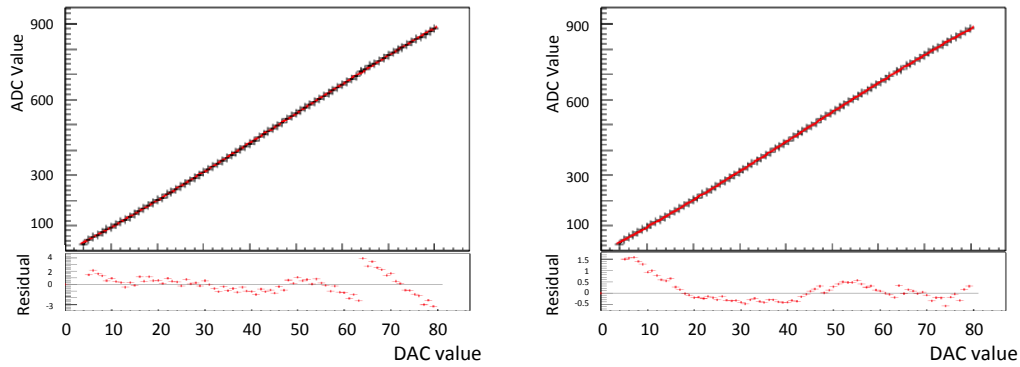


図 3.3.4: CdTe (ASIC ID , Channel ID 15) における DAC 値と ADC 値の較正曲線。(左) ビットシフト前、(右) ビットシフト後。

Step3 較正点の補間

各 ASIC においてステップ間隔 1 でテストパルスデータを取得したチャンネルは 2 つであり、他の 62 チャンネルは Si では 6 点、CdTe では 5 点である。各 ASIC でこれら 62 チャンネルの較正点の間に、ステップ間隔 1 で較正点を得ているチャンネルを基準にして較正点を補間する。表 3.3.2 に ASIC ID 0 における Channel ID 15 の補間した ADC 値を載せた。補間の方法は、まず共通して取得した DAC 値でのそれぞれの ADC 値の差を求める。次に、差同士を結ぶ線分を考え、DAC 値が 1 つ増加した際の増分をステップ間隔 1 で取得した ADC 値に足すことで補間する ADC 値を求めた。これで全 13312 チャンネルの ADC 値と DAC 値の較正が完了し、 $f(\text{ADC})$ が完成した。

表 3.3.2: ASIC ID 0 における較正点の補間

| DAC 値 ビットシフト後 (前) | Channel ID 15 ADC 値 | Channel ID 6 ADC 値 | 差 | 補間する ADC 値 |
|----------------------|------------------------|-----------------------|--------|------------|
| 1.97138 (2) | 20.9561 | 21.1675 | 0.2114 | 21.1675 |
| 2.93487 (3) | 42.9585 | | | 43.2749 |
| 4.03804 (4) | 61.7411 | | | 62.1779 |
| 5.00153 (5) | 78.3831 | | | 78.9249 |
| 6.00942 (6) | 96.6484 | | | 97.3001 |
| 6.97291 (7) | 113.336 | | | 114.093 |
| 8.1552 (8) | 135.058 | | | 135.944 |
| 9.11869 (9) | 152.494 | 153.485 | 0.991 | 153.485 |
| 10.1266 (10) | 171.765 | | | 172.971 |
| 11.0901 (11) | 190.038 | | | 191.488 |
| 12.1932 (12) | 210.884 | | | 212.529 |
| 13.1567 (13) | 229.412 | | | 231.262 |
| 14.1646 (14) | 249.948 | | | 252.013 |
| 15.1281 (15) | 268.671 | | | 270.941 |
| 16.005 (16) | 287.06 | 289.516 | 2.456 | 289.516 |
| 16.9685 (17) | 306.38 | | | 308.916 |
| 17.9764 (18) | 327.976 | | | 330.596 |
| 18.9399 (19) | 347.861 | | | 350.56 |
| 20.043 (20) | 370.498 | | | 373.288 |
| 21.0065 (21) | 390.897 | | | 393.768 |
| 22.0144 (22) | 413.236 | | | 416.19 |
| 22.9779 (23) | 433.804 | 436.072 | 2.268 | 436.072 |
| 24.1602 (24) | 460.003 | | | 463.072 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

Step4 DAC 値とエネルギーの較正曲線を作成する

f(ADC) を用いることで各 ASIC 内のゲインがそろうため、ASIC ごとに線源を用いて DAC 値とエネルギーの較正を行う。使用した線源は ^{241}Am (17.7, 20.8, 26.3, 59.5 keV), ^{133}Ba (31.0, 35.0, 81.0, 276, 302, 356, 383 keV), ^{57}Co (14.4, 122, 136 keV), ^{152}Eu (40.1, 45.1, 121.8, 245, 344, 441.1, 433.9 keV), ^{22}Na (511 keV), ^{137}Cs (662 keV) である。各 ASIC で線源のシングルヒットイベント (光電吸収イベント) の DAC 値 (=f(ADC)) のスペクトルを作成すると、線源のエネルギーに比例する DAC 値を中心としたガウス分布ができる。そのピークをガウシアンでフィッティングすることで DAC 値とエネルギーとの関係を求めた。使用した線源のエネルギーは ASIC により異なり、ここでは解析時のスレッショルドをデータ取得時のスレッショルドと同じ値 (ADC 値 10) としていたため、ノイズの影響により本来得たい線源からのシングルヒッ

トイベントがマルチシグナルのイベントとなった影響で、線源からのシングルヒットイベントの統計が十分に足りない ASIC があった。このことについては、第 5.1.2 節で適切な解析スレッシュホールドを設定し、再度エネルギー較正を行っているので参照してほしい。以上より、各 ASIC 208 個の $g(\text{DAC})$ が完成した。

Step5 エネルギー較正曲線の完成

以上で $f(\text{ADC})$ と $g(\text{DAC})$ が完成し、エネルギー較正曲線 $g(f(\text{ADC}))$ により ADC 値からエネルギーへの較正ができる。エネルギー較正曲線は $g(f(\text{ADC}))$ を 3 次スプライン関数で繋いだ曲線とし、ADC 値 0 を 0 keV としている。図 3.3.5 は ASIC ID 33(CdTe-Bottom) の ^{133}Ba のエネルギースペクトルである。先に述べた通り統計が足りず較正点が少ない ASIC もあるが、較正点として用いていないピークにおいてもエネルギー値とのずれがなく、正しく較正ができていることがエネルギースペクトルから確認できるため、ここで作成したエネルギー較正曲線を用いて SPring-8 試験に臨んだ。

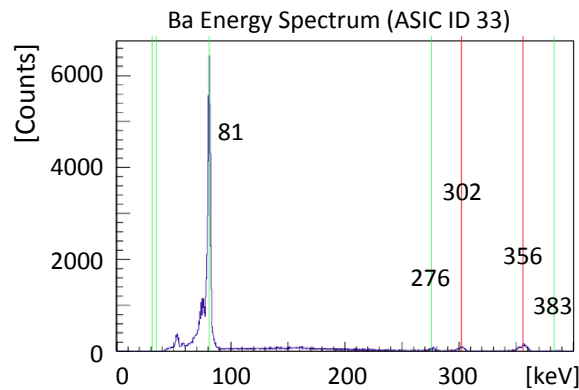


図 3.3.5: ASIC ID 33 の ^{133}Ba のエネルギースペクトル。赤はエネルギー較正に用いたエネルギー、緑はエネルギー較正に用いていないエネルギー

3.4 ^{57}Co 無偏光データを用いたシミュレーターの検証

上記のパラメーターをシミュレーターに反映させ、シミュレーションデータと実験データとの比較を行った。ここで比較を行うのは Si でコンプトン散乱、CdTe-Side で光電吸収される 2 ヒットイベント (以降では Si-CdTeS イベントと記載する) の方位角分布である。実験データは ^{57}Co を 73 時間照射して十分に統計を貯めた、無偏光データである。線源の照射位置を絞るため、6 mm 厚の鉛板に直径 2 mm の穴をあけてコンプトンカメラから 10.5 cm の位置に設置し、線源はコンプトンカメラから 26.5 cm の位置に設置してデータ取得をした。実験では図 3.4.1(左) のような照射位置となっており、シミュレーションでは実験を再現するように、122 keV の無偏光ビームを図 3.4.1(右) のように照射した。詳細なパラメータは表 3.4.1 である。表に記載している「合計デポジットエネルギーの制限」とは、Si-CdTeS イベントを選出するためである。もし 2 ヒットのイベントであっても、光電吸収されずにエスケープしたイベントであれば、合計デポジットエネルギーは 122 ± 10 keV よりも小さくなると考えられ、解析条件から外れる。また、ノイズシグナルとの偶然同時により 2 シグナルのイベントであっても、合計デポジットエネルギーのセレクションから外れるため、コンプトンリコンストラクションをしていない実験データであっても 122 keV の入射ガンマ線

による Si-CdTeS イベントを選択することができる。「Si でのデポジットエネルギーの制限」は、Si-CdTeS イベントにおいてジオメトリから制限される散乱角 θ に対し、コンプトン散乱の式から物理的に制限されるエネルギーの範囲から、エネルギー分解能を考慮して設定した。「ファーストヒット位置の制限」は、周囲で散乱して入射したイベントの混入を防ぐためであり、また、シミュレーションデータはビーム試験の模擬として検出器に垂直にガンマ線を照射したため、実験データでも検出器に垂直に入射したイベントのみを選ぶためである。

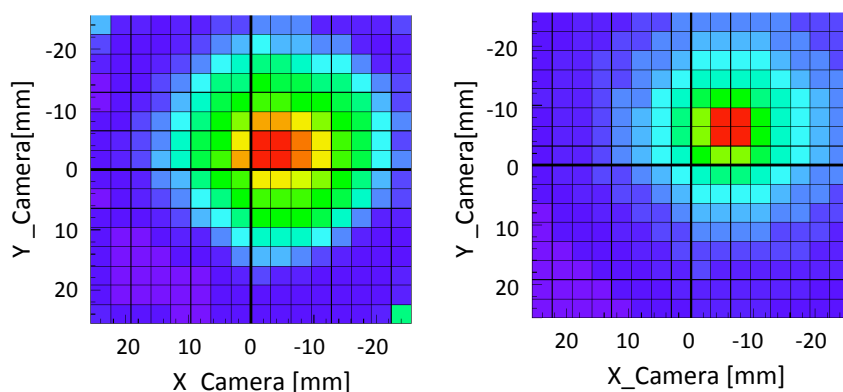


図 3.4.1: Si 32 層全体のヒット位置分布。(左)⁵⁷Co を照射した実験データ、(右)シミュレーションデータ

表 3.4.1: 実験データとシミュレーションデータの解析条件

| パラメータ | 実験データ | シミュレーションデータ |
|-----------------------------|-------------------------|---|
| 合計デポジットエネルギーの制限 | 122 ± 10 keV | 122 ± 10 keV |
| Si でのデポジットエネルギーの制限 | 5 ~ 40 keV | 5 ~ 40 keV |
| 各ピクセルのスレッシュホールド | 10 ADC Value | 5 keV |
| ファーストヒット位置の制限 | (2,2),(2,3),(3,2),(3,3) | (2,2),(2,3),(3,2),(3,3) |
| シミュレーションデータ解析時に 取り除くピクセル | DC 不調 (第 3.2.1 節) | 計 512 ch |
| | ストレンジチャンネル (第 3.2.2 節) | 計 336 ch |
| 備考 | 2 シグナルのイベント | 2 ヒットのイベント 検出器に対し垂直にビーム照射 偏光度 0% のガンマ線 FM 品程度のエネルギー分解能 |

以下に実験データとシミュレーションデータの比較結果を載せる。図 3.4.2 は Si-CdTeS イベントにおける、(横軸)Si のデポジットエネルギー、(縦軸)CdTe-S のデポジットエネルギーの分布である。ここではシミュレーターのエネルギー分解能は衛星搭載品程度の設定となっているため、実験データ解析結果に比べて分解能がよい。実験データ解析結果を見ると、想定されるエネルギーの範囲で Si-CdTeS イベントが取得で

ており、エネルギー較正が問題なくできていることが確認できる。図 3.4.3 に Si-CdTeS イベントの、実験データとシミュレーションデータの方位角分布の比較を載せた。シミュレーションデータは実験データを概ね再現できており、現状のエネルギー較正曲線による分解能や、実験とシミュレーションとのガンマ線の照射位置の違いを考慮して、シミュレーターにおけるジオメトリなどの明らかな間違いはないと考えてよいと言える。よって、実験室で行えるシミュレーターの検証も完了した。

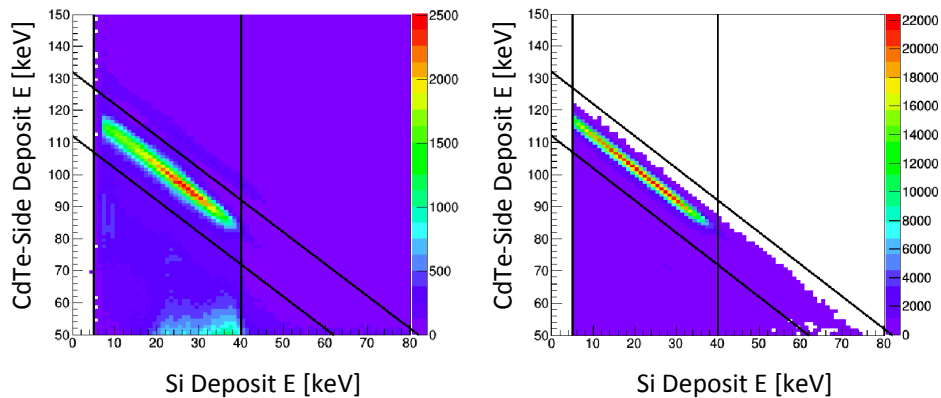


図 3.4.2: 全 Si-CdTeS イベントにおける、(横軸)Si でのデポジットエネルギー、(縦軸) CdTe-S でのデポジットエネルギー。(左) 実験データ解析、(右) シミュレーションデータ解析。黒線は表 3.4.1 でのエネルギーのセレクション値。

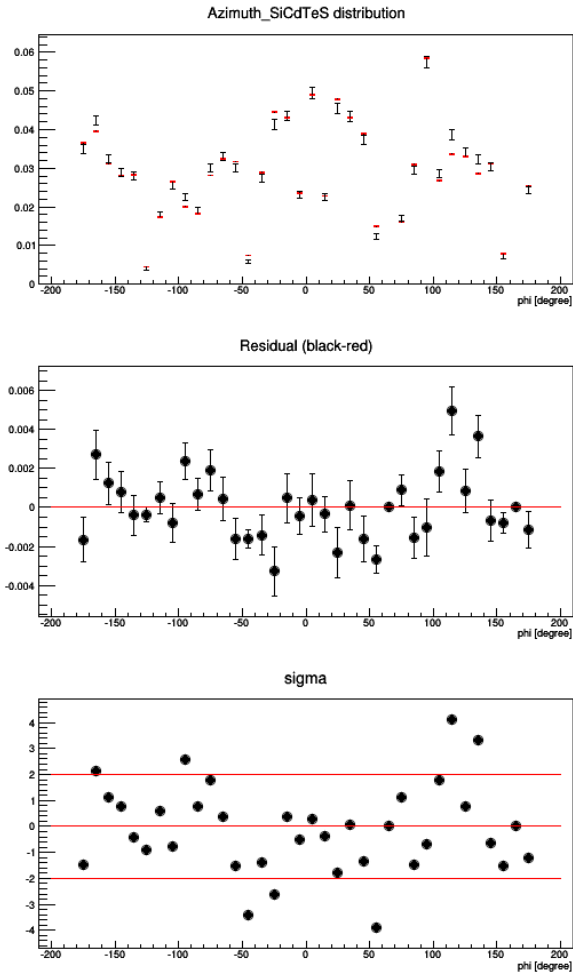


図 3.4.3: Si-CdTeS イベントの方位角分布の比較。(上)Azimuth 分布。縦軸は normalised counts。((黒) 実験データ、(赤) シミュレーションデータ)、(中) 残差、(下) 残差を統計誤差でわったもの

第4章 SPring-8 偏光測定試験

4.1 試験概要

2015年11月12~14日に大型放射光施設 SPring-8 において、122, 193 keV の単色 X 線を用いた CC の偏光測定試験を行った。以下に本試験の概要を示す。

4.1.1 SPring-8 BL08W

SGD が偏光に対して高い感度を持つのは 100-200 keV の範囲であり、検出器の偏光応答を得るためにはこのエネルギー範囲の単色 X 線で、かつ、系統誤差を抑えるために 100%に近い偏光度を持ったビームを用いたい。これらの条件を満たすのは、日本国内では SPring-8 のビームライン BL08W [26] のみであり、本研究では BL08W を使用した。BL08W はコンプトン散乱と磁気コンプトン散乱の測定を主目的として設計され、100~300 keV という高エネルギーの単色 X 線を利用できる。光源は楕円ウィグラーであり、位相を変えることで楕円偏光または直線偏光を選ぶことができる。BL08W には分光方法の異なる実験ステーションが 2 つあり、本試験では照射したいビームのエネルギーを考慮し、非対称ヨハン型分光器を用いて集光・単色化をする、実験ステーション A において行った。図 4.1.1 に実験ステーション A のレイアウト、表 4.1.1 に実験ステーション A におけるパラメータを示す。

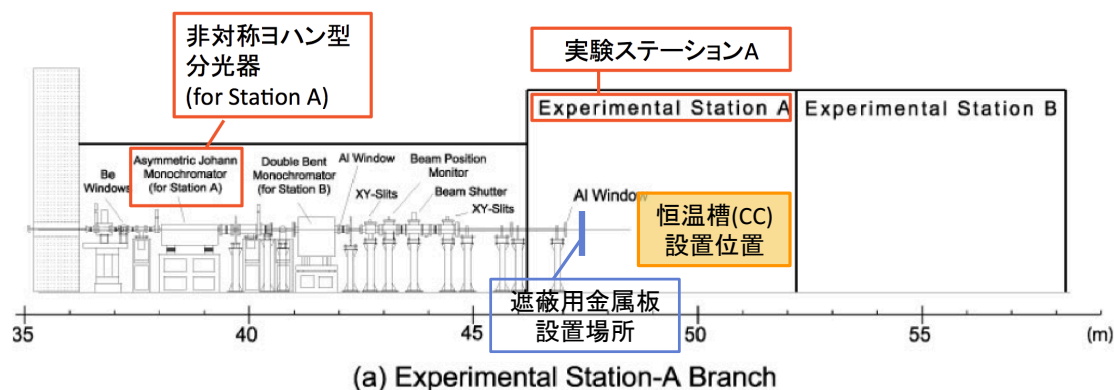


図 4.1.1: BL08W と実験ステーション A のレイアウト [26]

表 4.1.1: 実験ステージ A におけるパラメータ [26]

| | |
|----------|------------------------------------|
| エネルギー範囲 | 110-170, 170-270, 270-300 keV |
| エネルギー分解能 | $\Delta E/E \sim 1 \times 10^{-3}$ |
| 光子数 | 5×10^9 ph/s @300 keV |
| ビームサイズ | 3 mm (H) \times 1 mm (W) |

4.1.2 実験セットアップ

SP8 試験で用いるビームは照射位置や偏光角が一定である。一方で、本ビーム試験では検出器の様々な場所に、様々な偏光角でビームを照射し、CC の偏光応答を調べたい。そこで、図 4.1.2 の様に 4 つの自動ステージを組み合わせて CC を動かすことで相対的にビームの照射位置や偏光角を制御した。ステージは -20°C で動作させるため、グリースを通常品のものから交換した特注品である。ここではビームを基準に軸を定義すると考えやすいので、図 4.1.2 中に記載したように、ビームの進行方向を Y 軸正、また鉛直下向きを Z 軸正と定義した (右手系ではない)。この「ステージの座標系」は「検出器の座標系」とは異なることに注意してほしい (検出器の座標系については図 4.1.3 を参照)。表 4.1.2 に使用したステージの仕様を記載した。X 軸ステージ, Z 軸ステージ, Y 回転ステージを用いることでビームの入射位置や偏光角を制御し、Z 軸回転ステージを用いることでビーム進行方向 (以降でビーム軸と呼ぶ) と CC の (ステージ座標系での) Y 軸とのアライメントをとる。CC の Y 軸とビーム進行方向の鉛直方向の間のアライメントは、恒温槽をビームラインに設置する際に恒温槽上部に取り付けた気泡式水準器を用いて、恒温槽を設置するフレームの足の長さを調整することでアライメントをとり、 0.04 deg の精度で調整を行った。CC の電源や信号の配線は準備試験時と同様であり、3.1.1 を参照してほしい。

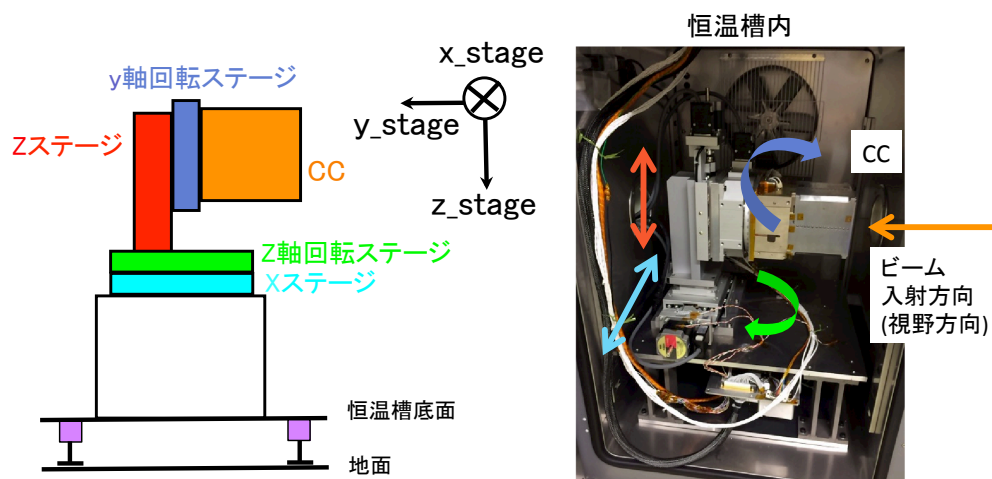


図 4.1.2: CC に組み付けた 4 つの駆動ステージの (左) 概略図と (右) 写真 (X ステージ (水色), Z ステージ (赤), Y 回転ステージ (青), Z 回転ステージ (黄緑))。ビームはステージの座標系で-Y の方向から入射する。

表 4.1.2: 使用した駆動ステージ

| ステージ名 | 製品名 (製造社名) | 動作範囲 | 分解能 |
|-----------|-------------------|----------|------------------------|
| X ステージ | XA16-R1 (KOHZU) | ±25 mm | 1 μm |
| Z ステージ | ZA16A-X1 (KOHZU) | ±25 mm | 1 μm |
| Y 軸回転ステージ | RA16A-WH (KOHZU) | ±177 deg | 2×10 ⁻³ deg |
| Z 軸回転ステージ | RA10A-T01 (KOHZU) | ±5 deg | 5×10 ⁻⁴ deg |

4.1.3 ビーム試験概要

本試験でビーム照射が行えるマシンタイムは、ビームラインの使用許可を得るための課題申請の際に算出したシフト数から 48 時間 (2015 年 11 月 12 日 AM10:00 ~ 11 月 14 日 AM10:00) と決まっており、機器の搬入や冷却などの準備もこの中に含まれる。従ってスムーズに測定に取りかかるために事前の準備が重要である。以下に試験当日の大まかな流れを記載した。

2015 年 11 月 12 日

10:00 マシンタイム開始

マシンタイムが開始し BL08W の使用開始時間となったが、直前まで BL08W を使用していたグループの実験機器搬出が完了していなかったため、実験ステーション外でデータレシーバーや解析用マシンなどの配線、立ち上げを行った。

11:40 頃 実験機器の搬入

機器を実験ステーション A 内に搬入し、機器の配線やビーム進行方向と CC のアライメント調整をレーザー墨出し器と気泡式水準器を用いて行った。

14:00 頃 CC の立ち上げ・恒温槽冷却開始

CC の立ち上げを行い、常温時動作確認により正常動作を確認した。恒温槽は CC の動作温度である -20°C まで冷却するため、露点と湿度を確認しながら順次冷却を進めた。

15:30 頃 ビームエネルギー調整 (122 keV)

CdTe 検出器は常温でも適切なバイアス電圧によって動作するため、CdTe 検出器のみを用いてビームのエネルギーやビーム進行方向のアライメントを調整した。まず、ビームのエネルギーを単色の 122 keV に設定した。シングルヒットイベントのエネルギースペクトルを確認するとビーム由来の 60 keV 程度のピークがあったため、1mm 厚の Cu と 1mm 厚の Sn をビームの上流 (図 4.1.1 参照) に設置して遮蔽した。

21:00 頃 CC 冷却完了・ビームレート調整・ビーム軸アライメント調整

CC の温度が -20°C に冷却したことを確認したため Si 検出器, CdTe 検出器に低温時動作のバイアス電圧をかけ、低温時動作確認により正常動作を確認した。デッドタイムやデータパケット量を考慮し、ビームのレートを調整した。また、ビーム軸のアライメント調整を行った (第 4.2.1 節参照)。

2015年11月13日

0:00 頃 122 keV ビーム試験開始

図 4.1.3(左) に示す位置に、順次様々な位置、角度でビームを照射し、データ取得及び QL 解析 (第 4.2 節参照) を行った。

19:50 頃 ビームエネルギー調整 (193 keV) ・ ビームレート調整

122 keV のデータ取得が完了したため、ビームのエネルギーを単色の 193 keV に変更した。シングルヒットイベントのスペクトルを確認するとビーム由来の 95 keV 程度のピークがあったため、0.5mm 厚の Pb と 3mm 厚の Sn をビームの上流 (図 4.1.1 参照) に設置して遮蔽した。

21:00 頃 ビーム軸アライメント調整

122 keV のビーム軸アライメント調整と同様に行った (アライメント調整の手法は (第 4.2.1 節参照))。

22:00 頃 193 keV ビーム試験開始

122keV の場合と同様に、図 4.1.3(右) に示す位置に順次ビームを照射し、データ取得及び QL 解析 (第 4.2 節参照) を行った。

2015年11月14日

10:00 マシントイム終了

ビーム試験での取得データの概要として、図 4.1.3 に CC を視野方向から見た時の Si 検出器のビーム照射位置を示す。ビーム照射位置の呼称方法は図 3.1.5 を参照してほしい。エネルギー依存性を調べるため 122, 193 keV の 2 種類のエネルギーを用いており、第 3 象限に読み出しのできない ASIC が含まれることから (第 3.2.1 節参照)、原点对称の位置である第 1 象限を中心にイベント取得を行った。特に、原点に近い (2,2) は検出効率がよいため、5 つの偏光角 (-90, -67.5, -45, 0, 90 deg) により詳細にデータ取得を行った (図 4.1.3 の赤)。また、位置の依存性があることから 122 keV では全体的に偏光角-90, 0deg(図 4.1.3 の橙) でデータ取得し、193 keV ではマシントイムの範囲内で第 1 象限 (図 4.1.3 の緑) で密にデータを取得した。本論文では (2,2) の位置で照射したデータについて詳細な解析を行う。

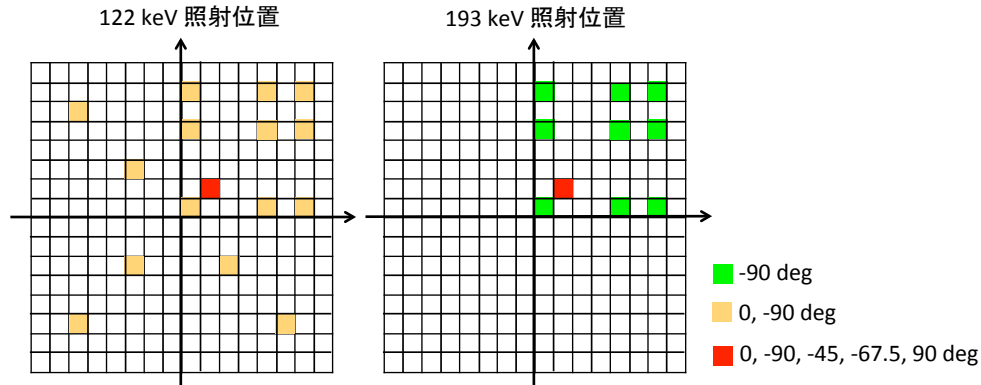


図 4.1.3: 視野方向からコンプトンカメラを見た時の Si のビーム照射位置。照射ビームのエネルギーは (左)122 keV, (右)193 keV。入射ビームの偏光角は (緑)-90 deg, (橙)0, -90 deg, (赤)0, -90, -45, -67.5, 90 deg。

4.2 試験当日の実施項目及び Quick Look 解析

ビーム試験開始時のアライメント調整や、ビーム試験中に行っていた Quick Look 解析について述べる。データ取得中に確認すべき項目は大きく分けて 4 つあり、それぞれの確認方法は以下の通りである。

1. 想定する位置にビームが照射できているか
 - ヒット位置分布の確認
2. 想定されるデータ量、必要量のデータ取得ができているか
 - ライトカーブの確認
 - シミュレーションによるデータ取得レートの予想との比較
 - ((2,2) でのデータ取得において) MDP が 1% となる統計量に達しているか
3. 取得したいイベント (Si 散乱-CdTeSide 光電吸収イベントなど) を検出できているか
 - モジュレーションカーブの作成、シミュレーションによるモジュレーションカーブとの比較
 - エネルギースペクトル (シングルヒットイベントや 2 ヒットイベントなど) の確認
4. 想定外の挙動をしていないか

これらの確認のため、試験中はビーム照射位置やエネルギーの変更毎に QL 解析を進め、問題がないことを確認しながらデータ取得を進めた。以下ではビームの照射位置に関するビーム軸アライメント調整と、QL 解析で得たモジュレーションカーブについて述べる。

4.2.1 ビーム軸アライメント調整

ビーム軸アライメント調整では、Si 層の 1 枚目と 32 枚目の (2,2) の位置におけるカウントレートを調べることで調整を行った。図 4.2.1 にビーム照射位置とピクセルのカウントレートの関係を模式的に示した。図 4.2.1 では模式的にビーム位置が移動しているように描いているが、実際には X ステージまたは Z ステージを動かすことによりビーム照射位置を相対的に制御している (第 4.1.2 節参照)。ビームがピクセルに照射

される前 (x_1 の位置) のカウントレートは 0 [counts/sec] であり、ビームがピクセルにかかり始めると (x_2 の位置から) カウントレートが上昇する。カウントレートの変化率はピクセルにかかったビームの面積を S とすると (dS/dx) に比例するため、十分な統計量で多くの位置で変化率を得ることができると、ビームの照射位置やビームの形状を知る事ができる。ビーム全体がピクセルに入ると (x_3 の位置) カウントレートは一定となる。レートが一定となる範囲を L [mm] とすると、Si 検出器のピクセルサイズが 3.2[mm] であることから、ビームの大きさは $3.2 - L$ [mm] と求められ、ビーム形状が長方形 (= dS/dx が一定) であれば、等脚台形のプロファイルが得られると予想される。本試験でのビーム照射位置は、ピクセルの中心位置となる X_{center} に照射した。ビーム軸と検出器とのアライメントが取れていれば、Si の 1 枚目と 32 枚目の双方で、同じ照射位置からカウントレートが上昇・下降するプロファイルを得ることができ、もしビーム軸に対して検出器が水平に設置されていないならば、0 枚目と 32 枚目のプロファイルのずれからビーム軸と検出器との傾きを調べることができる。よって、ビーム軸と検出器との傾きやビーム形状を知るため、X ステージの動作により水平方向、Z ステージの動作により鉛直方向の傾きを調べた。

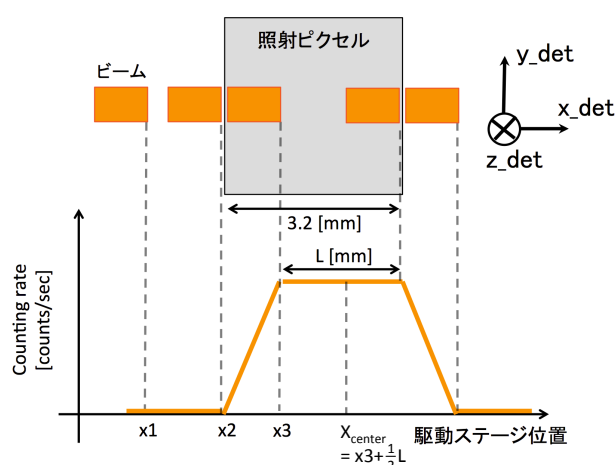


図 4.2.1: ビーム照射位置と対象ピクセルのカウントレートの関係

本試験では 122 keV ビームで偏光角 0, -90 deg、193 keV ビームでは偏光角 0 deg でアライメント調整を行った。先にも述べたが、ビーム位置の制御は駆動ステージを用いて相対的に行っている。データ取得の際にビーム照射位置の制御に使用するステージは X ステージ、Z ステージ、Y 軸回転ステージの 3 つであり、偏光角 0, -90deg の 2 種類のプロファイルを得るためにはこの 3 つのステージを用いるため、プロファイルにより検出器とビーム軸ずれや、3 つのステージ動作によるずれへの影響を知る事ができる。193 keV ビームは 122 keV ビーム時からエネルギー調整を行っただけであり、検出器の移動やビーム出力位置の変更はないため偏光角 0 deg のみでプロファイルを取得し、122 keV, 0deg 時のプロファイルから変化があるかどうかを確認した。122 keV で偏光角 0 deg のプロファイルを図 4.2.2、偏光角-90 deg のプロファイルを図 4.2.3 に載せる。それぞれの図の左が X ステージ動作時、右が Z ステージ動作時のプロファイルである。Z ステージ動作時のプロファイルを見ると (図 4.2.2, 4.2.3 の右)、Si の 1 枚目と 32 枚目のカウントレートが同様の照射位置から上昇・下降するプロファイルが得られており、ビーム軸と検出器の鉛直方向のアライメントがとれていることがわかる。X ステージ動作時のプロファイルを見ると (図 4.2.2, 4.2.3 の左)、Si の 1 枚目と 32 枚目のプロファイルにずれが生じていることがわかり、ビーム軸と検出器の水平方向に傾き

が生じていることがわかる。また、Y 軸回転ステージは検出器自体をビーム軸の周りに回転させるだけであることからアライメントへの影響はないと予想され、実際に図 4.2.2 と図 4.2.3 の比較により Y 軸回転ステージの動作によるアライメントへの影響はないと言える。ここでは等脚台形となる関数でカウントレートのフィッティングを行い、ビーム軸と検出器との傾きを調べた。その結果ビーム軸と検出器の水平方向の傾きは 1 deg 未満であると得られ、Si1 枚目と 32 枚目の距離は 55.1 mm であることから、Si 1 枚目の X_{center} にビームを照射した際の Si 32 枚目でのずれは 1 mm 未満であり、ピクセルサイズの半分の 1.6 mm には達しない。このことから、Z 軸回転ステージを用いた調整は行わず、Si 1 枚目の X_{center} をピクセル中心位置としてビーム試験を進めた。ビーム軸と検出器とのずれによるモジュレーションカーブへの影響や、ビームサイズの違いによるモジュレーションカーブへの影響は第 5.2 節で検証している。

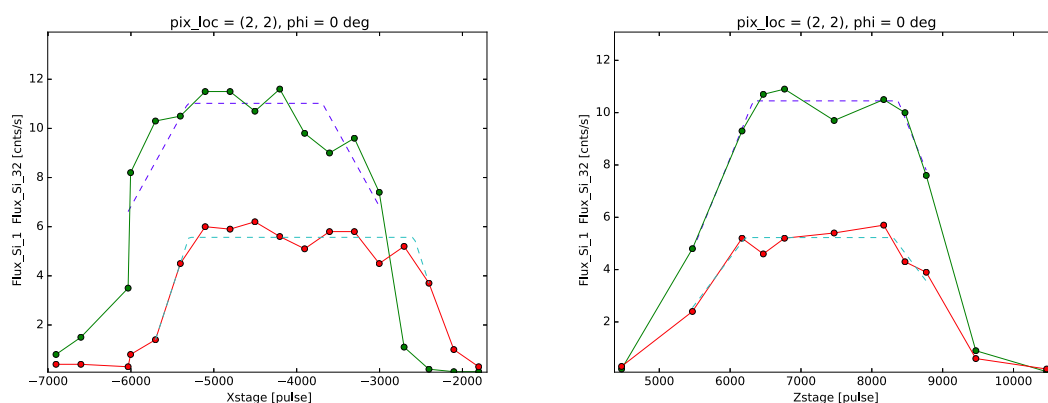


図 4.2.2: ビーム偏光角 0 deg (Y 軸回転ステージ 0 deg) 時の Si 1 枚目 (緑) と 32 枚目 (赤) における (2,2) のカウントレート。(左)X ステージ動作時、(右)Z ステージ動作時。

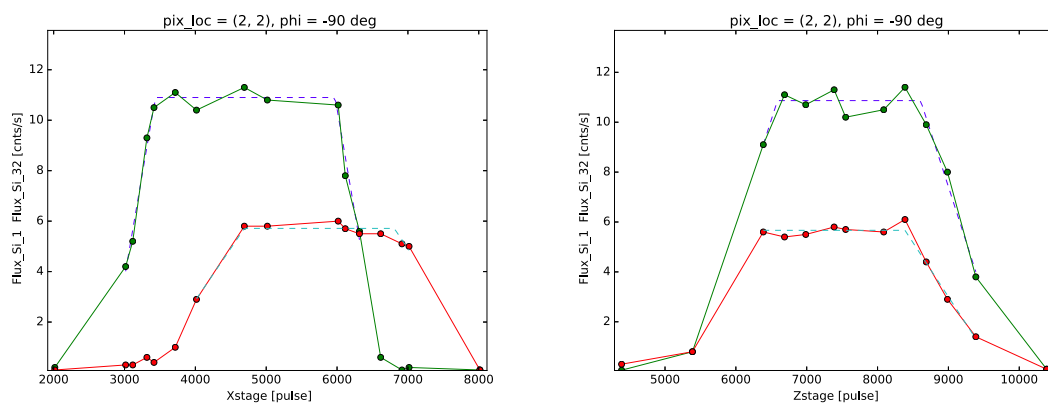


図 4.2.3: ビーム偏光角 -90 deg (Y 軸回転ステージ -90 deg) 時の Si1 枚目 (緑) と 32 枚目 (赤) における (2,2) のカウントレート。(左)X ステージ動作時、(右)Z ステージ動作時。

4.2.2 モジュレーションカーブ

QL 解析時に作成した (2,2) における Si 散乱-CdTeSide 光電吸収イベントのモジュレーションカーブについて述べる。QL 解析での条件は表 4.2.1, 4.2.2 の通りである。図 4.2.4 に (左)122 keV, (右)193 keV の (2,2) における (黒) 取得データと (赤) シミュレーションによるモジュレーションカーブを載せた。ここではピンサイズを 10 deg として作成している。ビームの偏光角を (図 4.2.4 の上から順に) -90, -67.5, -45, 0, 90 deg と変化させ、対応する方位角でのイベント数が減少していることが確認できる。特定の方位角でシミュレーションとのずれはあるが、全体にはシミュレーションでよく再現されるモジュレーションカーブが得られた。表 4.2.3 に QL 解析で得られた Si-CdTeS イベントについて載せた。ここでは式 2.1.13 でフィッティングを行いモジュレーションファクターを求めたが、 χ^2/dof の値が大きかったため、 M_{obs} は誤差をつけていない。 χ^2/dof が大きくなる理由については第 5.3 節で検証している。また、検出効率が低い理由はノイズ信号の影響であり、第 5.1.1 節で検証している。

表 4.2.1: 122 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件

| パラメータ | 実験データ | シミュレーションデータ |
|-----------------------------|-----------------------------|--|
| 合計デポジットエネルギーの制限 | 122 ± 10 keV | 122 ± 10 keV |
| Si でのデポジットエネルギーの制限 | 5 ~ 40 keV | 5 ~ 40 keV |
| 各ピクセルのスレッシュホールド | 10 ADC Value | 5 keV |
| ファーストヒット位置の制限 | (2,2) のみ | (2,2) のみ |
| シミュレーションデータ解析時に 取り除くピクセル | DC 不調 (第 3.2.1 節) | 計 512 ch |
| | ストレンジチャンネル (第 3.2.2 節) | 計 336 ch |
| | trigger disable (第 3.2.3 節) | 計 77 ch |
| 備考 | 2 シグナルのイベント | 2 ヒットのイベント 1mm×1mm のビームサイズ 検出器に対し垂直にビーム照射 FM 品程度のエネルギー分解能 検出効率 ~7.5% @-90deg |

表 4.2.2: 193 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件

| パラメータ | 実験データ | シミュレーションデータ |
|-----------------------------|----------------------------|---|
| 合計デポジットエネルギーの制限 | 193 ± 10 keV | 193 ± 10 keV |
| Si でのデポジットエネルギーの制限 | 5 ~ 80 keV | 5 ~ 80 keV |
| 各ピクセルのスレッシュホールド | 10 ADC Value | 5 keV |
| ファーストヒット位置の制限 | (2,2) のみ | (2,2) のみ |
| シミュレーションデータ解析時に 取り除くピクセル | DC 不調 (第 3.2.1 節) | 計 512 ch |
| | ストレンジチャンネル (第 3.2.2 節) | 計 336 ch |
| | trigger disable(第 3.2.3 節) | 計 77 ch |
| 備考 | 2 シグナルのイベント | 2 ヒットのイベント 1mm×1mm のビームサイズ 検出器に対し垂直にビーム照射 FM 品程度のエネルギー分解能 検出効率 ~4.8% @-90 deg |

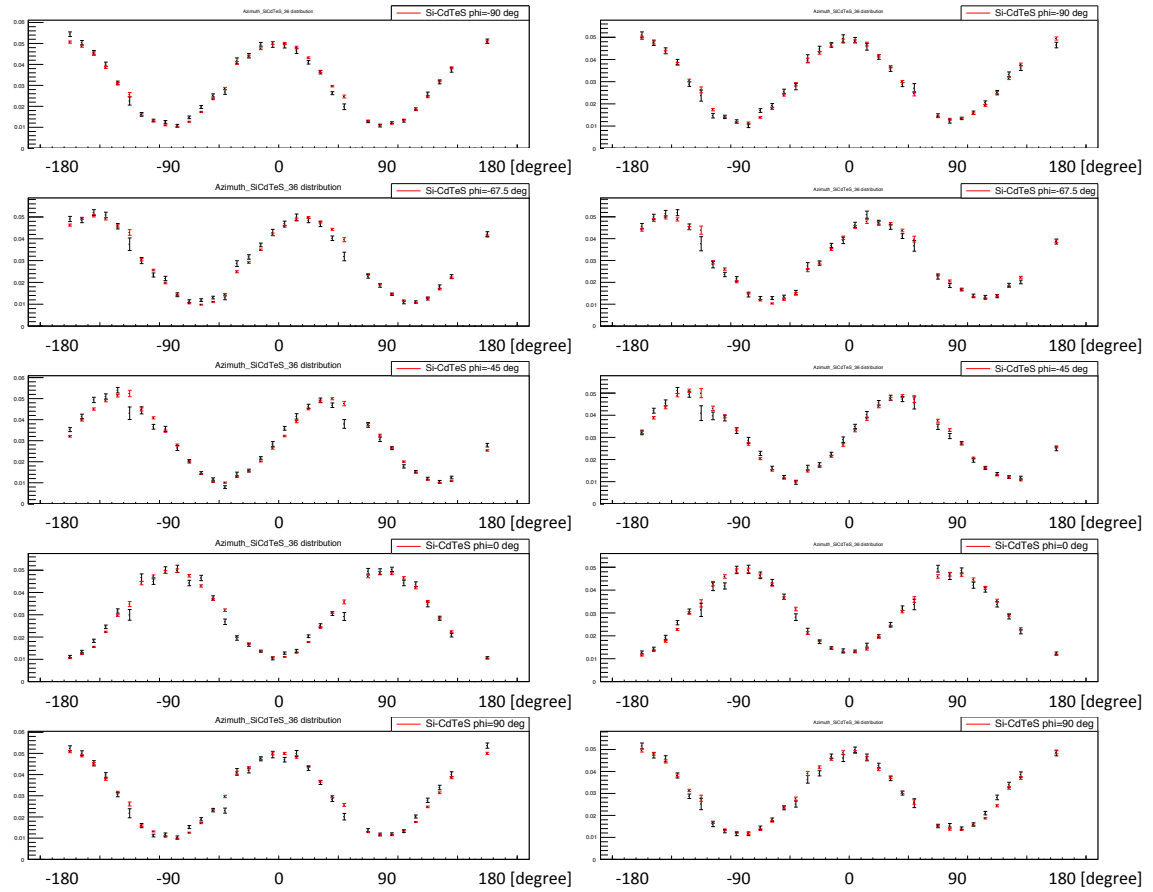


図 4.2.4: QL 解析時のモジュレーションカーブ。(左)122 keV ビーム、(右)193 keV ビームで、(黒) 実験データと (赤) シミュレーションデータ。上から順にビームの偏光角が $-90, -67.5, -45, 0, 90$ deg

表 4.2.3: 表 4.2.1,4.2.2 によるセレクション後の Si-CdTeS イベント

| 偏光角 [deg] | 122 keV | | | 193 keV | | |
|-----------|---------------------|----------|-----------|---------------------|----------|-----------|
| | セレクション後 [counts] | 検出効率 [%] | M_{obs} | セレクション後 [counts] | 検出効率 [%] | M_{obs} |
| -90 | 42935 | 1.42 | 0.648 | 30088 | 0.91 | 0.607 |
| -67.5 | 32213 | 1.34 | 0.658 | 29019 | 0.89 | 0.612 |
| -45 | 33735 | 1.43 | 0.665 | 29343 | 0.87 | 0.627 |
| 0 | 33831 | 1.25 | 0.656 | 27218 | 0.84 | 0.606 |
| 90 | 33970 | 1.41 | 0.660 | 29645 | 0.90 | 0.601 |

第5章 データ解析時詳細パラメータ設定とシミュレーターの検証

5.1 実験データ解析時詳細パラメータ設定

5.1.1 スレッシュホールド設定

各ピクセルにおいてノイズののりやすさには個性があり、解析時には個々のピクセルでスレッシュホールドを設定し、その値をシミュレーターにも反映させる必要がある。図 5.1.1(左) のヒストグラムはバックグラウンドデータ取得時の各チャンネルにおけるシグナル数のヒストグラムである。図 5.1.1(左) の赤で示したヒストグラムはスレッシュホールドを設定せずに解析した結果であり、各ピクセルでシグナル数にばらつきがあることがわかる。ノイズののりやすいピクセルでは他のピクセルに比べてスレッシュホールドを高く設定し、ノイズ由来のシグナルを減らしたい。各ピクセルのスペクトル形状を調べ、ノイズは低エネルギー側に分布することを確認した(図 5.1.1(右))。よって、以下の手順でスレッシュホールドを決定した。

1. 各レイヤーごとにシグナル数のヒストグラムを作成する
2. ノイズ以外のバックグラウンド由来であれば 1 の分布はポアソン分布に従うと考えられるため、各分布のポアソン分布の中心値をフィッティングにより決める
3. 各ピクセルのシグナル数について
 - 対応する中心値のポアソン分布において、Si では 3σ 、CdTe では 1σ の範囲内のシグナル数であれば、スレッシュホールド値を 10 ADC Value(DTHR と同じ値) とし、エネルギー較正曲線により対応するエネルギーに変換したものをスレッシュホールド値 [keV] とする
 - 対応する中心値のポアソン分布において、Si では 3σ 、CdTe では 1σ の範囲外のシグナル数であれば、Si では 3σ 、CdTe では 1σ のシグナル数の範囲内となるように低エネルギー側のイベントを除き、その境界のエネルギーをスレッシュホールド値 [keV] とする。

図 5.1.1(左) の青のヒストグラムはスレッシュホールド値を設定して解析した結果である。各検出器でシグナル数のばらつきがなくなり、ノイズ由来のイベントを除去することができた。

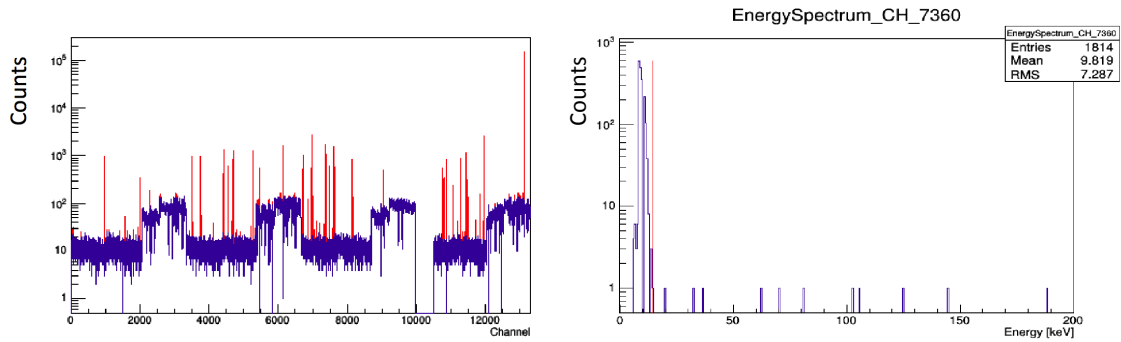


図 5.1.1: (左) 各チャンネルのバックグラウンドデータ取得時のシグナル数のヒストグラム。(赤) スレッシュヨールド設定前、(青) スレッシュヨールド設定後。(右) ノイズがのりやすいピクセルの例 (ChannelID 7360 のバックグラウンドデータのエネルギースペクトル)。赤線は設定したスレッシュヨールド値。

スレッシュヨールド値が適切であるかどうかを確認するため、シグナル数の分布をシミュレーションデータと比較した。図 5.1.2 は 1 イベント中のシグナル数の分布であり、シグナル数 1 のイベント数で規格化している。ここで用いた実験データはビーム試験データで、122 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) の位置に照射したデータである。同様の条件でシミュレーションを行い、上記のスレッシュヨールドの設定も行った。スレッシュヨールド設定前のシグナル数は、イベントデータに含まれる `NumberOfAllHitChannels` である。スレッシュヨールド設定後のシグナル数は、1 イベント中の各シグナルが、対応するスレッシュヨールド値を越えたシグナルの個数であり、シグナル数 0 のイベントは 1 イベント中の全てのシグナルがスレッシュヨールドを越えなかったものである。スレッシュヨールド設定前 (緑) では、ノイズシグナルによる影響により 1 シグナルのイベントよりも 2 シグナルイベントの方が多という分布となっている。スレッシュヨールド設定後 (青) では、1 シグナルイベントが最も多く、シグナル数が多くなるにつれ減少する、シミュレーション (赤) と同様の分布となった。シグナル数が多い部分ではノイズの引き残りによるシミュレーションとの差が見えるが、本研究での議論に用いる 2 シグナルイベントに対しては上記で決定したスレッシュヨールド値で問題がないと考えられ、適切なスレッシュヨールド値の設定ができたと言える。

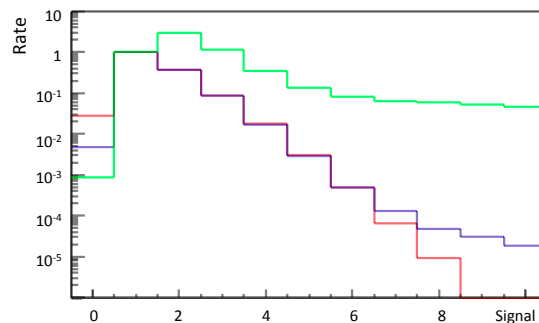


図 5.1.2: シグナル数分布の比較。(緑) 実験データでスレッシュヨールド設定前、(青) 実験データでスレッシュヨールド設定後、(赤) シミュレーションデータで実験解析と同じスレッシュヨールドを設定。

5.1.2 ASIC のエネルギー較正

エネルギー較正手法は第 3.3 章を参照して欲しい。ここでは第 5.1.1 節で設定したスレッシュホールドを反映させて線源データを再度解析して Step4 を行った。エネルギー較正が正しく行われていることは 3.3 章と同様にエネルギースペクトルを確認し、問題ないことを確認した。エネルギー分解能の評価のため、表 5.1.1 に線源データによるスペクトルから得られた分解能を示す。ここに示すエネルギー分解能は、各種線源データのエネルギースペクトルにおける光電吸収ピークの半値全幅 (Full Width Half Maximum; FWHM) を示している。衛星搭載品 (FM 品) のエネルギー分解能 (表 5.1.2) と比較すると、FM 品のエネルギー分解能には達していないが、 $\Delta E(\text{FWHM})/E$ の違いは 1%未満であり、その性能に問題はないと言える。

表 5.1.1: 再評価したエネルギー分解能

| Energy [keV] | Si | CdTe |
|--------------|---------------|---------------|
| 31 | 2.091 ± 0.003 | |
| 59.5 | 1.88 ± 0.02 | |
| 81 | 2.24 ± 0.03 | 2.769 ± 0.04 |
| 122 | 2.28 ± 0.01 | 3.113 ± 0.004 |
| 356 | | 7.00 ± 0.03 |
| 511 | | 10.34 ± 0.04 |

表 5.1.2: FM 品のエネルギー分解能 [9]

| Energy [keV] | Si | CdTe |
|--------------|-------------|-------------|
| 31 | 2.08 ± 0.02 | |
| 59.5 | 1.87 ± 0.04 | |
| 81 | 2.07 ± 0.08 | 2.32 ± 0.10 |
| 122 | 2.15 ± 0.06 | 2.71 ± 0.04 |
| 356 | | 3.42 ± 0.30 |
| 511 | | 7.09 ± 0.94 |

5.1.3 パラメータ設定後のモジュレーションカーブ

上記のパラメータを反映させ、QL 解析時に作成したモジュレーションカーブを作成した。解析の条件は表 5.1.3, 5.1.4 である。また、図 5.1.3 に得られた Si-CdTeS イベントのモジュレーションカーブを載せた。ここで着目したいのは、SP8 試験時の QL 解析結果 (図 4.2.4 参照) と分布に大きな変化がなく、シミュレーションと同様のカーブを描いていることであり、スレッシュホールドの設定変更起因する問題が生じていないと言える。さらに、表 5.1.5 に Si-CdTeS イベント数を載せた。QL 解析時 (表 4.2.3) に比べ、統計が ~4.5 倍程よくなっており、ここで得られた統計数は、シミュレーションにより予想される Si-CdTeS イベント数とオーダーがあい、検出効率も改善している。

表 5.1.3: 122 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件

| パラメータ | 実験データ | シミュレーションデータ |
|-----------------------------|----------------------------|--|
| 合計デポジットエネルギーの制限 | 122 ± 10 keV | 122 ± 10 keV |
| Si でのデポジットエネルギーの制限 | 5 ~ 40 keV | 5 ~ 40 keV |
| 各ピクセルのスレッシュホールド | 第 5.1.1 節 | 5 keV |
| ファーストヒット位置の制限 | (2,2) のみ | (2,2) のみ |
| シミュレーションデータ解析時に 取り除くピクセル | DC 不調 (第 3.2.1 節) | 計 512 ch |
| | ストレンジチャンネル (第 3.2.2 節) | 計 336 ch |
| | trigger disable(第 3.2.3 節) | 計 77 ch |
| 備考 | 2 シグナルのイベント | 2 ヒットのイベント 1mm×1mm のビームサイズ 検出器に対し垂直にビーム照射 FM 品程度のエネルギー分解能 検出効率 ~7.5% @-90deg |

表 5.1.4: 193 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件

| パラメータ | 実験データ | シミュレーションデータ |
|-----------------------------|----------------------------|---|
| 合計デポジットエネルギーの制限 | 193 ± 10 keV | 193 ± 10 keV |
| Si でのデポジットエネルギーの制限 | 5 ~ 80 keV | 5 ~ 80 keV |
| 各ピクセルのスレッシュホールド | 第 5.1.1 節 | 5 keV |
| ファーストヒット位置の制限 | (2,2) のみ | (2,2) のみ |
| シミュレーションデータ解析時に 取り除くピクセル | DC 不調 (第 3.2.1 節) | 計 512 ch |
| | ストレンジチャンネル (第 3.2.2 節) | 計 336 ch |
| | trigger disable(第 3.2.3 節) | 計 77 ch |
| 備考 | 2 シグナルのイベント | 2 ヒットのイベント 1mm×1mm のビームサイズ 検出器に対し垂直にビーム照射 FM 品程度のエネルギー分解能 検出効率 ~4.8% @-90 deg |

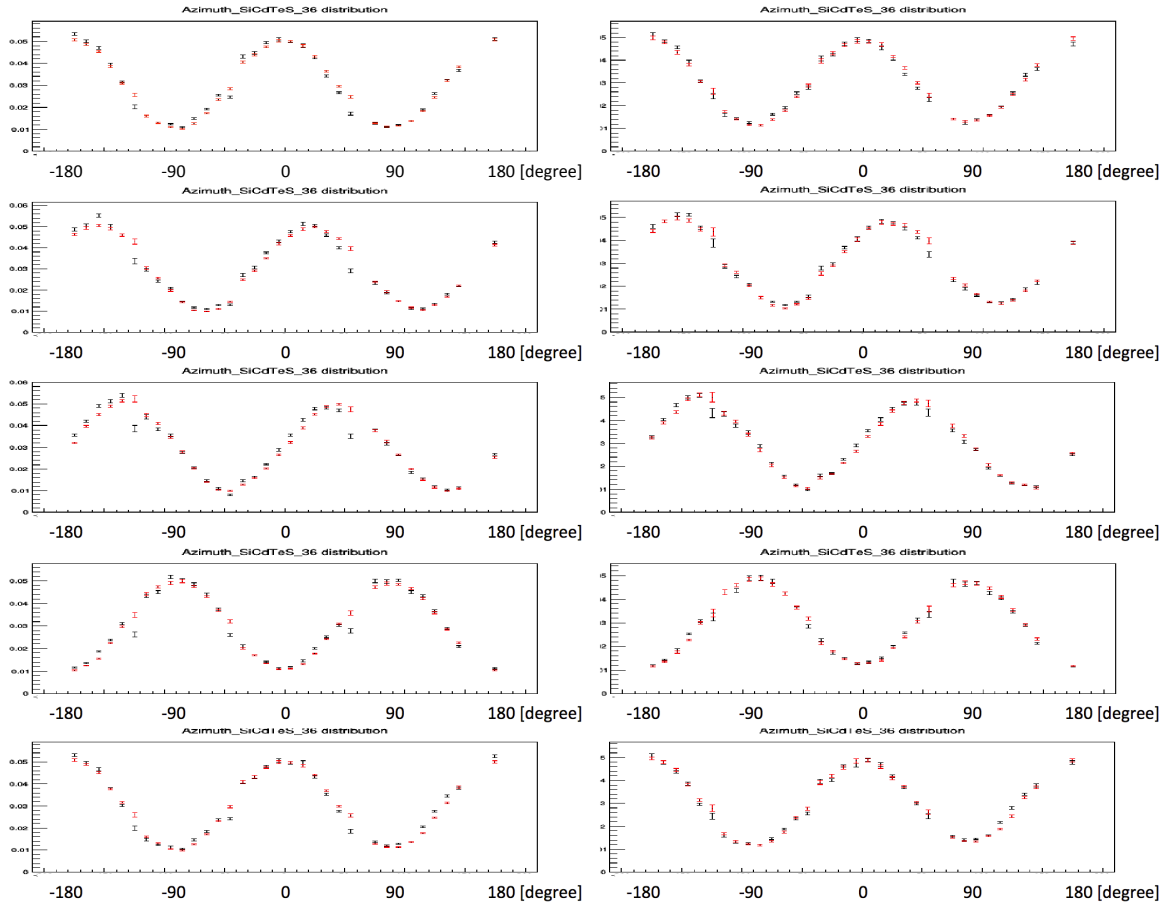


図 5.1.3: 解析時スレッシュホールド設定後のモジュレーションカーブ。(左)122 keV ビーム、(右)193 keV ビームで、(黒) 実験データと (赤) シミュレーションデータ。上から順にビームの偏光角が $-90, -67.5, -45, 0, 90$ deg

表 5.1.5: 表 5.1.3, 5.1.4 によるセレクション後の Si-CdTeS イベント

| 偏光角 [deg] | 122 keV | | | 193 keV | | |
|-----------|---------------------|----------|-----------|---------------------|----------|-----------|
| | セレクション後 [counts] | 検出効率 [%] | M_{obs} | セレクション後 [counts] | 検出効率 [%] | M_{obs} |
| -90 | 193858 | 6.41 | 67.5 | 139409 | 4.24 | 63.4 |
| -67.5 | 152213 | 6.37 | 68.7 | 137563 | 4.21 | 64.3 |
| -45 | 145400 | 6.17 | 68.4 | 138940 | 4.11 | 64.4 |
| 0 | 160693 | 5.95 | 60.3 | 126814 | 3.93 | 56.5 |
| 90 | 154610 | 6.40 | 67.5 | 140201 | 4.25 | 62.9 |

5.2 シミュレーターパラメータ調整と動作検証

5.2.1 入射エネルギーの設定

ビーム試験では 122, 193 keV の入射エネルギーの設定を行いビーム照射を行ったが、正確なエネルギー値は検証していない。ここで、実験で得られたデータを用いて 1 シグナルの光電吸収イベントのスペクトルを作成し、ピーク値をガウシアンでフィッティングすることでシミュレーションで再現するエネルギーを決定した。結果は表 5.2.1 である (スペクトルは図 5.2.2, 5.2.3 参照)。Si は CdTe に比べて電荷収集効率がよく、光電吸収ピークがガウシアンによくあう分布となるため、Si を基準に以降のシミュレーションで用いるエネルギーを決定した。

表 5.2.1: ビーム試験データフィッティング結果 (ともに偏光角-90 deg、(2,2) のデータ)

| エネルギー [keV] | Si | CdTe | 以降のシミュレーションで 用いる照射エネルギー [keV] |
|-------------|----------------|-----------------|----------------------------------|
| 122 | 122.22 ± 0.006 | 122.45 ± 0.004 | 122.2 |
| 193 | 194.45 ± 0.01 | 194.089 ± 0.007 | 194.5 |

5.2.2 エネルギー分解能の設定

シミュレーターに組み込むエネルギー分解能を実験データ解析と同等となるように設定した。本研究で用いたシミュレーターにおけるエネルギー分解能は、以下の 3 つのパラメータにより設定できる。

$$\Delta E = (\text{para0} + \text{para1} \times E + \text{para2} \times E^2)^{1/2} \quad (5.2.1)$$

実機で得られるスペクトルを忠実に再現するためには、各検出器の電荷収集効率を求めて別途設定し、para2 を 0、para1 は検出器の半導体物性で決まる値、para0 を各チャンネルで設定する必要がある。しかし、本研究においては解析に用いる 2 ヒットイベントを合計デポジットエネルギーでセレクションをかけており、電荷収集効率によるピークの低エネルギー側へのテールなどを忠実に再現する必要は必ずしもない。よって本研究では近似的にエネルギー分解能の設定を行い、電荷収集効率を 100%として、para0 をペダスタル (ゼロ点に対応する ADC 値) の広がり、para1 を 0、para2 を表 5.1.1 の分解能を用いて式 5.2.1 でフィッティングすることにより決定した。図 5.2.1、表 5.2.2 に Si と CdTe のフィッティング結果を載せる。表 5.1.1 のエネルギー分解能は FWHM で記載しているが、この図の縦軸は 1σ である。また、表 5.1.1 の誤差を用いると、低エネルギー側での誤差の小ささによる影響で正しくフィッティングができなかったため、ここでは全ての誤差を 0.01 として扱った。

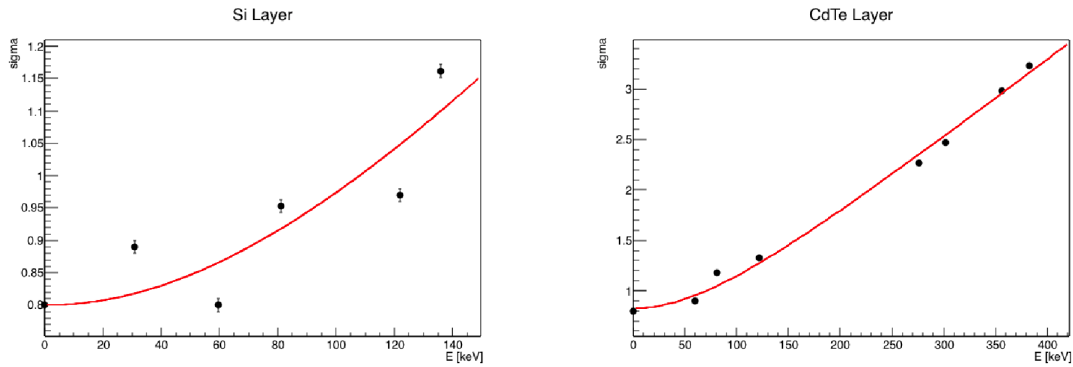


図 5.2.1: エネルギーに対する分解能 σ を式 5.2.1 でフィッティングしている。(左)Si、(右)CdTe。

表 5.2.2: シミュレーターに組み込んだエネルギー分解能に関するパラメータ

| | Si | CdTe |
|-------|-------|--------|
| para0 | 0.80 | 0.82 |
| para1 | 0.0 | 0.0 |
| para2 | 0.005 | 0.0079 |

図 5.2.2, 5.2.3 に実験データとシミュレーションデータのスペクトルを載せる。シミュレーションに用いたエネルギーは表 5.2.1 のエネルギーであり、分解能は 5.2.2 で決定したパラメータを用いている。それぞれのスペクトルは光電吸収ピーク (122.2 keV または 194.5 keV) のカウント数で規格化している。各スペクトルにおいて、実験のスペクトルのピークの広がりシミュレーションにより正しく再現されており、シミュレーターの分解能の設定は適切であると言える。ここで、実験とシミュレーションのスペクトル形状の違いについて考察する。まず、Si のスペクトルについて、122.2 keV スペクトル (図 5.2.2(左)) を考える。122.2 keV の光電ピークと ~ 39 keV の後方散乱ピークの高さの比は等しく、実験のスペクトルをよく再現されているのに対し、 ~ 82 keV のコンプトンエッジのピークは実験とシミュレーションとで異なる。この事は、後方散乱ピークと光電ピークのエネルギーの範囲において実験のみにバックグラウンドが存在することを示唆する。実験データのスペクトルにおける ~ 60 keV のピークはビーム由来のイベントであり、ビーム上流で金属板を用いてその大部分は遮蔽したが、検出器まで到来したイベントのピークが見えている (第 4.1.3 参照)。また、 ~ 20 keV 以下の構造は双方のイベント取得時のスレッシュホールドが異なる事に起因すると考えられる (実験データ: 10 ADC Value, シミュレーション: 5 keV)。194.5 keV の Si スペクトル (図 5.2.3(左)) でも同様に、光電ピークと後方散乱ピークの高さの比や形状はよく再現されているのに対し、同様のエネルギー範囲で実験とシミュレーションのずれがある。考えられる原因は大きく 3 つあり、(1) 検出器の周囲で散乱して入射したイベントが検出器に到来し、低エネルギー側のバックグラウンドとなる、(2) 実験で照射したビームが単色でなく、低エネルギー側に分布を持っている、(3) ピクセル間のチャージシェアリングによる影響、である。(1) については、シミュレーターにおいて恒温槽や部屋の壁などを作らず、検出器の周囲で散乱してから入射するイベントについて考慮していないことに起因するずれである。散乱により到来するイベント量は、ヒット位置でセレクションを行うことで見積もることができる。図 5.2.4(左) はヒット

位置でセレクションをかけたスペクトルであり、(青)は図 5.2.2(左)と同じ Si 全体 (32 層 × 256 ピクセル) のスペクトルであり、(紫)はビームを照射した (2,2) のピクセルのみ (32 層 × 1 ピクセル) のスペクトルである。両者のスペクトルの差は、ビームを照射していないピクセル部分 (32 層 × 255 ピクセル) のイベントであり、散乱によるイベントは等方的に一樣に到来すると考えると、差を (1/255) 倍することで 32 層 × 1 ピクセルに到来する散乱由来のイベント量が推定できる。本試験で使用したコンプトンカメラには読み出しのできない ASIC が 8 つあることを考慮し、差を (1/240) 倍したスペクトルが (緑) である。(緑) と (紫) において、後方散乱ピークと光電ピークの範囲で比較をすると、散乱に起因するイベントだけではその数 % しか寄与を説明できない。また、図 5.2.4(右) に Si のレイヤーごとのスペクトルを比較した。もし散乱に起因するイベントが支配的であれば、Si の下層に行くほど CdTe に囲われることで散乱の寄与は見えにくくなるはずであるが、どの層でも同様にイベントが到来している。よって、散乱に起因する成分よりも、ビーム照射に起因する成分 (上記 (2) および (3)) が効いていると考えられる。

次に (2) について、シミュレーターでは単色のエネルギーでシミュレーションをしているため、実験での照射ビームが単色でなく低エネルギー側に分布を持っていれば、スペクトルに違いが生じる。ただし、実験で用いたビームのエネルギー分布を正確に知ることはできないため、(2) を直接検証することはできない。(3) については、シミュレーターではピクセル間のチャージシェアリングが起きない設定にしており、実験ではチャージシェアリングが生じていることで違いが生じると考えられる。チャージシェアリングとは、ピクセルとピクセルの間にビームが照射されることなどにより、信号電荷が複数のピクセルにまたがることを指す。実験においてはチャージシェアリングが生じていると考えられ、チャージシェアリングにより本来の信号電荷量よりも小さくなったり、スレッショルドを越えない電荷量となることでシグナルが失われるなど、低エネルギー側の連続的な分布の形成が起こりうる。先にも述べたが本論文では合計デポジットエネルギーで制限をかけて Si-CdTeS イベントを選んでいるため、チャージシェアリングの影響は受けにくいと考え、シミュレーターではその再現をしていない。以上のことは CdTe-Bottom のスペクトルでも同様に説明できる。よって、スペクトル形状の違いは (2) および (3) の可能性が残るが、セレクションによる解析ではその影響が少ないため、上記パラメータに設定し、以降のシミュレーションを行う。

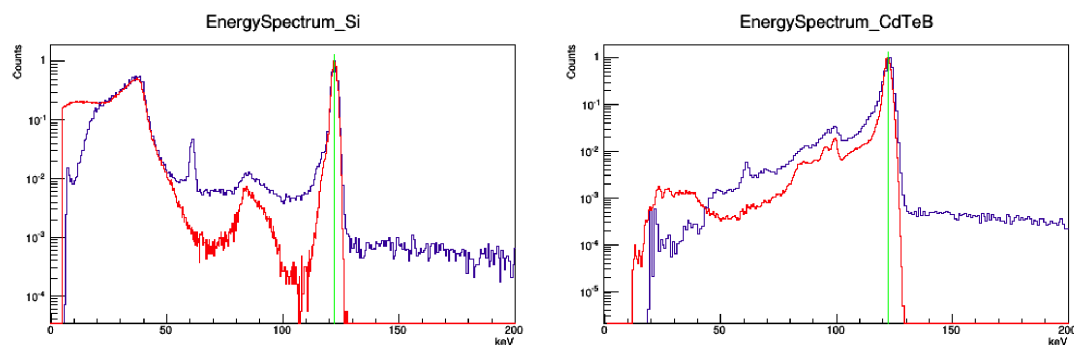


図 5.2.2: (左)Si と (右)CdTe-Bottom の 1 シグナルイベントのエネルギースペクトル。(青)122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) の実験データ、(赤)122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) のシミュレーションデータ、(緑)122.2 keV

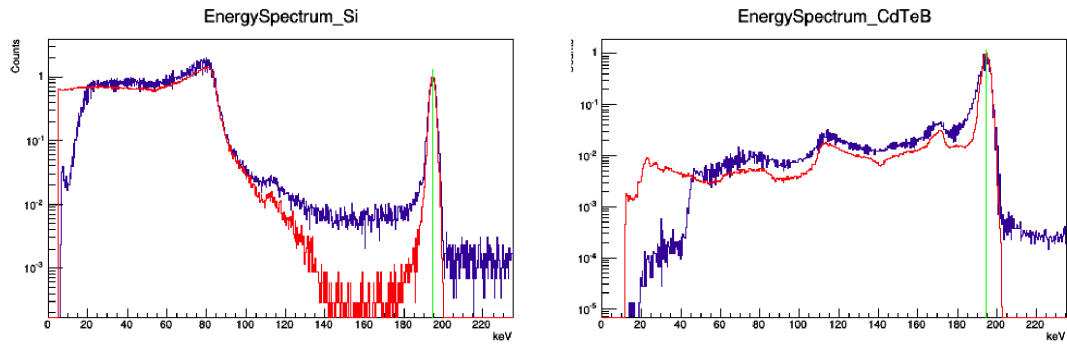


図 5.2.3: (左)Si と (右)CdTe-Bottom の 1 シグナルイベントのエネルギースペクトル。(青)194.5 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) の実験データ, (赤)194.5 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) のシミュレーションデータ, (緑)194.5 keV

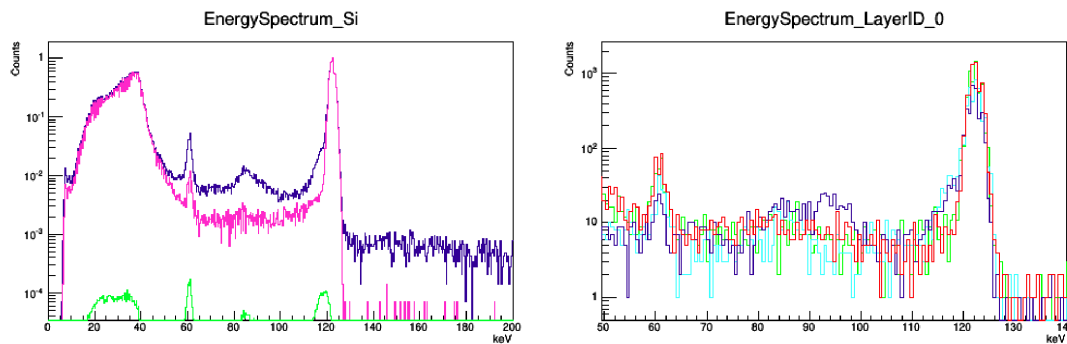


図 5.2.4: (左)(青)Siの全ピクセルでのスペクトル(図 5.2.2(左)(青)と同じ)、(紫)ビームを照射している 32 層 \times 1 ピクセル ((2,2) 位置) のスペクトル、(緑) 周囲で散乱して入射したと考えられる 32 層 \times 1 ピクセルのスペクトル。(右)Siのレイヤーごとのスペクトル。Layer ID (赤)0, (緑)1, (水色)19, (青)31

5.2.3 ビームサイズの設定

実験時のビームサイズは第 4.2.1 節でのフィッティングにより調べることができ、表 5.2.3, 5.2.4 はフィッティングにより得られたビームサイズである。図 4.2.2, 4.2.3 のプロファイルから分かる通り、ビームが照射ピクセルから外れ始める位置を決定することが難しく、ビームサイズにばらつきが生じていると言える。ビーム試験時にはプロファイルによりビーム形状を調べることは別に、直接的にビーム形状を知るために、ビームの衝突跡が残る特殊なシートをビーム上流に貼り付けてその形状を調べた(図 5.2.5)。そのシートで得られたビームサイズは、水平方向 ~ 0.4 mm、鉛直方向 ~ 1 mm であったが、その測定誤差は評価できない。よって、ビームサイズの違いによるモジュレーションカーブへの影響を調べ、シミュレーションで設定するビームサイズを検討した。

表 5.2.3: 水平方向のビームサイズ

| 使用データ | ビームサイズ [mm] | |
|----------------------------|-------------|-------|
| | 1 層目 | 32 層目 |
| 122.2 keV, -90 deg, Z scan | 1.2 | 1.2 |
| 122.2 keV, 0 deg, X scan | 1.4 | 0.76 |
| 194.5 keV, 0 deg, X scan | 1.5 | 1.0 |

表 5.2.4: 鉛直方向のビームサイズ

| 使用データ | ビームサイズ [mm] | |
|----------------------------|-------------|-------|
| | 1 層目 | 32 層目 |
| 122.2 keV, -90 deg, X scan | 0.66 | 0.86 |
| 122.2 keV, 0 deg, Z scan | 1.2 | 0.71 |
| 194.5 keV, 0 deg, Z scan | 1.3 | 1.2 |

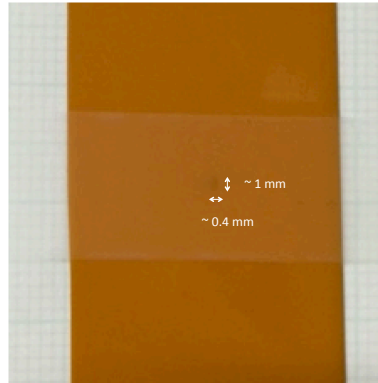


図 5.2.5: ビーム形状 (顕微鏡を用いても形状を確認しづらく、測定誤差は大きい)

図 5.2.6 はビームサイズを変化させた場合の Si-CdTeS の分布を載せる。これは偏光度 100%, 122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) に照射したシミュレーションデータを用いており、イベントセレクションの方法は表 5.1.3 と同様である。図 5.2.6 より、ピクセルサイズよりも小さいビームサイズであれば、それらの分布は誤差の範囲内で一致することがわかった。表 5.2.4, 5.2.3 や図 5.2.5 から、ビームサイズには不定性があるため、以降でもシミュレーションで用いるビームサイズは 1 mm×1 mm とした。

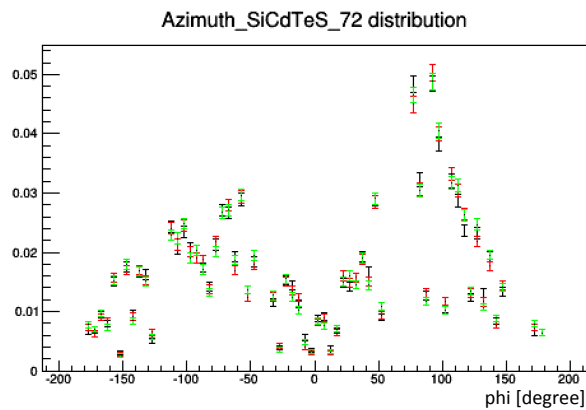


図 5.2.6: 偏光度 100%, 122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) 照射時の Si-CdTeS イベントの Azimuth 分布。ビームサイズは (緑)0.1 mm×0.1 mm、(黒)1 mm×1 mm、(赤)2 mm×2 mm。

5.2.4 ビーム軸と検出器との傾きの設定

ビーム軸と検出器との傾きは、第 4.2.1 節で調べた通りであり、その傾きは検出器を回転していない場合は表 5.2.5, 5.2.6 である。よってシミュレーションでは、検出器を回転させていない場合の水平方向は 0.78 deg、鉛直方向は 0 deg の傾きをシミュレーションに取り込んだ。鉛直方向については図 4.2.2, 4.2.3 においてずれは小さく、プロファイルのフィットの不定性や、ヒット位置分布の確認でもずれを認識できなかったため、鉛直方向は傾きをシミュレーションに含めないこととした。実験の際は自動ステージにより検出器を回転させることで相対的にビームの照射位置を制御したため、自動ステージの回転角度によって検出器に対するビームの傾きの方向が異なる。図 5.2.7 は 122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) に照射したシミュレーションデータで、検出器に垂直にビームを照射した場合と上記で設定した傾きを加えた場合の比較である。偏光角 -90 deg の時は自動ステージの回転によりビーム軸が鉛直方向に -0.78 deg 傾くこととなる。図 5.2.7 からビームの傾きによる影響は、 ~ 5 %程度であると言える。シミュレーションでは実験の状況と対応するようにビーム軸の傾き方向を設定してシミュレーションした。また、これまでのモジュレーションカーブなどの図は 10 deg または 5 deg の等間隔ピンで図を作成していたが、この図以降は非等間隔ピンを用いている。ピンの取り方は (2,2) の位置と CdTe-S のピクセル中心値で決まる方位角であり、128 ピン (CdTe-Side 8 層 \times 16 列) となっている。よって図 5.2.7(上) では CdTe-Side の内側と外側でカウント数の違いが見える分布となっている。

表 5.2.5: 水平方向の傾き

| 使用データ | 傾き [deg] |
|------------------------------|------------|
| 122.2 keV, -90 deg, Z scan | -1.0 |
| 122.2 keV, 0 deg, X scan | -0.56 |
| 194.5 keV, 0 deg, X scan | -0.79 |
| | 平均 -0.78 |

表 5.2.6: 鉛直方向の傾き

| 使用データ | 傾き [deg] |
|------------------------------|------------|
| 122.2 keV, -90 deg, X scan | 0.18 |
| 122.2 keV, 0 deg, Z scan | 0.075 |
| 194.5 keV, 0 deg, Z scan | 0.0071 |
| | 平均 0.087 |

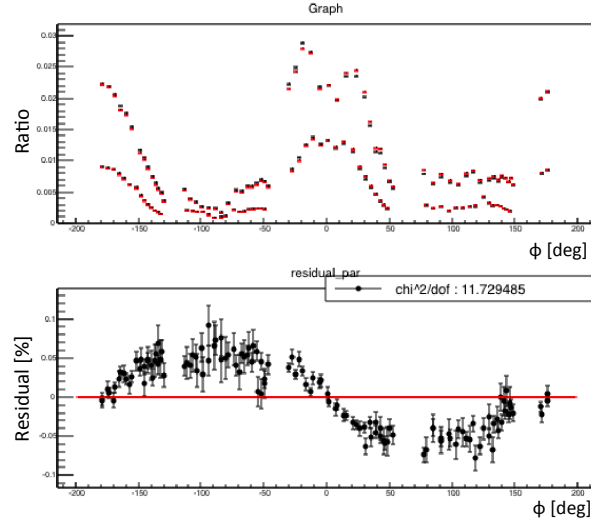


図 5.2.7: (上) 偏光角 -90 deg, エネルギー 122.2 keV, (2,2) 照射した際に、(黒) 検出器に垂直に照射、(赤) 傾けて照射した場合の比較。縦軸は全イベント数で正規化している。(下) 残差 (黒-赤)

5.3 モジュレーションカーブの形状に影響するパラメータ

本研究で使用したコンプトンカメラはそのジオメトリが複雑であり、ストレンジチャンネルなどの考慮すべき点も多い。本研究を進める上で、(2,2) にガンマ線を照射した際のシミュレーションによるモジュレーションカーブにおいて、方位角を 180 deg ずつに分けてフィッティングした場合の M_{obs} が異なり、モジュレーションカーブがサインカーブからずれる分布となることがわかった。モジュレーションカーブの形状の理解のため、どのようなパラメータによってモジュレーションファクターに影響がでるか、また、実験との比較方法を検討した。

まず、最も考えやすい場合として、コンプトンカメラの中心にガンマ線を照射し、全てのチャンネルで読み出しができる場合のシミュレーションを行った。図 5.3.1 は 122.2 keV, 偏光角 -90 deg のガンマ線を、全チャンネル読み出しができるコンプトンカメラに照射した場合のモジュレーションカーブである。モジュレーションカーブは、偏光度 100% のシミュレーションデータのある ϕ でのカウント数 $N_{obs}(\phi)$ に対し、偏光度 0% (無偏光) のシミュレーションデータの $R(\phi)$ で割っており (第 2.1.3 節参照)、図 5.3.1 の縦軸は $N_{cor}(\phi)$ である。

$$N_{cor}(\phi) = \frac{N_{obs}(\phi)}{R(\phi)} \quad (5.3.1)$$

$$R(\phi) = \frac{N_{iso}(\phi)}{\overline{N_{iso}}} \quad (5.3.2)$$

ここで、 N_{iso} は無偏光シミュレーションデータのカウント数、 $\overline{N_{iso}}$ は無偏光シミュレーションデータの各ビンでの平均値である。よって式 2.1.13 は

$$N_{cor}(\phi) = A \left(1 + M \cos 2 \left(\phi - \phi_0 - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (5.3.3)$$

と書き換えられ、以降で行うフィッティングは式 5.3.3 を用いて行う [14]。表 5.3.1 は図 5.3.1 のフィッティング結果である。図 5.3.1 において、実験データがフィッティングしたサインカーブの上下に分布する結果となっている。これは内側の CdTe-Side Layer(以降では Inner-Side と記載する) と外側の CdTe-Side Layer(以降では Outer-Side と記載する) でモジュレーションファクターが異なることによって生じている。分かりやすくするために、図 5.3.2 に Inner-Side と Outer-Side で分けたモジュレーションカーブを載せた。ここで(赤)は 5.3.1 をフィッティングした際のサインカーブであり、(左)Inner-Side の図では $n\pi$ rad 付近においてサインカーブの内側にプロット点があるが、(右)Outer-Side の図では $n\pi$ rad 付近においてサインカーブの外側にプロット点があり、Inner-Side の方が M が小さく、Outer-Side の方が M が大きいことがわかる。ここで、偏光度 100% のシミュレーションデータにより Inner-Side と Outer-Side における方位角に対する散乱角の分布を調べた(図 5.3.3)。図 5.3.3(左)Inner-Side では θ が 40~140 deg 程度まで分布するのに対し、(右)Outer-Side では θ は 120 deg 程度までしか分布しない。散乱角の大小は S_i でのコンプトン散乱におけるデポジットエネルギーに依存する。散乱角が大きい後方散乱の場合は S_i でのデポジットエネルギーが大きく、相対的に小さなエネルギーの光子が CdTe-Side と衝突することになり、散乱角が小さい場合は相対的に大きなエネルギーの光子が CdTe-Side と衝突することとなる。CdTe-Side に入射するエネルギーが相対的に小さければ、つまり散乱角が大きい後方散乱のイベントは 1 枚目の Inner-Side で光電吸収されやすいため、2 枚目の Outer-Side との分布の違いが見えていると言える。また、 M は散乱角に依存し、 ~ 90 deg で最大となる分布をもつ。モジュレーションカーブにプロットされる 1 点は、 θ で積分していると考えられるので、 θ が広く分布している方が相対的に M が小さくなると言える。定量的には $\theta \sim 90$ deg のイベント数に対して、他の θ のイベント数と M の大きさによる寄与を考える必要があるが、ここでは定性的な解釈のみにとどめておく。

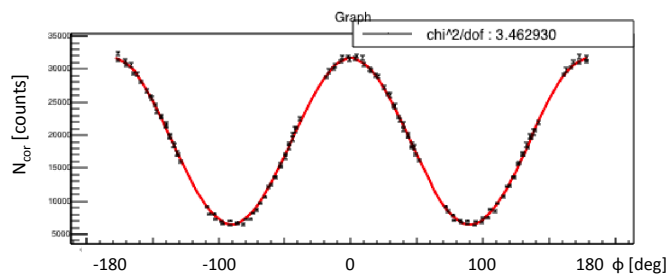


表 5.3.1: フィッティング結果

| | |
|---------------------|---------------------|
| M | 0.6596 ± 0.0009 |
| ϕ_0 | -90.01 ± 0.05 |
| χ^2/dof | $432.87/125 = 3.46$ |

図 5.3.1: コンプトンカメラの中心位置に 122.2 keV, 偏光角 -90 deg のガンマ線を照射した場合のシミュレーションによるモジュレーションカーブ

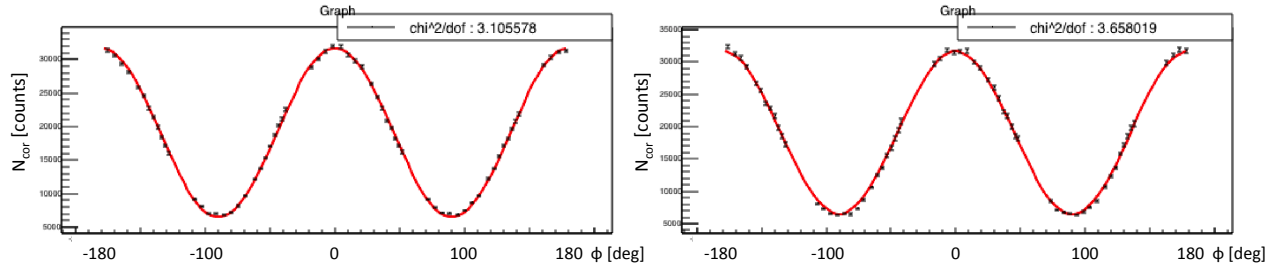


図 5.3.2: 図 5.3.1 のモジュレーションカーブを (左)Inner-Side と (右)Outer-Side に分けた。(赤) は図 5.3.1 のフィット結果のサインカーブである。

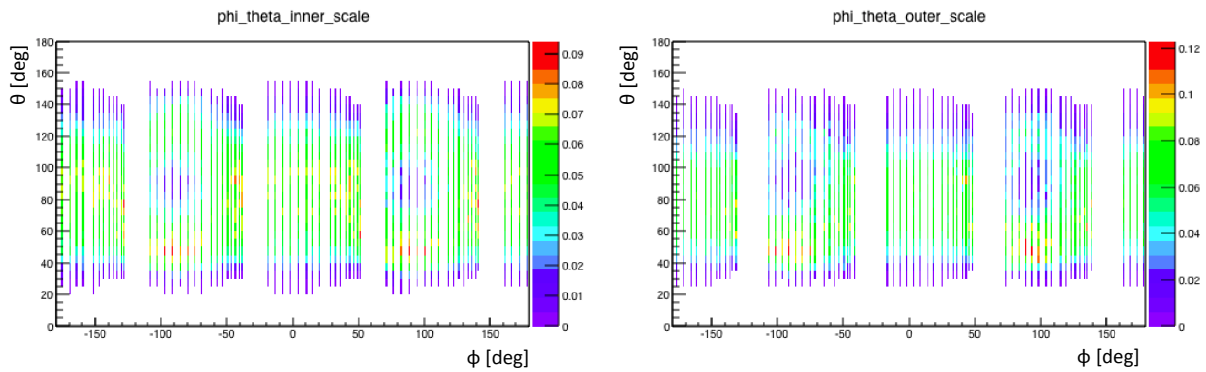


図 5.3.3: 偏光度 100%, 偏光角 -90 deg のシミュレーションにおける方位角 ϕ に対する散乱角 θ の分布。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。各ビンのエン트리数で正規化している。

次に、122.2 keV, 偏光角 -90 deg のガンマ線を (2,2) の位置に照射し、全チャンネルで読み出しができる、という場合のシミュレーションを行った。図 5.3.4 は (左)Inner-Side, (右)Outer-Side のモジュレーションカーブであり、データ全体のフィッティング結果であるサインカーブ (赤) の内側に分布する方位角の範囲 ($-40 \sim 160$ deg) と、外側に分布する方位角の範囲 ($-180 \sim -40$ deg) がある。これは照射位置と CdTe-Side との距離により生じると考えられる。図 5.3.5 は照射位置と CdTe-Side との距離による散乱角の違いを示しており、照射位置から距離の近い A と距離の遠い B を比較した場合、とりうる散乱角の範囲は $\Delta\theta_A > \Delta\theta_B$ となる。上記で述べたように、広い範囲の散乱角を積分するとモジュレーションファクターは小さくなると言えるので、照射位置から距離の近いレイヤーほどモジュレーションファクターは小さくなる。(2,2) に照射した場合は Layer ID 200~202 が照射位置から近く、Layer ID 204~207 が照射位置から遠い(図 3.1.4 参照)。つまり、方位角 $-40 \sim 160$ deg ではモジュレーションファクターが相対的に小さく、サインカーブの内側に分布し、方位角 $-180 \sim -40$ deg ではモジュレーションファクターが相対的に大きく、サインカーブの外側に分布することとなる。さらに、1 枚の CdTe-Side 内でも照射位置からの距離に違いがあるため、CdTe-Side 1 枚の中でも方位角によってモジュレーションファクターが変化し、今回使用したコンプトンカメラのジオメトリでは照射位置によってモジュレーションカーブの形状が様々に変化するとと言える。

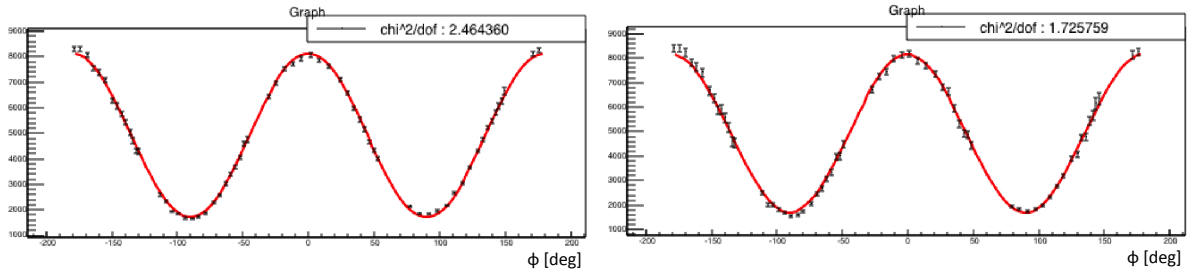


図 5.3.4: 122.2 keV, -90 deg, (2,2) に照射した際のモジュレーションカーブ。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。(赤) は全データのフィット結果のサインカーブ。

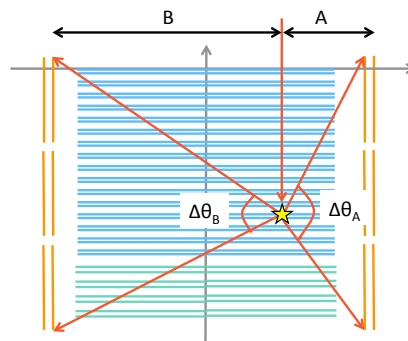


図 5.3.5: ビーム照射位置に対する CdTe-Side の距離による散乱角の違い。距離 A,B の時のとりうる散乱角の範囲が $\Delta\theta_A, \Delta\theta_B$

実際に散乱角によるセレクションを行い、モジュレーションカーブを作成した。図 5.3.6 は散乱角を 0~60, 60~80, 80~100, 100~120, 120~180 deg でセレクションをして作成したモジュレーションカーブである。0~60, 120~180 deg では統計が少ないため広く散乱角をとっているが、セレクションをしない場合(図 5.3.4)と比べて、散乱角でセレクションをした場合は $\chi^2/dof \sim 1$ 程度でサインカーブとよくあい、散乱角の違いによるモジュレーションファクターの大きさの違いもみとれる。

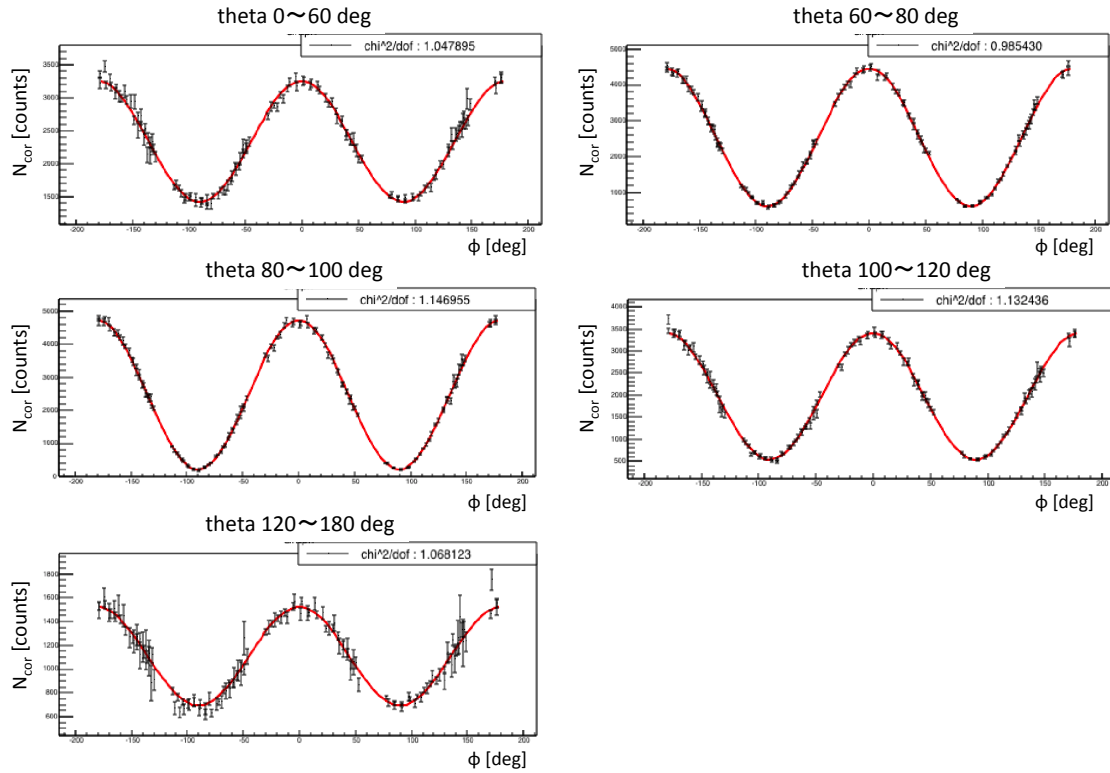


図 5.3.6: 散乱角の違いによるモジュレーションカーブ。(上左)0~60, (上右)60~80, (中左)80~100, (中右)100~120, (左下)120~180 deg。(122 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) に照射、全てのチャンネルで読み出し可)

最後に、実際のコンプトンカメラの状態である、DC 不調により読み出しのできない ASIC の部分と、ストレンジチャンネルを反映させ、122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) に照射した場合のシミュレーションを行った。図 5.3.7 がその結果であり、(左)Inner-Side、(右)Outer-Side である。モジュレーションカーブの形状そのものは図 5.3.4 から大きな変化はないが、ストレンジチャンネルの影響により各ピンでの N_{cor} の大きさは変化している。

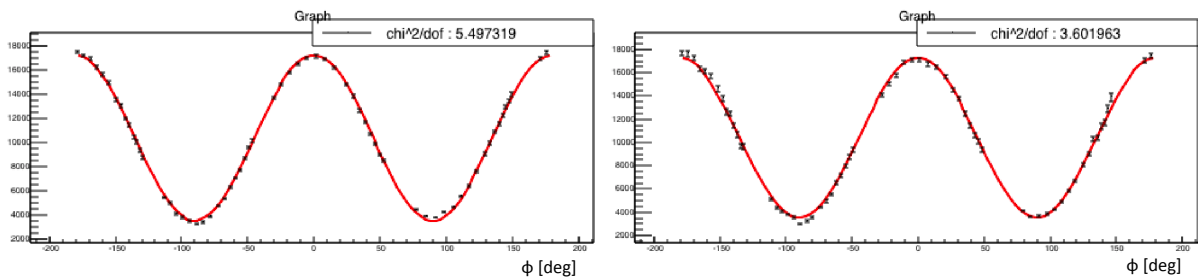


図 5.3.7: 実際のコンプトンカメラの読み出し状態を反映させた 122.2 keV, -90 deg, (2,2) に照射した際のモジュレーションカーブ。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。(赤)は全データのフィット結果のサインカーブ。

よって、照射位置と CdTe-Side との距離によってモジュレーションカーブが単一のサインカーブ (以前で赤で示したサインカーブ) にのらないことがわかったため、本研究では式 5.3.3 を用いてモジュレーションカーブをフィッティングするが、以下のように距離の近い Layer ID 200~203 に対応する方位角 ($\phi \geq -40$ deg) と、距離の遠い Layer ID 204~207 に対応する方位角 ($\phi < -40$ deg) において、同一の ϕ_0 で別々の M と A によりフィッティングを行うこととした (以降で青で示すサインカーブ)。

$$\begin{aligned}
 N_{\text{cor}}(\phi) &= A_1 \left(1 + M_1 \cos 2 \left(\phi - \phi_0 - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (\phi \geq -40) \\
 &= A_2 \left(1 + M_2 \cos 2 \left(\phi - \phi_0 - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (\phi < -40)
 \end{aligned}$$

第6章 コンプトンカメラ偏光応答

6.1 FTOOLS を用いたコンプトン再構成

これまでに挙げた実験データはコンプトン再構成をせずに解析を行ったものである。コンプトン再構成によるノイズシグナルの除去や、ARM の計算などのイベントの処理を FTOOLS(AstroH_B07c_20151209) を用いて行った。FTOOLS とは、ASTRO-H 衛星において各検出器でデータ取得が行われた際に、得られたイベントに対して各種データ処理を行うソフトウェアであり、SGD でのデータ処理に関する手法は一戸修論 [8] で開発されたコンプトン再構成アルゴリズムをもとに製作されている。以下にその概要を述べる。

hxisgdsff

取得したイベントの各シグナルに対して解析に必要な ID 情報などを付加する。

hxisgdpha

各シグナルの ADC Value をエネルギー keV に変換する。ここで使用するエネルギー較正曲線は第 5.1.2 節で作成したものを用い、スレッシュホールドは第 5.1.1 で設定した値を用いた。

sgdevtid

コンプトン再構成を行い、各イベントについてそのイベント順序や状況など (Si-CdTeS イベント, エスケープイベントなど) のもっともらしさを評価する。

上記のプロセスにより得られたデータファイルを用いてこれまでと同様にイベントのセレクション (エネルギーやヒット位置など) を行い、シミュレーションとの比較を行う。

6.1.1 FTOOLS を用いたイベントセレクションによる整合性

これまで解析をしてきた Si-CdTeS イベントデータ (表 5.1.5) と、FTOOLS を用いたコンプトン再構成後の Si-CdTeS イベントデータについて整合性を確認した。表 6.1.1 はこれまでの解析データ (event root と呼ぶ) と FTOOLS によるデータ (sffa と呼ぶ) とのイベントの中身を比較した結果である。

表 6.1.1: 122.2 keV, (2,2) 照射データの Si-CdTeS イベントの比較

| 比較したデータ 偏光角 [deg] | 共通のデータ [counts] | event root のみ [counts] | sffa のみ [counts] |
|----------------------|--------------------|---------------------------|---------------------|
| -90 | 171745 | 22071 | 4473 |
| -67.5 | 134890 | 17278 | 3527 |
| -45 | 128728 | 16672 | 3334 |
| 0 | 142253 | 18402 | 3734 |
| 90 | 137211 | 17399 | 3635 |

両者のセレクションによる Si-CdTeS イベントは概ね一致しており、各ファイルで異なるイベント数の比も同様である。異なるイベントの理由は以下である。

event root のみのイベント

event root のみに存在するイベントについて、sffa におけるイベント情報を確認すると、全てのイベントが ARM CUT によりセレクションから外れることが分かった。本研究で用いた ARM CUT のセレクションの条件は、先行研究 [8],[9] により採用されている条件と同様にしている。

sffa のみのイベント

sffa のみに存在するイベントについて、event root におけるイベント情報を確認すると、シグナル数が 3 以上のイベントであった。FTOOLS では隣接する複数ピクセルでのチャージシェアリングイベントは 1 つのシグナルにマージするプロセスがある。つまり、event root ではシグナル数==2 のセレクションにより外れていたイベントである。

よって双方でのイベント数が異なる要因が理解できており、FTOOLS のプロセスにおける問題はないと言っ
てよい。

6.2 シミュレーターによる実験データの再現

これからコンプトン再構成後のビーム試験データとシミュレーションデータとの詳細な比較を行う。まず 122.2 keV, 偏光角 -90 deg のデータについて比較を行った (データ解析の条件は表 6.2.1)。図 6.2.1(上) は (黒) 実験データと (赤) シミュレーションデータの Inner-Side のモジュレーションカーブであり、縦軸は実験データの N_{cor} で、シミュレーションデータは全イベント数により規格化している。(下) は実験データとシミュレーションデータの残差である。残差の形状を見ると、全体にはよくあう分布となっているが、青で示した部分で実験データの N_{cor} がシミュレーションに対して少なく、ずれが大きくなっている。対応する領域は各 CdTe-Side における方位角の大きい位置であり、ここでは 122.2 keV, 偏光角 -90 deg, Inner-Side の結果のみを載せているが、他の偏光角のデータでも同様のずれを確認した。図 6.2.2 にコンプトンカメラの俯瞰図を示す。青の矢印はビーム照射位置である Si の (2,2) で散乱した光子が、各 CdTe-Side における方位角の大きい方向へ散乱される場合の飛程を示している。ここで、各 CdTe-Side の方位角が大きい方向

へ散乱した場合は、読み出し部である ASIC を通過していることがわかる。本研究で用いたシミュレーターでは ASIC のジオメトリも再現されているが、今回の実機試験データとの比較によって ASIC の吸収体としての影響が十分に再現できていないことが分かった。ずれの一因としてシミュレーターで再現するの ASIC のジオメトリに重い金属が足りていないことがあげられ、その効果をシミュレーターに取り込むためには、ASIC に含まれる微量の金属なども詳細に再現し、様々な位置に照射したビーム試験データとの比較を進める必要がある。以降では (2,2) で照射した際に ASIC を通過する位置となる方位角 (各 CdTe-Side の方位角が大きい部分の 3 列ずつ、計 24 列分の方位角) を除いて比較を進める。

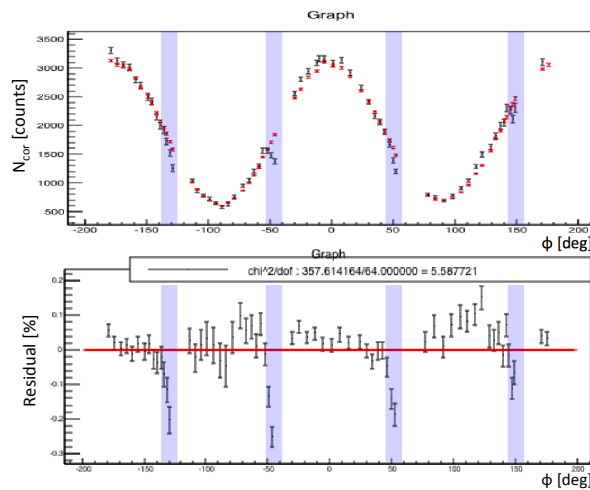


図 6.2.1: (上)122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) の Inner-Side のモジュレーションカーブ。(黒) 実験データ (赤) 偏光角 -90 deg のシミュレーションデータ。(下) 残差 (黒-赤)。青い領域でのずれが大きい。

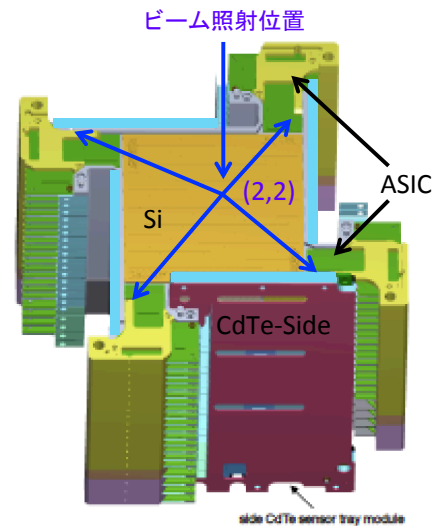


図 6.2.2: コンプトンカメラの読み出し部分 (ASIC) も含むジオメトリの俯瞰図 [15]

表 6.2.1: 122.2 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件

| パラメータ | 実験データ | シミュレーションデータ |
|-----------------------------|----------------------------|--|
| 合計デポジットエネルギーの制限 | 122.2 ± 10 keV | 122.2 ± 10 keV |
| Si でのデポジットエネルギーの制限 | 5 ~ 40 keV ¹ | 5 ~ 40 keV |
| 各ピクセルのスレッシュホールド | 第 5.1.1 節 | 第 5.1.1 節 |
| ファーストヒット位置の制限 | (2,2) のみ | (2,2) のみ |
| シミュレーションデータ解析時に 取り除くピクセル | DC 不調 (第 3.2.1 節) | 計 512 ch |
| | ストレンジチャンネル (第 3.2.2 節) | 計 359 ch (表 3.2.1) |
| | trigger disable(第 3.2.3 節) | 計 77 ch |
| 備考 | 2 ヒットのイベント | 2 ヒットのイベント 1mm×1mm のビームサイズ ビームを曲げて照射 (第 5.2.4 節) 第 5.2.2 節のエネルギー分解能 |

¹sffa では再構成後の各イベントの「合計デポジットエネルギー」が計算されているため、式 2.1.1 を用いて算出している。

これから、上記で述べたように ASIC を通過して入射する方位角を除いて比較を行う。図 6.2.1 から該当する方位角を除いて比較をした結果が図 6.2.3(右)Inner-Side であり、(左) は Outer-Side である (解析条件は上記と同様に表 6.2.1)。また、これ以降は方位角 160 deg 以上の部分は -360 deg している。残差を確認すると Inner-Side と Outer-Side においてモジュレーションカーブと同波長の周期的な振る舞いが見える。モジュレーションカーブと同じ波長で周期的な残差が生じる原因として考えられるのは、実験の偏光角とシミュレーションの偏光角がずれていることであり (図 6.2.4)、Inner-Side と Outer-Side で同位相の形状となっていることも説明できる。ビームを曲げた場合でも周期的なずれが形成されるが (第 5.2.4 参照)、モジュレーションカーブの波長とは異なる事が分かる。

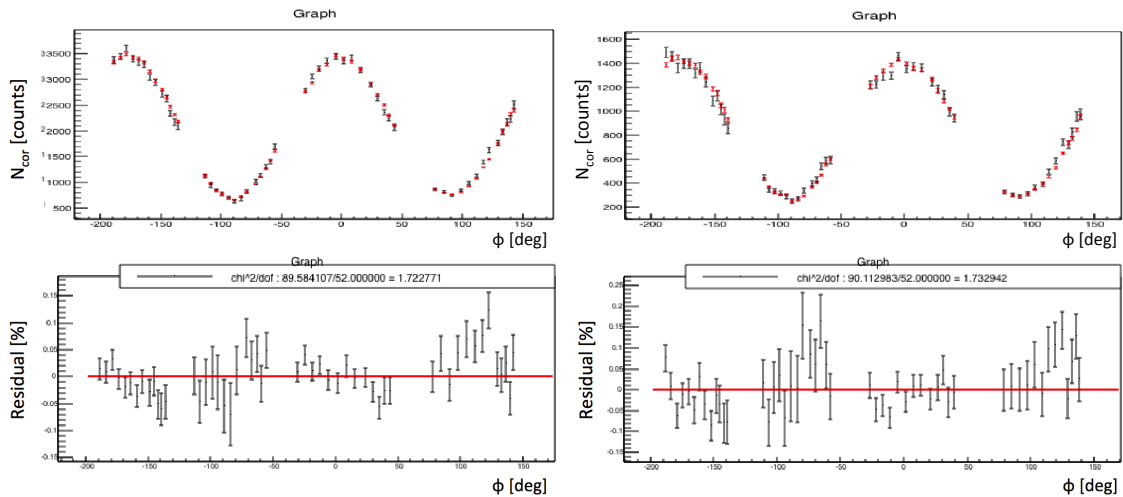


図 6.2.3: (上)122.2 keV, 偏光角 -90 deg, (2,2) のモジュレーションカーブ。(黒) 実験データ、(赤) 偏光角 -90 deg のシミュレーションデータ。ASIC を通過して CdTe-Side に入射する方位角を除いている。(下) 残差 (黒-赤)。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。

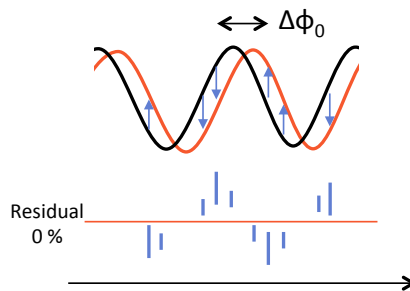


図 6.2.4: 偏光角のずれ $\Delta\phi_0$ により形成される周期的な残差

ここで、ビーム試験時の方位角のアライメント調整について振り返る。恒温槽上部に取り付けた気泡式水準器により床面と恒温槽のアライメントは 0.04 deg の精度で調整をしたが、恒温槽の内部、特にコンプトンカメラ上部に水準器を設置するなどのアライメント調整は行っていない。恒温槽内部には滑り防止のゴムシート、その上に台座、さらに自動ステージを組み付けてコンプトンカメラが設置してあり、方位角のずれは 1 deg の精度では確認ができていないと言える。よって偏光角が異なるデータにおいて、フィッティングにより得られる方位角 ϕ_0 が共通の方向に同程度ずれていればアライメント調整によるずれであると認識ができ、シミュレーションの際に設定する偏光角を変更する必要がある。表 6.2.2 は各偏光角のモジュレーションカーブにおいてフィッティングにより得られた ϕ_0 の値である。全ての偏光角のデータにおいてマイナス ϕ 方向にずれが生じており、コンプトンカメラのビーム軸周りのアライメントが 1 deg の精度で調整できていなかったことを意味する。よって以降ではシミュレーションの際に設定する偏光角を、実験で得られた偏光角のずれの平均値である -1.5 deg を含めて行う。

表 6.2.2: 122.2 keV, (2,2) データのモジュレーションカーブのフィティング結果

| 偏光角 [deg] | ϕ_0 [deg] | $\Delta\phi_0$ [deg] ($= \phi_0 - \text{偏光角}$) |
|-----------|-----------------|--|
| -90 | -91.4 ± 0.2 | -1.37 |
| -67.5 | -68.9 ± 0.2 | -1.44 |
| -45 | -46.9 ± 0.2 | -1.92 |
| 0 | -0.97 ± 0.2 | -0.97 |
| 90 | 88.1 ± 0.2 | -1.85 |
| | | 平均 -1.5 ± 0.1 |

図 6.2.5 は実験データのフィティングで得られた -1.5 deg を反映させ、偏光角 -91.5 deg でシミュレーションしたデータと実験データとの比較をした(左)Inner-Side、(右)Outer-Side のモジュレーションカーブである。残差を確認すると、偏光角を変更する前にあった周期的な残差はなくなり、その大きさも改善した。以上から、シミュレータに取り込むパラメータの設定は完了し、シミュレータによる実験結果の再現が概ね完了した。

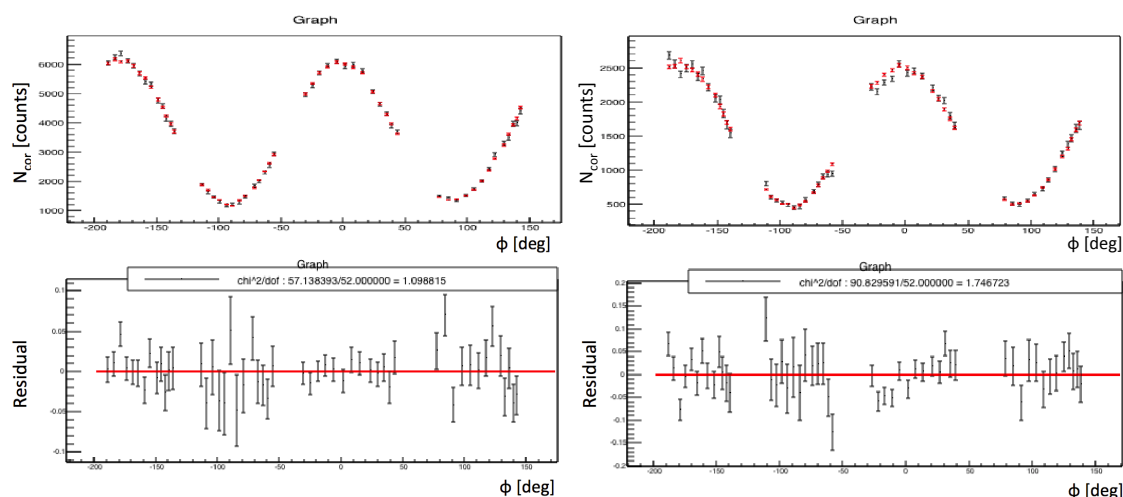


図 6.2.5: (上)122.2 keV, 偏光角 -91.5 deg, (2,2) のモジュレーションカーブ。(黒) 実験データ、(赤) 偏光角 -91.5 deg のシミュレーションデータ。ASIC を通過して CdTe-Side に入射する方位角を除いている。(下) 残差(黒-赤)。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。

6.2.1 実験とシミュレーションデータの比較結果のまとめ

これまで述べてきたように、実験とシミュレータを比較する際の各種パラメータを調整した。最終的に比較に用いるパラメータは以下の表 6.2.3, 6.2.4 である。

表 6.2.3: 122.2 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件

| パラメータ | 実験データ | シミュレーションデータ |
|-----------------------------|--------------------------------|---|
| 合計デポジットエネルギーの制限 | 122.2 ± 10 keV | 122.2 ± 10 keV |
| Si でのデポジットエネルギーの制限 | 5 ~ 40 keV | 5 ~ 40 keV |
| 各ピクセルのスレッシュホールド | 第 5.1.1 節 | 第 5.1.1 節 |
| ファーストヒット位置の制限 | (2,2) のみ | (2,2) のみ |
| シミュレーションデータ解析時に 取り除くピクセル | DC 不調 (第 3.2.1 節) | 計 512 ch |
| | ストレンジチャンネル (第 3.2.2 節) | 計 359 ch (表 3.2.1) |
| | trigger disable(第 3.2.3 節) | 計 77 ch |
| 備考 | 2 ヒットのイベント ASIC を通過する方位角を除く | 2 ヒットのイベント ASIC を通過する方位角を除く 1mm×1mm のビームサイズ ビームを曲げて照射 (第 5.2.4 節) 第 5.2.2 節のエネルギー分解能 入射エネルギー : 122.2 keV 偏光角 : -91.5, -69.0, -46.5, -1.5, 88.5 deg |

表 6.2.4: 194.5 keV ビームデータとシミュレーションデータの解析条件

| パラメータ | 実験データ | シミュレーションデータ |
|-----------------------------|--------------------------------|---|
| 合計デポジットエネルギーの制限 | 194.5 ± 10 keV | 194.5 ± 10 keV |
| Si でのデポジットエネルギーの制限 | 5 ~ 80 keV | 5 ~ 80 keV |
| 各ピクセルのスレッシュホールド | 第 5.1.1 節 | 第 5.1.1 節 |
| ファーストヒット位置の制限 | (2,2) のみ | (2,2) のみ |
| シミュレーションデータ解析時に 取り除くピクセル | DC 不調 (第 3.2.1 節) | 計 512 ch |
| | ストレンジチャンネル (第 3.2.2 節) | 計 359 ch (表 3.2.1) |
| | trigger disable(第 3.2.3 節) | 計 77 ch |
| 備考 | 2 ヒットのイベント ASIC を通過する方位角を除く | 2 ヒットのイベント ASIC を通過する方位角を除く 1mm×1mm のビームサイズ ビームを曲げて照射 (第 5.2.4 節) 第 5.2.2 節のエネルギー分解能 入射エネルギー : 194.5 keV 偏光角 : -91.5, -69.0, -46.5, -1.5, 88.5 deg |

ここで、各角度の χ^2/dof (図 6.2.5) をみると、1 を大きく超えるものがいくつかあり、シミュレータによる実験データの再現において、統計誤差のみでは説明できないものが残っていることがわかる。そこで、 χ^2/dof がおよそ 1 になるように系統誤差の大きさを評価した (表 6.2.5)。統計誤差 sys_err と統計誤差 $stat_err$ は通常の誤差伝搬を用い、

$$sim_err = \sqrt{stat_err^2 + sys_err^2} \quad (6.2.1)$$

として、各角度に共通の割合で加えた。結果として系統誤差は 1.0~4.5 % と評価できた。

表 6.2.5: 実験データとシミュレーションデータの比較

| Energy [keV] | 偏光角 [deg] | CdTe-Side | 系統誤差 0% χ^2/dof | 系統誤差 [%] | χ^2/dof | |
|--------------|-----------|-----------|-------------------------|----------|--------------|----------|
| 122.2 | -91.5 | Inner | 57.14/51 | 1.0 | 52.75/51 | |
| | | Outer | 90.83/51 | 2.5 | 55.42/51 | |
| | -69.0 | Inner | 91.82/51 | 2.5 | 53.76/51 | |
| | | Outer | 71.91/51 | 2.5 | 55.51/51 | |
| | -46.5 | Inner | 113.49/51 | 3.0 | 51.89/51 | |
| | | Outer | 75.10/51 | 3.0 | 53.53/51 | |
| | -1.5 | Inner | 105.27/51 | 3.0 | 51.65/51 | |
| | | Outer | 104.37/51 | 4.5 | 55.85/51 | |
| | 88.5 | Inner | 116.81/51 | 3.0 | 54.98/51 | |
| | | Outer | 60.11/51 | 2.0 | 53.01/51 | |
| | 194.5 | -91.5 | Inner | 66.46/51 | 2.0 | 49.25/51 |
| | | | Outer | 58.78/51 | 2.0 | 49.77/51 |
| -69.0 | | Inner | 63.32/51 | 2.0 | 49.97/51 | |
| | | Outer | 71.30/51 | 3.0 | 53.57/51 | |
| -46.5 | | Inner | 83.59/51 | 3.0 | 49.50/51 | |
| | | Outer | 79.62/51 | 3.5 | 51.30/51 | |
| -1.5 | | Inner | 102.81/51 | 3.5 | 52.47/51 | |
| | | Outer | 63.33/51 | 2.5 | 51.77/51 | |
| 88.5 | | Inner | 68.15/51 | 2.0 | 53.53/51 | |
| | | Outer | 68.85/51 | 2.5 | 54.72/51 | |

ここで、最も系統誤差の大きい 122.2 keV, 偏光角 -1.5 deg について、ずれの原因を考える。図は 6.2.6 は 122.2 keV, 偏光角 -1.5 deg の実験とシミュレーションの比較であり、残差は特定の方位角で大きくなっていることがわかる。特定の角度でずれが大きいことは、ストレンジチャンネルやその周囲のピクセルに与える影響を考慮しきれていないことが挙げられる。また、他の偏光角、エネルギーについては付録 B に図を載せている。

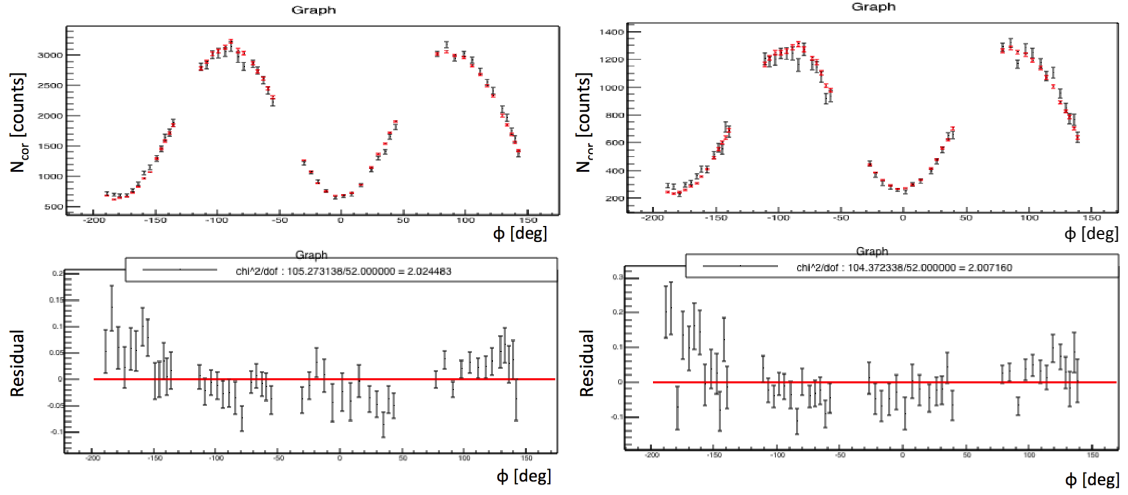


図 6.2.6: (上)122.2 keV, 偏光角 -1.5 deg, (2,2) のモジュレーションカーブ。(黒) 実験データ、(赤) 偏光角 -1.5 deg のシミュレーションデータ。ASIC を通過して CdTe-Side に入射する方位角を除いている。(下) 残差(黒-赤)。(左)Inner-Side、(右)Outer-Side。

6.3 ビーム試験により得られた偏光応答

本研究で用いたコンプトンカメラにより得られた偏光応答について述べる。図 6.3.1 は表 6.2.3, 6.2.4 の条件で作成した実験のモジュレーションカーブであり、Outer-Side の N_{cor} を Inner-Side の N_{cor} に規格化している。フィッティングの際は式 6.3.1 を用いており、式 6.3.1 のように (2,2) から距離が近い CdTe-Side である Layer ID 200~203(方位角 -40 deg 以上) と、距離が遠い Layer ID 204~207(方位角 -40 deg 未満) において独立の A と M でフィッティングをしている。表 6.3.1 は Inner-Side と Outer-Side に分けてフィッティングした結果である。 χ^2/dof の値が大きいため、 M_1, M_2 の平均と標準偏差により評価することとした。その結果、本試験で用いたコンプトンカメラにより得られた偏光応答は、122.2 keV では 0.665 ± 0.013 、194.5 keV では 0.607 ± 0.014 であった。SGD 搭載コンプトンカメラと同一設計のコンプトンカメラを使用した偏光測定試験は本試験が初めてであり、期待される偏光応答を取得することができた。

$$\begin{aligned}
 N_{cor}(\phi) &= A_1 \left(1 + M_1 \cos 2 \left(\phi - \phi_0 - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (\phi \geq -40) \\
 &= A_2 \left(1 + M_2 \cos 2 \left(\phi - \phi_0 - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (\phi < -40)
 \end{aligned} \tag{6.3.1}$$

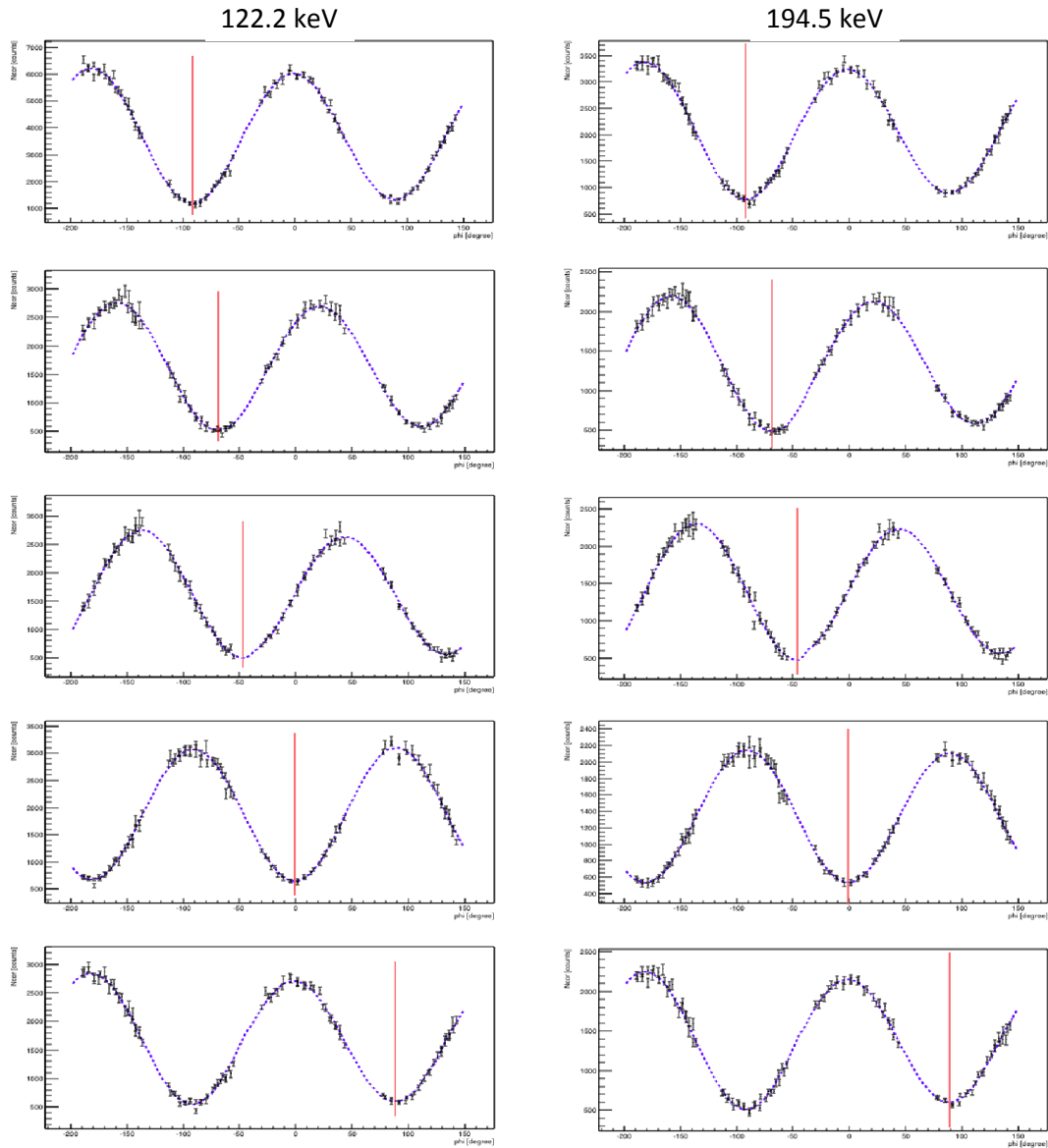


図 6.3.1: 本試験のコンプトンカメラで得られたモジュレーションカーブ。上から順に偏光角 $-91.5, -69.0, -46.5, -1.5, 88.5$ deg。 (左)122.2 keV、(右)194.5 keV。青線は式 6.3.1 のフィッティング関数であり、赤線はフィッティングにより得られた ϕ_0 を示している。

表 6.3.1: 本試験のコンプトンカメラにより得られた偏光応答

| Energy [keV] | 偏光角 [deg] | CdTe-Side | M_1 | M_2 | ϕ_0 [deg] | χ^2/dof | |
|--------------|-----------|-----------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|
| 122.2 | -91.5 | Inner | 0.674 ± 0.004 | 0.633 ± 0.004 | -91.6 ± 0.2 | 67.69/47 | |
| | | Outer | 0.686 ± 0.006 | 0.658 ± 0.005 | -90.8 ± 0.3 | 91.93/47 | |
| | -69.0 | Inner | 0.676 ± 0.006 | 0.633 ± 0.005 | -68.9 ± 0.2 | 71.58/47 | |
| | | Outer | 0.705 ± 0.009 | 0.666 ± 0.008 | -68.2 ± 0.4 | 56.73/47 | |
| | -46.5 | Inner | 0.694 ± 0.008 | 0.644 ± 0.005 | -46.8 ± 0.2 | 71.28/47 | |
| | | Outer | 0.708 ± 0.015 | 0.676 ± 0.009 | -46.4 ± 0.3 | 68.13/47 | |
| | -1.5 | Inner | 0.641 ± 0.005 | 0.650 ± 0.005 | -0.9 ± 0.2 | 57.07/47 | |
| | | Outer | 0.648 ± 0.008 | 0.673 ± 0.006 | -1.4 ± 0.3 | 71.97/47 | |
| | 88.5 | Inner | 0.669 ± 0.006 | 0.631 ± 0.005 | 88.1 ± 0.2 | 63.06/47 | |
| | | Outer | 0.690 ± 0.008 | 0.655 ± 0.008 | 88.5 ± 0.4 | 58.32/47 | |
| | | | | $\overline{M}_1 \pm \sigma_1$ | $\overline{M}_2 \pm \sigma_2$ | $\Delta\phi_0 \pm \sigma$ | |
| | | | | 0.679 ± 0.021 | 0.652 ± 0.016 | 0.16 ± 0.39 | |

| Energy [keV] | 偏光角 [deg] | CdTe-Side | M_1 | M_2 | ϕ_0 [deg] | χ^2/dof | |
|--------------|-----------|-----------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|
| 194.5 | -91.5 | Inner | 0.625 ± 0.006 | 0.560 ± 0.005 | -92.2 ± 0.2 | 83.76/47 | |
| | | Outer | 0.632 ± 0.006 | 0.582 ± 0.006 | -91.1 ± 0.3 | 71.73/47 | |
| | -69.0 | Inner | 0.627 ± 0.007 | 0.560 ± 0.006 | -68.6 ± 0.3 | 75.91/47 | |
| | | Outer | 0.654 ± 0.008 | 0.588 ± 0.007 | -68.0 ± 0.4 | 45.48/47 | |
| | -46.5 | Inner | 0.651 ± 0.009 | 0.574 ± 0.006 | -46.2 ± 0.2 | 72.22/47 | |
| | | Outer | 0.662 ± 0.013 | 0.624 ± 0.008 | -46.0 ± 0.3 | 78.76/47 | |
| | -1.5 | Inner | 0.593 ± 0.007 | 0.591 ± 0.006 | -0.8 ± 0.3 | 66.40/47 | |
| | | Outer | 0.617 ± 0.008 | 0.604 ± 0.007 | -1.7 ± 0.3 | 47.88/47 | |
| | 88.5 | Inner | 0.627 ± 0.007 | 0.561 ± 0.006 | 88.0 ± 0.3 | 59.89/47 | |
| | | Outer | 0.634 ± 0.008 | 0.570 ± 0.007 | 89.7 ± 0.4 | 68.87/47 | |
| | | | | $\overline{M}_1 \pm \sigma_1$ | $\overline{M}_2 \pm \sigma_2$ | $\Delta\phi_0 \pm \sigma$ | |
| | | | | 0.632 ± 0.019 | 0.581 ± 0.020 | 0.31 ± 0.58 | |

最後に、本研究で調整したシミュレーターにより実際の SGD の天体観測の模擬として、122 keV、偏光角 -90 deg で平行光全面照射のシミュレーションを行った。図 6.3.2 がその結果であり、ここでは ASIC を通過するイベントの除去はせず、単一のサインカーブでフィッティングしている（フィッティング結果は表 6.3.2）。平行光全面照射の場合に得られるコンプトンカメラの偏光応答は 122 keV で 0.62 であり、サイエンスワーキンググループに公開されている SGD MDP Calculation Tool により想定される SGD の偏光応答（図 2.1.7）を再現できていると言える。

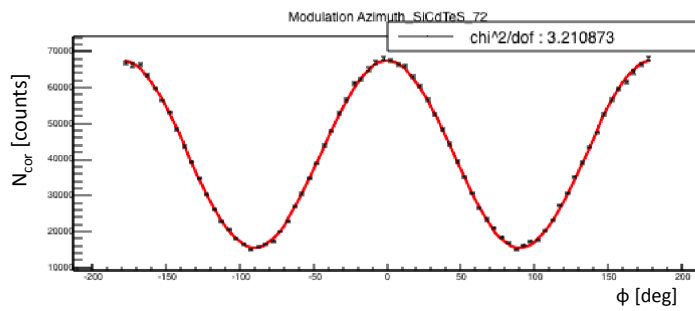


表 6.3.2: フィッティング結果

| | |
|---------------------|---------------------|
| M | 0.6249 ± 0.0009 |
| ϕ_0 | -89.90 ± 0.05 |
| χ^2/ndf | 3.21 |

図 6.3.2: 122 keV, 偏光角 -90 deg の平行光全面照射のシミュレーションによるモジュレーションカーブ

第7章 まとめ

本研究では、ASTRO-H/SGDの主検出部であるコンプトンカメラと同一設計品のコンプトンカメラを用いた偏光ビーム試験を行い、シミュレーターの検証を進めた。本研究の結論は以下である。

- モジュレーションカーブの形状に対して影響を与えやすい項目 (コンプトンカメラのジオメトリや照射位置など) の知見を得た。
- シミュレーターにおいて ASIC 部の再現が不十分となっていることがわかった。
- 実験データとシミュレーションの比較を進め、残るわずかなずれを 1.0~4.5 %の系統誤差として考慮した。
- 衛星搭載品と同一設計のコンプトンカメラを用いた初めての実機試験によって、理想的な場合の予想と同等のモジュレーションファクターを得られた。

本研究によって、これまでシミュレーションでしか予想されていなかった偏光応答を同一設計品の試験で得る事ができ、ASTRO-H/SGDの観測により想定される性能が実現できる見込みが得られた。今後はシミュレーターに取り込む ASIC の再現を詳細に行うことや、今回と同等の解析を他のビーム照射位置でも行う。

付録A SGDシミュレータ

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。

A.1 Geant4 を用いたシミュレーション

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標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。[28]

A.2 本研究で用いた検出器シミュレータ

本研究では 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している。検出器シミュレータのジオメトリは一戸修論 [8] で開発、その後の各試験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、照射方向をパラメータとして設定した。

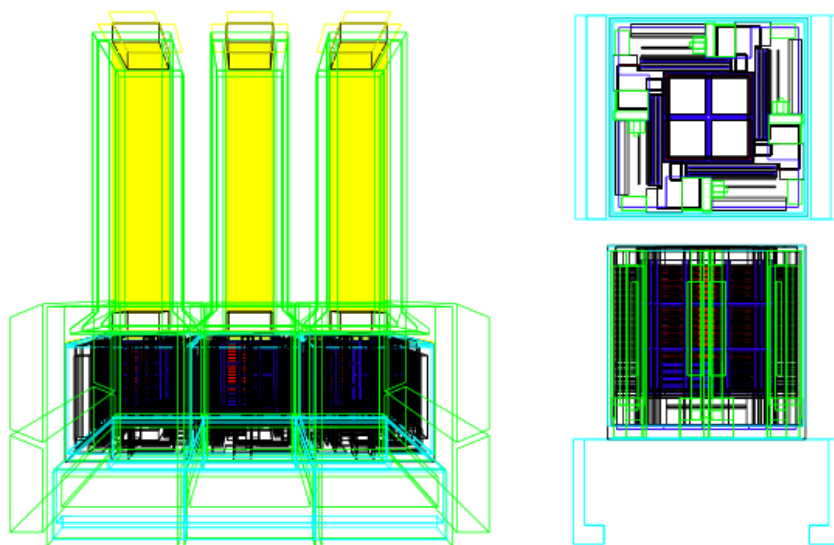


図 A.2.1: 記述しているジオメトリ。(左)SGD1 台、(右)コンプトンカメラ 1 台。[8]

付録B

B.1 偏光測定データと検出器シミュレーションデータの比較結果

第 6.2.1 における最終的な偏光実験データと検出器シミュレーションデータとの比較の図を載せる。ここに載せる図は表 6.2.5 の系統誤差を加える前に対応しており、122.2 keV, 偏光角 -91.5 deg は図 6.2.5 と同じ図である。また、以下の図では Outer-Side の N_{cor} を Inner-Side の N_{cor} に規格化している。各図の(上)は各エネルギー、各偏光角でのモジュレーションカーブで、(緑)Inner-Side の実験データ、(青)Outer-Side の実験データ、(赤) 検出器シミュレーションデータであり、ASIC を通過して CdTe-Side に入射する方位角を除いている。また、(下)は((緑)または(青)) 実験データ-(赤) シミュレーションデータの残差を示している。

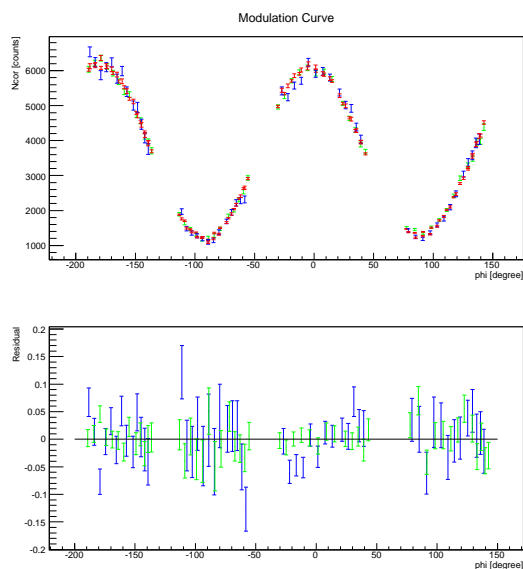


図 B.1.1: 122.2 keV, 偏光角 -91.5 deg

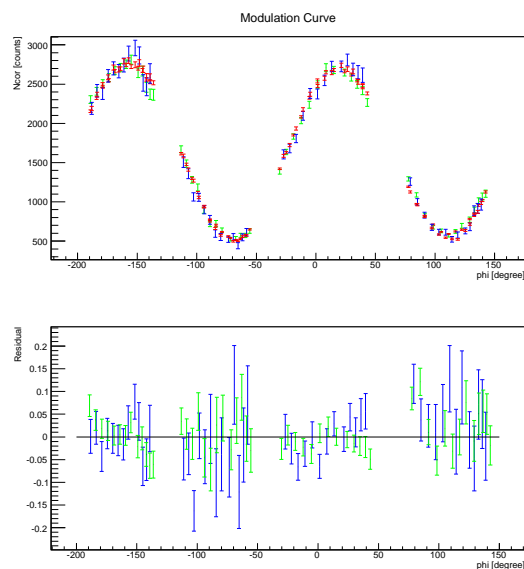


図 B.1.2: 122.2 keV, 偏光角 -69.0 deg

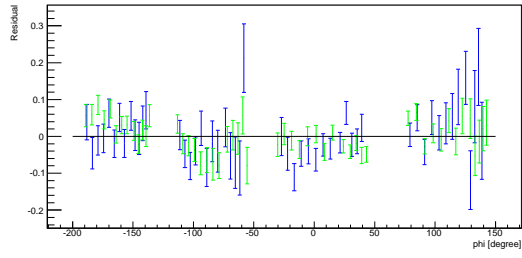
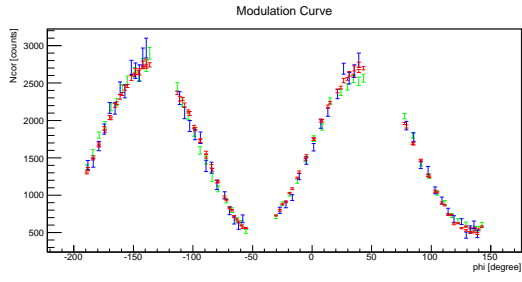


图 B.1.3: 122.2 keV, 偏光角 -46.5 deg

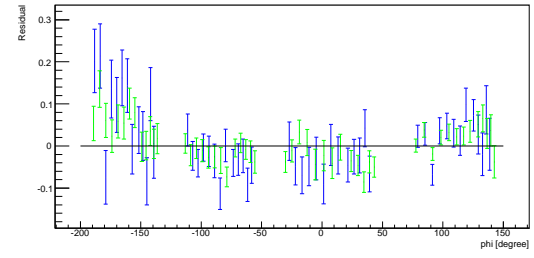
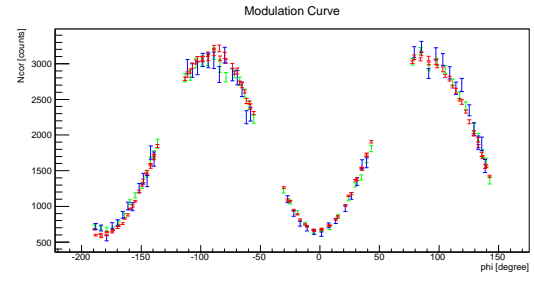


图 B.1.4: 122.2 keV, 偏光角 -1.5 deg

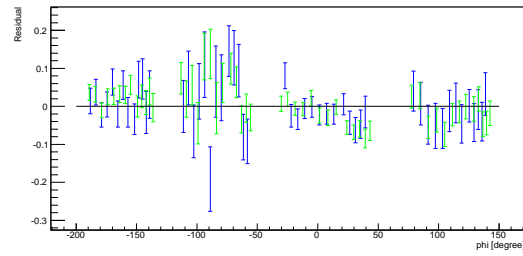
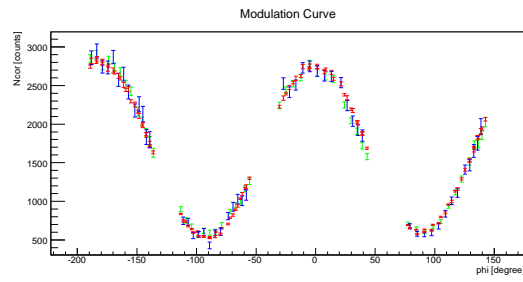


图 B.1.5: 122.2 keV, 偏光角 88.5 deg

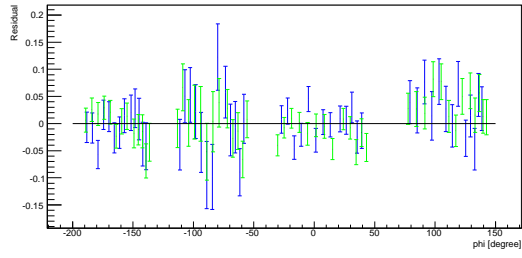
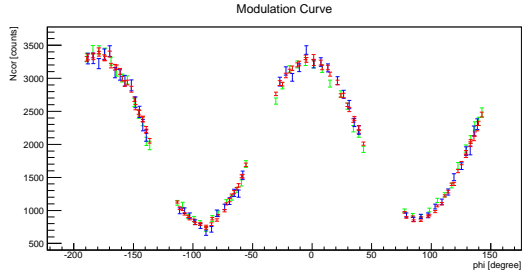


图 B.1.6: 194.5 keV, 偏光角 -91.5 deg

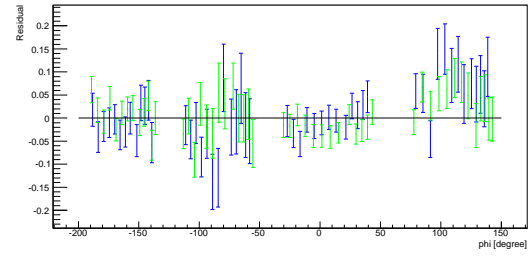
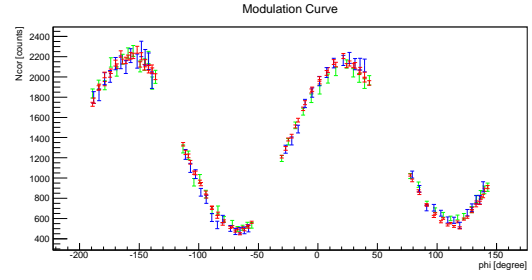


图 B.1.7: 194.5 keV, 偏光角 -69.0 deg

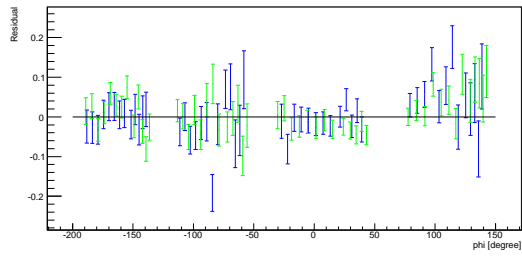
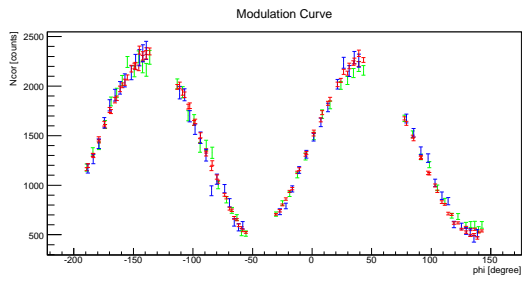


图 B.1.8: 194.5 keV, 偏光角 -46.5 deg

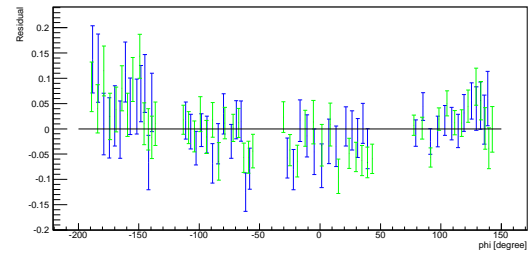
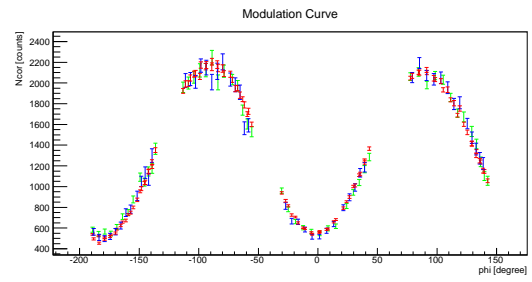


图 B.1.9: 194.5 keV, 偏光角 -1.5 deg

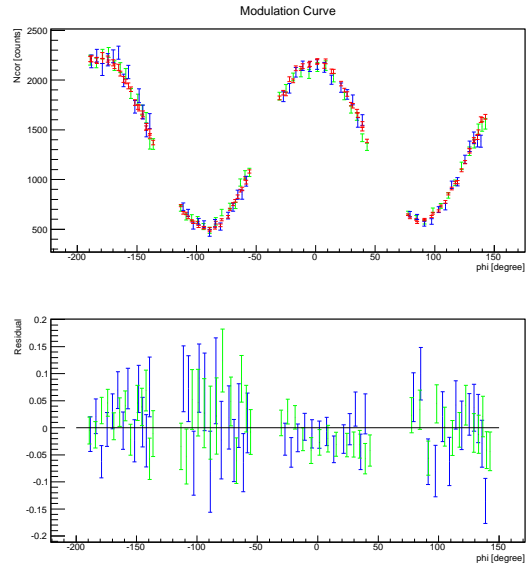


图 B.1.10: 194.5 keV, 偏光角 88.5 deg

付録C 投稿論文に向けた追解析

投稿論文の作成に向け、修論本文中で設定した検出器シミュレータに組み込むパラメータを再検討した。投稿論文中の図は以下のパラメータにより作成したものである。本修論中と投稿論文中では方位角 ϕ の 0 deg の定義が異なるので注意してほしい。本論文の方位角の値に対し、+90 deg した値が投稿論文中での方位角の値に対応する。以下に記載する偏光角は本論文中と同じ定義で記載している。

C.1 再設定したパラメータ

C.1.1 偏光角の設定

本修論中ではアライメント調整時のずれとして -1.5 deg を設定に組み込んだ (第 6.2 節参照)。その結果として得られた実験のモジュレーションカーブのフィッティング結果 (表 6.3.1) において、 ϕ_0 のフィット結果が設定値からずれがあった (表 6.3.1 中の $\Delta\phi_0$)。122.2 keV の $\Delta\phi_0$ の $+0.1$ deg をさらに考慮し、アライメント調整時のずれとして -1.4 deg を設定に組み込んだ。よって、シミュレーションに用いた偏光角は $-91.4, -68.9, -46.4, -1.4, 88.6$ deg である。

C.1.2 ビーム軸と検出器の傾きの設定

本修論中に記載したビーム軸と検出器の傾きの設定の際は、event root file を用いて Si の 1 層目と 32 層目のプロファイルを作成し、中心値を求めて傾きを決定した。投稿論文に際しては sffa file を用い、Si の 1 層目から 22 層の各層でプロファイルを作成してフィッティングにより中心値を求め、各層の Z 位置に対するビームの中心値のグラフを 1 次関数でフィッティングすることで傾きを決定した。上記の方法により決定した傾きは、Si1 層目から 32 層目の Camera_Z 方向の -55.1 mm に対し、偏光角 -1.4 deg で Camera_X 方向に -0.498 mm、Camera_Y 方向に -0.122 mm であり、偏光角 -91.4 deg で Camera_X 方向に -0.608 mm、Camera_Y 方向に -0.224 mm である。

C.1.3 ビームサイズの設定

sffa file を用いて Si の 1 層目のプロファイルのみによりビームサイズを決定した。決定したビームサイズは、偏光角 -1.4 deg (検出器を回転させない状態) で、(X 軸方向) 0.79 mm、(Y 軸方向) 1.39 mm である。

C.2 比較結果

以下に実験データと検出器シミュレーションデータとの比較結果を示す。ここで、(緑)Inner-Side、(青)Outer-Side、(赤) 検出器シミュレーションデータ、であり、(上) モジュレーションカーブ、(下) 残差は(実験データ(緑) または (青)) - (検出器シミュレーションデータ(赤)) である。Outer-Side の N_{cor} を Inner-Side の N_{cor} に規格化しており、以下の図においても本修論中で記載している ASIC を通過する方位角は除いている。表 C.2.1 に上記の条件でのシミュレーションデータと実験データとの比較結果を載せた。 χ^2/dof が 1 程度になるように系統誤差の大きさを評価すると、0.0~3.3 % であり、本修論中より改善している。

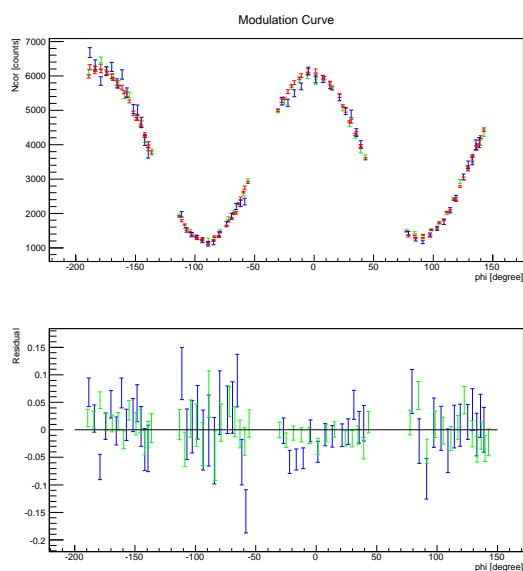


図 C.2.1: 122.2 keV, 偏光角 -91.4 deg

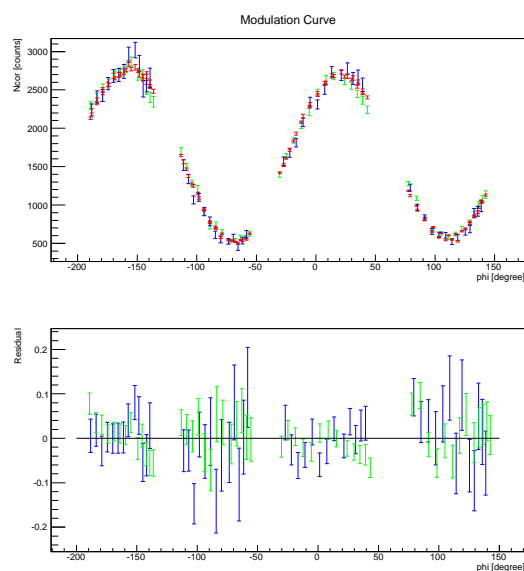


図 C.2.2: 122.2 keV, 偏光角 -68.9 deg

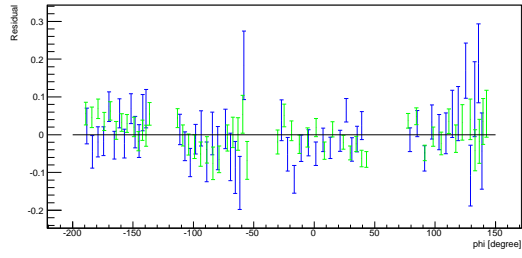
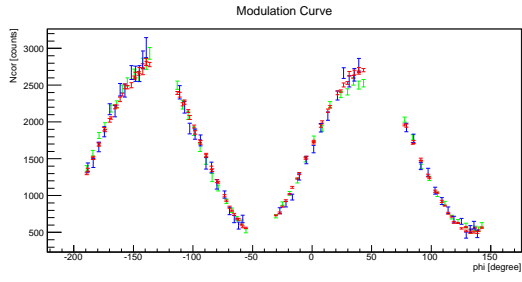


图 C.2.3: 122.2 keV, 偏光角 -46.4 deg

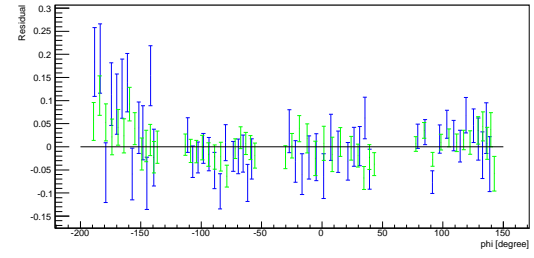
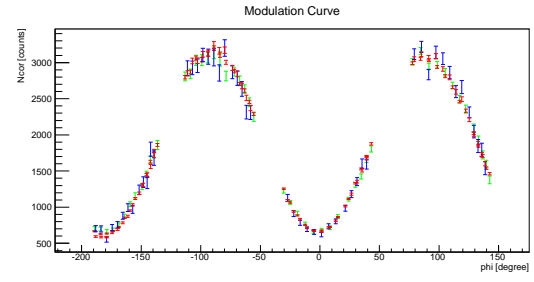


图 C.2.4: 122.2 keV, 偏光角 -1.4 deg

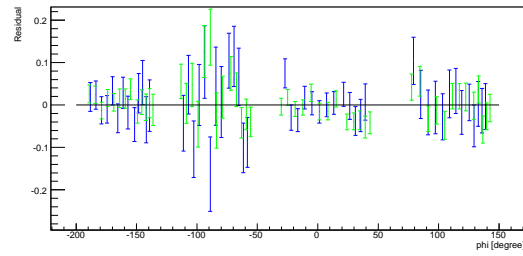
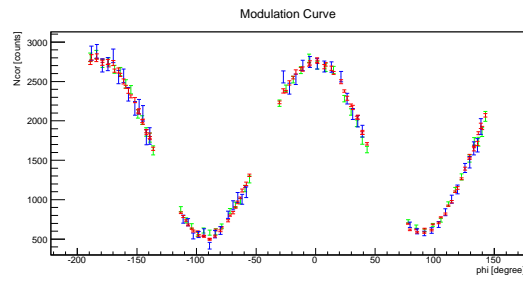


图 C.2.5: 122.2 keV, 偏光角 88.6 deg

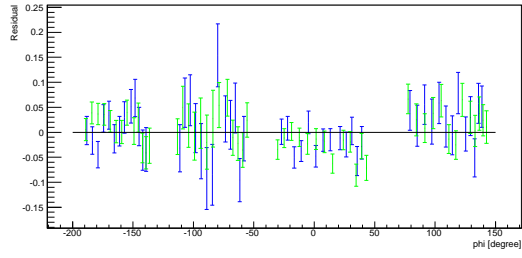
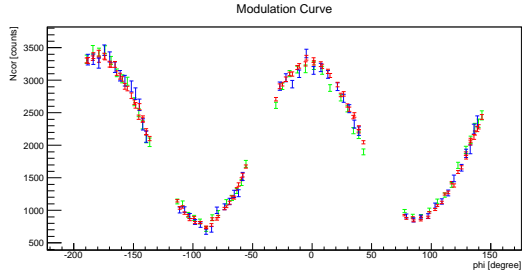


图 C.2.6: 194.5 keV, 偏光角 -91.4 deg

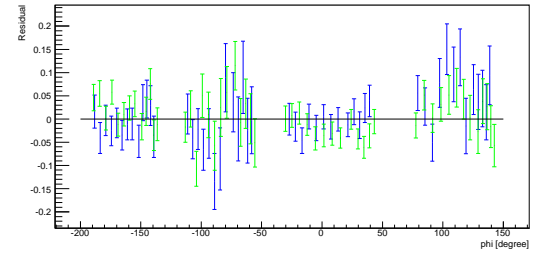
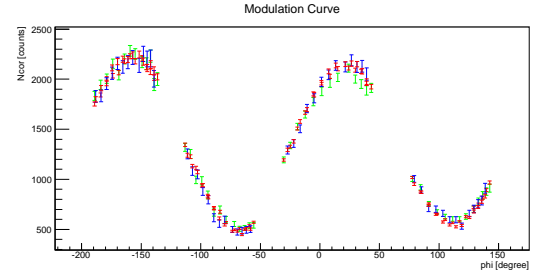


图 C.2.7: 194.5 keV, 偏光角 -68.9 deg

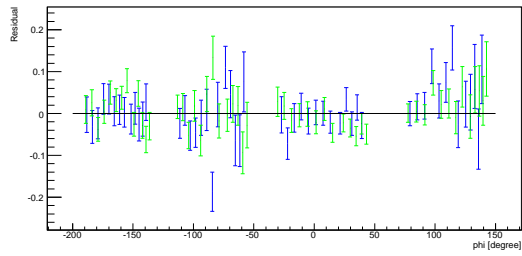
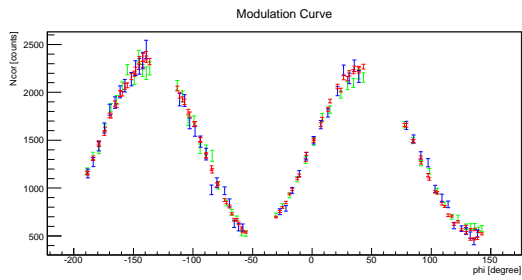


图 C.2.8: 194.5 keV, 偏光角 -46.4 deg

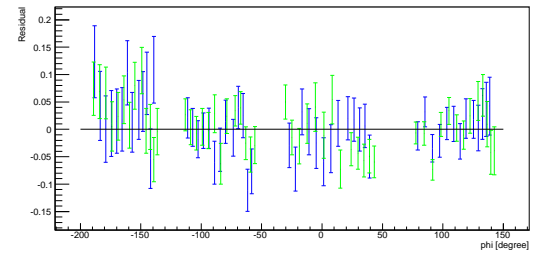
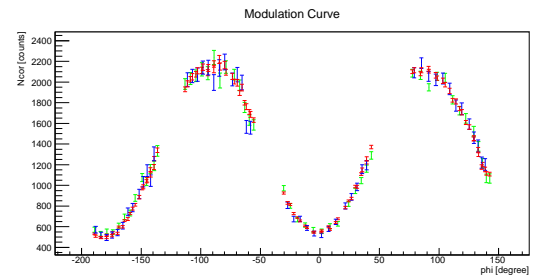


图 C.2.9: 194.5 keV, 偏光角 -1.4 deg

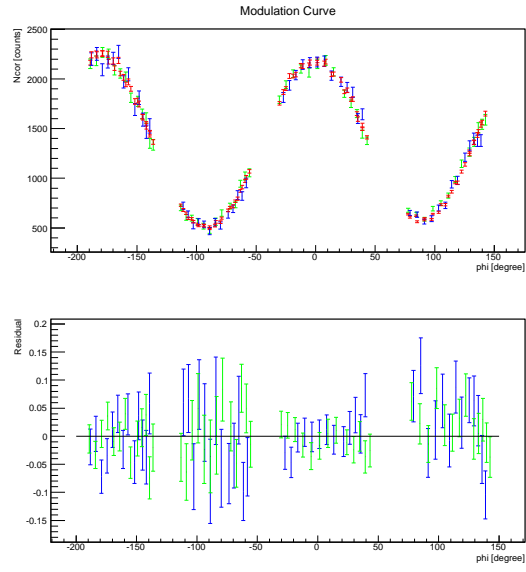


图 C.2.10: 194.5 keV, 偏光角 88.6 deg

表 C.2.1: 実験データとシミュレーションデータの比較

| Energy [keV] | 偏光角 [deg] | CdTe-Side | 系統誤差 0% χ^2/dof | 系統誤差 [%] | χ^2/dof |
|--------------|-----------|-----------|-------------------------|----------|--------------|
| 122.2 | -91.4 | Inner | 86.81/51 | 1.5 | 49.28/51 |
| | | Outer | 122.36/51 | 3.0 | 53.24/51 |
| | -68.9 | Inner | 101.92/51 | 2.5 | 50.42/51 |
| | | Outer | 70.16/51 | 2.5 | 50.32/51 |
| | -46.4 | Inner | 116.56/51 | 2.5 | 55.55/51 |
| | | Outer | 79.19/51 | 3.0 | 53.32/51 |
| | -1.4 | Inner | 69.22/51 | 1.5 | 51.07/51 |
| | | Outer | 90.01/51 | 3.3 | 55.82/51 |
| | 88.6 | Inner | 72.73/51 | 2.0 | 47.50/51 |
| | | Outer | 47.24/51 | 0.0 | 47.24/51 |
| 194.5 | -91.4 | Inner | 109.08/51 | 2.5 | 49.16/51 |
| | | Outer | 87.03/51 | 2.5 | 52.36/51 |
| | -68.9 | Inner | 88.94/51 | 2.5 | 49.73/51 |
| | | Outer | 62.55/51 | 1.5 | 55.16/51 |
| | -46.4 | Inner | 94.49/51 | 2.5 | 53.44/51 |
| | | Outer | 76.11/51 | 2.5 | 55.08/51 |
| | -1.4 | Inner | 93.98/51 | 2.5 | 53.73/51 |
| | | Outer | 56.10/51 | 0.5 | 55.13/51 |
| | 88.6 | Inner | 60.73/51 | 1.0 | 54.40/51 |
| | | Outer | 76.59/51 | 2.5 | 53.38/51 |

C.3 再設定したパラメータによる偏光応答

本修論中では Inner-Side と Outer-Side を別々にフィッティングしてるが、投稿論文中では Inner-Side と Outer-Side をあわせて (上記のように N_{cor} を用いて Outer-Side を Inner-Side に規格化して) 全データに対してフィッティングを行っている。下記の表には本論文と同様に Inner-Side と Outer-Side を分けたフィッティング結果を載せている。結果として 122.2 keV では 0.664 ± 0.012 、194.5 keV では 0.605 ± 0.012 と得られ、本修論中の結果とは誤差の範囲で一致する。

表 C.3.1: 本試験のコンプトンカメラにより得られた偏光応答

| Energy [keV] | 偏光角 [deg] | CdTe-Side | M_1 | M_2 | ϕ_0 [deg] | χ^2/dof | |
|--------------|-----------|-----------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|
| 122.2 | -91.4 | Inner | 0.677 ± 0.004 | 0.630 ± 0.004 | -91.7 ± 0.2 | 70.48/47 | |
| | | Outer | 0.685 ± 0.006 | 0.656 ± 0.005 | -90.9 ± 0.3 | 95.65/47 | |
| | -68.9 | Inner | 0.676 ± 0.006 | 0.629 ± 0.005 | -69.0 ± 0.2 | 74.96/47 | |
| | | Outer | 0.702 ± 0.009 | 0.663 ± 0.008 | -68.3 ± 0.4 | 58.34/47 | |
| | -46.4 | Inner | 0.692 ± 0.008 | 0.643 ± 0.005 | -47.0 ± 0.2 | 73.06/47 | |
| | | Outer | 0.709 ± 0.015 | 0.672 ± 0.009 | -46.2 ± 0.3 | 60.19/47 | |
| | -1.4 | Inner | 0.647 ± 0.005 | 0.640 ± 0.005 | -1.1 ± 0.2 | 47.91/47 | |
| | | Outer | 0.655 ± 0.008 | 0.663 ± 0.007 | -1.5 ± 0.3 | 72.33/47 | |
| | 88.6 | Inner | 0.667 ± 0.006 | 0.629 ± 0.005 | 88.5 ± 0.2 | 52.22/47 | |
| | | Outer | 0.689 ± 0.008 | 0.653 ± 0.008 | 88.7 ± 0.4 | 54.22/47 | |
| | | | | $\overline{M}_1 \pm \sigma_1$ | $\overline{M}_2 \pm \sigma_2$ | $\Delta\phi_0 \pm \sigma$ | |
| | | | | 0.680 ± 0.019 | 0.648 ± 0.015 | 0.05 ± 0.35 | |

| Energy [keV] | 偏光角 [deg] | CdTe-Side | M_1 | M_2 | ϕ_0 [deg] | χ^2/dof | |
|--------------|-----------|-----------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|
| 194.5 | -91.4 | Inner | 0.625 ± 0.006 | 0.558 ± 0.005 | -92.1 ± 0.2 | 90.44/47 | |
| | | Outer | 0.635 ± 0.006 | 0.578 ± 0.006 | -91.1 ± 0.3 | 82.32/47 | |
| | -68.9 | Inner | 0.628 ± 0.007 | 0.556 ± 0.006 | -68.7 ± 0.3 | 68.58/47 | |
| | | Outer | 0.652 ± 0.008 | 0.585 ± 0.007 | -68.1 ± 0.4 | 42.99/47 | |
| | -46.4 | Inner | 0.648 ± 0.009 | 0.570 ± 0.006 | -46.4 ± 0.2 | 72.50/47 | |
| | | Outer | 0.645 ± 0.013 | 0.623 ± 0.007 | -46.0 ± 0.3 | 86.29/47 | |
| | -1.4 | Inner | 0.602 ± 0.007 | 0.583 ± 0.006 | -0.8 ± 0.3 | 69.01/47 | |
| | | Outer | 0.622 ± 0.008 | 0.598 ± 0.007 | -1.7 ± 0.4 | 58.35/47 | |
| | 88.6 | Inner | 0.630 ± 0.007 | 0.557 ± 0.006 | 88.2 ± 0.3 | 53.76/47 | |
| | | Outer | 0.636 ± 0.008 | 0.570 ± 0.007 | 90.0 ± 0.4 | 70.05/47 | |
| | | | | $\overline{M}_1 \pm \sigma_1$ | $\overline{M}_2 \pm \sigma_2$ | $\Delta\phi_0 \pm \sigma$ | |
| | | | | 0.632 ± 0.014 | 0.578 ± 0.020 | 0.23 ± 0.59 | |

C.4 SGD による天体観測の模擬

Crab を模擬し、60~100 keV, 100~200 keV で photon index が 2.1 のべき関数に従うエネルギーを平行光全面照射した場合のシミュレーションを行った。シミュレーションのパラメータと解析の条件は表 C.4.1 とし、単一のサインカーブ式 5.3.3 でフィッティングした。モジュレーションカーブとフィッティング結果

は 60~100 keV と 100~200 keV でそれぞれ図 C.4.1, C.4.2、表 C.4.2, C.4.3 である。図中の縦の赤線はフィッティングにより得られた ϕ_0 を示している。

表 C.4.1: シミュレーションと解析の条件

| パラメータ | シミュレーション |
|-----------------------------|---|
| 合計デポジットエネルギー | 入射エネルギー ± 10 keV |
| Si でのデポジットエネルギーの制限 | 5 ~ (散乱角 $\theta=150$ [deg] に対応するエネルギー) keV |
| 各ピクセルでのスレッシュホールド | 第 5.1.1 節 |
| ファーストヒット位置の制限 | なし |
| シミュレーションデータ解析時に 取り除くピクセル | DC 不調 (第 3.2.1 節) : 読み出し可に変更 |
| | ストレンジチャンネル (第 3.2.2 節) : 計 512 ch |
| | trigger disable(第 3.2.3 節) : 計 77 ch |
| 備考 | 2 ヒットのイベント 全ての方角角を用いる 第 5.2.2 節のエネルギー分解能 偏光角 : -91.4 deg |

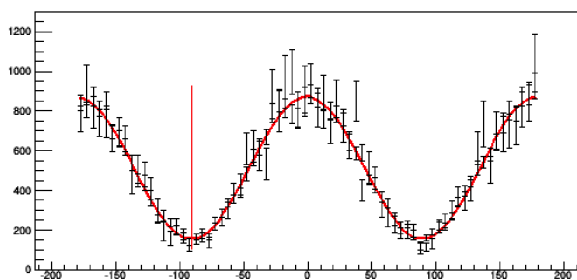


表 C.4.2: フィッティング結果

| | |
|---------------------|-------------------|
| M | 0.699 ± 0.007 |
| ϕ_0 | -90.7 ± 0.3 |
| χ^2/ndf | 1.05 |

図 C.4.1: 60~100 keV のシミュレーションによるモジュレーションカーブ

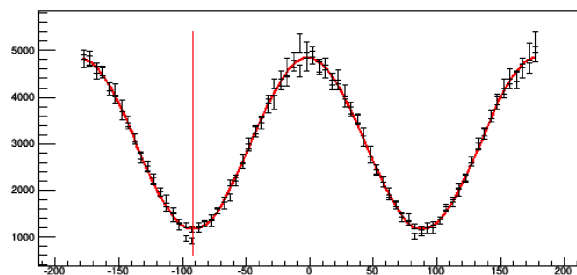


表 C.4.3: フィッティング結果

| | |
|---------------------|-------------------|
| M | 0.614 ± 0.003 |
| ϕ_0 | -91.3 ± 0.1 |
| χ^2/ndf | 1.23 |

図 C.4.2: 100~200 keV のシミュレーションによるモジュレーションカーブ

謝辞

本論文を作成するにあたり、指導教官の水野先生には大変お世話になりました。度重なる出張日程の変更にも臨機応変に対応していただき、不自由なく実験や解析を進めることができました。また、研究室においては深沢先生を始め、ひろたかさん、大野さん、勝田さん、河野さんにはお世話になりました。ASTRO-H/SGDの研究に関われたことは、深沢先生に昨年度から各種試験や会議に参加させていただいたことが大きく、修論のテーマとしても扱わせていただき大変感謝しています。ひろたかさん、大野さんには、データプロセスに関してやその他様々な相談をさせていただきありがとうございました。勝田さんには試験の準備から、試験後のデータ解析の相談や議論など、長期にわたり指導をしていただきありがとうございました。勝田さんの心の広さに何度救われたことかわかりません。いつでも人に見せれるスクリプトが書けるようにします。

2ヶ月に及ぶ宇宙研への出張中は、高橋先生を始め、渡辺さん、悟朗さん、原山さんには居室に迎え入れていただきありがとうございました。解析面では渡辺さん、武田さん、林さん、小高さん、一戸さん、内田さん、米田君にお世話になりました。私がSGDの試験に参加し始めた頃から解析の質問やアドバイス、議論を積極的に行っていただき大変勉強になりました。また、原山さんには健康管理面でお世話になり、野菜不足に陥ることなく健やかな研究生活を送る事ができました。所属の異なる皆さんと切磋琢磨した日々は研究への原動力や私の成長の糧となり、大変感謝しています。

SPring-8でのビーム試験や準備に参加していただいた、水野先生、渡辺さん、太田さん、北口さん、武田さん、勝田さん、林さん、ISAS内田さん、幅田君、広大内田君はありがとうございました。特に渡辺さん、林さんは他の試験との過密なスケジュールの中で参加していただき、初日の電話での対応もありがとうございました。皆さんのご協力のおかげで無事に試験を開始・終了することができ、本論文の完成に至ることができました。

最後になりますが、高エネ宇宙研の同期や先輩、後輩にも感謝しています。修論卒論期間中でもみんなで牡蠣を食べちゃう行動力を今後とも忘れずに過ごしたいと思います。

参考文献

- [1] T.Takahashi et al., "The ASTRO-H X-ray Astronomy Satellite", arXiv:1412.1356, 2014
- [2] ASTRO-H 次期 X 線国際天文衛星 HP, <http://astro-h.isas.jaxa.jp/>
- [3] T.Takahashi et al., "Wide band X-ray Imager (WHI) and Soft Gamma-ray Detector (SGD) for the NeXT Mission", Proc. SPIE, 5488, p549-560, 2004
- [4] H. Tajima. et al., "Soft Gamma-ray Detector for the ASTRO-H Mission", Proc. SPIE, 7732, pp. 773216–773216-17, 2010
- [5] S. Watanabe, et al., "Soft Gamma-ray Detector for the ASTRO-H Mission", SPIE, 8443, 844326, 2012–17, 2010
- [6] Glenn F. Knoll 「放射線ハンドブック (第 3 版)」
- [7] A. Zoglauer and G. Kanbach, "Doppler broadening as a lower limit to the angular resolution of next generation Compton telescopes", Proc. SPIE 4851, 1302, 2003
- [8] 一戸 悠人 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」, 東京大学、2013 年
- [9] 内田 悠介 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」、東京大学、2015 年
- [10] T.Takahashi et al., "Multiwavelength Astronomy and CTA: X-rays", arXiv:1205.2423, 2012
- [11] 宇宙航空開発機構宇宙科学研究所 高橋・国分研究室 HP, http://www.astro.isas.jaxa.jp/takahasi/ASTRO-H/ASTRO-H_gaiyou.html
- [12] Lei. F. et al., "Compton Polarimetry in Gamma-Ray Astronomy", Space Science Reviews, 82, pp.309-388, 1997
- [13] M. Dovciak, et al., "Thermal disc emission from a rotating black hole: X-ray polarization signatures", arXiv:0809.0418, 2008
- [14] S. Takeda et al., "Polarimetric performance of Si/CdTe semiconductor Compton camera", NIM, A622, pp619-627, 2010
- [15] S. Watanabe, et al., "The Si/CdTe semiconductor Compton camera of the ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector(SGD)", arXiv:1509.07668, 2016

- [16] SGD MDP Calculation Tool,
https://galaxy.astro.isas.jaxa.jp/wikis/astroh-sci/index.php/Main_Page
- [17] T. Takahashi, et al., "Hard X-ray and Gamma-Ray Detectors for the NEXT mission", *New Astronomy Reviews*, 48, pp. 309-313, 2014
- [18] 武田 伸一郎 博士論文 "Experimental Study of a Si/CdTe Semiconductor Compton Camera for the Next Generation of Gamma-ray Astronomy", 東京大学、2008
- [19] 小高 裕和 修士論文 「Si/CdTe 半導体コンプトンカメラ試作機の開発と性能評価」、東京大学、2008
- [20] 青野 博之 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」、東京大学、2009年
- [21] 中村 竜 修士論文 「ASTRO-H 搭載コンプトンカメラの基礎特性評価と Multi Hit イベント解析」、広島大学、2014年
- [22] 古井 俊也 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」、広島大学、2013年
- [23] 渋谷 明伸 修士論文 「ASTRO-H 搭載 軟ガンマ線検出器のエネルギー較正法の確立」、名古屋大学、2013
- [24] SGD 実験計画書、内部文書
- [25] GAMMA MEDICA-IDEAS, "VATA 450.3-461.3 UAWA MANUAL", MAY 2011
- [26] SPring-8 BL08W 概要,
http://www.spring8.or.jp/wkg/BL08W/instrument/lang/INS-0000000432/instrument_summary_view
- [27] Compton Soft,
<https://github.com/odakahirokazu/ComptonSoft/>
- [28] Geant4 日本グループ, Geant4 初心者講習会 2013 資料, 2013