2021年度 卒業論文

X線偏光観測気球実験XL-Calibur搭載CZT半導体 検出器の性能評価および解析手法の改善

広島大学 理学部 物理学科 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B181219 阪本菜月

主査: 高橋 弘充 副査: リプタックザカリージョン

2022年3月22日

概要

偏光観測を行うことは、中性子星パルサーやブラックホール、活動銀河核といった高エネルギー天体の 解明に繋がると考えられている。しかし、検出器の開発や観測の段階での課題から、未だ有意な結果は出 ていない。2022 年に放球予定の XL-Calibur 実験は、気球に CZT 半導体検出器を使用した偏光計を搭載し、 硬 X 線領域 (15-80 keV) での世界最高感度の偏光観測を目指している。偏光計に入射した硬 X 線はクライ ン仁科の式に従い、偏光方向と垂直な方向にコンプトン散乱しやすい。この散乱光を CZT 検出器 (2 mm 角 × 1088 ピクセル) で測定し、散乱角の異方性を調べる。

本論文では、まず CZT 検出器の性能評価を行った。¹⁵²Eu のガンマ線源を照射した際の ADC 値をエネ ルギー値に変換し、しきい値を導出した。図は、39.9 keV に対応するピーク ADC 値を 1088 ピクセル分詰 めたものである。580 channel 付近に分布しており、妥当な性能であることが確認できた。次に、観測デー タの統計を増やすため、同時に 2 回以上のヒットが検出された信号について、そのカウント数と原因を調 べた。1 光子の入力が、隣接ピクセルで検出されることがある。この隣接ピクセル信号を1 イベントとして 再構成することで、解析に使えるイベント数を約3%増やせることが分かった。



図 1: 39.9 keV に対応するピーク ADC 値

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	研究の目的	1
第2章	X 線偏光観測	2
2.1	偏光検出	2
2.2	コンプトン散乱	2
2.3	モジュレーションファクター	4
第3章	XL-Calibur 気球実験	6
3.1	XL-Calibur 概要	6
3.2	CZT 検出器	9
3.3	ASIC	10
第4章	CZT 検出器の性能評価	13
4.1	解析方法と結果の考察	13
	4.1.1 較正直線	18
	4.1.2 エネルギーヒストグラム	21
	4.1.3 しきい値	26
4.2	マルチヒットイベント	30
第5章	まとめと今後	33

図目次

1	39.9 keV に対応するピーク ADC 値	1
2.1	XL-Calibur の偏光検出において、左の硬 X 線望遠鏡から右の偏光計へと光子が入射する様	
	子 (高橋, 2021)	2
2.2	コンプトン散乱の様子	3
2.3	コンプトン散乱の微分断面積の極座標表示 (枝廣, 2016)	4
2.4	モジュレーションカーブの様子 (枝廣, 2016)	4
3.1	XL-Calibur 完成予想図 (Abarr et al., 2021)	6
3.2	望遠鏡の変更による有効面積の増加具合 (高橋, 2021)	7
3.3	CZT の厚みを変更した前後でのイベント数の比較 (Abarr et al., 2021)	8
3.4	XL-Calibur 偏光計の切断面図 (Abarr et al., 2021)	9
3.5	各ボードに設置された CZT の様子	10
3.6	ボード 0 に設置されている ASIC の様子	11
3.7	各ボードに割り当てられた ASIC の対応番号	11
3.8	各 ASIC に割り当てられたピクセルごとの番号	12
4.1	横軸 ADC のヒストグラムを 39.9 keV 付近でガウスフィットした様子	13
4.2	2 つの root ファイルにおけるイベント数の比較	14
4.3	4 パターンの ADC ヒストグラムの 39.9 keV 付近でのガウスフィット	15
4.4	39.9 keV に対応するピーク ADC 値	16
4.5	カウント数が 0 であった例	16
4.6	121.8 keV に対応するピーク ADC 値	17
4.7	ADCchannel とエネルギーの較正直線	18
4.8	較正直線の傾きの分布....................................	18
4.9	較正直線の切片の分布	18
4.10	正しくフィッティングできていない例	19
4.11	4 パターンの ADCchannel とエネルギーの較正直線	20
4.12	横軸エネルギーのヒストグラム	21
4.13	横軸エネルギーのヒストグラムを 39.9 keV 付近でガウスフィットした様子	21
4.14	4パターンのエネルギーヒストグラムの 39.9 keV 付近でのガウスフィット	22
4.15	39.9 keV に対応するピークエネルギー値	23
4.16	カウント数が少ない例 1(エネルギー)	23
4.17	カウント数が少ない例 1(ADC)	23

4.18	広げられている例 1(エネルギー)	24
4.19	広げられている例 1(ADC)	24
4.20	121.8 keV に対応するピークエネルギー値	24
4.21	カウント数が少ない例 2(エネルギー)	25
4.22	カウント数が少ない例 2(ADC)	25
4.23	広げられている例 2(エネルギー)	25
4.24	広げられている例 2(ADC)	25
4.25	フィッティング範囲が正しくない例1(エネルギー).............	25
4.26	フィッティング範囲が正しくない例1(ADC)	25
4.27	誤差関数のコマンドを C++で入力した様子	26
4.28	しきい値を導出するための誤差関数によるフィッティング...........	26
4.29	4 パターンの誤差関数によるフィッティング	27
4.30	しきい値の分布の様子	28
4.31	カウント数が少ない例 3(エネルギー)	28
4.32	カウント数が少ない例 3(ADC)	28
4.33	カウント数が少ない例 4(エネルギー)	29
4.34	カウント数が少ない例 4(ADC)	29
4.35	フィッティング範囲が正しくない例 2 (エネルギー)	29
4.36	フィッティング範囲が正しくない例 2 (ADC)	29
4.37	宇宙線ミューオンが検出器を突き抜けた様子.................	30
4.38	CZT の断面	31
4.39	CZT を上から見た様子	31
4.40	Run5501.root における 2 ヒットでのカウント数	31
4.41	Run5575.root における 2 ヒットでのカウント数	32
5.1	121.8 keV に対応するビーク ADC 個 改善則 (左) と改善後 (石)	34
5.2	ADCchannel とエネルキーの戦止 目線 改善則 (左) と 改善後 (石)	35
5.3	39.9 keV に対応するビークエネルギー値 改善前(左)と改善後(石)	35
5.4	121.8 keV に対応するピークエネルギー値 改善前(左)と改善後(右)	36
5.5	しきい値を導出するための誤差関数によるフィッティング 改善前 (左) と改善後 (右)	36
5.6	しきい値の分布の様子 改善前 (左) と改善後 (右)	37
5.7	しきい値の分布のフィッティングの様子 改善前 (左) と改善後 (右)	37

第1章 序論

1.1 背景

X線天文学により高エネルギー現象を明らかにしようとする際、しばしば偏光観測が重要となってくる。 これは、天体から発せられる X線のほとんどは偏光していると考えられており、中性子星パルサー、ブラッ クホール、活動銀河核といった高エネルギー天体の解明に繋がると期待されるためである。

XL-Calibur は、気球搭載型の硬 X 線偏光観測ミッションである。2018 年 12 月-2019 年 1 月に行われた X-Calibur 実験をもとにしており、2022 年 5 月頃にスウェーデンで 1 週間、2023 年末に南極で 1 か月程度の フライトが予定されている。前実験の X-Calibur 気球は、約 2 日という短い飛行の間に、パルサー GX 301-2 の時間・スペクトル観測を詳細に行った。続く XL-Calibur 気球による実験では、Cyg X-1 や Vela X-1 の観 測を目指している。15-80 keV 帯域でのこの観測は、IXPE による 2-8 keV 帯域の観測結果と組み合わせる ことで、エネルギーの放射領域の形状や物理的特性を明らかにすることが期待される。恒星質量ブラック ホールの降着円盤とコロナによる放射の偏りを分離できるほか、降着パルサーを取り巻く QED 真空におい て、磁化されたプラズマの複屈折や偏光依存の散乱断面積に対する強い QED 効果の影響を調べられる。¹

本論文では、XL-Calibur に搭載する望遠鏡と偏光計のうち、偏光計の解析について記述する。日本、ア メリカ、スウェーデンの3か国による XL-Calibur チームに貢献したいという思いからスタートした。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、XL-Calibur 気球に搭載予定の CZT 半導体検出器の性能評価である。硬 X 線のエネル ギー帯域 (15-80 keV) ではコンプトン散乱が優勢となり、散乱された光子が検出器から抜け出てしまう確率 が高い。そのため全エネルギーを検出器に与える確率が低く、高感度での観測は難易度が高い。また、バッ クグラウンドである宇宙線、2 次粒子、突然の衛星が宇宙線によって放射化された結果発生するガンマ線な どの遮蔽が難しく、観測対象である天体からの信号は容易に捉えられるものではない。XL-Calibur に用い られる偏光検出システムは、前実験の X-Calibur 気球を作成の際にワシントン大学が開発したものである。² XL-Calibur 実験でも装置の形状や偏光観測の仕組みは同じだが、バックグラウンドカウントレート低減の ため、CZT の薄型化と反入射シールドの改善が行われた。改良後の性能評価は日本チームで行われておら ず、本研究を進めることにより検出器の性能を把握し、チームへと共有することを目指す。

現在、解析は¹⁵²Euガンマ線源を照射した際の地上データを用いて行っている。5月に実際のデータを取 得した際にも活かすことができると考えている。

¹(Abarr et al., 2021)

²(國枝, 2016)

第2章 X線偏光観測

2.1 偏光検出

光は電磁波の一種であり、電場と磁場の振動により伝わる横波である。電場と磁場は互いに直交し、振動しながら光の進行方向と垂直に伝播する。このとき振動方向を示す平面を振動面と呼ぶが、太陽や白熱球からの直接光は様々な振動面を持つ光が混ざり合っており、偏光していない。¹一方、反射光やレーザー光は一様な分布をしておらず、偏光している。天体からの光は、ほぼ全て偏光していると言える。これまで行われた X 線観測の例として、1975 年にアメリカで打ち上げられた OSO-8 と呼ばれる人工衛星がある。OSO-8 はブラッグ散乱を利用した検出器を搭載しており、限られたエネルギーの感度しか観測できなかった。しかし、X 線源の強度、スペクトルや偏光の観測を行い、軟 X 線の偏光観測に成功した。² また、2021 年に打ち上げられた IXPE 衛星は光電吸収を利用した検出器を搭載しており、今後の成果に期待が集められている。

XL-Calibur 気球実験では、X 線は焦点距離 12 m の硬 X 線望遠鏡を用いて集光し、Be 散乱棒の周囲に配置した CZT(テルル化カドミウム亜鉛) 半導体検出器で検出される。このとき検出したコンプトン散乱で、入射ビームの偏光度と偏光方向を調べることができる。



図 2.1: XL-Calibur の偏光検出において、左の硬 X 線望遠鏡から右の偏光計へと光子が入射する様子 (高橋, 2021)

2.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱とは、入射したエネルギーと原子中の電子との間で起こる相互作用の一つである。図 2.2 のように、入射 X 線はコンプトン散乱によりエネルギーの一部を電子に与え、エネルギーを下げて角度 θ の方向へ曲げられる。このとき、飛び出す電子は反跳電子と呼ばれる。

¹(家他, 2017) ²(竹内, 2021)



図 2.2: コンプトン散乱の様子

コンプトン散乱に対するエネルギーと散乱角の関係式を導く。 E_{γ} は入射光子のエネルギー、 E'_{γ} はコンプトン散乱後の光子のエネルギー、 m_ec^2 は電子の質量、cは真空中の光速とすると、

$$E_{\gamma}' = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)}$$
(2.1)

また、散乱光子の微分断面積はクライン仁科の式より

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma}}\right)^2 \left(\frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma}'} + \frac{E_{\gamma}'}{E_{\gamma}'} - 2sin^2\theta cos^2\phi\right)$$
(2.2)

ここで、 σ は全コンプトン断面積、 Ω は立体角、 $r_e^2 = e^2/m_ec^2$ は古典電子半径、 ϕ は光子の偏光角である。 この散乱方位角は、入射光子の偏光に依存し、電場ベクトルに対して垂直な方向に散乱されやすい傾向が ある。これを異方性という。入射光子が無偏光であるとすると、以下の式のようになる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E_{\gamma}'}{E_{\gamma}}\right)^2 \left(\frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma}'} + \frac{E_{\gamma}'}{E_{\gamma}} - 2sin^2\theta\right)$$
(2.3)

また、このとき微分断面積の極座標表示は図 2.3 のようになる。入射光子のエネルギーが高くなるにつれて、前方散乱の確率が非常に高くなることが分かる。³

³(古井, 2021)



図 2.3: コンプトン散乱の微分断面積の極座標表示(枝廣, 2016)

散乱体の形状や見込み角を制限し、ブラックホール連星の降着円盤の幾何学的構造を明らかにすることに 繋がる。光子のエネルギーと散乱角の関係は、ブラッグ反射や光電吸収によっても調べることができる。

2.3 モジュレーションファクター

前章のとおり、コンプトン散乱の異方性を調べれば、偏光度と偏光角が分かる。異方性が最も大きくな るのは散乱角 θ=90 deg のときである。光子の偏光角を φ とし、偏光角の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が現れる。この偏光検出能力を表す量を、モジュレーションファクターと言う。



Azimutn angle w [uegree]

図 2.4 で、モジュレーションカーブの様子を示している。偏光角が 0 deg、180 deg のときカウントレートは 最小で、偏光角が 90 deg のとき最大となる。ここで、偏光角に対するカウントレートを N(¢) とすると、モ ジュレーションカーブは以下の式で表せる。入射光子は ϕ_0 、モジュレーションファクターは M_{obs} とする。

$$N(\phi) = A(1 + M_{obs} cos2(\phi - \phi_0 - \frac{\pi}{2}))$$
(2.4)

図 2.4: モジュレーションカーブの様子 (枝廣, 2016)

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

となる。

第3章 XL-Calibur 気球実験

3.1 XL-Calibur 概要

XL-Calibur 実験は、気球搭載型の硬 X 線偏光観測ミッションである。硬 X 線は成層圏 (地上から 10-50 km) での観測が可能であり、XL-Calibur は、高度約 40 km まで放球を予定している。飛行機が地上から 10 km 上空を飛行していることを考えると、それよりも 4 倍近く高いことになる。2018 年に実施した X-Calibur 実験を改良し、2022 年 5-7 月にスウェーデン-カナダでおよそ 1 週間、2023 年に南極でおよそ 1ヶ月のフラ イトを予定している。このフライトでより良い観測を行うため、何点か改良が行われた。



図 3.1: XL-Calibur 完成予想図 (Abarr et al., 2021)

図 3.1 は、2022 年に完成が予定される XL-Calibur の全体図である。上端に気球を設置、左上に硬 X 線望 遠鏡、右下に偏光計がある。全長は 12 m、重さは約 2 t である。 表 3.1 に、気球実験の改良点をまとめる。

実験 (年)	望遠鏡 (直径)	焦点距離	CZT 半導体検出器	シンチレータ
X-Calibur(2018)	infocus 望遠鏡 (40 cm)	8 m	2 mm 厚	CsI
XL-Calibur(2022)	FFAST 望遠鏡 (45 cm)	12 m	0.8 mm 厚	BGO

表 3.1: XL-Calibur の作成時 X-Calibur より改良した点

最大の改良点として、望遠鏡の変更が挙げられる。これに伴い直径も大きくなることから、有効面積が大き くなる。また、焦点距離が8mから12mになったことから、反射率をより高く保ったまま観測することが でき、有効面積の拡大に繋がった。

図 3.2: 望遠鏡の変更による有効面積の増加具合 (高橋, 2021)

図 3.2 は、横軸はエネルギー、縦軸は有効面積のグラフである。現状の inFOCuS 望遠鏡は黒で、改良後の FFAST 望遠鏡は赤で示してある。観測帯域は 2 倍、天体信号は 5 倍以上増やせるようになっている。図か ら、搭載する偏光計は 15-80 keV のエネルギー領域で観測が可能であることが分かる。15 keV は大気の吸 収によるもので、80 keV は望遠鏡のブラッグ反射によって決まる。これ以上は光電吸収されブラッグ散乱 しなくなるため、望遠鏡の反射率が激減する。 また、CZT 半導体検出器は厚みが 2 mm だったものが 0.8 mm と薄くなり、バックグラウンドを 2.5 分の 1 に減らせるようになった。

図 3.3: CZT の厚みを変更した前後でのイベント数の比較 (Abarr et al., 2021)

図 3.3 は、CZT の厚みを変更した前後での、横軸はエネルギー、縦軸はカウント数のグラフである。太い 破線が 2 mm CZT、細い破線が 0.8 mm CZT を示している。CZT の厚みを薄くしたときにも、性能は変わ らず保てていることが分かる。また、シールドとして利用するシンチレータは、CsI から BGO へと変更し た。BGO はガンマ線の阻止脳が大きく、外からの天体信号や荷電粒子を阻止することに優れている。よっ て、バックグラウンドの低減に繋がる。

これらの変更点から、XL-Caibur は X-Calibur と比べ感度を大幅に向上できることが期待される。

3.2 CZT 検出器

図 3.4: XL-Calibur 偏光計の切断面図 (Abarr et al., 2021)

図 3.4 は、XL-Calibur に搭載される偏光計の切断面図である。内側で偏光を検出する部分について CZT 半導体検出器と呼ぶ。以下、これを CZT 検出器と記す。CZT 検出器は、上から見ると断面が 3cm のコンパ クトな直方体となっている。青い矢印の箇所から X 線が入射することを想定し、そのすぐ内側に Be 散乱棒 が設置されている。この周りを、CZT が取り囲むように配置されている。偏光計に入射した硬 X 線はクラ イン仁科の式に従い、偏光方向と垂直な方向にコンプトン散乱しやすい。Be で散乱された散乱光は、原子 番号のより大きい CZT で光電吸収をする。これを CZT 検出器で測定し、散乱光の異方性を調べる。検出器 の側面と最下面にそれぞれボードが設置されており、その計 5 枚を取り外すと下図のようである。

図 3.5: 各ボードに設置された CZT の様子

本研究で用いた CZT 検出器が直方体となっていることは先に述べたが、CZT は各ボードに4枚取り付けら れており、さらに最下面に1枚の合計17枚である。このうち、最下面を除く4つのボードを写真の左から 順にボード0、ボード1、ボード2、ボード3と呼ぶ。Be で側面に散乱しなかった光子は、最下面の CZT で検出可能である。また、検出器自身の異方性を取り除き系統誤差をキャンセルするため、偏光計はBe 散 乱棒を軸として1分間に2回程度連続して回転する。これにより、等方的に偏光を検出することができる ようになっている。

3.3 ASIC

CZT の下に、ASIC と呼ばれる特定集積回路が取り付けられている。図 3.6 で見ると黒いチップのように 見え、検出器の振動をアナログからデジタルに変える ADC(Analog to Digital Converter) の役割を担ってい る。各 CZT につき 2 枚ずつの ASIC があり、1 つのボードには 8 枚が備わっている。

図 3.6: ボード 0 に設置されている ASIC の様子

設置されている ASIC には、図 3.7 のようにそれぞれ番号が決められている。ボード 0 に注目してみると、0,1,2,3,8,9,..., と不規則に並んでいる。解析の際には 0,1,2,3,4,5,... と通しの ASIC 番号を決めた。また、ボード 1、ボード 3 は ASIC の数が 8 枚だが、ボード 0、ボード 2 では 9 枚になっている。これは、ASIC 番号 12、44 の 2 つが、実際は検出器の最下面に位置する ASIC であるためである。しかし、解析の便宜上これ も通しの ASIC 番号に含め、またボード 1 にも仮想的に 9 枚目の ASIC が存在するものとして考えた。つま り、通しの ASIC 番号は 0 から 34 までの 35 枚存在することとした。

Board 0		Воа	rd 1	Воа	rd 2	Воа	rd 3
0	1	16	17	32	33	48	49
2	3	18	19	34	35	50	51
8	9	24	25	40	41	56	57
10	11	26	27	42	43	58	59
12				44			

ASIC Number

図 3.7: 各ボードに割り当てられた ASIC の対応番号

次に、検出器全体のピクセル数を考える。図 3.8 のように、ASIC1 枚には 0 から 31 まで 32 個のチャン ネルが対応し、ランダムに並んでいる。隣接する ASIC は、それをちょうど半回転させた状態で設置されて いる。そのため、CZT1 枚では 32 ピクセルを 2 倍した 64 ピクセルあると言える。各ボードには 4 枚の CZT が隣接しており、これらを掛け合わせると 64 × 4 = 256 ピクセルになる。このボードは 4 つあるため、側 面全体では 256 × 4 = 1024 ピクセルである。さらに最下面に 1 枚の CZT があるため、64 ピクセルを足す と 1024 + 64 = 1088 となり、全体で 1088 ピクセルあることが分かる。CZT 検出器の全体を知るため、これ から進める解析はこの 1088 チャンネル分について調べる必要がある。

CZT - ASIC channel map

図 3.8: 各 ASIC に割り当てられたピクセルごとの番号

第4章 CZT検出器の性能評価

4.1 解析方法と結果の考察

本論文では、CZT 検出器に関する性能評価を行った。この解析にあたり、¹⁵²Eu のガンマ線源を照射した データをワシントン大学より提供していただいた。解析手順としては、第一に CZT 検出器の 1088 チャン ネル分それぞれに対応した個別の較正直線を作成した。第二に、ADC 値をエネルギー値に変換し、ヒスト グラムを作成した。ADC(Analog to Digital Converter)とは、アナログ信号をデジタル信号に変換する電子回 路のことであり、単位は channel で表される。しきい値を求める際、横軸はエネルギーに変えておく必要が ある。このとき、単位は keV となる。第三に、そこからしきい値を求めた。¹⁵²Eu のピーク値は、小さいも のから順に 39.9 keV、45.4 keV、121.8 keV であり、以下これらの値を使用して解析を進める。

第一の手順で、横軸が ADC、縦軸がイベント数となるヒストグラムを 1088 個作成した。今後、ASIC、 channel の値は、(asic,channel) のように表記する。ここでの channel とは、各ピクセルの番号のことである。 代表して (asic,channel)=(0,0) のときのヒストグラムを図 4.1 に載せる。これは、ASIC 番号 0、channel 番号 0 を意味している。ここで nChannel==1 とは、同時に起こるヒットの数が 1 回であったことを示す。較正 直線を導く 2 点を求めるため、1 つ目のピークは 500-700 channel の範囲でガウスフィットを行った。この とき、ピークとなる ADC の値は 574.5 channel であった。2 つ目のピークである 121.8 keV 付近でのフィッ ティングは困難であったため、700-1000 channel の範囲での最大値を用いた。このとき、値は 892 channel であった。同様に、合計して 1088 チャンネル分のピーク値と最大値を求めた。

図 4.1: 横軸 ADC のヒストグラムを 39.9 keV 付近でガウスフィットした様子

また、このとき 2 つの root ファイルを用いた。Run005501.root は検出器の上側に放射線源を置いた場合、 Run005575.root は検出器の下側に放射線源をおいた場合のデータであり、各 ASIC において適当な root ファ イルを用いた。

5505.root検出器上側のデータ5575.root検出器下側のデータ

表 4.1: 解析の際に使用した root ファイル

図 4.2 は、5501 と 5575 の root ファイルでイベント数がどの程度検出できているのかを調べている。赤い ヒストグラムが 5501 で検出器の上側、青いヒストグラムが 5575 で検出器の下側にあたる。図 3.7 により、 正しいことが確認できる。

図 4.2: 2 つの root ファイルにおけるイベント数の比較

第一の手順により、横軸が ADC、縦軸がイベント数のヒストグラムを 1088 個作成した。ここで、ボード 1、ボード 2、ボード 3 から代表して asic、channel が (a)19,3、(b)43,21、(c)56,23、さらに最下面から代表して (d)12,12 の場合を示した。ただし、いずれも nChannel==1 のときであり、ASIC、channel の番号は検出器全体の性能が分かるようランダムに選んだ。また、このとき通しの ASIC 番号は順に 12、25、31、08 となっていた。表示しているグラフタイトルの ASIC は検出器の番号 (0,1,2,3,8,9,...,58,59)、統計ボックスタイトルの ASIC は通しの ASIC 番号 (0-35) であり、仮想的な ASIC 番号 17 を含んでいる。

図 4.3: 4 パターンの ADC ヒストグラムの 39.9 keV 付近でのガウスフィット

これら4チャンネル分のフィッティングで求められた 39.9keV と 121.8keV 付近の値は表 4.2 のようであった。

ボード	asic&&channel	ADC(39.9keV)	ADC(121.8keV)
1	(a)19,03	589.5	906
2	(b)43,21	566.0	868
3	(c)56,23	581.4	897
最下面	(d)12,12	551.5	711

表 4.2: 39.9keV と 121.8keV 付近の値

39.9 keV に対応するピーク ADC 値を 1088 チャンネル分詰める。期待する 580 channel 付近に分布しており、検出器の性能が妥当であることが確認できる。

図 4.4: 39.9 keV に対応するピーク ADC 値

表 4.2 に示した 4 パターンの値は、図 4.4 において 550-600 keV 付近でできたガウシアンに含まれているこ とが分かる。このとき、630-670 channel に現れた全てのイベントを出力すると 35 パターンあったが、そ のうち 32 パターンは図 4.5 のようにカウント数が 0 の場合であった。検出器がオフになっていたことが原 因で、初期値が詰められていたと考えられる。その他の箇所でガウシアンから外れた点にも、同様の原因が 考えられる。

図 4.5: カウント数が0 であった例

続けて、121.8 keV に対応するピーク ADC 値を 1088 チャンネル分詰めた。これも期待する 890 channel 付近に分布があり、検出器の性能が妥当であることが確認できる。

図 4.6: 121.8 keV に対応するピーク ADC 値

表 4.2 に示した (a)、(b)、(c) の値は、図??において 850-950 keV 付近でできたガウシアンに含まれているこ とが分かる。しかし、(d) の場合、想定される 120 keV 付近でのピーク値が小さくなっている。これは、120 keV 付近でのピークが最大値によって正しく決められなかったことが原因であると考えられる。

4.1.1 較正直線

この後の解析のため、第一の手順で求めた ADC 値をエネルギー値に変換する必要がある。そこで、39.9 keV と 121.8 keV 付近の値の 2 点と、¹⁵²Eu のデータ値を用いて較正直線を導出した。本来 45.4 keV につい ても対応した値を確認すべきであるが、ここでは簡単のため 2 点を用いて直線とした。

図 4.7: ADC channel とエネルギーの較正直線

代表して (asic,channel)=(0,0) のときを示している。座標は $(x_1, y_1) = (574.5, 39.9)$ 、 $(x_2, y_2) = (892, 121.8)$ の 2 点であり、このとき較正直線は f(ADC) = 0.258ADC - 108.3 と求まった。同様に、合計 1088 パターン求 めた。この際チャンネルごとの傾きと切片のばらつきを見るため、図 4.8、図 4.9 のようにヒストグラムに 詰めた。

この結果から、傾きに関してはほとんどが 0~1 の値を取ることが分かった。しかし、切片にはばらつきが あることから、較正直線は全てのチャンネルで同じものではなく、1088 チャンネルそれぞれの場合で用意 し解析を進めた。また、傾き 1.2-1.4 の範囲で現れた全てのイベントを出力すると 52 パターンあったが、そ のうち 35 パターンはカウント数が 0 の場合であった。横軸 ADC のヒストグラムを確認すると、図 4.10 の ようにカウント数は 0 ではないがフィッティングが上手くできていない例も合った。このとき ¹⁵²Eu からの ガンマ線による信号が少ないことが原因であると考えられる。

図 4.10: 正しくフィッティングできていない例

表 4.2 をもとに、較正直線を求めた。同様の操作を合計 1088 パターンで行い、傾きと切片を求めた。ここ でも、先程のヒストグラムに対応した (a)19,3、(b)43,21、(c)56,23、(d)12,12 の場合を代表して示している。 ただし、いずれも nChannel==1 のときである。また、表の ASIC 番号は検出器の番号 (0,1,2,3,8,9,...,58,59)、 グラフタイトルの ASIC 番号は通しの ASIC 番号 (0-35) であり、仮想的な ASIC 番号 17 を含んでいる。

図 4.11: 4 パターンの ADC channel とエネルギーの較正直線

これら4パターンの較正直線で求められた傾きと切片は表4.3のようであった。

ボード	asic&&channel	傾き	切片
1	(a)19,03	0.259	-112.6
2	(b)43,21	0.265	-108.6
3	(c)56,23	0.307	-139.3
最下面	(d)12,12	0.385	-190.4

表 4.3: 較正直線の傾き、切片の値

表 4.3 に示した (a)、(b)、(c) の値は、図 4.8 においておよそ傾き 0.2-0.3、かつ図 4.9 において切片-140-80 の 範囲にできたガウシアンに含まれていることが分かる。しかし、(d) の場合、較正直線の切片が小さくなっ ている。第一の手順で 120 keV 付近でのピークが最大値によって正しく決められなかったことが影響して いると考えられる。

4.1.2 エネルギーヒストグラム

第二の手順で、較正直線をもとに横軸がエネルギー、縦軸がイベント数となるヒストグラムを 1088 チャンネル分作成した。図 4.12 は、図 4.1 とイベントの数が一致し、概形も同じになっていることが確認できる。ただし、ビン数は同じにすると細かくなりすぎたため、エネルギーヒストグラムの場合のみ大きめに設定した。

図 4.12: 横軸エネルギーのヒストグラム

1 つ目のピークは 20-50 keV の範囲でガウスフィットを行った。このとき、ピークとなるエネルギーの値は 39.8 keV であった。2 つ目のピークである 121.8 keV 付近でのフィッティングは困難であったため、110-130 keV の範囲での最大値を用いた。このとき、エネルギー値は 122 keV であった。同様に、合計して 1088 パ ターンで求めた。

図 4.13: 横軸エネルギーのヒストグラムを 39.9 keV 付近でガウスフィットした様子

ここでも、ボード 1、ボード 2、ボード 3 から代表して (a)19,3、(b)43,21、(c)56,23、さらに最下面から代表 して (d)12,12 の場合を示した。ただし、いずれも nChannel==1 のときであり、ASIC、channel の番号は検出 器全体の性能が分かるようランダムに選んだ。また、このとき通しの ASIC 番号は順に 12、25、31、08 と なっていた。表の ASIC 番号は検出器の番号 (0,1,2,3,8,9,...,58,59)、グラフと統計ボックスタイトルの ASIC 番号は通しの ASIC 番号 (0-35) であり、仮想的な ASIC 番号 17 を含んでいる。

図 4.14: 4 パターンのエネルギーヒストグラムの 39.9 keV 付近でのガウスフィット

これら4パターンのフィッティングで求められた 39.9keV と 121.8keV 付近の値は表4.4 のようであった。

ボード	asic&&channel	エネルギー (39.9 keV)	エネルギー (121.8 keV)
1	(a)19,03	39.8	115
2	(b)43,21	41.1	125
3	(c)56,23	39.0	120
最下面	(d)12,12	31.5	120

表 4.4: 39.9keV と 121.8keV 付近の値

39.9 keV に対応するピークエネルギー値を 1088 チャンネル分詰める。期待する 40 keV 付近に分布して おり、検出器の性能が妥当であることが確認できる。ただし、35 keV 付近で大きく目立っている値は、検 出器がオフになっていたことが原因で、初期値が詰められているものを含んでいる。その他の箇所でガウシ アンから外れた点にも、同様の原因が考えられる。

39.9keV peak energy

図 4.15: 39.9 keV に対応するピークエネルギー値

表 4.4 に示した (a)、(b)、(c) の 39.9 keV 付近でのエネルギー値は、図??において 536-42 keV 付近でできた ガウシアンに含まれていることが分かる。このとき、34-36 keV に現れた全てのイベントを出力すると 85 パターンあったが、そのうち 71 パターンはカウント数が 0 の場合であった。カウント数が 0 でなくても、 ヒストグラムのフィッティングが上手くできていない場合があった。

図 4.16: カウント数が少ない例 1(エネルギー)

図 4.17: カウント数が少ない例 1(ADC)

図 4.16 は、カウント数が少ないことにより較正直線が上手く生成されていないと考えられる。図 4.17 は、 同じときの横軸 ADC のヒストグラムである。 図 4.18 は、図 4.19 が広げられている。このとき、2 つ目のピーク値が正しく求められなかったことが原因 で、エネルギーヒストグラムでもフィッティングできなかったことが考えられる。

続けて、121.8 keV に対応するピークエネルギー値を 1088 チャンネル分詰めた。これも期待する 122 keV 付近に分布があり、正しくフィッティングできていることが確認できる。

図 4.20: 121.8 keV に対応するピークエネルギー値

表 4.5 に示した 4 パターンの 121.8 keV 付近でのエネルギー値は、図??において 120-125 keV 付近ででき たガウシアンに含まれていることが分かる。このとき、110-112 keV に現れた全てのイベントを出力すると 140 パターンあったが、そのうち 81 パターンはカウント数が 0 の場合であった。カウント数が 0 でなかっ た場合を数例示す。先ほどと同様に、カウント数が少なかった場合と、ヒストグラムが広げられて表示され たことにより、上手くフィッティングできていない例が見受けられた。

図 4.21: カウント数が少ない例 2(エネルギー)

図 4.22: カウント数が少ない例 2(ADC)

図 4.25、図 4.26 は、ヒストグラムは正しく表示されているが、フィッティングの範囲とずれている。これ は、プログラムを回す際フィッティング範囲を 20-50 keV に指定したためであり、改善の余地がある。

図 4.25: フィッティング範囲が正しくない例 1 (エ 図 4.26: フィッティング範囲が正しくない例 1 ネルギー) (ADC)

25

4.1.3 しきい値

第三の手順で、エネルギーヒストグラムからしきい値を求めた。このとき、フィッティングには誤差関数

$$Erf(x; \mu, \sigma) = \int_0^x exp(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2})dt$$
(4.1)

を用いた。入力したコマンドは以下の通り。

```
TF1* erf = new TF1("erf","0.5*[0]*(1.0 + TMath::Erf(((x-[1])/TMath::Sqrt(2)/[2])))");
```


このプログラムから、0-20 keV の範囲でエネルギーヒストグラムのフィッティングを行った。代表して asic==0&&channel==0&&nChannel==1 のときを示す。

図 4.28: しきい値を導出するための誤差関数によるフィッティング

このとき、15 keV 付近にあるピークは、この検出器のノイズであると考えられる。図??から、検出器の動 作のしきい値は 14.9 keV であるが、観測のしきい値は 17.5 keV 程度であることが分かった。

さらに、表 4.3 をもとにエネルギーヒストグラムを作成し、誤差関数のフィッティングからしきい値を求 めた。同様の操作を合計 1088 パターンで行った。ASIC、channel は先程と対応しており、nChannel はいず れも 1 である。また、表の ASIC 番号は検出器の番号 (0,1,2,3,8,9,...,58,59)、グラフと統計ボックスタイトル の ASIC 番号は通しの ASIC 番号 (0-35) であり、仮想的な ASIC 番号 17 を含んでいる。

図 4.29:4 パターンの誤差関数によるフィッティング

これら4パターンのフィッティングで求められたしきい値は表4.5のようであった。

ボード	asic&&channel	しきい値
1	(a)19,03	11.1
2	(b)43,21	14.8
3	(c)56,23	7.3
最下面	(d)12,12	11.2

表 4.5: 誤差関数のフィッティングにより求められたしきい値

検出器の動作のしきい値を 1088 チャンネル分詰める。このグラフから、およそ 10-15 keV の範囲がしき い値にあたることが分かる。

図 4.30: しきい値の分布の様子

表 4.5 に示した (a)、(b)、(d) の値のしきい値は、図 4.30 において 10-15 keV 付近でできたガウシアンに含 まれていることが分かる。このとき、30-31 keV に現れた全てのイベントを出力すると 185 パターンあった が、どれもカウント数が 0 の場合か、正しくフィッティングができていないものであった。これまでの例と 同様に、カウント数が少なく、上手くフィッティングに至らなかったものを示す。

図 4.31: カウント数が少ない例 3(エネルギー)

図 4.32: カウント数が少ない例 3(ADC)

図??、図 4.36 は、ヒストグラムは正しく表示されているが、フィッティングの範囲とずれている。これも、 プログラムを回す際フィッティング範囲を 20-50 keV に指定したためであり、改善の余地がある。

図 4.35: フィッティング範囲が正しくない例 2 (エ 図 4.36: フィッティング範囲が正しくない例 2 ネルギー) (ADC)

4.2 マルチヒットイベント

観測データの統計を増やすため、同時に2回以上のヒットが検出された信号について、そのカウント数 と原因を調べた。考えられる原因として、

- ・宇宙線ミューオンが検出器を突き抜けたもの
- ・光子の入力が隣接ピクセルで検出されたもの
- ・特性 X 線が出て別のピクセルで検出されたもの
- ・コンプトン散乱が起こったもの

等が挙げられる。それぞれの場合について、調べ方を考えてみる。まず、図 4.37 のように、宇宙線ミュー オンが検出器を突き抜けた場合について考える。2 ヒットを検出した ASIC が、検出器の反対側に対応して いるかどうかを調べた。検出器の側面は、順にボード 0、ボード 1、ボード 2、ボード 3 と決められている ことから、ボード 0 とボード 2、ボード 1 とボード 3 は向かい合っていることになる。この場合、宇宙線 ミューオンが突き抜けたものとしてカウントした。

図 4.37: 宇宙線ミューオンが検出器を突き抜けた様子

次に、1 光子の入力が隣接ピクセルで検出された場合を調べた。図 4.38 は、照射された光子が CZT 内で 2つのピクセルの間に検出されたときの CZT の断面である。図 4.39 は、これを上から見た様子である。実際のピクセル数よりも簡易的に表している。色のついた 2 ピクセルに広がっていることが分かる。このと き、CZT 検出器はヒットは 2 であるとカウントしている。

図 4.38: CZT の断面

図 4.39: CZT を上から見た様子

実際には、1 枚の CZT は 2 cm × 2 cm、ピクセル数は 8 × 8 となっている。つまり、隣り合うピクセルの 距離は 2.5 mm、斜めに位置する場合は 2.5√2 mm である。各ピクセルの位置を座標で決め、そこから 2.5 もしくは 2.5√2 の距離に 2 回目のヒットがあった場合、1 光子の入力が隣接ピクセルで検出されたものと 考えた。コンプトン散乱が起こった場合はほとんどないものとみなし、検出器の反対側や隣接するピクセ ル以外で見られた 2 ヒットは、特性 X 線が出て別のピクセルで検出されたものもしくはその他、と決めた。 このとき、これらのカウント数を調べると、以下のようになっていた。ただし、解析における全体のイベン ト数は 21553771 であった。また、root ファイルは 2 通りで調べた。

nChannel==1 16221930				
nChannel==2 4830486				
number of same ASIC 920637				
number of same CZT 0				
number of others 3909849				
number of next pixcel 657790				
number of opposit 1290736				

図 4.40: Run5501.root における 2 ヒットでのカウント数

nChannel==1 16835550				
nChanne	l==2 5426978			
number	of same ASIC 1140911			
number	of same CZT 0			
number	of others 4286067			
number	of next pixcel 858653			
number	of opposit 1405746			

図 4.41: Run5575.root における 2 ヒットでのカウント数

偏光検出器には読み出しによる熱を逃すための thermal plate が設置されるが、このデータ取得時には設置 されていなかった。そのため 0、thermal plate が設置されていない代わりとして一個の CZT で 2 ヒット検出 されても、異なる ASIC であったら ASIC 番号が若いものだけしか読まない設定となっていた。

Run5501.rootのとき、1 ヒットのカウント数は全体のイベントに対してどの程度であったかを調べると、

$$(\frac{1 ヒットのカウント数}{全体のイベント数}) \approx 0.753$$
(4.2)

であった。さらに、隣り合ったピクセルのカウント数を足し合わせると

$$(\frac{1 ヒットのカウント数+隣接ピクセルでのカウント数}{全体のイベント数}) \approx 0.783$$
(4.3)

となった。同様に Run5575.root のときを考えると、1 ヒットのカウント数の全体のイベントに対する割合は

$$\left(\frac{1 \, \upsilon \, \nu \, \rho \, \sigma \, j \, \upsilon \, \nu \, \lambda \, b}{2 \, \phi \, \sigma \, \eta \, \nu \, \nu \, \lambda \, \lambda \, b}\right) \approx 0.781 \tag{4.4}$$

であった。さらに、隣り合ったピクセルのカウント数を足し合わせると

$$(\frac{1 ヒットのカウント数+隣接ピクセルでのカウント数}{全体のイベント数}) \approx 0.821$$
 (4.5)

となった。この隣接ピクセル信号を1イベントとして再構成することで、解析に使えるイベントを少なく とも3%増やせることが分かった。

第5章 まとめと今後

本研究では、2022 年に放球予定の XL-Calibur 気球に関して、搭載する CZT 半導体検出器のデータ解析 を行った。検出器に設置されている全 1088 ピクセルについて、較正直線を作成した。そこから作成した横 軸がエネルギーのヒストグラムは、ピークが 39.9 keV、121.8 keV 付近の値をとっており、放射線源である ¹⁵²Eu の照射データとほぼ一致していた。較正直線が正しく動いていると考えられる。そこから、検出器の しきい値を求めた。XL-Calibur 気球実験が目標とする観測領域は 15-80 keV であり、しきい値は 15 keV 程 度の見込みであった。解析した結果、しきい値はおよそ 10-15 keV の範囲に含まれており、妥当であった。 しかし、回路や検出器による原因から低 ADC チャンネルに連続したノイズ成分がみられ、しきい値が正し く導出できていない場合があった。解析手法について改善の余地があると考えた。

また、観測データの統計を増やすため、2回以上のヒットが検出された信号について調べた。この解析 は、現在アメリカのチームでも進められていない。隣接ピクセルに広がった信号を1イベントとして再構 成することで、解析に使えるイベント数を少なくとも3%増やせることが分かった。今後は、この信号を足 し合わせた較正直線としきい値を求め、さらに隣接ピクセル以外で2ヒットが起こった場合についても考 えていきたい。

較正直線を作成し、今後引き続きマルチヒットについての研究も進めることで、放球後のデータからの 天体信号を取りこぼしなく使用できると考えている。

付録

卒業論文の提出後に、改善した箇所を付録に掲載する。第5章までの解析では、¹⁵²Euの1つ目のピー クはガウシアンでフィッティングし、2つ目のピークは700-1000 channel の範囲内で最大値を導出した。こ の2点から較正直線を作成していたが、2つ目のピークの決め方を、(相補誤差関数の中心値-3 σ)に変更し た。誤差関数の式が

$$Erf(x; \mu, \sigma) = \int_0^x exp(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2})dt$$
(5.1)

であるのに対し、相補誤差関数は

$$Erfc(x; \mu, \sigma) = 1 - Erf(x; \mu, \sigma)$$
(5.2)

である。これを用い、850-950 channel の範囲内でフィッティングを行った。これにより新たに求めた図を、 これまでに求めていた図と比較する。

まず、図 4.6 で示した 121.8 keV に対応するピーク ADC 値の比較をする。Mean の値にはほとんど変化 がないが、Std Dev の値が 2.1 小さくなっており、ヒストグラムの幅が狭くなっていることが分かる。

図 5.1: 121.8 keV に対応するピーク ADC 値 改善前 (左) と改善後 (右)

次に、図 4.7 で示した ADCchannel とエネルギーの較正直線を、新しく導出したものと比較する。asic==0&&channel==0 のとき、較正直線の傾きは 0.2 ほど大きくなっていた。

図 5.2: ADCchannel とエネルギーの較正直線 改善前 (左) と改善後(右)

図 4.15 に示した 39.9 keV に対応するピークエネルギー値である。ピークの出ている箇所に変化はないが、 Std Dev の値が小さくなっている。

図 5.3: 39.9 keV に対応するピークエネルギー値 改善前 (左)と改善後(右)

続いて、図 4.20 に示した 121.8 keV に対応するピークエネルギー値の比較である。122 keV 付近に、ヒスト グラムが集められていることが分かる。

図 5.4: 121.8 keV に対応するピークエネルギー値 改善前 (左) と改善後(右)

これらのとき、図 4.28 に示したしきい値を導出するための誤差関数によるフィッティングも同様に行った。

図 5.5: しきい値を導出するための誤差関数によるフィッティング 改善前 (左) と改善後 (右)

最後に、図 4.30 に示したしきい値の分布の様子を比較する。他の図と同様 Std Dev の値が小さくなり、ヒ ストグラムが 10-20 keV の範囲で集中していることが見て分かる。

図 5.6: しきい値の分布の様子 改善前(左)と改善後(右)

さらに、上図のヒストグラムをフィッティングし、ピークの値を求める。

図 5.7: しきい値の分布のフィッティングの様子 改善前 (左)と改善後(右)

このとき、フィッティングのピーク値は改善前が 14.02 ± 0.27、改善後が 13.92 ± 0.14 となっていた。 以上のように、2 つ目のピークの決め方を変更することにより、より誤差の小さい正確なしきい値を求め ることが可能となった。

卒業論文の作成にあたり、多くの方にご教授いただきました。大変ありがとうございました。ひろたか 先生こと高橋先生、XL-Calibur の作成のためアメリカにいらっしゃった折も、teams での温かいアドバイス、 ありがとうございました。いつか私も NASA に連れて行ってください。内田先生、プログラミング言語や 研究の進め方に関して、大変細かくご指導いただきました。来年度から広島を離れてしまうということで とても心細いですが、新天地でのご活躍をお祈りしています。研究室の大部屋のみなさん、研究で困ってい るときに助言してくださり、ありがとうございました。今後一層研究に尽力していきますので、来年度以降 もよろしくお願いいたします。

引用文献

- Abarr, Q., H. Awaki, M.G. Baring et al. (2021) "XL-Calibur a second-generation balloon-borne hard X-ray polarimetry mission," *Astroparticle Physics*, Vol. 126, p. 102529, DOI: https://doi.org/10.1016/j.astropartphys. 2020.102529.
- 家正則・岩室史英・舞原俊憲・水本好彦・吉田道利 [編] (2017) 「宇宙の観測 光・赤外天文学」,『シリーズ 現代の天文学 [第 2 版] 第 1.5 巻』.
- 古井俊也 (2021) 「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載コンプトンカメラの同等品の性能評価」,『卒業論文』.
- 高橋弘充 (2021) 「硬 X 線偏光観測 XL-Calibur 気球実験の 2022 年フライトへ向けた準備状」,『秋の物理 学会』.
- 枝廣育実 (2016) 「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」,『修士論文』.
- 竹内勝哉 (2021) 「IXPE 衛星によるブラックホール連星偏光観測の感度評価」,『卒業論文』.
- 國枝秀世 (2016) 「硬X線偏光気球観測による非熱的放射機構と構造の解明」,『科学研究費助成事業 研究 成果報告書』.