

2022年度 卒業論文

次世代MeVガンマ線衛星に向けた  
新型ピクセル検出器 AstroPix の基礎特性評価

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

B193118 鈴木 彩夏

主査：須田 祐介  
副査：飯沼 昌隆

2023年2月22日

## 概要

宇宙 MeV ガンマ線観測が期待される天体現象はガンマ線バーストをはじめ多く存在するが、その観測の難しさから他電磁波に比べて観測例は少ない。現在計画中の衛星の一つに MeV ガンマ線衛星 AMEGO-X が挙げられ、AstroPix はこの AMEGO-X に向けて NASA などが開発中のシリコンピクセル検出器である。検出器と読み出し回路の一体化によりノイズや消費電力が少なく、MeV 領域で支配的であるコンプトン散乱を捉える上で重要なエネルギー・位置分解能に優れるという特徴を持つ。

本研究では、AstroPix の v2 チップについて基礎特性評価を行った。比抵抗値の異なる 2 つのチップについて、暗電流と空乏層の電圧変化、エネルギースペクトルなどを調べた。59.5 keV のエネルギー分解能は低比抵抗で 3.7 keV、高比抵抗チップで 3.4 keV であり、どちらも要求仕様の値を満たすことが確かめられた。また、空乏層が電圧の印加によって正しく発達していることが分かったが、厚みが理論値を上回っているため引き続き調査が必要である。

さらに、検出器のモンテカルロシミュレーションを行い、アナログ測定で得たエネルギースペクトルと比較した。シリコン板に X 線を照射したときのシミュレーション結果と実際の測定結果は概ね一致しており、検出器が正しく機能していることが確かめられた。電気ノイズなどの検出器の特性を考慮したシミュレーションを今後は行っていく必要がある。また、AstroPix の宇宙空間での技術実証試験に向けて AstroPix を 3 層にした検出器を再現し、ガンマ線に対する応答を調べた。コンプトン再構成したエネルギー分解能や角度分解能の結果から、検出器がシミュレーション上で再現できていることを確認できた。

# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 MeV ガンマ線天文学	1
1.2 MeV ガンマ線と物質との相互作用	1
1.2.1 光電吸収	2
1.2.2 コンプトン散乱	3
1.2.3 電子-陽電子対生成	4
1.3 AMEGO-X 衛星計画	4
1.4 新型シリコンピクセル検出器の必要性	6
1.4.1 シリコン検出器の候補	6
1.4.2 シリコンピクセル検出器への要求仕様	6
1.5 本研究の目的	8
<b>第 2 章 新型シリコンピクセル検出器 AstroPix</b>	<b>10</b>
2.1 AstroPix の構造と特徴	10
2.1.1 構造	10
2.1.2 特徴	11
2.2 開発のこれまでとこれから	12
2.2.1 これまでの開発	12
2.2.2 AstroPix v2	13
2.2.3 これからの開発	14
2.3 AstroPix v2 の実験セットアップ	15
<b>第 3 章 AstroPix v2 の基礎特性評価</b>	<b>17</b>
3.1 暗電流の電圧依存性	17
3.2 アナログ出力波形	20
3.3 エネルギースペクトル	21
3.3.1 アナログ出力	21
3.3.2 デジタル出力	25
3.3.3 高比抵抗チップのアナログ出力のスペクトル測定	27
3.4 エネルギー較正曲線・分解能	31
3.4.1 アナログのエネルギー較正曲線・分解能	31
3.4.2 デジタルのエネルギー較正直線・分解能	33
3.5 空乏層厚	34

3.5.1	カウントレートの電圧依存性 . . . . .	34
3.5.2	空乏層測定の原理・セットアップ . . . . .	36
3.5.3	結果 . . . . .	39
3.5.4	考察 . . . . .	42
<b>第 4 章</b>	<b>検出器モンテカルロシミュレーション</b>	<b>45</b>
4.1	MeV ガンマ線天文学用ライブラリ MEGALib . . . . .	45
4.1.1	geomega (Geometry for MEGALib) . . . . .	45
4.1.2	cosima (A Cosmic Simulator for MEGALib) . . . . .	45
4.1.3	revan . . . . .	45
4.2	AstroPix の X 線・ガンマ線に対する応答評価 . . . . .	46
4.2.1	シリコン板 1 枚のジオメトリ . . . . .	46
4.2.2	シミュレーション方法 . . . . .	46
4.2.3	各線源の結果 . . . . .	51
4.2.4	考察 . . . . .	59
4.3	観測ロケット搭載用検出器のためのシミュレーション開発 . . . . .	59
4.4	観測ロケット搭載用検出器のガンマ線に対する性能評価 . . . . .	62
<b>第 5 章</b>	<b>まとめと今後の展望</b>	<b>68</b>

# 目次

1.1	シリコンと光子の相互作用の反応確率（縦軸：反応断面積、横軸：エネルギー。ピンクは光電吸収、青はコンプトン散乱、水色は対生成） [1]	2
1.2	光電吸収	3
1.3	コンプトン散乱における入射方向の推定	4
1.4	電子-陽電子対生成	4
1.5	AMEGO-X の感度（下に行くほど感度が良い） [2]	5
1.6	AMEGO-X の構造（左）とトラッカーとカロリメータの断面図（右） [3]	5
1.7	両面シリコンストリップ検出器の構造 [5]	6
1.8	ピクセルサイズに対する角度分解能の変化（下に行くほど良い） [4]	7
1.9	ピクセルサイズに対する検出効率の変化 [4]	8
1.10	MeV ガンマ線衛星用のシリコンピクセル検出器に対する要求仕様 [4]	8
2.1	AstroPix の構造断面図（[6] の図 3 を一部改変）	11
2.2	デジタル読み出しのイメージ図	11
2.3	ATLASPix のチップ [6]	12
2.4	AstroPix v1（中央の黒い四角がチップ） [4]	13
2.5	AstroPix v2（低比抵抗チップ）のキャリアボード。中央の黒い板で囲んでいる部分がチップ	14
2.6	AstroPix v2（高比抵抗チップ）のキャリアボード。中央の黄緑の板で囲んでいる部分がチップ	14
2.7	測定のセットアップ	15
2.8	測定のセットアップの簡易図	16
2.9	線源の貼り方（白い円盤が線源）	16
3.1	160 V における低比抵抗チップに流れる電流の時間変化	17
3.2	低比抵抗チップの暗電流の電圧依存性	18
3.3	高比抵抗チップの暗電流の電圧依存性	18
3.4	低比抵抗チップの (0,0)(0,18)(0,34) ピクセルの波形。縦軸：電圧 (V)、横軸：時間 (s)	20
3.5	高比抵抗チップの (0,8)(0,18)(0,34) ピクセルの波形。縦軸：電圧 (V)、横軸：時間 (s)	21
3.6	低比抵抗チップの (0,18) ピクセルのエネルギースペクトル（縦軸：イベント数、横軸：ADC チャンネル）	23
3.7	高比抵抗チップの (0,8) ピクセルのエネルギースペクトル（縦軸：イベント数、横軸：ADC チャンネル）	24

3.8	低比抵抗チップ (0,18) ピクセルの Fe55 と 線源なしのエネルギースペクトル (縦軸：イベント数、横軸：ADC チャンネル)	25
3.9	高比抵抗チップ (0,8) ピクセルの Fe55 と 線源なしのエネルギースペクトル (縦軸：イベント数、横軸：ADC チャンネル)	25
3.10	低比抵抗チップ (0,18) ピクセルのデジタルのエネルギースペクトル (縦軸はイベント数。row と col の ToT 読み出しを重ね書きしている。)	26
3.11	低比抵抗チップ (0,18) ピクセルのデジタルの Fe55 のエネルギースペクトル (左：閾値 10 mV、 右：20 mV。row と col の ToT 読み出しを重ね書きしている。)	26
3.12	高比抵抗チップの (0,0) から (0,34) ピクセルの Am241 のエネルギースペクトル (縦軸はイベ ント数)	28
3.13	高比抵抗チップの (0,0)~(0,34) のアナログ出力における 59.5 keV ピーク位置のぼらつき	29
3.14	高比抵抗チップの (0,0) から (0,34) の 59.5 keV のカウントレートヒストグラム	30
3.15	高比抵抗チップのピクセルごとの 59.5 keV のカウントレート	30
3.16	低比抵抗チップの (0,18) ピクセルのエネルギー較正曲線と分解能 (上縦軸：ピーク中心の ADC、下縦軸：FWHM(keV)、横軸：エネルギー (keV))	31
3.17	高比抵抗チップの (0,8) ピクセルのエネルギー較正曲線と分解能 (上縦軸：ピーク中心の ADC、 下縦軸：FWHM(keV)、横軸：エネルギー (keV))	32
3.18	低比抵抗チップ (0,18) ピクセルのデジタル測定 of エネルギー較正直線と分解能 (上縦軸：ピー ク中心の ToT( $\mu$ s)、下縦軸：FWHM(keV)、横軸：エネルギー (keV))	33
3.19	低比抵抗チップ (0,18) ピクセルのカウントレートの電圧依存性 (Cd109)	35
3.20	低比抵抗チップ (0,18) ピクセルのカウントレートの電圧依存性 (Am241)	35
3.21	高比抵抗チップ (0,8) ピクセルのカウントレートの電圧依存性 (Am241)	36
3.22	各電圧における Am241 のエネルギースペクトル測定結果とフィッティングの様子 (高比抵 抗チップ (0,8) ピクセル)	38
3.23	空乏層厚測定のセットアップ	39
3.24	低比抵抗チップ (0,18) ピクセルの 15 V における Am241 のエネルギースペクトル	40
3.25	高比抵抗チップ (0,8) ピクセルの 15 V における Am241 のエネルギースペクトル	40
3.26	低比抵抗チップ (0,0) ピクセルの空乏層厚の電圧依存性	41
3.27	低比抵抗チップ (0,18) ピクセルの空乏層厚の電圧依存性	41
3.28	高比抵抗チップ (0,0),(0,8),(0,22),(0,34) ピクセルの空乏層厚の電圧依存性	42
3.29	低比抵抗チップ (0,0) ピクセルの空乏層厚 (崩壊数 +20%)	43
3.30	低比抵抗チップ (0,18) ピクセルの空乏層厚 (崩壊数 +20%)	43
3.31	高比抵抗チップ (0,0),(0,8),(0,22),(0,34) ピクセルの空乏層厚 (崩壊数 +20%)	44
4.1	シリコン板 1 枚のジオメトリのイメージ図	46
4.2	source ファイル	47
4.3	sim ファイルの一部	48
4.4	59.54 keV のシミュレーション結果	49

4.5 エネルギーを落としきらなかったイベントの出力結果 . . . . .	50
4.6 青:59.54 keV のシミュレーション結果, 緑: エネルギーを落としきらなかったイベント . . . . .	50
4.7 Am241 のシミュレーション結果 . . . . .	51
4.8 Am241 のシミュレーション結果とガウシアンで揺らがせた図 (赤: 揺らがせる前, 青: 揺らが せたあと) . . . . .	52
4.9 Am241 のシミュレーション結果 (緑) と実測結果 (青) . . . . .	52
4.10 Co57 のシミュレーション結果とガウシアンで揺らがせた図 . . . . .	53
4.11 Co57 のシミュレーション結果 (青) と実測結果 (緑) . . . . .	54
4.12 Co57 (7keV なし) のシミュレーション結果とガウシアンで揺らがせた図 . . . . .	55
4.13 Co57 (7keV なし) のシミュレーション結果 (青) と実測結果 (緑) . . . . .	55
4.14 Ba133 のシミュレーション結果とガウシアンで揺らがせた図 . . . . .	56
4.15 Ba133 のシミュレーション結果 (青) と実測結果 (緑) . . . . .	57
4.16 Cd109 のシミュレーション結果とガウシアンで揺らがせた図 . . . . .	58
4.17 Cd109 のシミュレーション結果 (青) と実測結果 (緑) . . . . .	58
4.18 Quad-chip のジオメトリ (チップを真上から見たとき) . . . . .	59
4.19 Quad-chip1 層でのヒット位置の分布 (縦軸と横軸は座標 (cm) を表し、色はヒット数を表す。) . . . . .	60
4.20 Quad-chip3 層のジオメトリ . . . . .	61
4.21 Quad-chip3 層でのヒット位置の分布 (軸は座標を表す (cm)) . . . . .	61
4.22 Quad-chip3 層, 1 MeV, 入射方向 $0^\circ$ のときのコンプトン散乱事象の再構成エネルギースペ クトル . . . . .	62
4.23 Quad-chip3 層, 1 MeV, 入射方向 $36.8^\circ$ のときのコンプトン散乱事象の再構成エネルギースペ クトル . . . . .	63
4.24 Quad-chip3 層, 1 MeV, 入射方向 $0^\circ$ のときのコンプトン散乱事象の再構成角度分解能 . . . . .	64
4.25 Quad-chip3 層, 1 MeV, 入射方向 $36.8^\circ$ のときのコンプトン散乱事象の再構成角度分解能 . . . . .	65
4.26 Quad-chip3 層検出器の有効面積 (上: 入射方向 $0^\circ$ 、下: $36.8^\circ$ ) . . . . .	66
4.27 観測用ロケットに検出器を搭載した場合のジオメトリ (中央が AstroPix、水色の円筒がロケッ ト部分) . . . . .	67

# 表目次

3.1	各電圧の電流値（低比抵抗チップ）	19
3.2	各電圧の電流値（高比抵抗チップ）	19
3.3	測定条件	22
3.4	LiveTime	22
3.5	LiveTime	25
3.6	エネルギー分解能（アナログ）	32
3.7	エネルギー分解能（デジタル）	34
3.8	各パラメータ	37
3.9	低比抵抗チップと高比抵抗チップの空乏層厚の比	44
4.1	Am241 の各エネルギーの放出確率 [11]	47
4.2	Co57 の各エネルギーの放出確率 [11]	53
4.3	Ba133 の各エネルギーの放出確率 [11]	56
4.4	Cd109 の各エネルギーの放出確率 [11]	57



# 第1章 序論

## 1.1 MeV ガンマ線天文学

現在、多くの天体現象の MeV ガンマ線領域における観測が期待されている。例えば、数百 keV~MeV 領域に放射エネルギーのピークを持つガンマ線バースト・活動銀河核・ブレイザーなどである。ガンマ線バーストは、重い星が一生を終える際に起こす超新星爆発や連星中性子星の合体によってガンマ線が爆発的に放射される現象で、太陽が一生をかけて放出するエネルギーと同程度、もしくはそれ以上のエネルギーを数秒から数百秒の間に放出する。1967年にアメリカの核実験探知衛星「Vela」によって初めて発見。1997年に、イタリアとオランダの X 線衛星「BeppoSAX」によってガンマ線バーストの X 線残光が観測され、それを可視光望遠鏡で観測したことで発生天体の母銀河が判明した。これよりバーストが銀河系外で発生していること、銀河系外で発生しても明るく見えるほど莫大なエネルギーを放射していることが明らかになった。その後も Swift 衛星や Fermi 衛星によりガンマ線バーストの観測が行われており、起源天体やガンマ線放射機構の理解が進んだが、ガンマ線バーストの物理には未解明な点が多い。

ブレイザーとは活動銀河核から放出されるジェットを正面から観測した天体である。銀河の中心にある大質量ブラックホールに物質が落下することで、銀河全体の 1%程の領域から莫大なエネルギーが放出されると考えられており、この領域を活動銀河核と呼んでいる。活動銀河核の進化と銀河の進化は密接に関係していると考えられている。

2017年にアメリカの重力波干渉計「LIGO」2台とヨーロッパの重力波干渉計「VIRGO」によって、連星中性子星の合体に伴う重力波 GW 170817 とショートガンマ線バースト (GRB 170817A) が観測された。また、同じく 2017年に IceCube 実験でブレイザー天体 TXS 0506+056 のフレア期におけるニュートリノと電磁波も観測された。これらの観測は、電磁波や重力波、ニュートリノなどの観測を組み合わせるマルチメッセンジャー天文学が本格化するきっかけとなった。荷電粒子の観測が難しい遠くの天体は、これらのマルチメッセンジャーの観測によって謎の解明を目指している。

MeV 領域の観測は、先述した Vela 衛星によるガンマ線バーストの観測 (1967年) や Apollo15 号による宇宙拡散ガンマ線の観測 (1971年) など、大気外観測の初期から進められていた。しかし、1991~2000年全天観測を行った「COMPTEL」で約 30 個の天体が発見されて以来観測は進んでおらず、マルチメッセンジャー観測においても MeV 領域が抜けてしまっている。よって、全天 MeV ガンマ線衛星の早期実現に向けた検出器および衛星開発が進められている。

## 1.2 MeV ガンマ線と物質との相互作用

MeV 領域におけるガンマ線と物質との相互作用は図 1.1 に示す通り、光電吸収とコンプトン散乱と電子・陽電子対生成である。ここでは、それぞれの相互作用の特徴と検出方法について説明する。

## Silicon

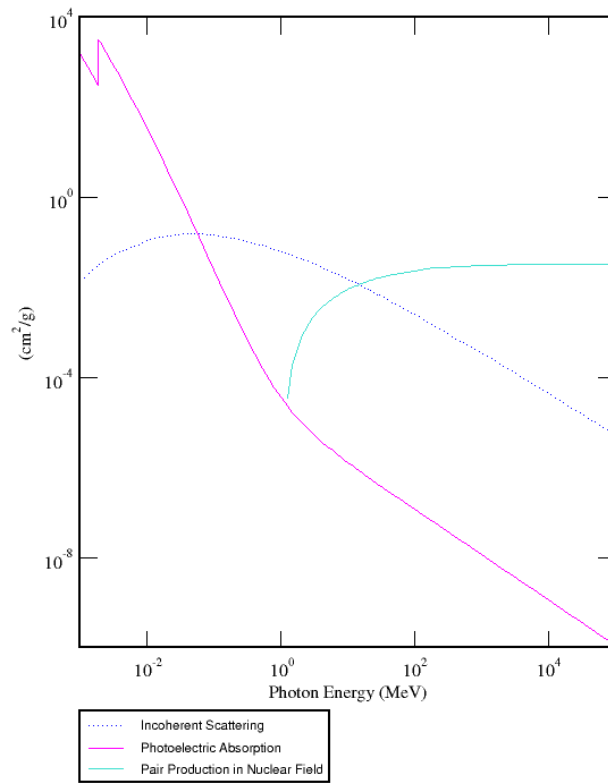


図 1.1: シリコンと光子の相互作用の反応確率（縦軸：反応断面積、横軸：エネルギー。ピンクは光電吸収、青はコンプトン散乱、水色は対生成） [1]

### 1.2.1 光電吸収

光電吸収は物質に光子が当たった際に、原子核まわりの電子が光子を吸収して原子が光電子を放出する現象である（図 1.2）。このとき、光子は全エネルギーを電子に渡す。光電子のエネルギーを測定して元の光子のエネルギーを求める。シリコンの場合、数 100 keV 以下で光電吸収が支配的である。

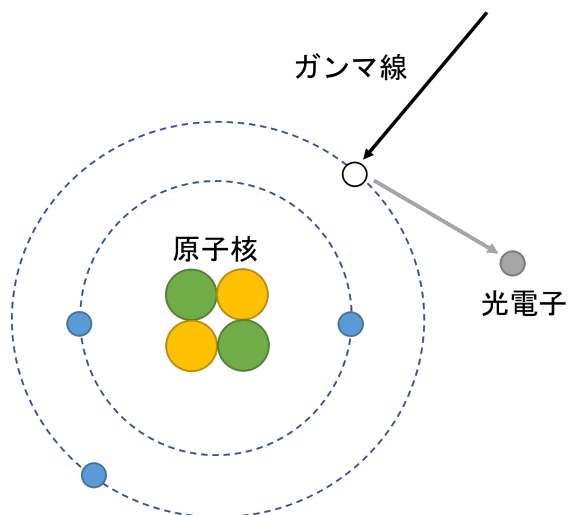


図 1.2: 光電吸収

## 1.2.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱は、光子が電子と衝突することで電子にエネルギーの一部を与え、弾き飛ばされた電子とガンマ線が散乱される現象である。シリコンでは数 100 keV から 10 MeV のエネルギー帯域で支配的になる。電子に与えたエネルギーを  $E_1$ 、散乱されたガンマ線のエネルギーを  $E_2$  とすると、散乱光子と入射ガンマ線のなす散乱角  $\theta$  はエネルギー・運動量保存則から次式で表される。

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \quad (1.1)$$

これより 2 つのエネルギーと反応位置が分かれば、図 1.3 のように入射光子の方向を円錐で定めることができる。円錐の軸は散乱位置と散乱ガンマ線の吸収位置を結ぶことで決まる。さらに反跳電子の飛跡を捉え初期運動量を測定することで、円環から円弧に絞ることができる。入射光子の方向を正確に決めるためには、エネルギー分解能と位置分解能が非常に重要となる。

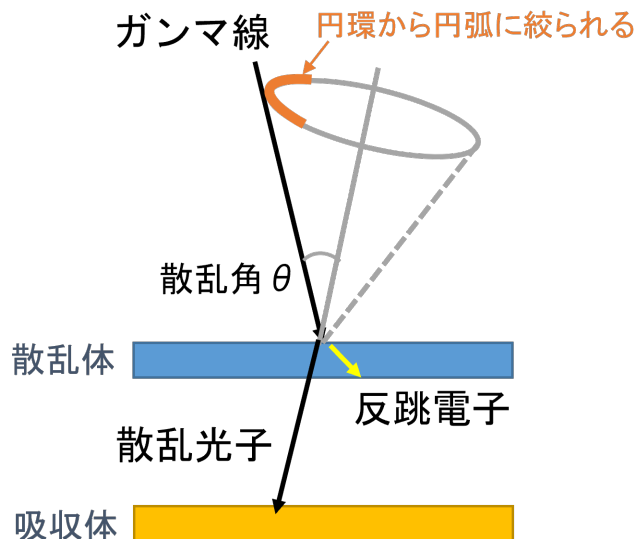


図 1.3: コンプトン散乱における入射方向の推定

### 1.2.3 電子 - 陽電子対生成

光子のエネルギーが電子の静止質量である 511 keV の 2 倍以上になると、電子 - 陽電子対生成が生じる。これはガンマ線が原子核付近の電場と相互作用を起こすことで消滅し、電子と陽電子が発生する現象である (図 1.4)。対生成の場合は、電子と陽電子の飛跡を検出器で捉えることで入射光子のエネルギーと方向を精度良く決めることができる。シリコンでは数 10 MeV 以上で対生成が支配的になる。

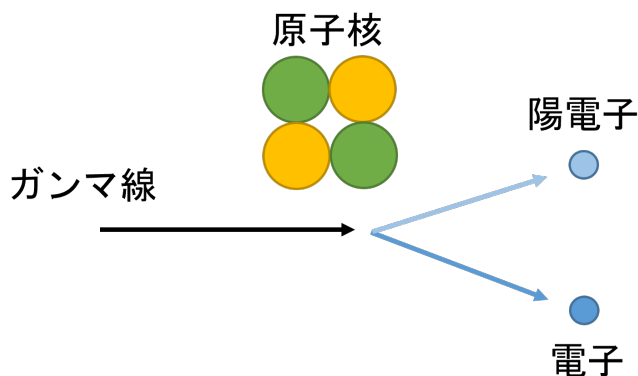


図 1.4: 電子-陽電子対生成

## 1.3 AMEGO-X 衛星計画

AMEGO-X は米国 NASA を中心に現在計画中の全天 MeV ガンマ線観測衛星である。MeV 天体やマルチメッセンジャー天体のガンマ線放射の検出や、それらの特徴を明らかにすることを目標としている。同じ

く計画中の衛星「AMEGO」のコンセプトをもとにしており、NASAの「MIDEX（中型衛星）」規模のプロジェクトである。AMEGO-Xの観測エネルギー帯域は数100 keVから1 GeVである。図1.5に示すように過去のMeVガンマ線検出器COMPTELと比較して感度も高くなり、観測エネルギー帯域も広がっていることが分かる。

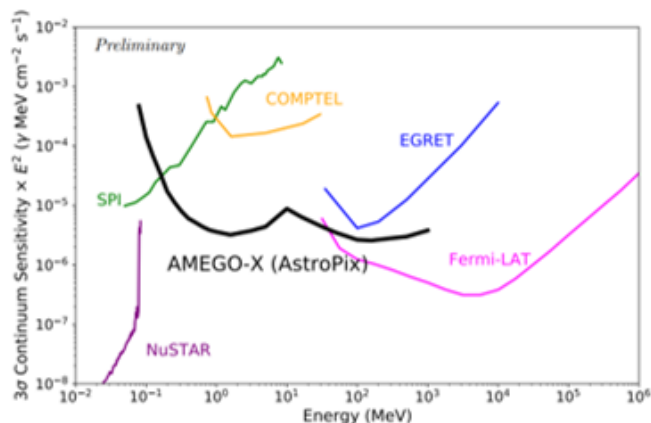


図 1.5: AMEGO-X の感度（下に行くほど感度が良い） [2]

AMEGO-Xは、トラッカーとカロリメータから構成されている（図1.6）。トラッカーはシリコンセンサーを何層にも重ねたもので、光子をコンプトン散乱させて散乱位置やエネルギーを測定する役割を果たしている。また、対生成で生じた電子と陽電子の方向もトラッカーで捉えられる。カロリメータでは、コンプトン散乱で散乱された光子を吸収してそのエネルギーと位置を測定する。対生成で生じた電子と陽電子も吸収され、エネルギーが測定される。

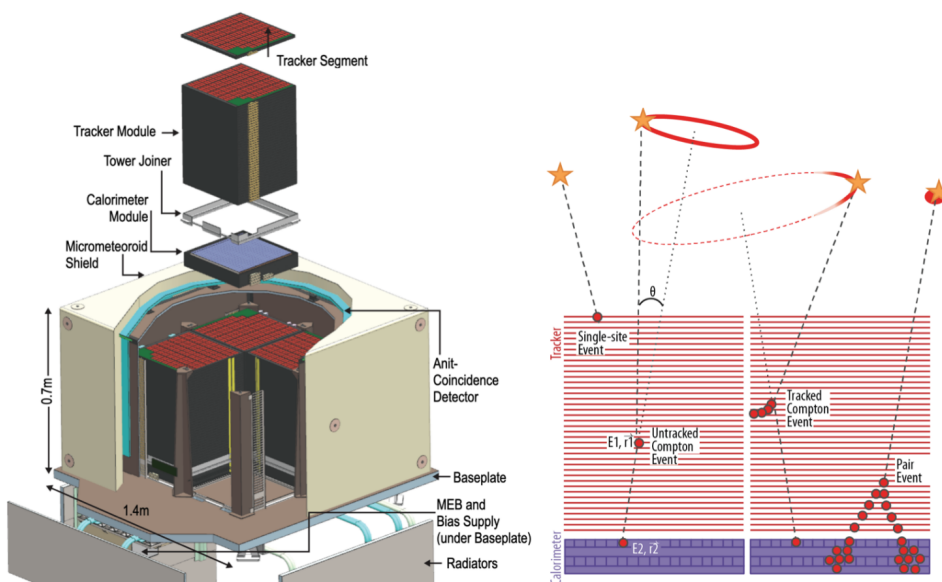


図 1.6: AMEGO-X の構造（左）とトラッカーとカロリメータの断面図（右） [3]

## 1.4 新型シリコンピクセル検出器の必要性

### 1.4.1 シリコン検出器の候補

AMEGO-X のガンマ線検出器のトラッカー部分にはシリコンセンサーが用いられる。その理由としては、他の検出器にも用いられてきた実績があること、取り扱いが容易で放射線耐性が高いこと、原子番号が小さいためコンプトン散乱が起こりやすいことなどが挙げられる。

シリコン検出器の候補には、DSSD と呼ばれる両面シリコンストリップ検出器とシリコンピクセル検出器の2つがある。DSSD はシリコンウエハー上に電極を設置し、荷電粒子が通過した際に発生する電子と正孔を収集することで通過位置とエネルギーを精密に測定することができる。エネルギー分解能が非常に高く、AMS-02、Astro-H HXI、PAMELA での宇宙空間における使用実績がある。しかし、各電極にそれぞれ読み出し回路が必要になるため検出器の大面积化が難しい。さらに、読み出し回路を減らすために複数のDSSD を繋げると、静電容量の増加によりノイズが増加することも問題点として挙げられている [4]。

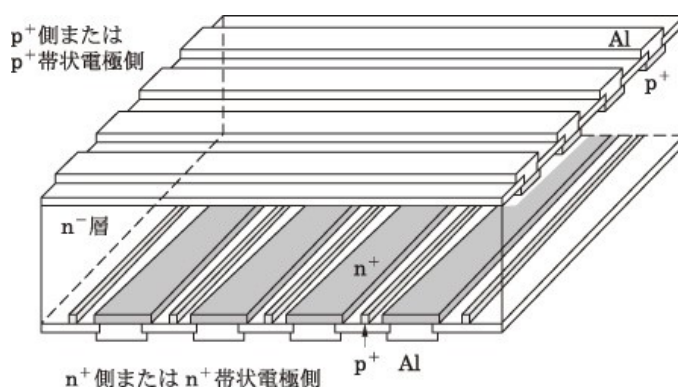


図 1.7: 両面シリコンストリップ検出器の構造 [5]

一方で、シリコンピクセル検出器は X 線・ガンマ線のイベントの検出部分と読み出し部分が一体化している検出器である。そのためノイズが減少し、エネルギー分解能や角度分解能を向上させることが可能である。現在、MeV 領域の観測のために新たなシリコンピクセル検出器の開発が進められている。

### 1.4.2 シリコンピクセル検出器への要求仕様

Isabella Brewer らの論文 [4] で、MeV ガンマ線用のシリコンピクセル検出器の開発にあたり、検出器のモンテカルロシミュレーションによって導出された理想的なピクセルサイズと厚さが示されている。ここではその要求仕様を紹介する。シミュレーションでは、50 層のトラッカーと理想的な性能のカロリメータを真空中に定義している。

図 1.8 は、厚さ  $500\mu\text{m}$ 、ピクセルサイズが  $0.01 \times 0.01 \text{ mm}^2$  から  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  のピクセルから構成されるトラッカーに、200 keV、300 keV、500 keV、1000 keV の点光源を用いたときの角度分解能を示している。これより、すべてのエネルギーで 1 mm まではピクセルサイズが角度分解能に影響を与えないことが分かる。

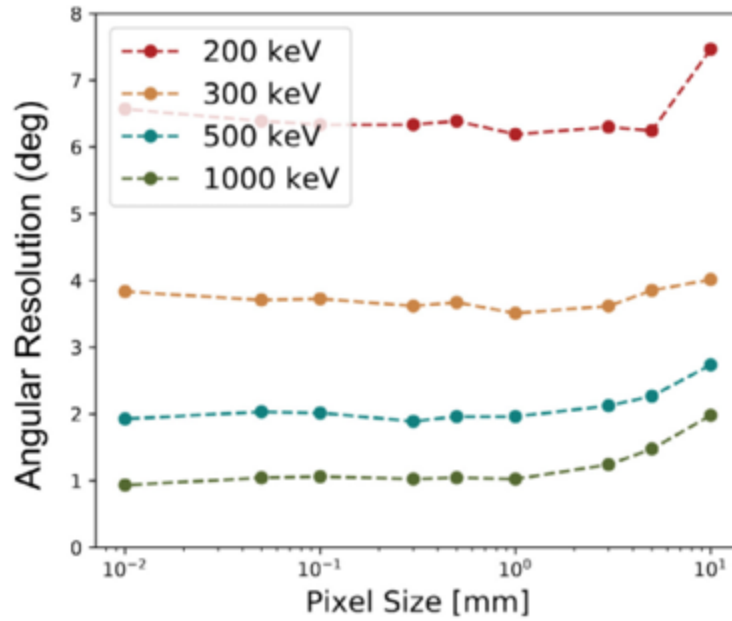


図 1.8: ピクセルサイズに対する角度分解能の変化（下に行くほど良い） [4]

また、ピクセルサイズと検出効率の関係も示されている。図 1.9 は、角度分解能のときと同様にピクセルサイズを変化させたときの検出効率の変化であり、それぞれ全体の厚みに対して空乏化していない層の割合を 0%~50%まで変えたときと鉛を 30%にしたときの結果である。これより、ピクセルサイズが 0.1 mm 以下になると検出効率が低下していることが分かる。また、空乏化していない層が増えるほど検出効率は低下する。

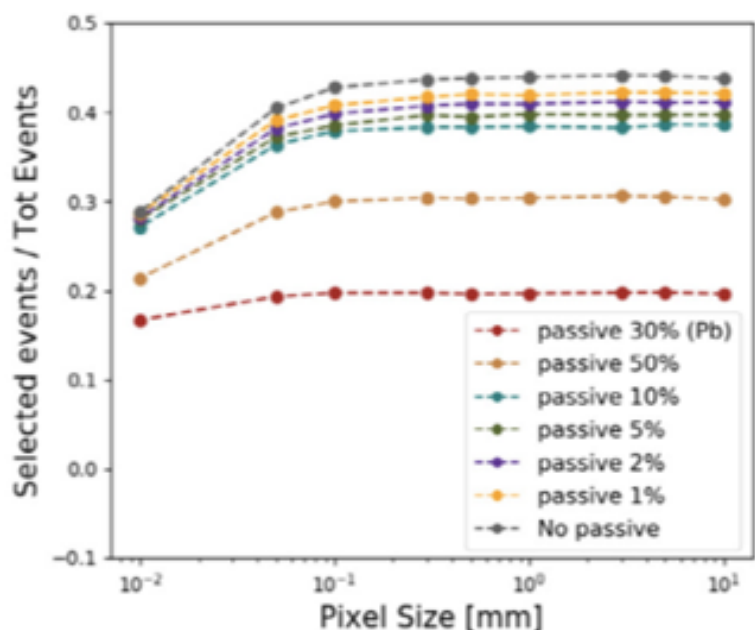


図 1.9: ピクセルサイズに対する検出効率の変化 [4]

これらの結果より、厚さが  $500\mu\text{m}$  の場合の最適なピクセルサイズは  $0.1\sim 1\text{ mm}^2$  と導き出された。ピクセルサイズ以外にも消費電力などその他の要求仕様をまとめたものが図 1.10 である。

Parameter	Goal
$E_{Res}$	<10% at 60 keV
Power usage	<1 mW/cm <sup>2</sup>
Passive material	<5% on the active area of Si
Pixel size	$500 \times 500\ \mu\text{m}^2$
Si Thickness	500 $\mu\text{m}$
Time tag	$\sim 1\ \mu\text{s}$

図 1.10: MeV ガンマ線衛星用のシリコンピクセル検出器に対する要求仕様 [4]

## 1.5 本研究の目的

ここまで述べてきたように、MeV ガンマ線天文学の発展のために新しいシリコンピクセル検出器が必要である。本研究では、AMEGO-X 計画に向けて開発中のシリコンピクセル検出器「AstroPix」の基礎特性を調べ、MeV ガンマ線観測に有効な検出器であるかを検討する。第 2 章では AstroPix の構造や特徴、開発状況などを説明する。現在 AstroPix は第 2 版 v2 チップの段階であり、さらに比抵抗の値が異なる 2 つのチップが存在する。第 3 章では、これら 2 つのチップで暗電流と空乏層厚の電圧依存性、エネルギースペクトル、エネルギー較正直線・分解能などを調べ、アナログ特性とデジタル特性を評価した。また、第 4 章で



は測定結果の理解を深める目的で検出器モンテカルロシミュレーションを行った。まず最初に、シミュレーションツールについて理解するために1枚のシリコン板で放射線に対する応答を調べた。そして、宇宙空間での動作実証試験のためにAstroPixを搭載したロケットを宇宙空間に打ち上げる計画「A-STEP」に向けて、ロケット内の環境でもシミュレーションを行った。

## 第2章 新型シリコンピクセル検出器 AstroPix

本研究で用いる AstroPix は、NASA のゴダード宇宙飛行センター、カールスルーエ工科大学、アルゴンヌ国立研究所、広島大学、名古屋大学などが共同開発を行っているシリコンピクセル検出器である。第2章では、AstroPix の構造や特徴、開発状況、セットアップについて説明する。

### 2.1 AstroPix の構造と特徴

#### 2.1.1 構造

AstroPix は HV-CMOS ピクセル検出器の一種である。CMOS とは半導体回路の一種であり、金属酸化物でできた P 型トランジスタと N 型トランジスタを組み合わせたものである。消費電力が少なく動作速度が高速であるため、多くの半導体製品に利用されている。

図 2.1 に AstroPix の断面構造図を示す。ピクセル内部は p 型の基盤の上に deep n-well と呼ばれる層があり、これらは pn 接合をなしている。p 型はホール濃度、n 型は電子濃度が高くなっているが、接合面付近では濃度の低い方へとキャリアが移動していく。するとキャリア同士が再結合して、キャリアがほぼ存在しない「空乏層」と呼ばれる領域が接合面付近にできる。このとき、p 型にはアクセプターイオンが、n 型にはドナーイオンが残されており、これによって 2 つの領域に電位差が生じる。この電位差をビルトインポテンシャルと呼ぶ。空乏層は逆電圧 (n 型の電位が高くなる方向) をかけると広げることができ、その厚さ  $d$  は次のような式で表される。

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{BB} + \phi_i)} \quad (2.1)$$

$\epsilon_{Si} = 1.04 \times 10^{-12}$  F cm はシリコンの誘電率、 $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C は電気素量、 $N_A$  と  $N_D$  はそれぞれアクセプターイオンとドナーイオンの濃度、 $V_{BB}$  は逆電圧の値、 $\phi_i$  はビルトインポテンシャル (シリコンの場合 0.6 V) である。またアクセプターイオン濃度がドナーイオン濃度に比べて十分に低い ( $N_A \ll N_D$ ) とき、空乏層厚は式のようにかける。

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}(V_{BB} + \phi_i)}{qN_A}} \quad (2.2)$$

このとき、空乏層は濃度の低いアクセプター (p 型) の領域に広がっており、濃度の高いドナー (n 型) の領域は電荷の検出を行う電極として機能する。2.2 式をホールの移動度  $\mu_h = 500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  と p 型の比抵抗  $\rho_p$  を用いて書くと、

$$d = \sqrt{2\epsilon_{Si}\mu_h\rho_p(V_{BB} + \phi_i)} \quad (2.3)$$

となる。これより、逆電圧  $V_{BB}$  が高く、比抵抗値  $\rho_p$  が大きいほど空乏層が広がることが分かる。

X線やガンマ線が空乏層を通過するとシリコンの原子核と相互作用を起こし、電子-ホール対が発生する。電子は n-well で収集され、信号として CMOS 回路内の電荷有感型アンプで増幅される。空乏層は印加する電圧が高いほど広がるため、電圧が高いほど有感領域が増える。

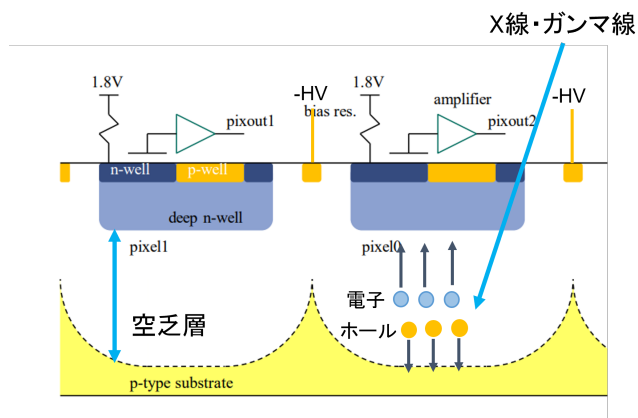


図 2.1: AstroPix の構造断面図 ([6] の図 3 を一部改変)

アンプで増幅された信号はコンパレータに入り、参照電圧より高い時間をクロックで数えて Time over Threshold (ToT) デジタル値となり、ピクセル ID や時刻情報とともにデジタルデータとして出力される (図 2.2)。一方、アンプのアナログ出力波形はそのままチップ外に出て、基板上的のバッファを通過してアナログ信号として出力されるので、オシロスコープで波形を見ることができる。アナログ出力は選択された 1 ピクセルのみが出力され、また限られたピクセルのみが選択可能であるが、デジタル信号はすべてのピクセルから読み出せる。

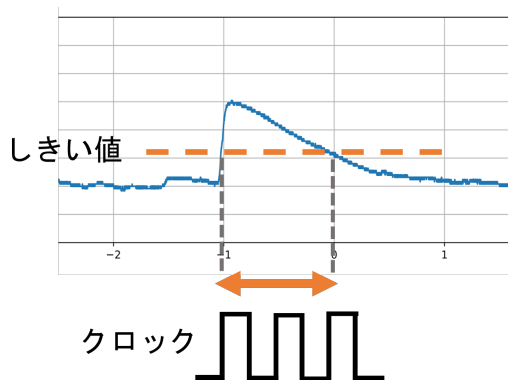


図 2.2: デジタル読み出しのイメージ図

## 2.1.2 特徴

AstroPix は、センサーに高比抵抗のシリコンを用いており高電圧をかけることができるため完全空乏化が可能であり、ガンマ線に対する広い有感領域を持つ。また、1つのピクセルは  $500 \times 500 \mu\text{m}^2$  であり、他

のシリコンピクセル検出器と比較すると大きい値となっている。例えば、X線衛星のために開発されている「XRPIX」という検出器は、 $36 \times 36 \mu\text{m}^2$ である。ピクセルサイズを大きくすることにより回路の数を減らし、総消費電力を小さく抑えることが可能になる。これはリソースが限られている衛星において重要である。

## 2.2 開発のこれまでとこれから

### 2.2.1 これまでの開発

#### < ATLASPix >

AstroPix は、CERN の ATLAS 実験のために開発された検出器「ATLASPix」の技術を元に作られている。ATLASPix (図 2.3) のピクセルサイズは  $130 \times 40 \mu\text{m}^2$ 、厚さは  $100 \mu\text{m}$  と全体的に AstroPix よりも小さい。また、エネルギー分解能は  $30.1 \text{ keV}$  で 7%、ダイナミックレンジ (識別可能なエネルギー範囲) は  $5 \sim 32 \text{ keV}$ 、消費電力は  $150 \text{ mW/cm}^2$  などの性能が示されている。[7]

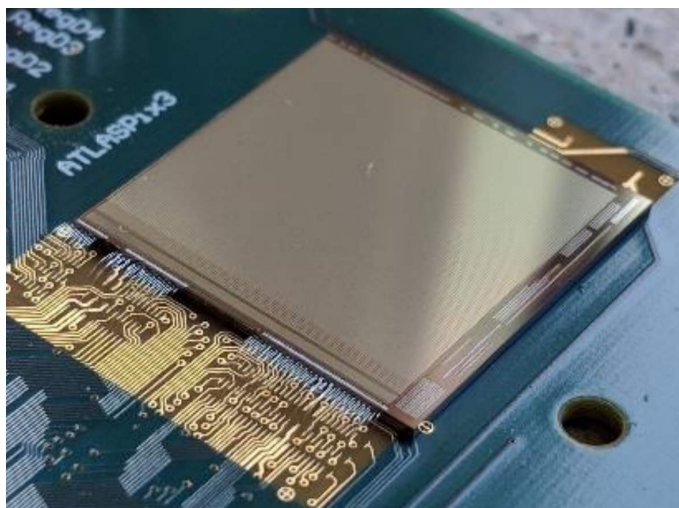


図 2.3: ATLASPix のチップ [6]

#### < AstroPix v1 >

AstroPix v1 は AstroPix の試作された最初のバージョンである (図 2.4)。v1 チップのピクセルサイズは  $175 \times 175 \mu\text{m}^2$ 、厚さは  $725 \mu\text{m}$ 、ピクセル数は  $18 \times 18$  である。また、AstroPix はデジタルでデータを収集することを想定されているが、v1 チップでは設計上の欠陥によりデジタルデータの読み出しができなかったため一部のピクセルのアナログ特性のみが評価されている。比抵抗は  $250 \pm 50 \Omega\text{cm}$  であり、測定は  $60 \text{ V}$  で行われた。これより完全空乏化は難しく、空乏層の厚さは  $3 \sim 100 \mu\text{m}$  程度であると予想されている。[7]

エネルギー分解能は、AstroPix の要求パラメータを満たすものではなかったが、すべての光電吸収ピークが期待値の 7% 以内に収まっていた。またダイナミックレンジの下限は  $13 \text{ keV}$  であった。

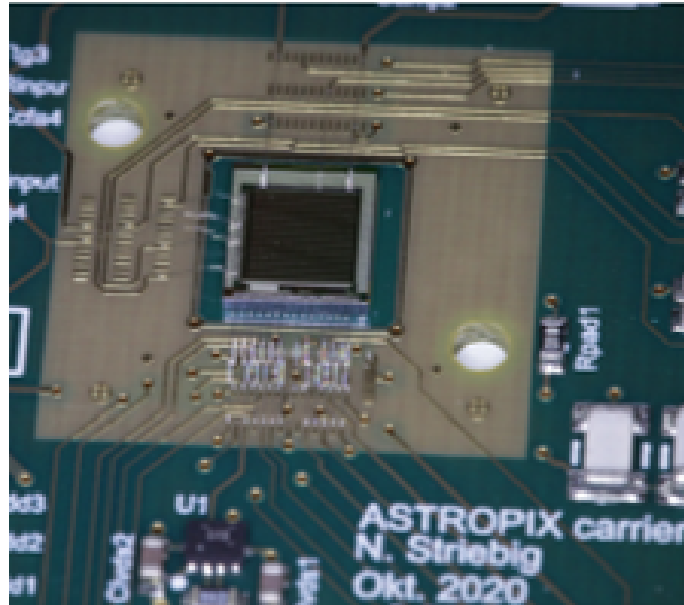


図 2.4: AstroPix v1 (中央の黒い四角がチップ) [4]

### 2.2.2 AstroPix v2

AstroPix v1 に続き、AstroPix v2 が開発された。現段階では比抵抗値の異なる 2 つの v2 チップが作られており、本研究ではこの 2 つに関して特性評価を行う。比抵抗とは電流の流れにくさを表す値である。ここでは、 $300 \Omega\text{cm}$  のものを低比抵抗チップ (図 2.5)、 $5 \text{ k}\Omega\text{cm}$  のものを高比抵抗チップ (図 2.6) と呼ぶこととする。

v2 チップの大きな特徴は、アナログ測定に加えてデジタル測定が可能となったことである。ピクセルサイズは  $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ 、厚さは v1 と同じ  $725 \mu\text{m}$ 、ピクセル数は  $35 \times 35$  になっている。また、消費電力が  $14.7 \text{ mW}/\text{cm}^2$  から  $3.4 \text{ mW}/\text{cm}^2$  まで削減された。



図 2.5: AstroPix v2（低比抵抗チップ）のキャリアボード。中央の黒い板で囲んでいる部分がチップ



図 2.6: AstroPix v2（高比抵抗チップ）のキャリアボード。中央の黄緑の板で囲んでいる部分がチップ

### 2.2.3 これからの開発

2022年の夏に、AstroPix v3の制作方針が決められた。ピクセルサイズは目標値の $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ まで拡大される予定である。消費電力も $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 未満を設計値としている。また、4つのチップをデジタイゼー

ンして同一のチップとして扱う Quad-chip 化も可能な設計となっている。Quad-chip は、将来望遠鏡などのより大きな検出装置の一部として機能するユニットである。

チップの開発と並行して、AstroPix の宇宙空間での動作実証計画「A-STEP (Astropix Soundingrocket Tech dEmo Payload)」も進められている。A-STEP の主な目的は AstroPix を衛星に搭載するために、NASA の定めた「Technology Readiness Level」を上げることである。宇宙空間でのデータの取得や宇宙線バックグラウンドの測定などが期待されており、性能が予想通りであるかを確認する。A-STEP では、観測用ロケットに AstroPix の Quad-chip を 3 層重ねたものが搭載され、2024 年後半の打ち上げを予定している。

## 2.3 AstroPix v2 の実験セットアップ

v2 チップはキャリアボードの中央に埋め込まれている。ボードには左側に 1 つ、右側に 3 つの SMA 端子があり、高電圧電源を左側の端子に繋いで逆電圧をかけている。アナログ測定ではチップの 0 行目（チップの最下段）の 35 ピクセルのうち 1 つを選択的に読み出し、右側の中央の端子からアンプに繋いで測定を行う。デジタルの読み出しはチップの下部で行われる。

AstroPix を用いた測定は、図 2.7 のようなセットアップで行った。図 2.8 にセットアップの簡易図を示す。高電圧電源は AstroPix チップに直接接続されており、指定した電圧をかけることができる。AstroPix は GECCO board と呼ばれるボードに垂直に設置しており、GECCO board には 3 つの低電圧電源が接続されている。各電源の設定値は 1.8、1.8、2.7 V である。GECCO board は Nexys board と呼ばれる FPGA（プログラミングが可能な集積回路）評価ボードに繋がっている。AstroPix で検出されたアナログ信号は、シェーピングアンプや Multi Channel Analyzer (MCA) を通して読み出される。

エネルギースペクトルの取得の際、線源は図 2.9 のように AstroPix 上部の部品に直接テープで張り付けた。また、測定は室内の光の影響をなくするために AstroPix にブラックシートをかけて遮光した状態で行った。

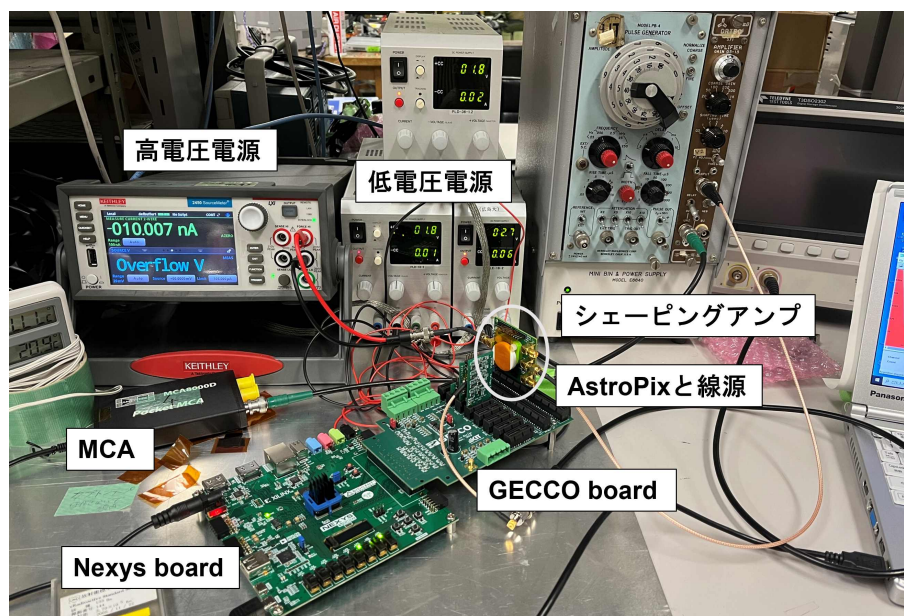


図 2.7: 測定のセットアップ

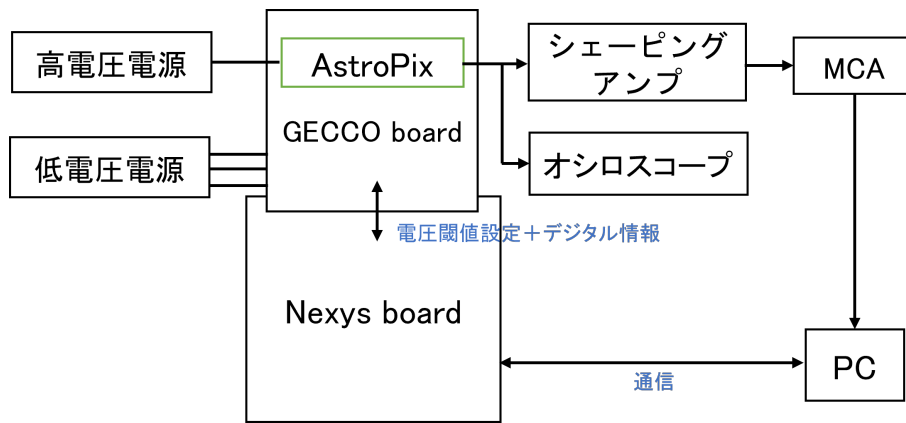


図 2.8: 測定のセットアップの簡易図

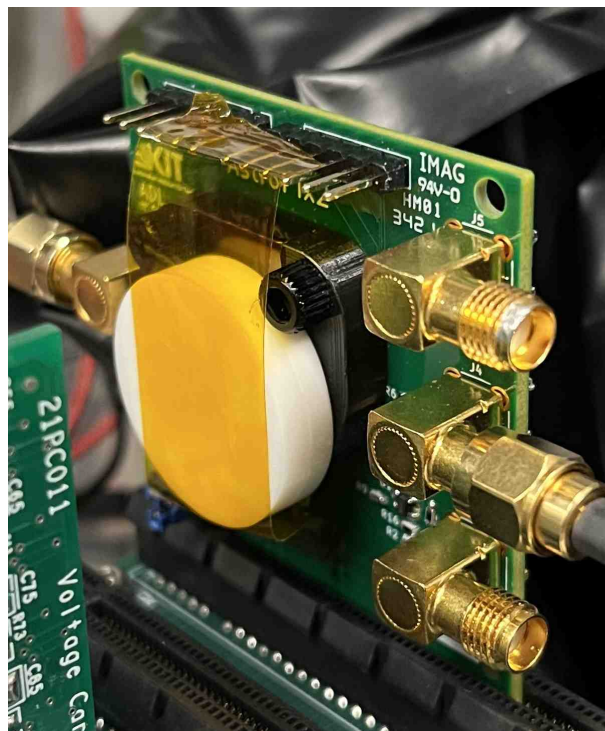


図 2.9: 線源の貼り方 (白い円盤が線源)



## 第3章 AstroPix v2の基礎特性評価

本章では、AstroPix v2の基礎特性を調べるために行った測定について述べる。測定項目として、暗電流の電圧依存性・アナログ出力における波形・各線源のエネルギースペクトルとエネルギー較正直線・空乏層の厚さについて調べた。

### 3.1 暗電流の電圧依存性

まず初めに、暗電流の電圧依存性を調べた。暗電流とは検出器に光子が入射していないにもかかわらず、電子が検出器の温度によって励起することで流れてしまう電流のことである。検出器ノイズの原因の一つであり、電圧を上げていくとある電圧から急激に増加するという特徴を持つ。

電流の測定は高電圧電源として使用する KEITHLEY 2450 ソースメータを用いて行った。また、測定の際は実験室内の光を遮光するためにブラックシートをかけた。低比抵抗チップでは、電圧は5 V から 180 V の範囲で変化させた。5~130 V は 5 V 刻み、130~180 V は 2 V 刻みで、それぞれ 60 秒ずつ測定した。高比抵抗チップは低比抵抗チップの 1000 倍もの暗電流が流れてしまい高電圧がかけられないため、5 V から 20 V の範囲で変化させた。5~15 V は 5 V 刻み、16~20 V は 2 V 刻みで、それぞれ 1 時間ずつ測定した。測定時間の半分以降を電流値が安定した範囲であるとみなし、それらの平均値をプロットした。例として、図 3.1 では横軸が 30~60 s の範囲で電流の平均値を求めた。結果を図 3.2、3.3 に示す。

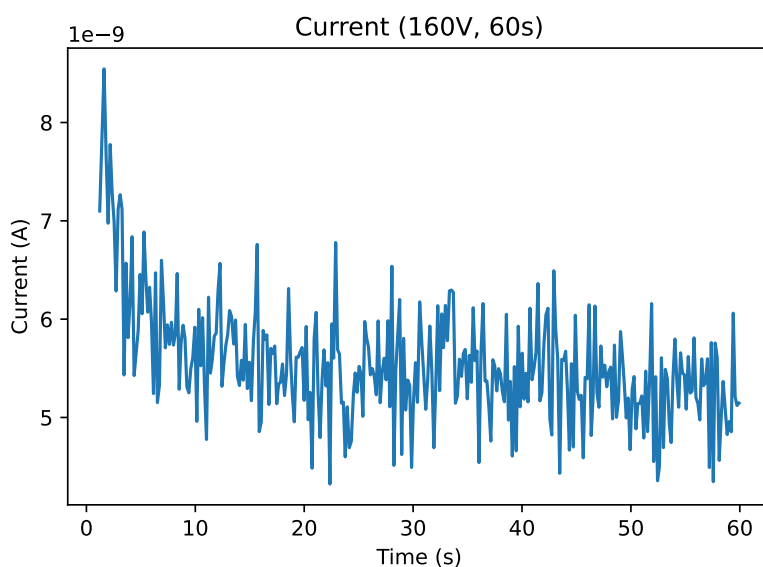


図 3.1: 160 V における低比抵抗チップに流れる電流の時間変化

<結果>

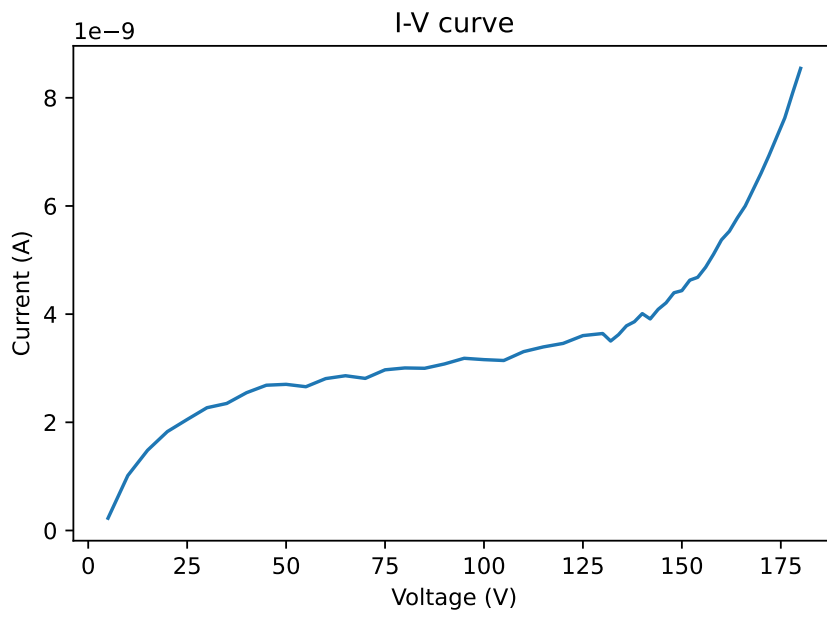


図 3.2: 低比抵抗チップの暗電流の電圧依存性

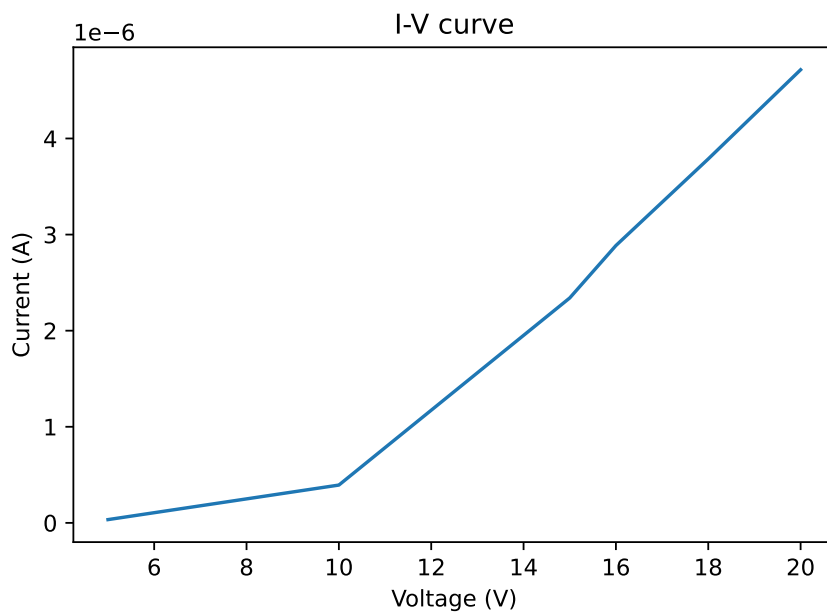


図 3.3: 高比抵抗チップの暗電流の電圧依存性

表 3.1: 各電圧の電流値 (低比抵抗チップ)

電圧 (V)	電流 (nA)	電圧 (V)	電流 (nA)
5	0.23	132	3.50
10	1.01	134	3.62
15	1.48	136	3.78
20	1.83	138	3.86
25	2.05	140	4.01
30	2.27	142	3.91
35	2.35	144	4.01
40	2.55	146	4.21
45	2.69	148	4.40
50	2.70	150	4.43
55	2.66	152	4.63
60	2.81	154	4.68
65	2.86	156	4.87
70	2.81	158	5.11
75	2.97	160	5.37
80	3.01	162	5.53
85	3.00	164	5.78
90	3.08	166	6.00
95	3.18	168	6.30
100	3.16	170	6.60
105	3.14	172	6.93
110	3.31	174	7.28
115	3.40	176	7.63
120	3.46	178	8.09
125	3.60	180	8.54
130	3.64		

表 3.2: 各電圧の電流値 (高比抵抗チップ)

電圧 (V)	電流 ( $\mu$ A)
5	0.034
10	0.39
15	2.34
16	2.88
18	3.79
20	4.71

低比抵抗チップでは 160 V 付近から暗電流が急激に増加していた。高比抵抗チップでは電流の急激な増加は見られなかったが、15 V までは時間とともに電流が増加、16~20 V では減少していた。

この結果と 3.5.1 で示すカウントレートの結果より、3.2、3.3、3.4 の測定は低比抵抗チップは 160 V、高比抵抗チップは 13 V で行うものとする。

## 3.2 アナログ出力波形

1 ピクセルのアナログ出力波形の測定では 0 行の 0~34 ピクセルについて測定することができる。低比抵抗チップのピクセル座標 (0,0) と (0,18) と (0,34)、高比抵抗チップのピクセル座標 (0,8) と (0,18) と (0,34) で Cd109 の 22 keV を測定し、その波形をオシロスコープで取得した。なお、オシロスコープのトリガー閾値は低比抵抗チップでは 120 mV、高比抵抗チップでは 100 mV に設定した。

### <結果>

取得した波形を図 3.4、3.5 に示す。ピークの波高値は、低比抵抗チップでは 150 mV、高比抵抗チップでは 130 mV 程度だった。ノイズの大きさもピクセルごとに差があり、低比抵抗チップの (0,34) や高比抵抗チップの (0,18) ではほかの 2 ピクセルに比べてノイズが大きいことが分かる。このようにピクセルによって性能が異なっている。

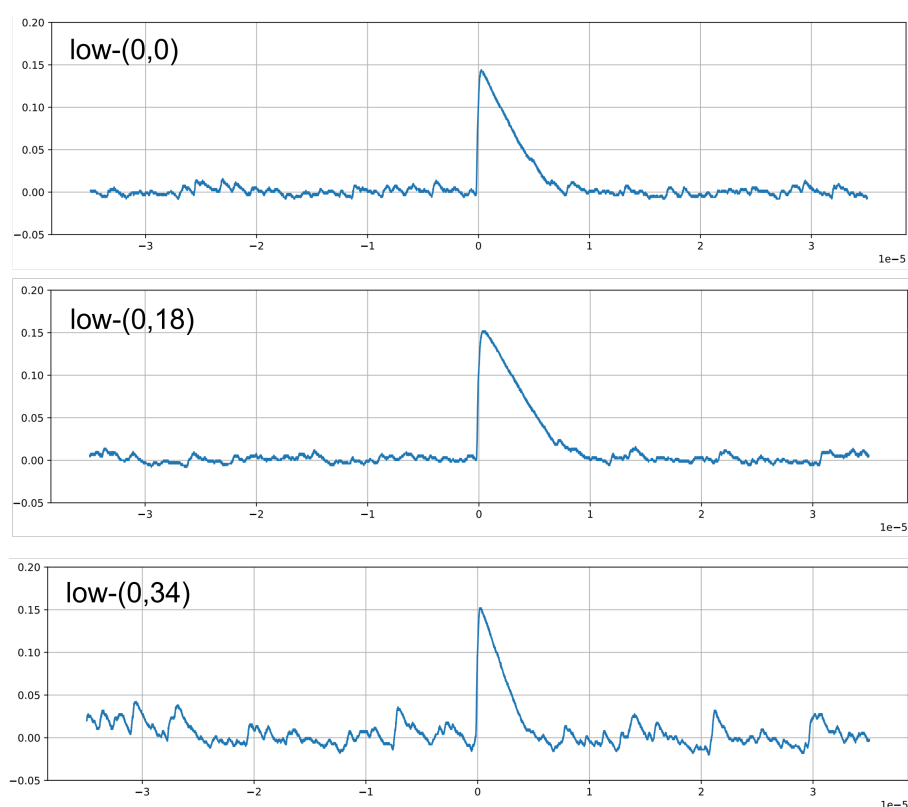


図 3.4: 低比抵抗チップの (0,0)(0,18)(0,34) ピクセルの波形。縦軸：電圧 (V)、横軸：時間 (s)

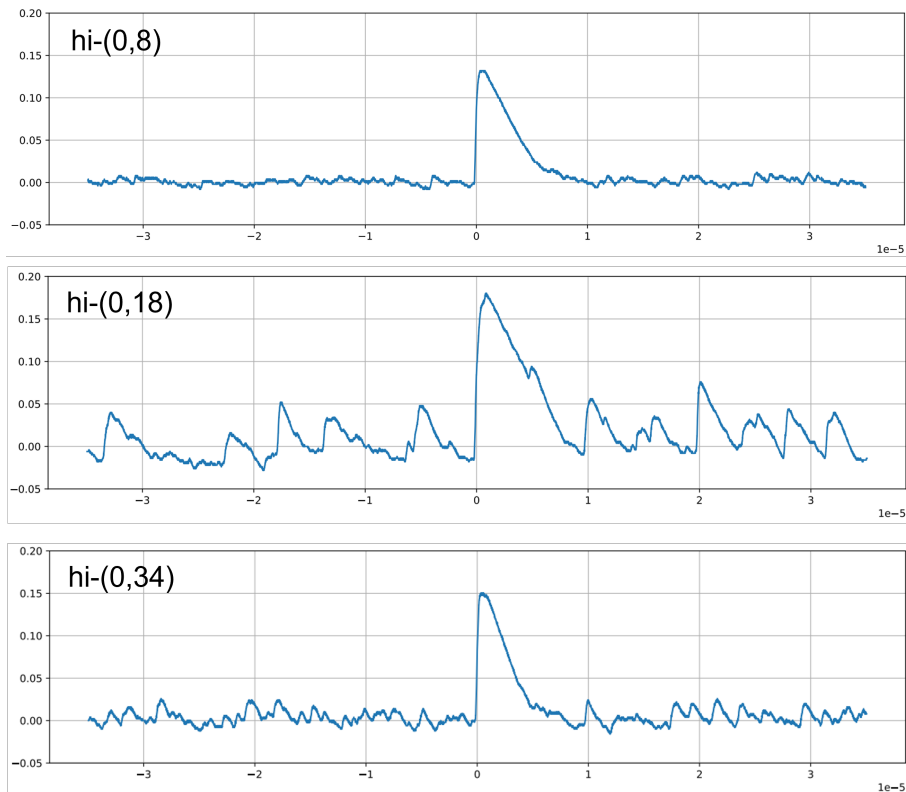


図 3.5: 高比抵抗チップの (0,8)(0,18)(0,34) ピクセルの波形。縦軸：電圧 (V)、横軸：時間 (s)

### 3.3 エネルギースペクトル

#### 3.3.1 アナログ出力

1 ピクセルのアナログ出力波形の測定（以後アナログ測定と略す）では、AstroPix の出力波形をシェーピングアンプを通して波形整形し、その波高値を Multi Channel Analyzer(MCA) で AD 変換し、データを取得する。アンプは ORTEC Model 571 を使い、パルス整形時定数は  $1\mu\text{s}$  に設定した。MCA は Pocket MCA 8000D を用いた。MCA ではパルスの波高が ADC 値のヒストグラムとして出力され、これは検出器で検出されたエネルギースペクトルに対応している。

アナログ測定では、Am241、Co57、Cd109、Ba133、Fe55、線源なしで測定を行った。表 3.3 に測定条件、表 3.4 に測定時間、図 3.6 と図 3.7 にエネルギースペクトルの測定結果を示す。

#### <測定条件>

測定を行うピクセルに (0,18) と (0,8) を用いたのは、35 ピクセルの中でノイズが少なかったためである。(0,8) については 3.3.3 で 35 ピクセルのアナログ出力について述べているため、そちらも参照されたい。

表 3.3: 測定条件

	低比抵抗	高比抵抗
電圧	160 V	13 V
使用ピクセル ID (Row,Col)	(0,18)	(0,8)
室温	20 °C前後	
整形時定数	1 $\mu$ s	

表 3.4: LiveTime

線源	低比抵抗チップの LiveTime (秒)	高比抵抗チップの LiveTime (秒)
線源なし	1,800	5,500
Fe55	1,800	85,900
Cd109	3,600	50,000
Am241	4,100	50,000
Ba133	72,000	243,300
Co57	82,800	84,800

<結果>

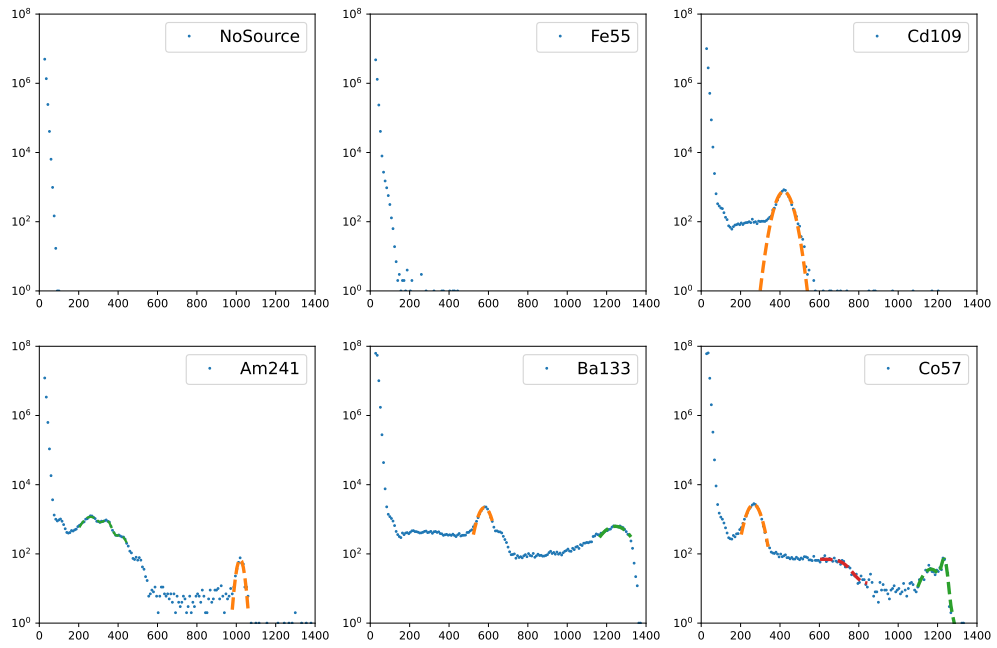


図 3.6: 低比抵抗チップの (0,18) ピクセルのエネルギースペクトル (縦軸：イベント数、横軸：ADC チャンネル)

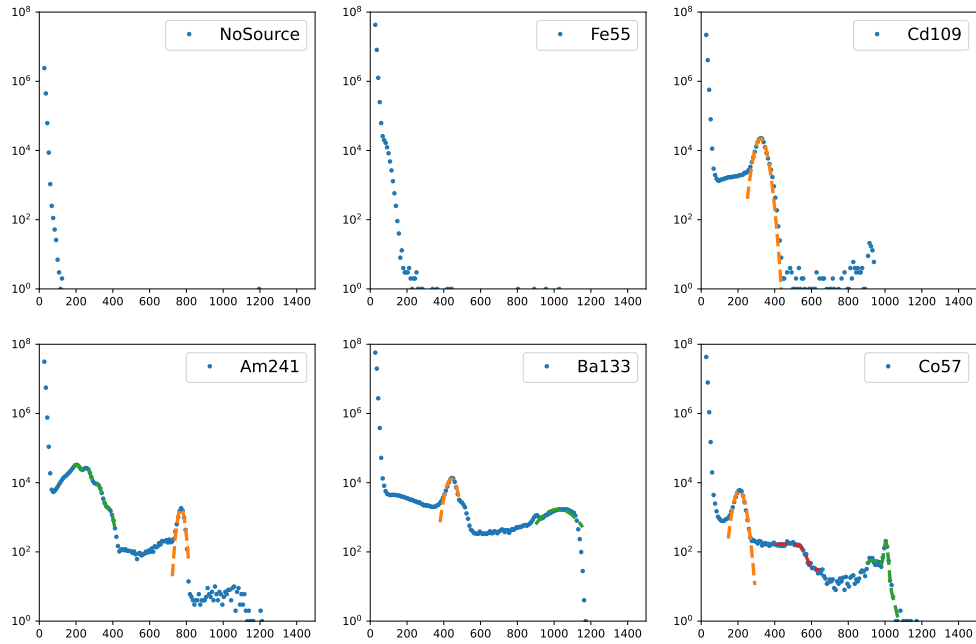


図 3.7: 高比抵抗チップの (0,8) ピクセルのエネルギースペクトル (縦軸：イベント数、横軸：ADC チャンネル)

得られたエネルギースペクトルより、Cd109 の 22.2 keV、Am241 の 59.5 keV、Ba133 の 31.0 keV、Co57 の 14.4 keV などの光電吸収ピークがどちらのチップでも見えることが分かる (図中のオレンジ色の曲線付近)。また、Co57 の 122 keV によるコンプトンエッジも見えている (図中の赤色の曲線付近)。コンプトンエッジはコンプトン散乱で光子が電子に与える最大のエネルギーに見られるふるまいで、その算出には次式を用いた。122 keV によるコンプトンエッジは、 $E_0 = 122$  keV、 $\theta = 180$  deg、 $mc^2 = 511$  keV (電子の静止エネルギー) を代入した際の電子に与えられたエネルギー 39.5 keV である。

$$\text{電子に与えられたエネルギー} = \frac{E_0}{\frac{mc^2}{E_0(1-\cos\theta)} + 1} \quad (3.1)$$

Fe55 の 5.9 keV の明確なピークは確認できないが、線源なしの結果と比較すると 5.9 keV の存在を確認できる (図 3.8、3.9 より)。なお、高比抵抗チップは Fe55 と線源なしの測定時間が異なるため、Fe55 のイベント数に (線源なしの LiveTime) / (Fe55 の LiveTime) をかけてスケールしている。



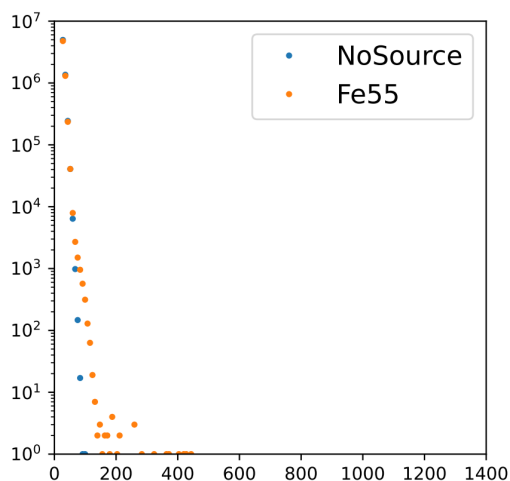


図 3.8: 低比抵抗チップ (0,18) ピクセルの Fe55 と線源なしのエネルギースペクトル  
(縦軸：イベント数、横軸：ADC チャンネル)

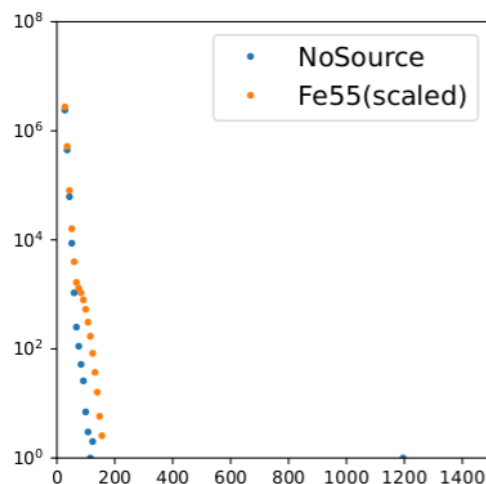


図 3.9: 高比抵抗チップ (0,8) ピクセルの Fe55 と線源なしのエネルギースペクトル  
(縦軸：イベント数、横軸：ADC チャンネル)

### 3.3.2 デジタル出力

アナログ測定は (0,0) から (0,34) ピクセルのみ出力が可能だが、デジタル測定は全ピクセルで行うことができる。AstroPix で検出した信号をアンプで増幅し、コンパレータを通して読み出される。読み出しには Time Over Threshold (以降 ToT とする) 方式が用いられている。これは設定した電圧閾値を超えた部分の時間幅を読み出す方法で、時間幅が波高値に対応している。12 ビットのチャンネルを 5 ns 幅のクロックで読み出すため、ToT が  $20.48 \mu\text{s}$  ( $=2^{12} \times 5 \text{ ns}$ ) に到達するとカウンターが 0 に戻ってしまう。以降この現象をラッピングと呼ぶことにする。

デジタル測定でもアナログと同様に、Am241、Co57、Cd109、Ba133、Fe55、線源なしで測定を行った。チップは低比抵抗チップを用い、電圧などの測定条件はアナログ測定と同じである。Fe55 のみ電圧閾値を 10 mV と 20 mV で測定し、その他の線源は 35 mV に設定した。各線源の測定時間は表 3.5、結果を図 3.10、3.11 に示す。

表 3.5: LiveTime

線源	測定時間 (秒)
Am241	3,600
Ba133	13,700
Co57	14,800
Cd109	7,350
Fe55(閾値 10 mV)	8,460
Fe55(閾値 20 mV)	21,500
線源なし	1,800

<結果>

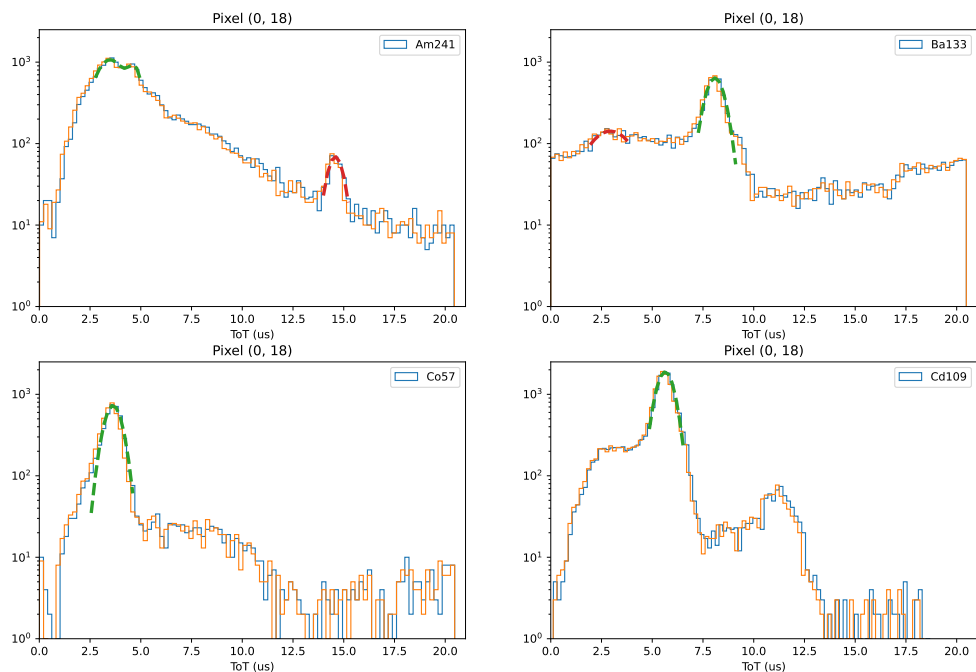


図 3.10: 低比抵抗チップ (0,18) ピクセルのデジタルのエネルギースペクトル (縦軸はイベント数。row と col の ToT 読み出しを重ね書きしている。)

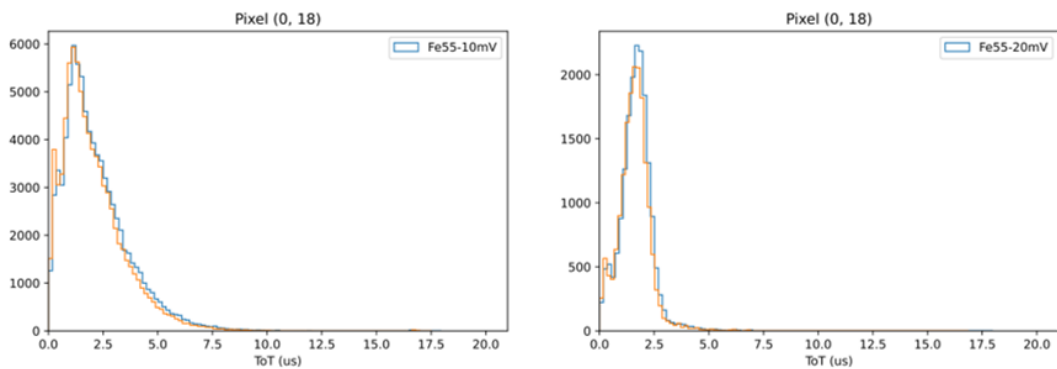


図 3.11: 低比抵抗チップ (0,18) ピクセルのデジタルの Fe55 のエネルギースペクトル (左: 閾値 10 mV、右: 20 mV。row と col の ToT 読み出しを重ね書きしている。)

グラフの横軸は ToT の値 (単位:  $\mu\text{s}$ )、縦軸はイベント数を表している。線源なしのときは信号が検出されなかったため、閾値の 35 mV はベダスタル成分よりも十分高いと考えられる。Am241 の結果では、4  $\mu\text{s}$

付近に 13.9 keV と 17.8 keV のピークがあり、15  $\mu$ s 付近に 59.5 keV ピークが見られる。また、Ba133 では 8  $\mu$ s 付近のピークが 31.0 keV、3  $\mu$ s 付近のピークがカウンターが一周回ったと考えると 81.0 keV であると推測できる。Co57 の 14.4 keV や Cd109 の 22.2 keV も見えている。Co57 の 10  $\mu$ s 付近にコンプトンエッジのようなものが見え、後のエネルギー較正から 39.5 keV で説明できるが、122 keV や 136 keV ピークの成分が含まれている可能性があるためフィッティングは行わなかった。Cd109 は ToT が 11 付近のところにピークがあるが、何によるものか分からないため調査する必要がある。

Fe55 は電圧閾値を上げるとペDESTAL部分が削れて見えた。ピークの形が異なって見えるのは、閾値を変えたことで横軸のスケールが変わったためであると考えられる。5.9 keV の成分が含まれているようにも見えるが、ピークであると判断することは難しいと考えた。

### 3.3.3 高比抵抗チップのアナログ出力のスペクトル測定

3.3.1 の低比抵抗チップと同様にして、高比抵抗チップのアナログ出力を用いてエネルギースペクトルを取得した。(0,0)~(0,34) の全 35 ピクセルで Am241 のエネルギースペクトル測定を行ったためその結果を図 3.12 に示す。

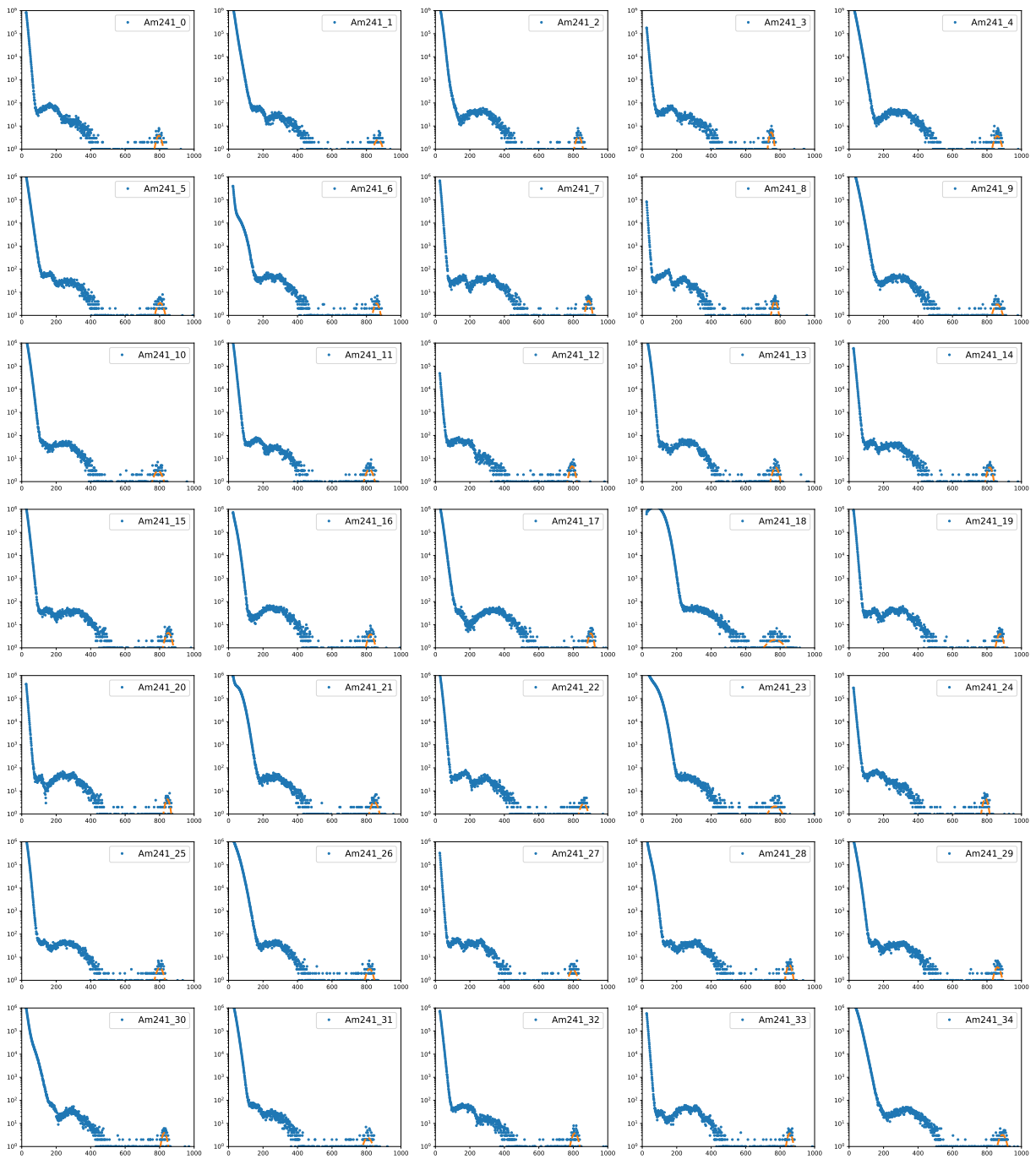


図 3.12: 高抵抗チップの (0,0) から (0,34) ピクセルの Am241 のエネルギースペクトル (縦軸はイベント数)

これより、ピクセルごとに性能は異なるが Am241 のエネルギースペクトルが得られていることが分かる。ピクセルごとに比較をすると、例えば、(0,8) では低エネルギー側の複数ピークが分かれて見えておりノイズも少ないのに対し、(0,18) では複数ピークが分解できず一つのピークになっておりノイズも非常に多くなっていた。ゲインにもばらつきがみられ、ガウシアンフィットで求めた 59.5 keV ピークの位置に注目

すると ADC チャンネルで最小値が 750、最大値が 901 だった (図 3.13 参照)。ADC チャンネルの平均値は 826.4、標準偏差は 38.6 だった。

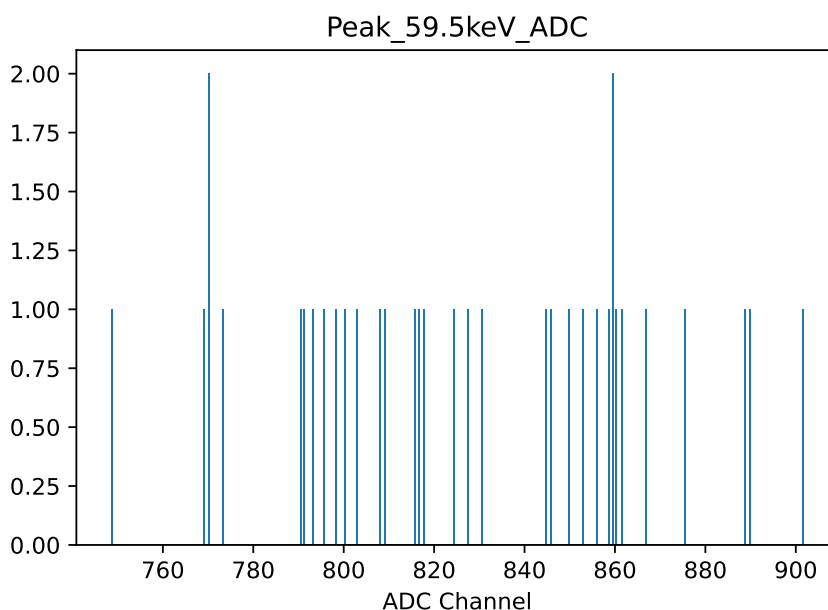


図 3.13: 高比抵抗チップの (0,0)~(0,34) のアナログ出力における 59.5 keV ピーク位置のばらつき

また、ピクセルごとのカウントレートを調べると図 3.14、3.15 のようになっていた。カウントレートは、Am241 の 59.5 keV ピークのカウント数を LiveTime で割った値とする。カウント数はピークのフィッティングを行い、中心値から  $\pm 3\sigma$  の範囲のイベント数を足し合わせた値として定義する。図 3.14 はカウントレートのヒストグラム、図 3.15 はピクセルナンバーに対するカウントレートとその統計誤差を示したものである。

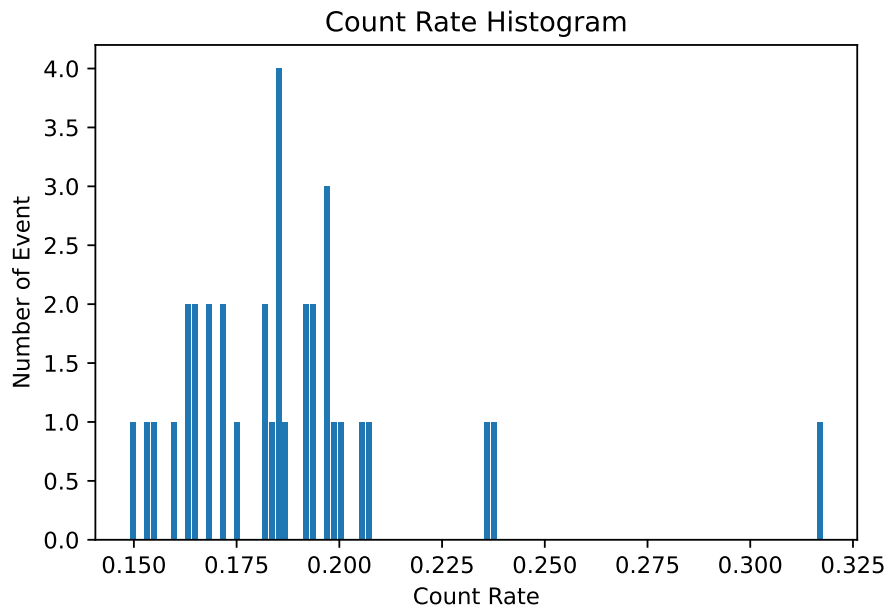


図 3.14: 高比抵抗チップの (0,0) から (0,34) の 59.5 keV のカウントレートヒストグラム

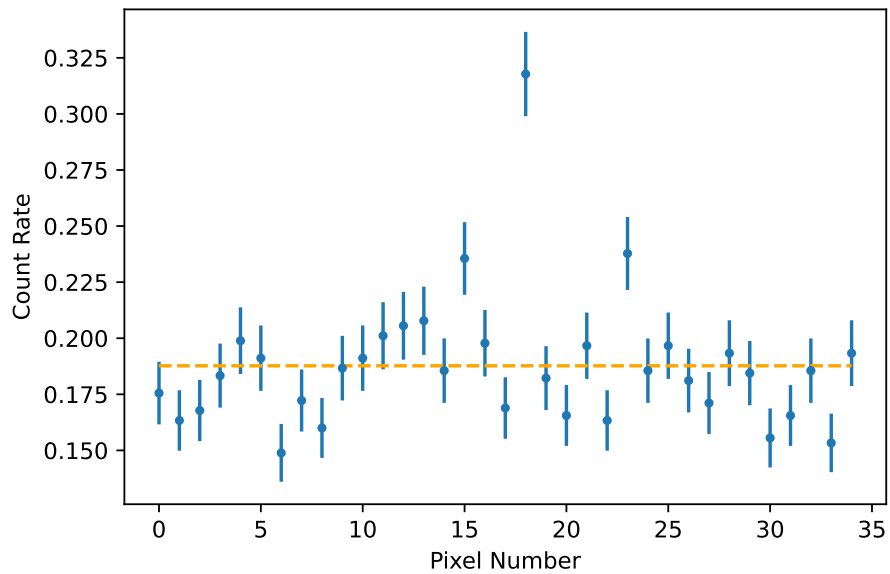


図 3.15: 高比抵抗チップのピクセルごとの 59.5 keV のカウントレート

カウントレートの平均値は 0.188 (図中の黄色の線)、標準偏差は 0.030 だった。図 3.15 より、ピクセル (0,18) を除いたピクセルではカウントレートに大きなばらつきは見られなかった。(0,18) ピクセルは他のピ

クセルと比較してエネルギー分解能が悪く、足し合わせるイベントの範囲が広がってしまったことでカウントレイトが高くなったと考えられる。

### 3.4 エネルギー較正曲線・分解能

3.3で取得したエネルギースペクトルのピークのガウシアンフィッティングを行い、エネルギー較正曲線を作成した。Co57は誤差関数を用いてコンプトンエッジのフィットも行き、Am241の13.9 keV付近はトリプルガウシアンでフィットした。エネルギー較正曲線はエネルギーの2次式でフィッティングした。またFWHMの値もプロットし、これらはエネルギーの平方根の比例式でフィッティングを行った。なお、FWHM(半値全幅)とは検出器のエネルギー分解能を表す際に用いられる数値であり、ピークの極大値の半分のところの幅にあたる。ガウシアン $\sigma$ を用いると、 $FWHM = 2.35\sigma$ と表せる。

#### 3.4.1 アナログのエネルギー較正曲線・分解能

アナログ出力のエネルギースペクトルからピークを中心値とFWHMを求めてプロットした。図3.16が低比抵抗チップ、図3.17が高比抵抗チップの結果である。

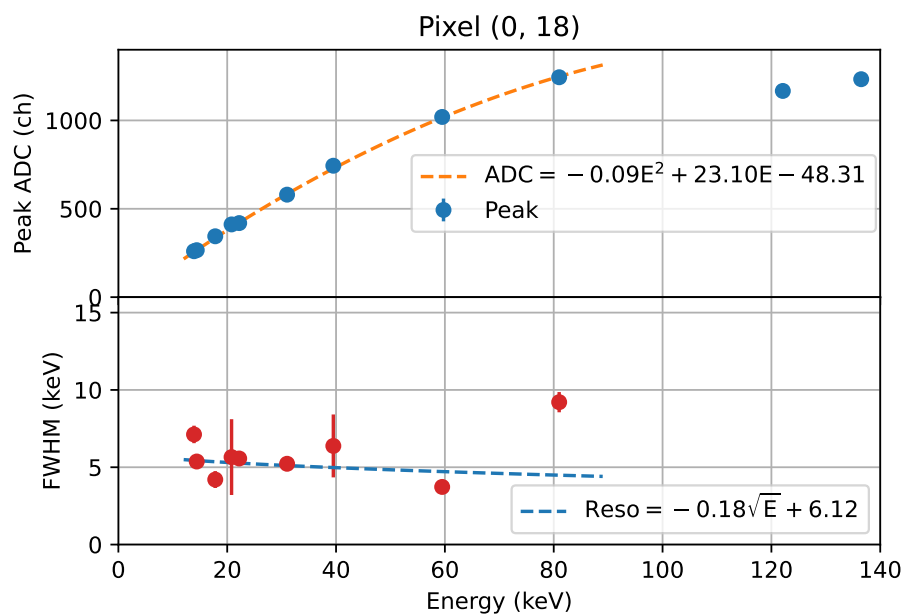


図 3.16: 低比抵抗チップの (0,18) ピクセルのエネルギー較正曲線と分解能 (上縦軸: ピーク中心の ADC、下縦軸: FWHM(keV)、横軸: エネルギー (keV))

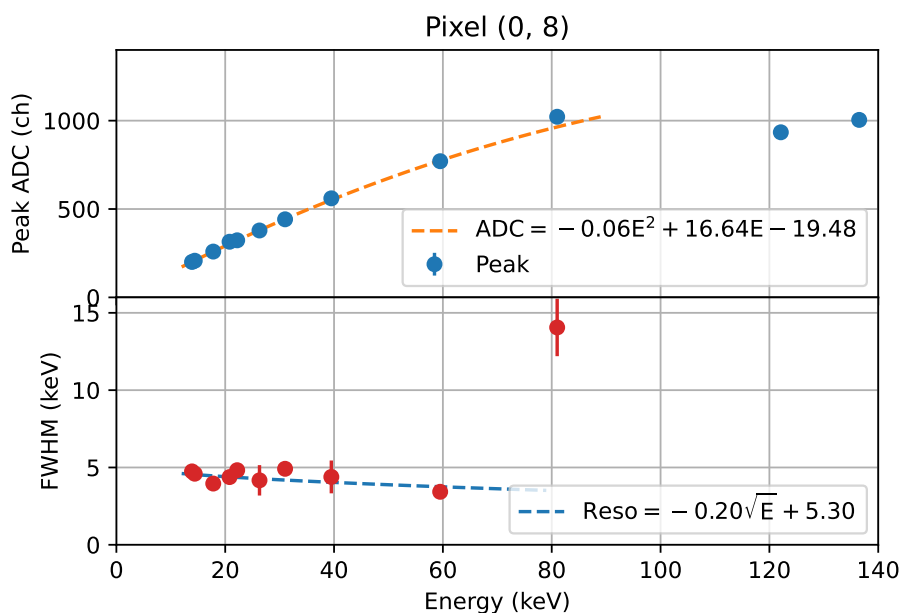


図 3.17: 高比抵抗チップの (0,8) ピクセルのエネルギー較正曲線と分解能（上縦軸：ピーク中心の ADC、下縦軸：FWHM(keV)、横軸：エネルギー (keV)）

較正曲線から低比抵抗チップと高比抵抗チップのゲインが同程度のものであると分かる。どちらのチップでも 60 keV 付近から線形性がなくなっており、80 keV 付近でサチュレーションしている。これはアナログ出力部のバッファのサチュレーションの影響であると考えられる。

また各エネルギーにおけるエネルギー分解能 (FWHM) は以下の通りである。

表 3.6: エネルギー分解能 (アナログ)

エネルギー (keV)	FWHM(keV)	
	低比抵抗	高比抵抗
13.9	7.12 ± 0.57	4.75 ± 0.19
14.4	5.37 ± 0.17	4.60 ± 0.24
17.8	4.20 ± 0.55	3.96 ± 0.16
20.8	5.66 ± 2.45	4.38 ± 0.43
22.2	5.57 ± 0.28	4.83 ± 0.19
31.0	5.22 ± 0.26	5.02 ± 0.50
39.5	6.38 ± 2.03	4.39 ± 1.06
59.5	3.73 ± 0.25	3.43 ± 0.22
81.0	9.21 ± 0.65	14.1 ± 1.9

FWHM の値はポアソン統計ならば  $\sqrt{E}$  に比例すると考えられるが、どちらのチップでも値がばらついておりフィッティングができなかった。これは、エネルギーの成分によらないノイズ成分が支配的であるため、



$\sqrt{E}$  に比例せず一定になっていると考えられる。13.9 keV は 11.9 keV の成分をフィットできないことによってピークが広がり、FWHM が大きくなっていると考えられる。59.5 keV の FWHM が他のエネルギーに対して小さくなっていることも検出器の特性などが関係している可能性があるため、さらに応答の理解を進めていく必要がある。また、81.0 keV の FWHM が大きな値になった原因として、81.0 keV によって発生した電荷が 1 つのピクセルの電極に集まりきらず、低エネルギー側に流出してピークが広がったのではないかと考えられる。

### 3.4.2 デジタルのエネルギー較正直線・分解能

デジタル出力のエネルギースペクトルからもアナログ測定と同様にしてエネルギー較正直線・分解能を求め、プロットした。図 3.18 は低比抵抗チップの結果である。上はエネルギーに対するピーク中心の ToT 値をプロットしており、下はデジタル測定とアナログ測定（低比抵抗チップ）の FWHM(keV) である。

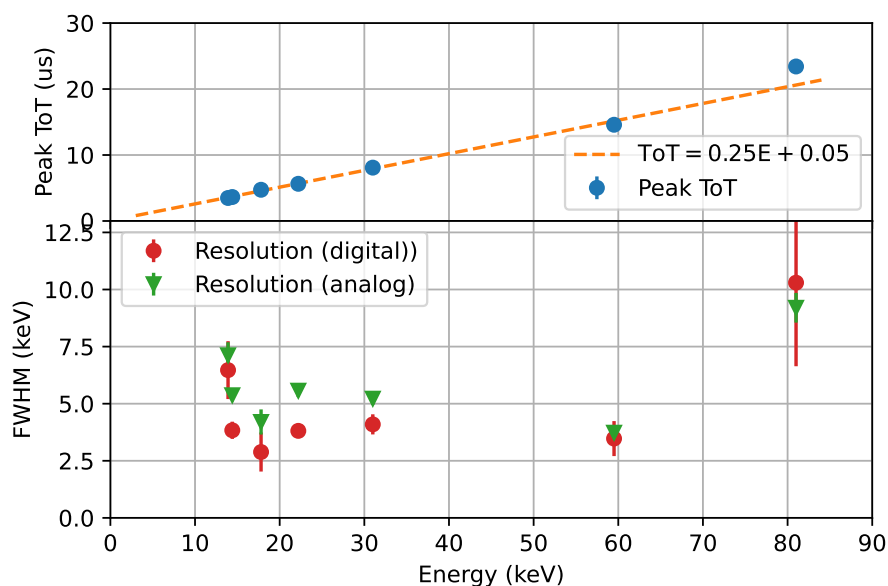


図 3.18: 低比抵抗チップ (0,18) ピクセルのデジタル測定のエネルギー較正直線と分解能（上縦軸：ピーク中心の ToT( $\mu$ s)、下縦軸：FWHM(keV)、横軸：エネルギー (keV))

アナログ測定と異なり出力部のサチュレーションの影響を受けないため、エネルギー較正の式は直線になっている。また、統計誤差の大きい 81.0 keV を除き FWHM はアナログよりも小さくなっており、エネルギー分解能が良いことが分かった。81.0 keV のピーク位置がずれているのは、ToT カウンターのラッピングによる影響を受けて低エネルギー側に現れたことでピークがよく定まらない可能性があると考えられる。

表 3.7: エネルギー分解能 (デジタル)

エネルギー (keV)	FWHM (keV)
13.9	6.47 ±1.27
14.4	3.83 ±0.38
17.8	2.88 ±0.85
22.2	3.81 ±0.28
31.0	4.09 ±0.44
59.5	3.47 ±0.77
81.0	10.30 ±3.66

## 3.5 空乏層厚

### 3.5.1 カウンtrateの電圧依存性

実際に空乏層の厚みを測定する前に、カウントレートの電圧依存性を調べ空乏層の広がりを確認した。電圧が高いほど空乏層が広がるため、反応確率が高くなりカウントレートも増加すると考えられる。低比抵抗チップで Cd109 のエネルギースペクトルのアナログ測定を行い、22 keV ピークのカウント数を測定時間 (LiveTime) で割った値をカウントレートとする。カウント数はピークのガウシアンフィッティングを行い、中心値から ±3 σ の範囲のイベント数を足し合わせた値として定義する。電圧は 5 V から 180 V まで変化させ、150 V までは 25 V、150~180 V では 10 V 刻みとした。また、空乏層厚の測定では Am241 を用いたため Am241 のカウントレートもグラフにした。低比抵抗チップは須田先生のデータ ((0,18) ピクセルのアナログ出力) を、高比抵抗チップは著者のデータ ((0,8) ピクセルのアナログ出力) を用いた。結果を図 3.19、3.20、3.21 に示す。

<結果>

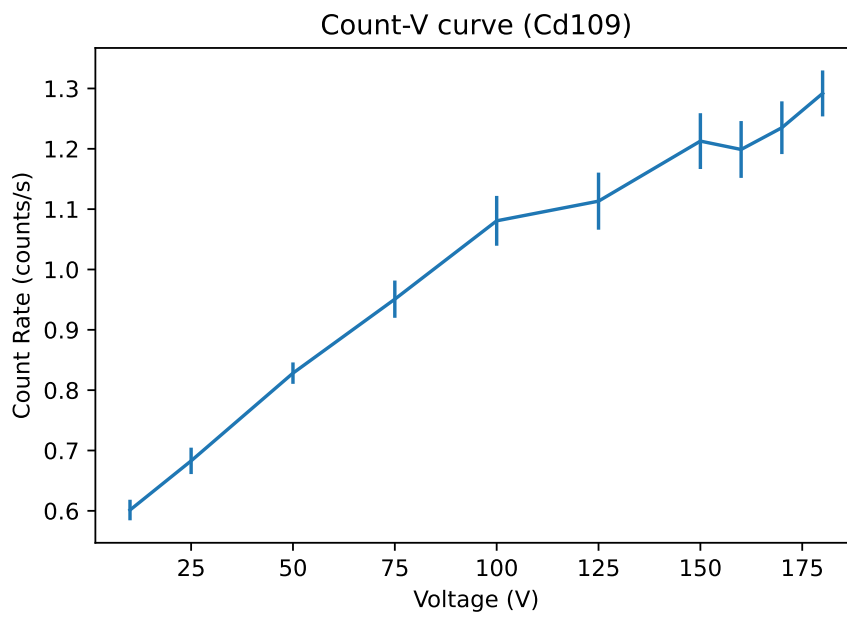


図 3.19: 低比抵抗チップ (0,18) ピクセルのカウントレートの電圧依存性 (Cd109)

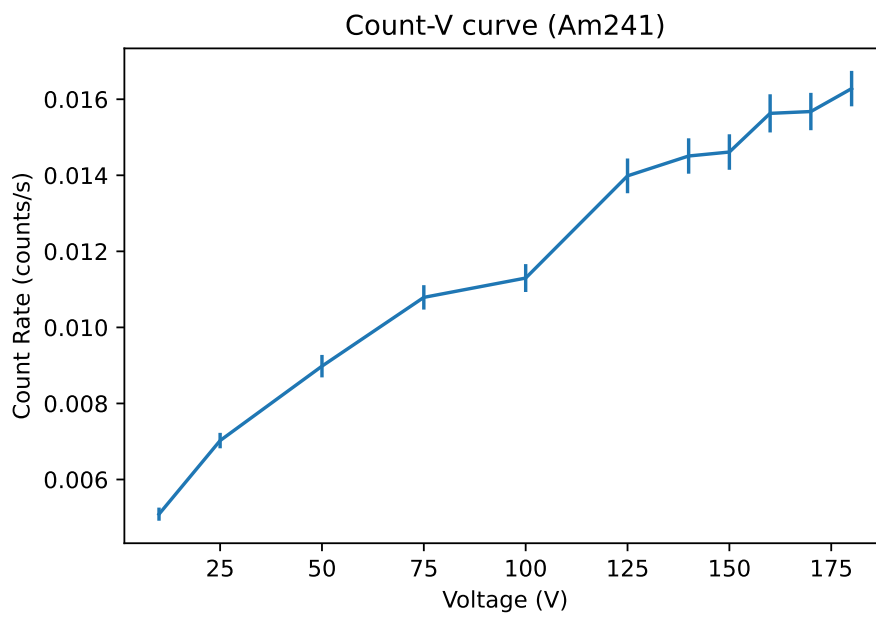


図 3.20: 低比抵抗チップ (0,18) ピクセルのカウントレートの電圧依存性 (Am241)

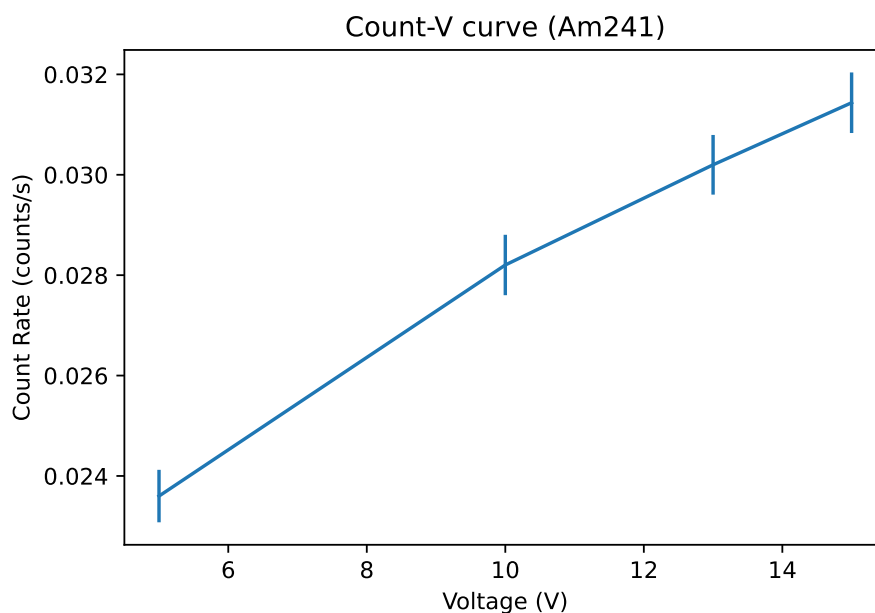


図 3.21: 高比抵抗チップ (0,8) ピクセルのカウントレートの電圧依存性 (Am241)

図 3.19、3.20、3.21 より、電圧が増加するにつれてカウントレートも増加していることが分かる。低比抵抗チップは Cd109 でも Am241 でも 150 V 付近からは増加が緩やかになっており、空乏層がこれ以上は広がらないと考えられる。

### 3.5.2 空乏層測定の実理・セットアップ

#### <実理>

空乏層の厚さは Am241 の 59.5 keV のカウントレートをを用いて、以下の式で求める。

$$\text{カウントレート} = \text{崩壊数 (Bq)} \times 59.5 \text{ keV の放出確率} \times \Omega \times (1 - \exp(-\rho\sigma d)) \times \exp(-\rho_{air}\sigma_{air}L) \quad (3.2)$$

59.5 keV のカウントレートをを用いる理由としては、透過力が高いため空気に吸収されにくいこと、単独ピークであるため他のエネルギーの影響を受けないことなどが挙げられる。

空乏層の厚さは式中の  $d$  で表され、 $\rho$  はシリコンの密度、 $\sigma$  はシリコンにおける 59.5 keV の光電吸収断面積である。崩壊数は、2010 年 3 月 10 日時点での崩壊数 3 MBq ( $\pm 20\%$  の誤差あり) から以下のように求める。

$$\text{現在の崩壊数} = \text{崩壊数 (2010.3.10)} \times 0.5^{\frac{\text{日数}}{\text{半減期}}} \quad (3.3)$$

日数は 2010 年 3 月 10 日から測定日までの日数、半減期は Am241 の値を用いる。また、 $\Omega$  は 1 ピクセルの 1 辺の長さ  $l$  と、線源と検出器間の距離  $L$  を用いて以下のように求められる。

$$\Omega = \frac{l^2}{4\pi L^2} \quad (3.4)$$

また、空気でコンプトン散乱した場合測定しているピクセルには散乱光子が入ってこないと仮定して、空気による吸収・散乱の項を含めている。 $\rho_{air}$  は空気の密度、 $\sigma_{air}$  は空気の反応断面積である。

今回計算に用いた各パラメータの値は表 3.8 のとおりである。

表 3.8: 各パラメータ

パラメータ	数値
崩壊数 (2010.3.10) (Bq)	$3 \times 10^6$
半減期 (日)	$1.5785 \times 10^5$
59.5 keV の放出確率	0.3578
$l$ (mm)	0.25
$L$ (mm)	31.54
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.329
$\sigma$ (cm <sup>2</sup> /g)	0.1321
$\rho_{air}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$1.176 \times 10^{-3}$
$\sigma_{air}$ (cm <sup>2</sup> /g)	0.18821

カウントレートはアナログ出力の Am241 の 59.5 keV ピークから算出し、方法は 3.5 章で説明した方法と同じものを用いた。ただし、足し合わせるイベントの範囲は  $\pm 5\sigma$  とし、測定時間には Livetime (実際の測定時間からデッドタイムを除いたもの) を用いた。図 3.22 に各電圧での測定結果とフィッティングの様子を示す。緑の線の間が足し合わせた部分である。

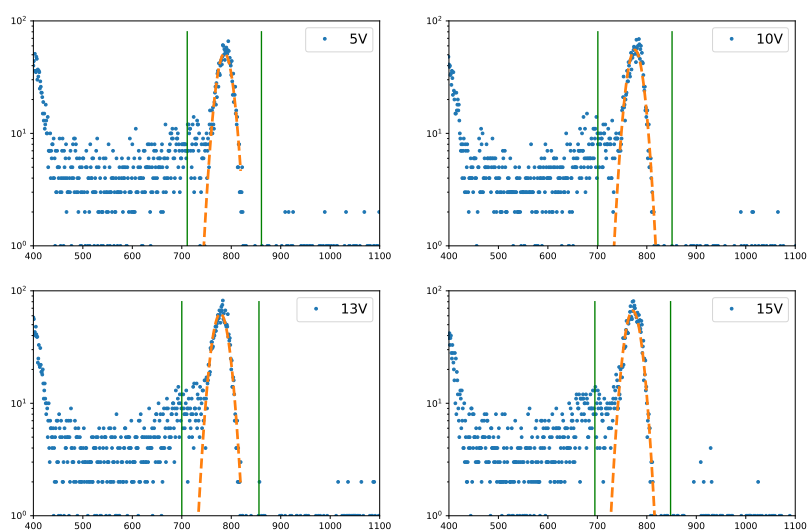


図 3.22: 各電圧における Am241 のエネルギースペクトル測定結果とフィッティングの様子（高比抵抗チップ (0,8) ピクセル）

#### <セットアップ>

本測定は、図 3.23 のようなセットアップで行った。線源は Am241 を使い、AstroPix から 3cm の位置に設置した。ほかの測定のように線源を直に貼り付けない理由は、式 3.4 が無限遠からの放射線を想定しているためである。また、全ピクセルに均等に放射線が当たるように、AstroPix の中心と線源の中心が一致するように取り付けた。

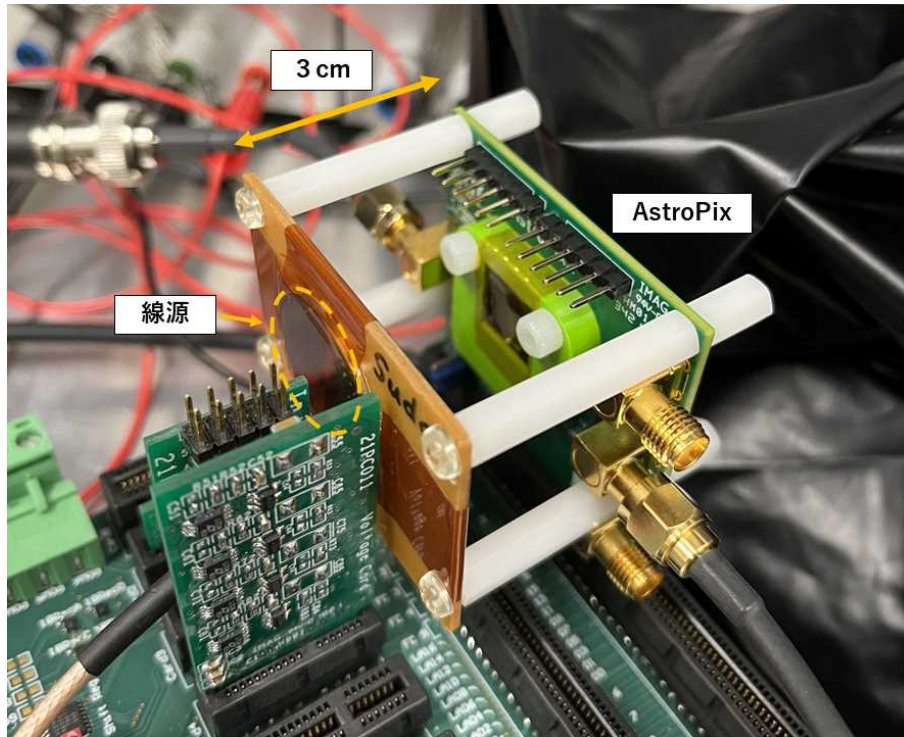


図 3.23: 空乏層厚測定の設定アップ

### 3.5.3 結果

#### <低比抵抗チップと高比抵抗チップのスペクトル>

空乏層の計算に利用した、低比抵抗チップと高比抵抗チップの 15 V でのエネルギースペクトルを比較する (図 3.24、3.25)。低比抵抗チップは (0,18) ピクセルで 155,000 秒、高比抵抗チップは (0,8) ピクセルで 86,400 秒測定した結果である。この測定時間は 59.5 keV のピークが最低 1000 イベントを超えることを目安に決めている。

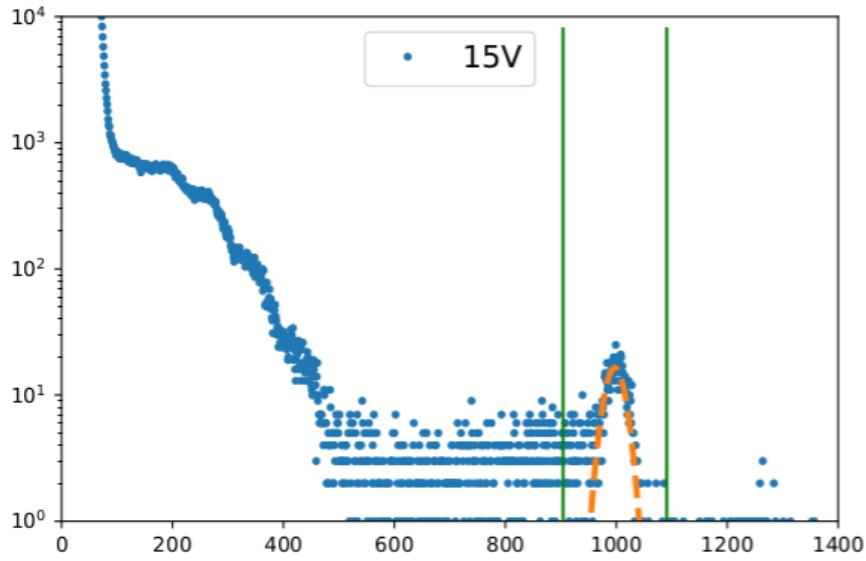


図 3.24: 低比抵抗チップ (0,18) ピクセルの 15 V における Am241 のエネルギースペクトル

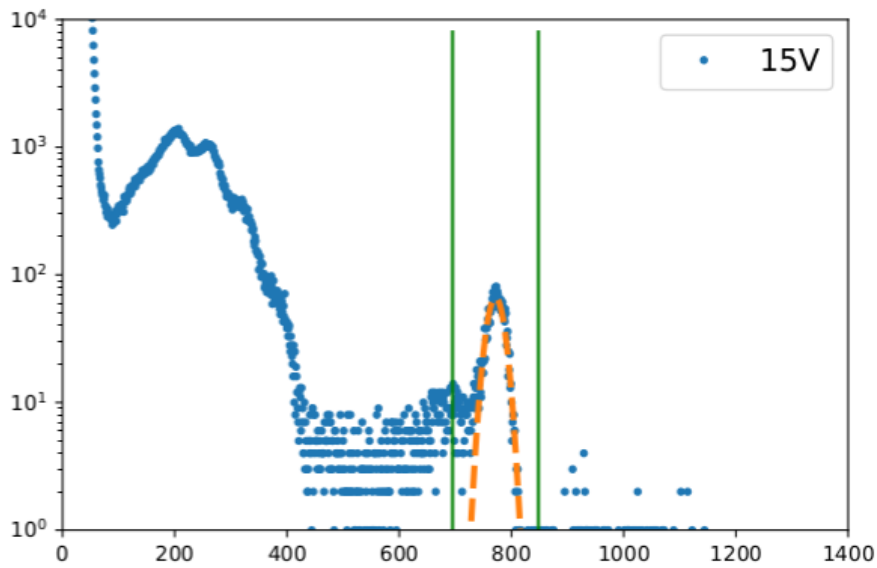


図 3.25: 高比抵抗チップ (0,8) ピクセルの 15 V における Am241 のエネルギースペクトル

これより、高比抵抗チップは低比抵抗チップの半分程度の測定時間であるが、59.5 keV のイベント数は低比抵抗チップよりも多くなっていることが分かる。よって高比抵抗チップの方がピーク強度が強くなっていることが分かる。

<低比抵抗チップの空乏層厚>



低比抵抗チップでは、(0,0) と (0,34) ピクセルで測定を行った (図 3.26、3.27)。高比抵抗チップの結果を比較するために、電圧は 5 V、10 V、15 V に設定した。また、低比抵抗チップの空乏層厚は須田先生による測定データ (2022 年 7 月測定) があるため、その結果とも比較した。

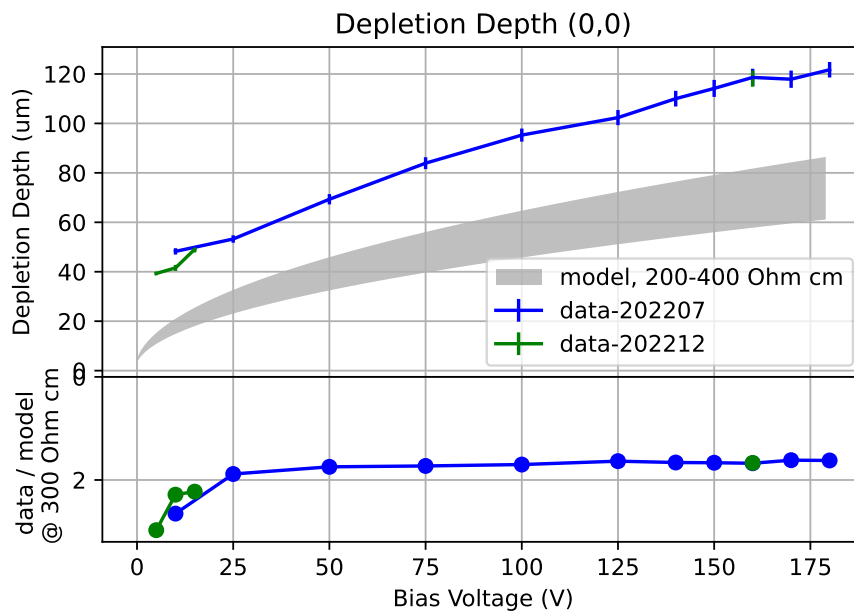


図 3.26: 低比抵抗チップ (0,0) ピクセルの空乏層厚の電圧依存性

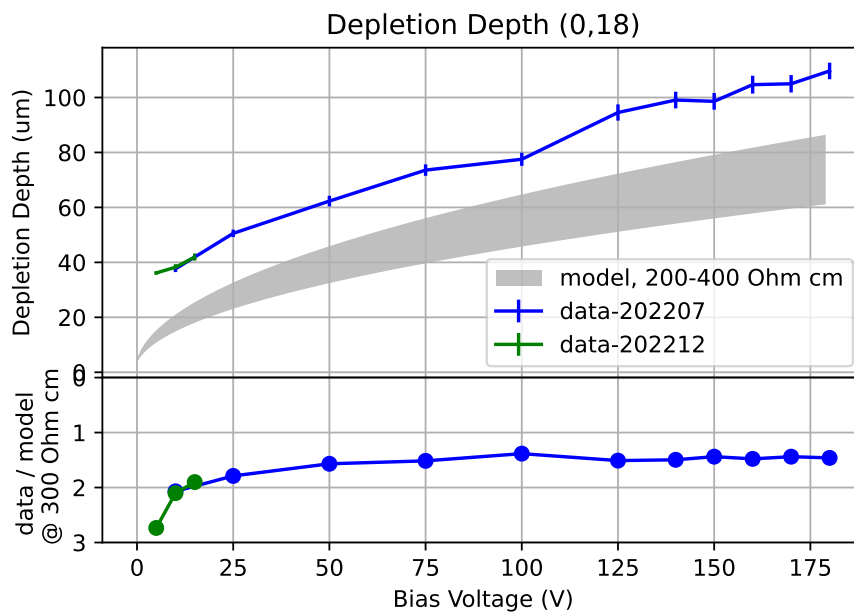


図 3.27: 低比抵抗チップ (0,18) ピクセルの空乏層厚の電圧依存性

緑のグラフが著者の測定、青のグラフが須田先生の測定結果である。図の上半分は電圧と空乏層の関係、下半分は式 2.3 で計算される理論値とのずれを表している。比抵抗値には  $\pm 100 \Omega \text{ cm}$  程度の不定性があることから、 $200 \Omega \text{ cm}$  から  $400 \Omega \text{ cm}$  のときの理論値を図中の灰色の部分で示している。どちらのピクセルも理論曲線に沿っているが、理論値よりも 1.5~2 倍程度大きい値を示していた。

また測定の再現性について、低比抵抗チップの (0,0) ピクセルでは 10 V の結果が 7 月と 12 月で 9% ずれていたため 160 V でも測定を行った。160 V では両者のずれは 0.4% であり、統計誤差の範囲内で一致することが確認できた。(0,18) ピクセルの 10 V の値のずれは 1.6% であり、これは統計誤差の範囲内で一致している。これより、セットアップを一度崩しても測定結果の再現が可能であることが確認できたが、電圧が低い領域ではセンサの動作が不安定になり再現が難しくなった可能性が考えられる。

### <高比抵抗チップの空乏層厚>

高比抵抗チップでは、(0,0)、(0,8)、(0,22)、(0,34) ピクセルで測定を行った。(0,0) と (0,22) は 10 V のみ、(0,8) と (0,34) は 5 V、10 V、15 V ((0,8) ピクセルは 13 V も) で測定した (図 3.28)。

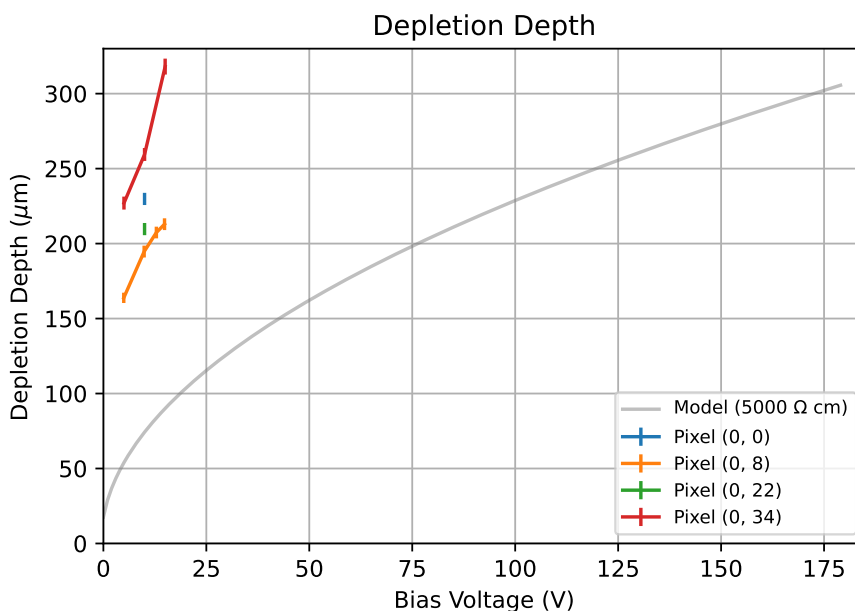


図 3.28: 高比抵抗チップ (0,0),(0,8),(0,22),(0,34) ピクセルの空乏層厚の電圧依存性

図 3.28 の灰色の線は、比抵抗  $5000 \Omega \text{ cm}$  の場合の予想値である。実際の測定結果はこの予想値を大きく上回っており、さらにピクセルごとにばらつきがみられた。空乏層厚の値は予想値と異なっているが、低比抵抗チップと同様に電圧の増加による空乏層の広がり確認できた。

### 3.5.4 考察

まず空乏層の広がりについては、低比抵抗・高比抵抗どちらのチップにおいても電圧の増加とともに広がっていると考えられる。どちらのチップでも理論値を上回っていた原因の一つとして、崩壊数 3 MBq の

誤差が±20%であることが考えられる。そこで、崩壊数を+20%の3.6 MBqとして計算した結果が図 3.29、図 3.30、図 3.31 である。

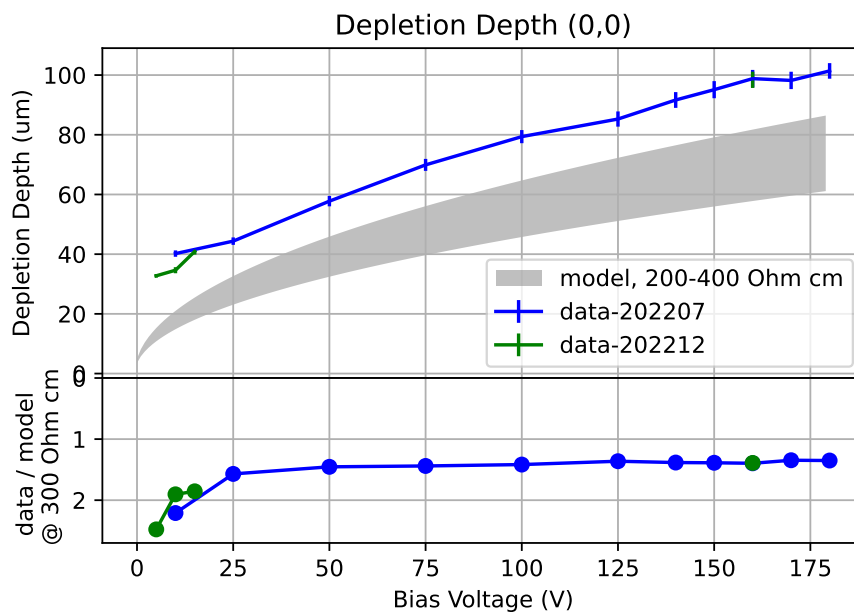


図 3.29: 低比抵抗チップ (0,0) ピクセルの空乏層厚 (崩壊数 +20%)

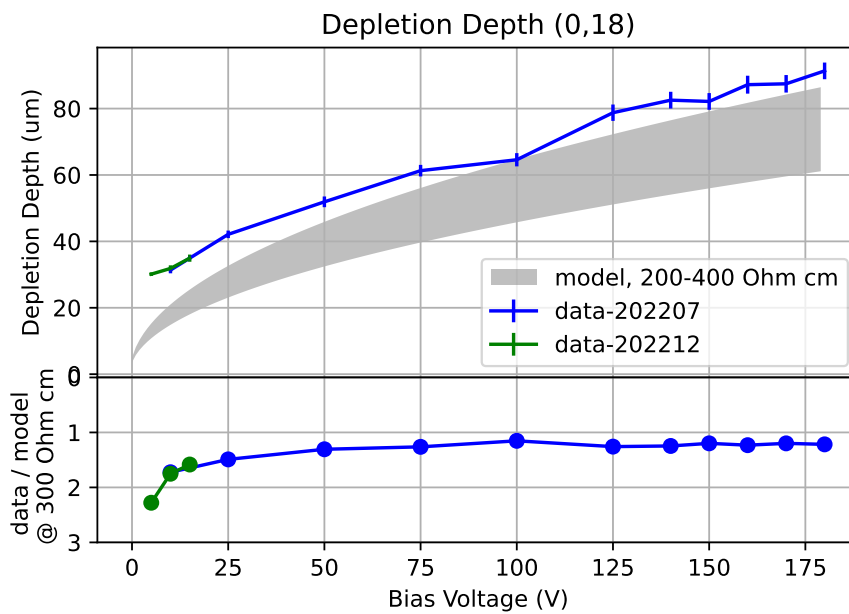


図 3.30: 低比抵抗チップ (0,18) ピクセルの空乏層厚 (崩壊数 +20%)

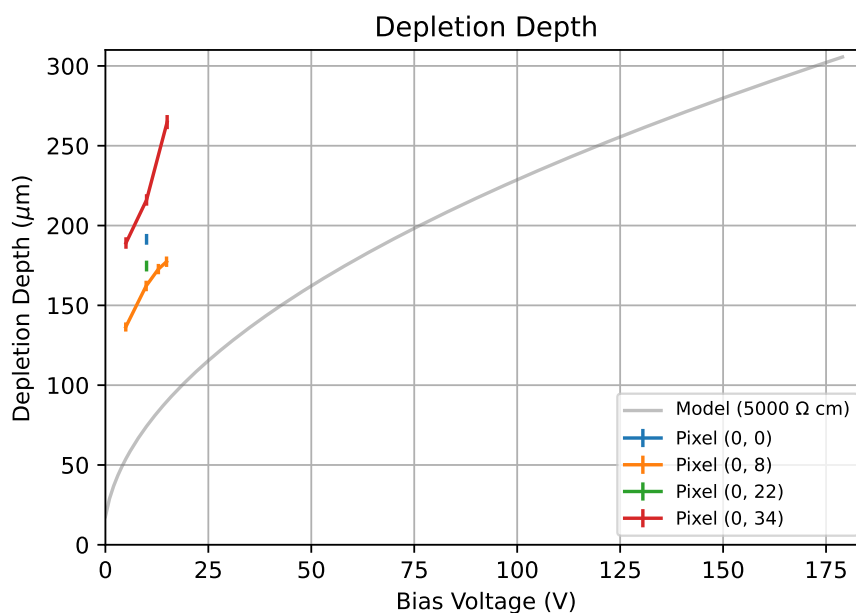


図 3.31: 高比抵抗チップ (0,0),(0,8),(0,22),(0,34) ピクセルの空乏層厚 (崩壊数 +20%)

依然として測定値が理論値を上回っているが、低比抵抗チップの (0,18) ピクセルのように理論値の範囲に収まりそうな部分も見られた。

また、低比抵抗チップと高比抵抗チップの空乏層厚の比は以下のようになっていた。

表 3.9: 低比抵抗チップと高比抵抗チップの空乏層厚の比

電圧 (V)	5	10	15
理論値の比	4.08	4.08	4.08
平均値の比	5.31	5.75	5.95
低比抵抗 (0,18) と高比抵抗 (0,8) の比	4.53	4.58	4.36

ここでは、(高比抵抗チップでの空乏層厚) / (低比抵抗チップでの空乏層厚) を比としている。理論値の比は 300 Ωcm と 5000 Ωcm を使って求めている。平均値の比とは、低比抵抗チップでは (0,0) と (0,18)、高比抵抗チップでは (0,8) と (0,34) の測定値を平均した値を比にしたものである。3つ目は平均ではなくノイズの少なかった (0,18) と (0,8) のみで比を取っている。どちらの比も理論値比より 7% から 46% 大きくなっているが、これは比抵抗値の不定性を考慮すると説明できる可能性がある。例えば 201 Ωcm と 6650 Ωcm (それぞれ 33% 変化) として計算すると、比は 5.75 になる。これより、データと理論との間に相違が見られるものの、相対的に見ると空乏層厚は正しく発達していると考えられる。

## 第4章 検出器モンテカルロシミュレーション

第3章の測定で得られたエネルギースペクトルについての理解を深めるために、MEGAlib を用いてシミュレーションを行った。はじめにシリコン板1枚に対してガンマ線を照射したときの反応を調べ、観測ロケットに搭載される予定の AstroPix を3層重ねた検出器の場合も同様に調べた。

### 4.1 MeV ガンマ線天文学用ライブラリ MEGAlib

MEGAlib とは The Medium-Energy Gamma-ray Astronomy library の略称であり、Geant4 に基づいてガンマ線検出器のシミュレーションとデータ解析を行うソフトウェアツールである。Geant4 とは、モンテカルロ法を用いて粒子と物質の相互作用をシミュレートするためのツールである。MEGAlib は天体物理学のほか医療や環境の分野でも使われており、AMEGO-X 計画でも MEGAlib によるシミュレーションを用いて感度計算などが行われている。

MEGAlib には、`geomega`・`cosima`・`revan`・`mimrec`などのプログラムが含まれている。以下で今回使用した `geomega` と `cosima` と `revan` について簡単に説明する。

#### 4.1.1 `geomega` (Geometry for MEGAlib)

`geomega` では、ジオメトリファイルを読み込んで検出器やその周りの環境を可視化することができる。ジオメトリファイルには材質・体積・検出器のトリガー基準などの情報が記述されており、ここで構築された検出器は他のどのプログラムでも使用することができる。

#### 4.1.2 `cosima` (A Cosmic Simulator for MEGAlib)

`cosima` は粒子と検出器との相互作用のシミュレーションを行うものである。出力された `sim` ファイルには検出器でのヒット位置やデポジットエネルギーなどが記載されており、イベント再構成ツールである `revan` で使用する。

#### 4.1.3 `revan`

`revan` は `cosima` で出力された `sim` ファイルを使い、イベントの再構成を行う。検出器でのヒット位置やデポジットエネルギーを用いて光電吸収やコンプトン散乱、電子-陽電子対生成事象などを再構成し、その情報は `tra` ファイルに出力される。`tra` ファイルには、再構成された相互作用の種類やエネルギー・到来方向などが記述されている。

## 4.2 AstroPix の X 線・ガンマ線に対する応答評価

### 4.2.1 シリコン板 1 枚のジオメトリ

AstroPix の X 線・ガンマ線に対する応答を調べるために、真空中で 1 枚のシリコンの板にあるガンマ線を照射した場合のシミュレーションを行った。使用したジオメトリは、図 4.1 のようなものである。Surrounding Sphere と呼ばれる球を定義し、その中に  $45 \times 45 \times 0.01 \text{ cm}^3$  のシリコンを設置する。今回は、シリコン板は無限に分解能の良い Anger Camera として設定している。シリコンと指定した領域はすべてガンマ線に感度を持つと定義しているため、この場合の空乏層は  $0.01 \text{ cm}$  であると言える。また、Surrounding Sphere と等しい直径のディスクから垂直方向に、ガンマ線が照射されるように設定した。

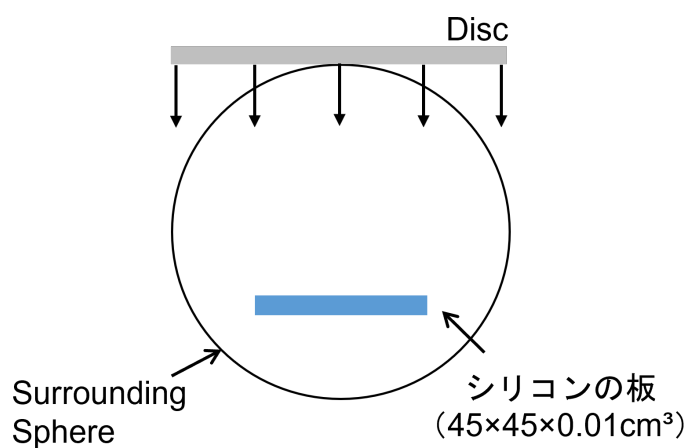


図 4.1: シリコン板 1 枚のジオメトリのイメージ図

### 4.2.2 シミュレーション方法

まず source ファイルと呼ばれるファイルで、シミュレーションに関するパラメータを指定する。

```

Version          1
Geometry         SiBase.geo.setup
CheckForOverlaps 1000 0.01
PhysicsListEM    LivermorePol

StoreCalibrate           true
StoreSimulationInfo      true
StoreOnlyEventsWithEnergyLoss true
DiscretizeHits           true
StoreSimulationInfoIonization false

Run FFPS
FFPS.FileName           CPS100_0
FFPS.Events             35780000

FFPS.Source One
One.ParticleType        1
One.Beam                FarFieldPointSource 0.0 0.0
One.Spectrum            Mono 59.54
One.Flux                10000.0

```

図 4.2: source ファイル

図 4.2 が実際のファイルである。「Geometry」で使用するジオメトリファイルを指定する。「Events」でシミュレーション回数を指定しており、今回は主なエネルギーピークのイベント数が 1000 イベントを超える程度となる、放出確率の  $10^8$  倍とした。また、「.Spectrum」でビームのエネルギーを指定する。「Mono」は単色ガンマ線であることを意味する。解析のしやすさから source ファイルで指定するエネルギーは 1 つずつとし、例えば Am241 の場合 7 つのエネルギー（11.89, 13.90, 17.81, 20.82, 26.34, 33.20, 59.54 keV）それぞれについてシミュレーションを行った。Am241 の各エネルギーの放出確率は表 4.1 の通りである。

表 4.1: Am241 の各エネルギーの放出確率 [11]

エネルギー (keV)	放出確率
11.89	0.00848
13.90	0.1303
17.81	0.1886
20.82	0.0481
26.34	0.0240
33.20	0.00121
59.54	0.3578

次に cosima で source ファイルを指定して実行すると、図 4.3 のような出力結果が得られる。

```

SE
ID 18 87211
TI 0.000123227
ED 59.54
EC 0
NS 0
IA INIT 1 0 0 0.000000000000e+00 -21.08810 17.14631 150.00000 0 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.000 1 -0.00000 -0.00000 -1.00000 0.00000 0.00000 0.00000
59.540
IA PHOT 2 1 7 6.904707517131e-09 -21.08810 17.14631 -56.99792 1 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.000 3 0.04290 0.83771 -0.54442 0.00000 0.00000 0.00000
57.712
HTsim 7 -21.08825 17.14694 -56.99811 59.54000 0.00000e+00 2
SE
ID 19 93009
TI 0.000131318
ED 59.54
EC 0
NS 0
IA INIT 1 0 0 0.000000000000e+00 -20.12018 -12.19298 150.00000 0 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.000 1 -0.00000 -0.00000 -1.00000 0.00000 0.00000 0.00000
59.540
IA PHOT 2 1 7 6.904671963831e-09 -20.12018 -12.19298 -56.99686 1 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.000 3 0.14591 -0.88526 -0.44163 0.00000 0.00000 0.00000
57.712
HTsim 7 -20.12069 -12.19382 -56.99738 59.54000 0.00000e+00 2
SE
ID 20 98457
TI 0.000138975
ED 0.330227
EC 59.2098
NS 0
IA INIT 1 0 0 0.000000000000e+00 17.29052 21.94070 150.00000 0 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.000 1 -0.00000 -0.00000 -1.00000 0.00000 0.00000 0.00000
59.540
IA COMP 2 1 7 6.904694610599e-09 17.29052 21.94070 -56.99754 1 -0.20660 -0.23978 -0.94859
0.66814 -0.74284 0.04225 59.210 3 0.64242 0.74559 -0.17720 0.00000 0.00000 0.00000
0.179
IA ESCP 3 1 0 2.248253534171e-08 -79.19465 -90.03947 -500.00000 1 -0.20660 -0.23978 -0.94859
0.66814 -0.74284 0.04225 59.210 0 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.000
HTsim 7 17.29052 21.94070 -56.99754 0.33023 0.00000e+00 2

```

図 4.3: sim ファイルの一部

「SE」が1つのヒットの区切りである。「IA」から始まる行は生じた相互作用に関する情報が示されており、「INIT」は粒子の初期パラメータ、「PHOT」は光電効果、「COMP」はコンプトン散乱、「ESCP」は粒子が検出器の外に逃れたことを示している。そのあとに相互作用した座標やもとの粒子のエネルギー (keV) などが書かれている。IA の次にくる「HTsim」の行は検出器でのヒットの情報であり、ヒットの座標、デポジットエネルギー (keV)、イベントの時間などが読み取れる。今回はシミュレーション結果をエネルギースペクトルの形で確認するために、デポジットエネルギー（「HTsim」の5番目の要素）をヒストグラムにした。



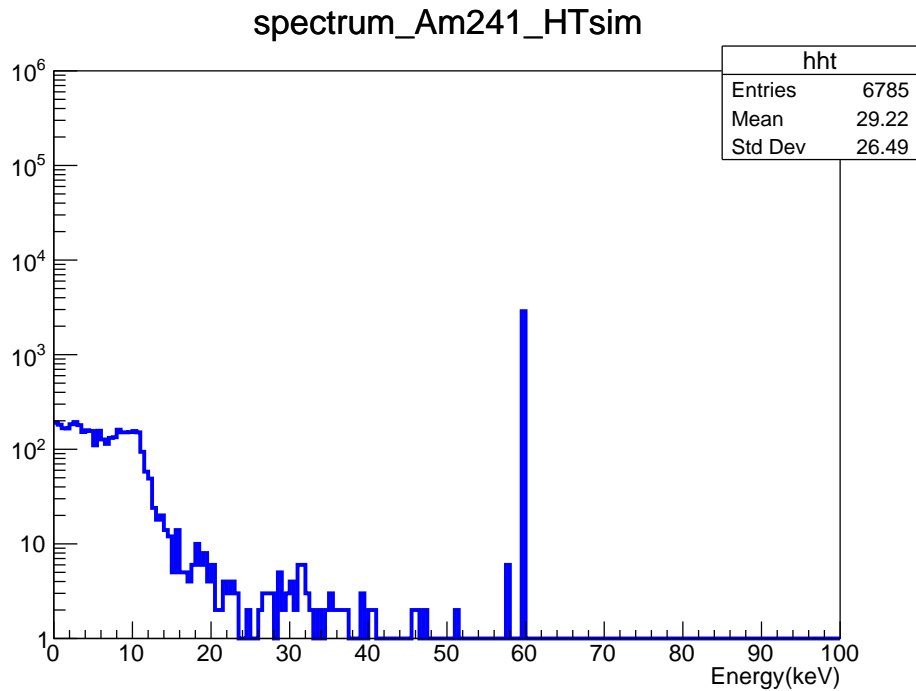


図 4.4: 59.54 keV のシミュレーション結果

図 4.4 は、Am241 の 59.54 keV のシミュレーション結果である。59.54 keV ピークと 11.4 keV 付近のコンプトンエッジ（導出方法は式 3.1 に示してある）が見えていることが分かる。また、密度  $\rho$  ・ 反応断面積  $\sigma$  ・ 厚さ  $d$  から求められるピークのイベント数が 3150 であるのに対し、シミュレーション結果は 2882 であった。理論値の算出には式 4.1 を用いた。

$$\text{全吸収ピークのイベント数} = \text{シミュレーションで振ったイベント数} \times (1 - e^{-\rho\sigma d}) \times \frac{\text{シリコンの面積}}{\text{Disc の面積}} \quad (4.1)$$

ここで、Disc の面積に対するシリコン面積の割合をかけているのは、シリコンに当たらず反応しなかった光子を除くためである。

理論値よりも 9% 小さいのは、光電効果を起こしたが検出器にエネルギーを落としきらずに外に逃げた電子がいるからだと考えられる。そこで、実際にエネルギーを落としきらなかったイベントを数えると 342 イベントだった。方法としては、エネルギーを落としきらなかったイベントは、図 4.5 のような sim ファイルで「PHOT」の次に「ESCP」が来ているイベントであると考えその数を数えた。

```

SE
ID 49 184036
TI 0.000259388
ED 6.51424
EC 53.0258
NS 0
IA INIT 1 0 0 0.000000000000e+00 -6.32288 6.35333 150.00000 0 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.000 1 -0.00000 -0.00000 -1.00000 0.00000 0.00000 0.00000
59.540
IA PHOT 2 1 7 6.904936346254e-09 -6.32288 6.35333 -57.00478 1 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000 0.00000 0.00000 0.000 3 -0.40936 -0.49404 -0.76703 0.00000 0.00000 0.00000
57.712
IA ESCP 3 2 0 5.679462640062e-08 3.43031 -500.00000 -436.90000 3 0.01534 -0.79978 -0.60010
0.00000 0.00000 0.00000 53.026 0 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.000
HTsim 7 -6.32290 6.35324 -57.00487 6.51424 0.00000e+00 2

```

図 4.5: エネルギーを落としきらなかったイベントの出力結果

図 4.6 は、シミュレーション結果（青）とエネルギーを落としきらなかったイベントのみのプロット（緑）を重ね書きした図である。これより、光電効果が起こったにもかかわらず、59.54 keV よりも少ないエネルギーしか落としていないイベントがあることが分かる。

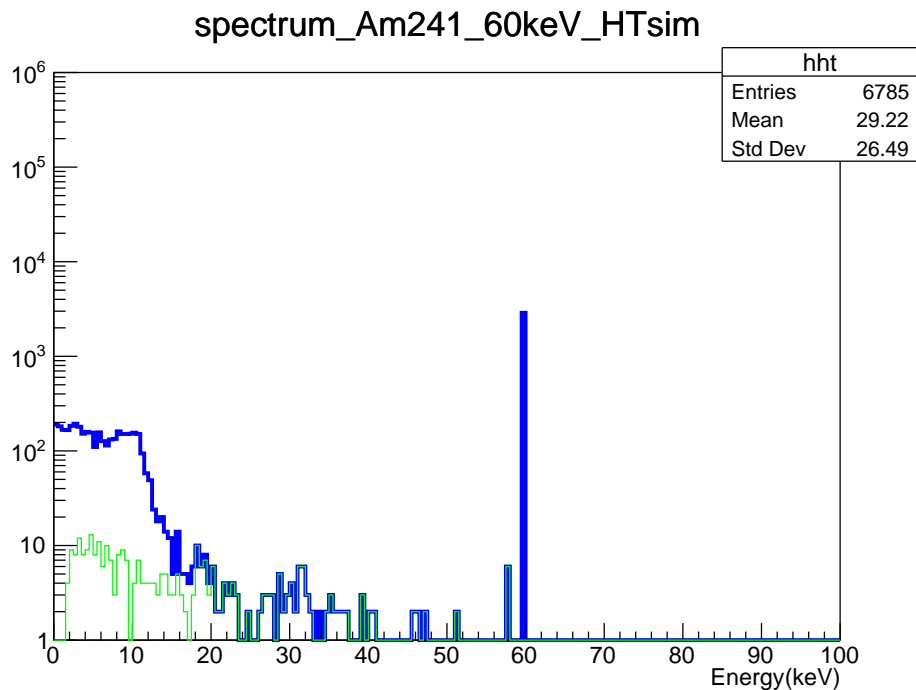


図 4.6: 青:59.54 keV のシミュレーション結果, 緑: エネルギーを落としきらなかったイベント

これよりこのシミュレーション結果が妥当であると考え、ほかのエネルギーについても同様の作業を行った。Am241 の各エネルギーのシミュレーション結果を合わせたものが図 4.7 である。

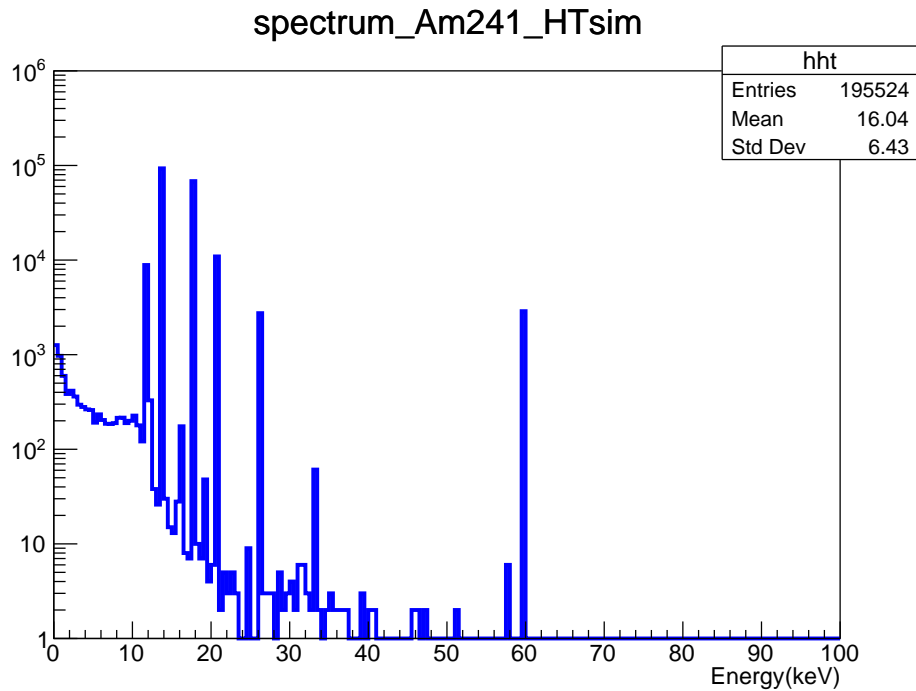


図 4.7: Am241 のシミュレーション結果

次に、実際の測定結果を再現するためにエネルギーの値をガウシアンで揺らがせる。方法としては、第 3 章のアナログ測定で得られた低比抵抗チップの 14.4、22.2、31.0、59.5、81.0 keV におけるガウシアン の  $\sigma$  を用いて線形補間を行い、その式で定義した  $\sigma$  と Python の `random.gauss` 関数を用いてガウシアン の形にした。これらのエネルギーの値を用いた理由は、ノイズや他 X 線の影響が少ないと考えられたためである。次章で各線源のシミュレーション結果をガウシアンで揺らがせた図を紹介する。

### 4.2.3 各線源の結果

Am241、Co57、Ba133、Cd109 についてシミュレーション結果のガウシアンで揺らがせる前後の比較と、第 3 章のアナログ測定結果（低比抵抗チップ (0,18) ピクセル、160 V）との比較を行う（図 4.8～4.17）。シミュレーションの横軸は keV であるため、較正曲線を用いてエネルギーを ADC チャンネルに変換した。シミュレーション結果と測定結果では縦軸のスケールが異なるため、低エネルギー側の主なピークを基準としてシミュレーション結果をスケールしている。

< Am241 >

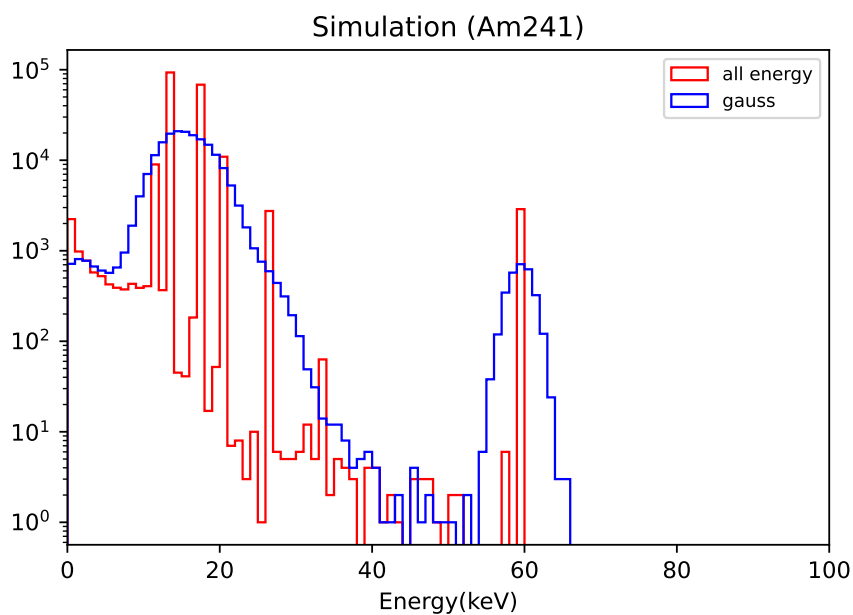


図 4.8: Am241 のシミュレーション結果とガウシアンで揺らがせた図 (赤: 揺らがせる前, 青: 揺らがせたあと)

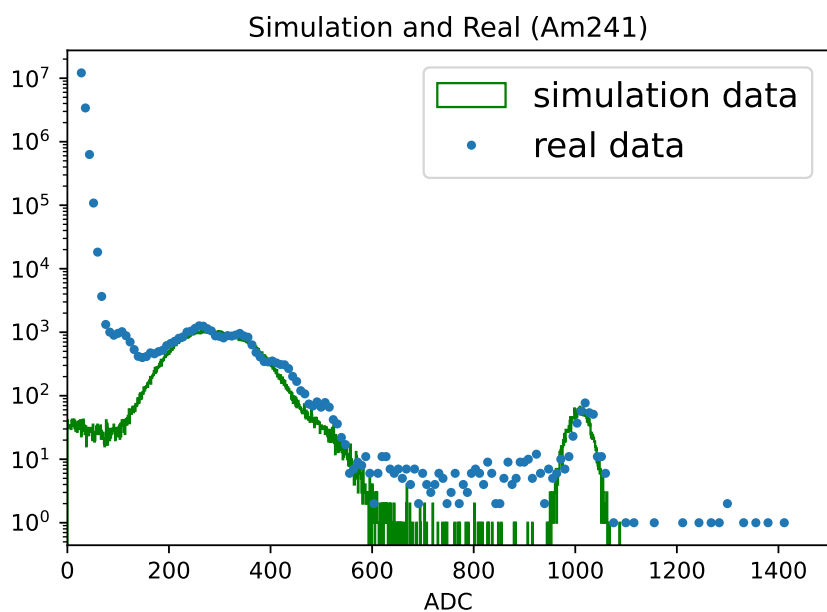


図 4.9: Am241 のシミュレーション結果 (緑) と実測結果 (青)

シミュレーションでは検出器のノイズを考慮していないため低エネルギー側は大きくずれているが、13.9 keV、17.8 keV、59.5 keV のピークの高さが概ね一致していた。今後、400~900 ch の部分の理解が必

要である。

< Co57 >

表 4.2: Co57 の各エネルギーの放出確率 [11]

エネルギー (keV)	放出確率
0.70	0.0155
6.39	0.168
6.40	0.332
7.08	0.071
14.4	0.0915
122.1	0.8551
136.5	0.1071

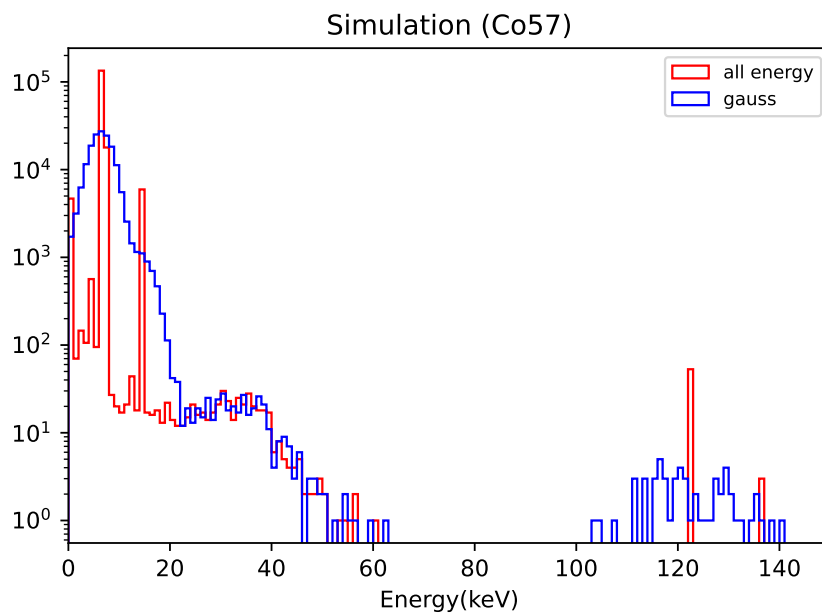


図 4.10: Co57 のシミュレーション結果とガウシアンで揺らがせた図

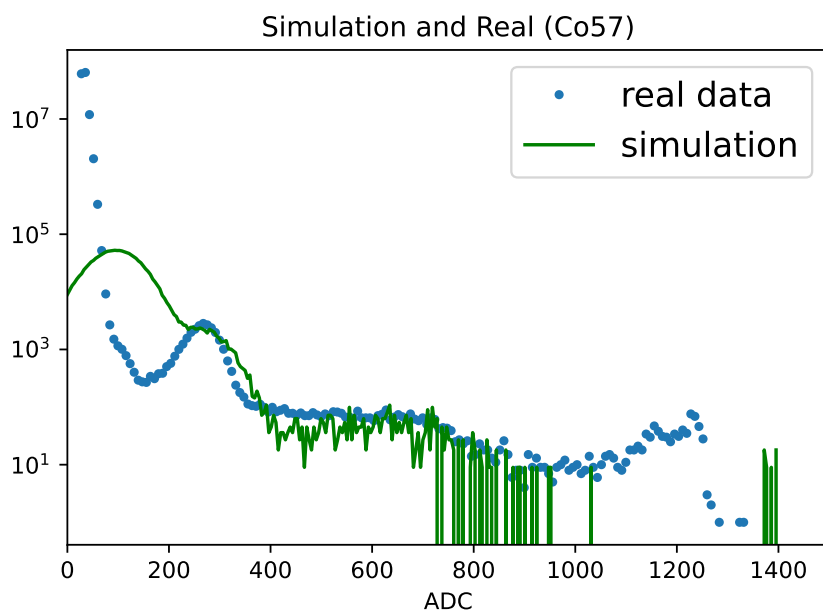


図 4.11: Co57 のシミュレーション結果（青）と実測結果（緑）

Co57 のシミュレーション結果では、122 keV と 136 keV のピークが 1400 よりも大きい位置にあるため重ね書きしていないが、これは測定結果のピーク位置がサチュレーションによってずれているためであると考えられる。3.4 章で示したエネルギー較正直線から分かるように、80 keV 付近よりも大きいエネルギーでは実際よりも低い位置にピークが現れていると予測できる。また、シミュレーションでは 7 keV 付近のピークが見えているが、測定結果ではピークとしては確認できなかった。これは線源の密封容器による吸収の影響を受けていると考えられ、7 keV 付近のエネルギーをシミュレーションしなかった場合の図が図 4.12、4.13 である。

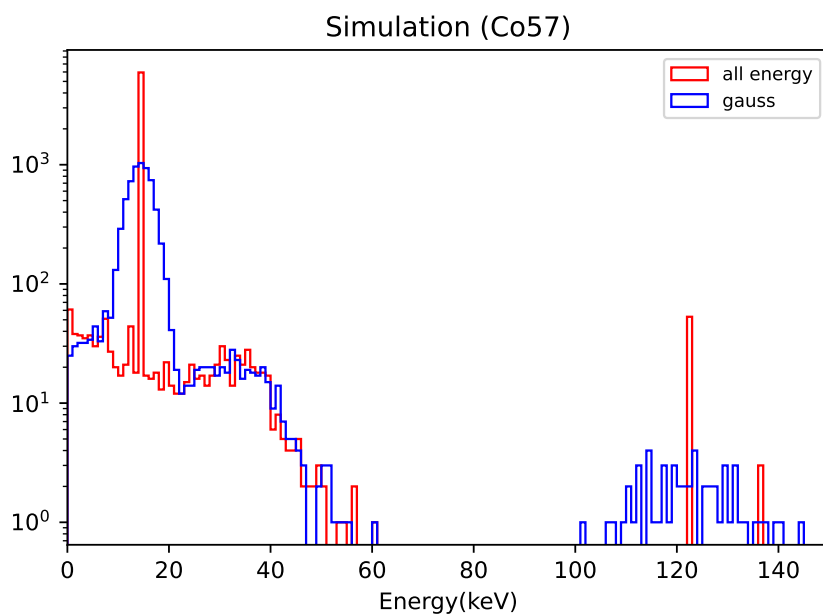


図 4.12: Co57 (7keV なし) のシミュレーション結果とガウシアンで揺らがせた図

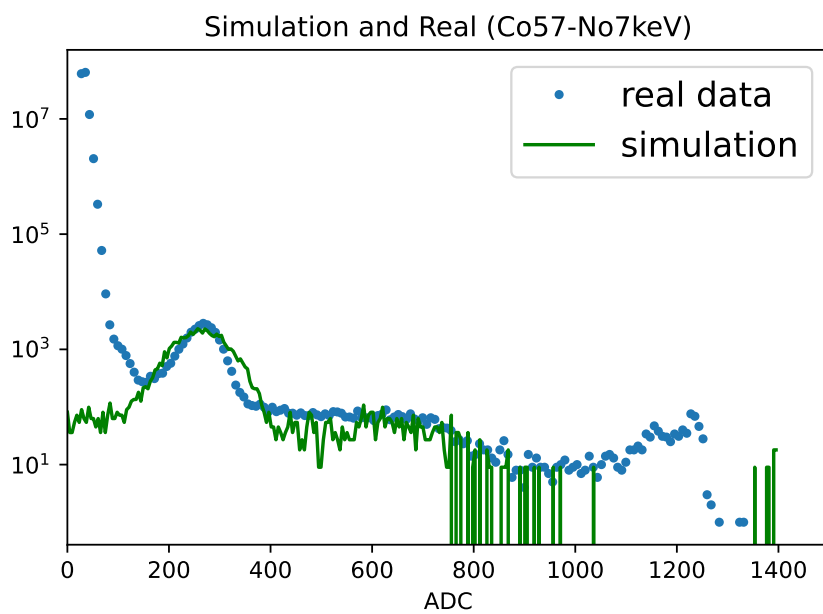


図 4.13: Co57 (7keV なし) のシミュレーション結果 (青) と実測結果 (緑)

これより、7 keV 付近のエネルギーを考慮しない場合シミュレーションと測定結果が近づくことが分かった。

< Ba133 >

表 4.3: Ba133 の各エネルギーの放出確率 [11]

エネルギー (keV)	放出確率
30.63	0.340
30.97	0.628
35.10	0.182
35.90	0.046
53.16	0.0214
79.61	0.0265
81.00	0.329

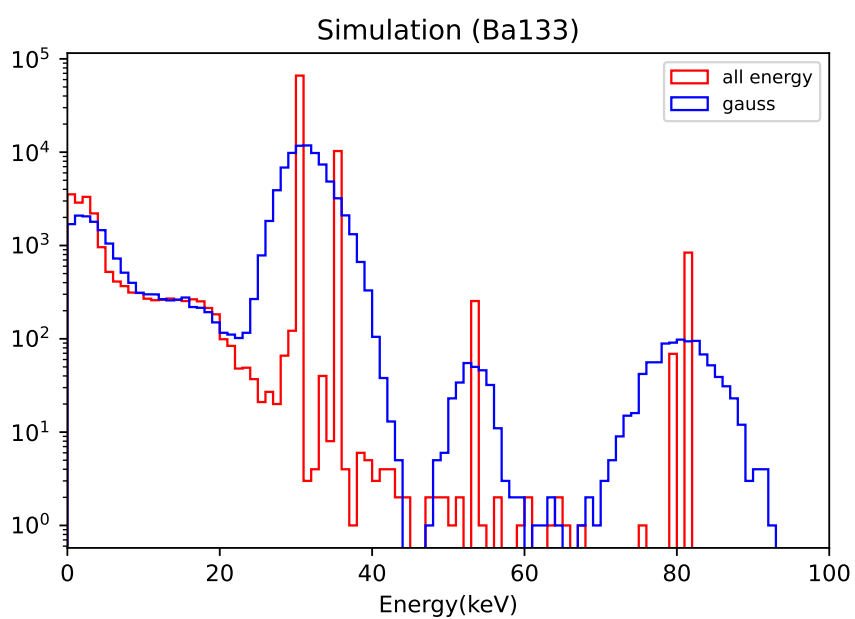


図 4.14: Ba133 のシミュレーション結果とガウシアンで揺らがせた図



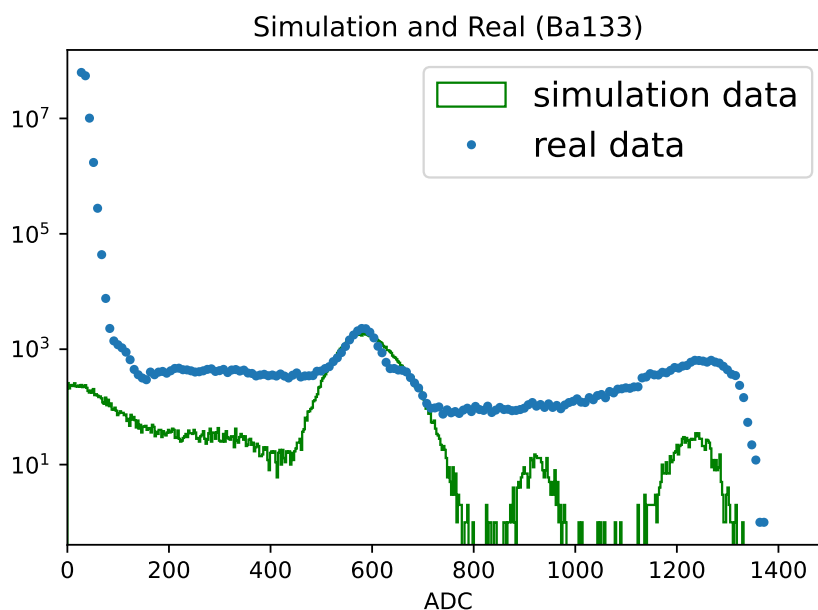


図 4.15: Ba133 のシミュレーション結果（青）と実測結果（緑）

Ba133 のシミュレーション結果では 31.0、53.2、81.0 keV の 3 つのピークが見えている。30 keV 付近では定義した  $\sigma$  が測定よりも大きい値になっていると考えられるため、シミュレーションで 31.0 keV と 35 keV 付近のピークを分解することはできなかった。また、測定結果ではピークでないエネルギーも多く検出されており、53.2 keV のピークは埋もれてしまっている。81.0 keV のピークもシミュレーションと比較して広がっている。

< Cd109 >

表 4.4: Cd109 の各エネルギーの放出確率 [11]

エネルギー (keV)	放出確率
3.2	0.1034
21.99	0.2899
22.16	0.5470
25	0.1514
25.5	0.0263
88.03	0.03626

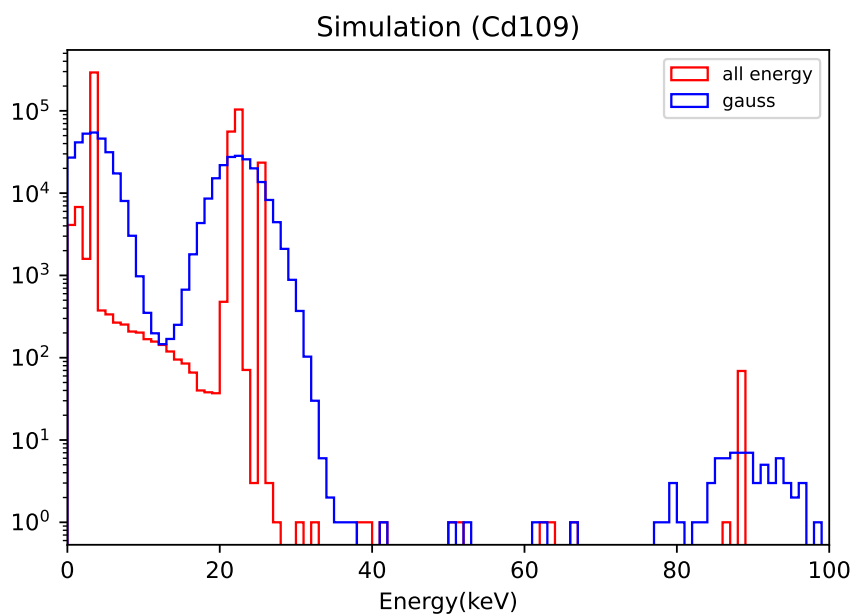


図 4.16: Cd109 のシミュレーション結果とガウシアンで揺らがせた図

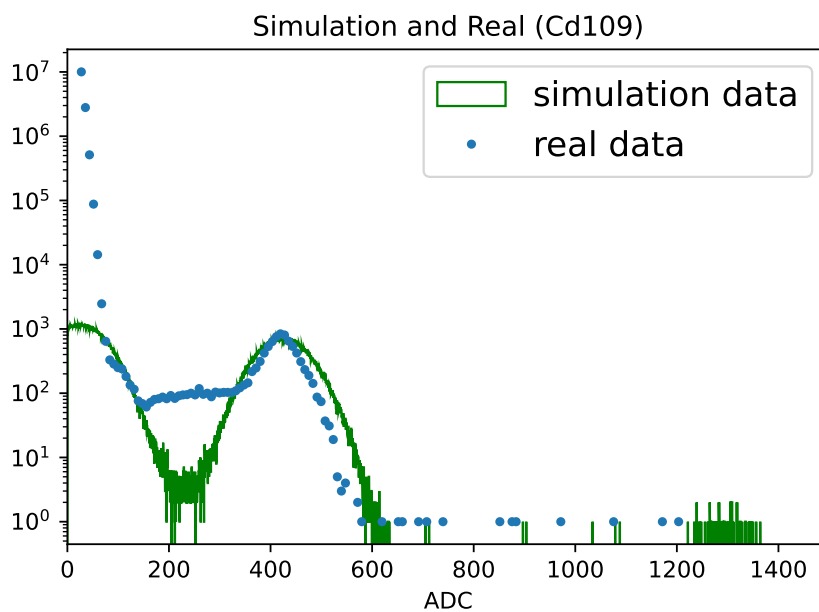


図 4.17: Cd109 のシミュレーション結果（青）と実測結果（緑）

Cd109では22.2 keVのピークの幅が測定のほうがやや細くなっていたが、シミュレーションと測定の間  
に大きな違いは見られなかった。

#### 4.2.4 考察

それぞれの結果より、シミュレーションで予測される性能に近い状態で測定が行われていると考えられる。Am241 の 14 keV 付近の複数ピークのように、シミュレーションに自分でセットした値ではラインを分別できないことが分かった。一方で、Co57 の結果で述べたようにエネルギーが高くなるにつれて、測定ではピーク位置が低く現れていた。これは 3.4 章で示したエネルギー較正直線からも予測でき、出力部バッファのサチュレーションが原因であると考えられる。Co57 の測定結果で 7 keV のピークが見えなかったのは、線源の密封容器によって吸収されているためであると考えられる。よって、光源と検出器の間に密封容器を模した板などを置いた状態でシミュレーションすることで測定結果に近づく可能性がある。また、Ba133 の測定結果のピークがない部分にもイベントが検出されているのは、Ba133 が 303 keV や 356 keV 付近のエネルギーを放出している影響であると考えられる。これらのエネルギーは AstroPix では信号を完全に収集することが難しく、実際よりも低いエネルギーの位置に現れる場合がある。また、これらのコンプトン散乱の成分を見ているとも考えられる。一方でシミュレーションでは 81 keV までのエネルギーしか考慮していないためこれらの影響が見られず、測定結果とずれてしまっていると考えられる。81.0 keV のピークが広がっているのは、電極に集まりきらなかった分が低エネルギー側に流出しているためであると考えられる。

### 4.3 観測ロケット搭載用検出器のためのシミュレーション開発

ここからは A-STEP に向けたシミュレーションについて述べる。2.2.3 章で紹介したように、A-STEP ではアルミニウムの観測用ロケットに AstroPix の Quad-Chip が 3 層になったものが搭載される予定である。そこで、この検出器を MEGALib シミュレーション上で再現しガンマ線に対する応答を調べた。

すでに作成されていた AMEGO-X のジオメトリを参考にして、まずは Quad-chip1 層のジオメトリファイルを作成した。

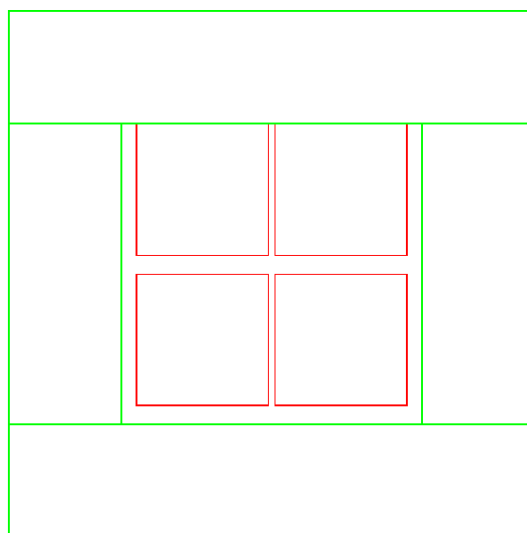


図 4.18: Quad-chip のジオメトリ (チップを真上から見たとき)

AstroPix のチップ全体の大きさは  $2 \times 2 \times 0.05 \text{ cm}^3$  であり、そのうち感度を持つ領域が  $17.5 \times 17.5 \text{ cm}^2$  である。図 4.18 の赤い四角は有感領域を表し、この中に  $0.5 \text{ mm}$  角のピクセルが  $35 \times 35$  で配置されている。これを 4 枚並べ、周りを  $7 \times 7 \times 0.05 \text{ cm}^3$  の PCB 基板で囲った (緑の部分)。PCB には M55J と呼ばれる材料を用いた。M55J の密度は  $1.91 \text{ g/cm}^2$ 、組成比は炭素が 99.99 %、ナトリウムが 0.005 %、カリウムが 0.005 % である。配置位置や用いる素材などは A-STEP のデザイン案を参考にした。また、チップ部分はピクセルセンサである SiStrip として定義した。

このジオメトリファイルを用いて Am241 の場合 7 つのエネルギー (11.89, 13.90, 17.81, 20.82, 26.34, 33.20, 59.54 keV) をセンサの上部から降らせるシミュレーションを行い、ヒット位置分布を確認した (図 4.19)。

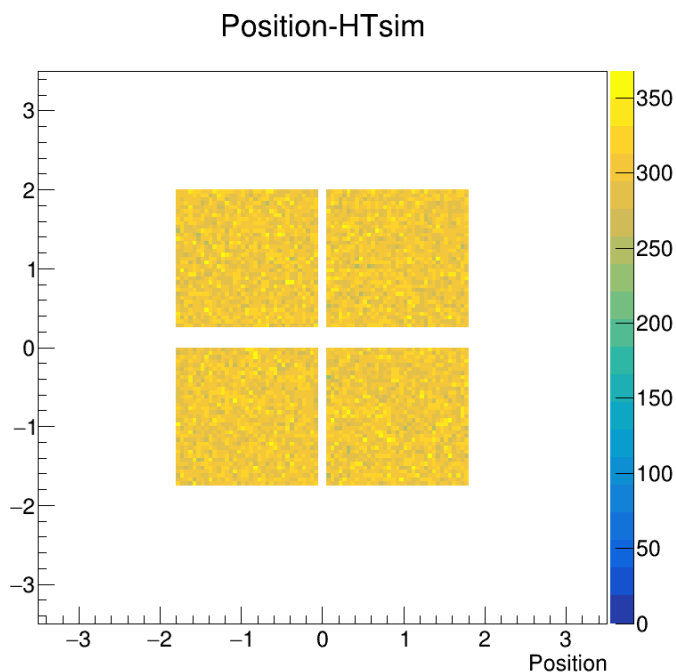


図 4.19: Quad-chip1 層でのヒット位置の分布 (縦軸と横軸は座標 (cm) を表し、色はヒット数を表す。)

これより有感領域に指定した部分でのみ一様に相互作用が起こっていることが分かる。検出器のジオメトリが正しく再現されていることを確認できたため、次にこの Quad-chip を 3 層重ねたジオメトリを作成した (図 4.20)。

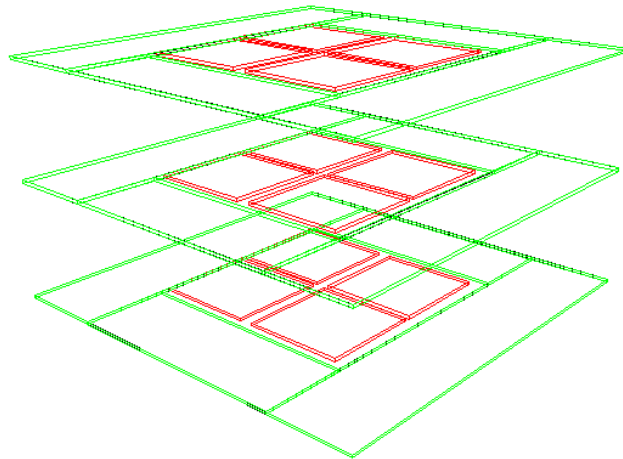


図 4.20: Quad-chip3 層のジオメトリ

チップとチップの間は 2 cm に設定している。これを用いて同様にヒット位置を調べた結果が図 4.21 である。

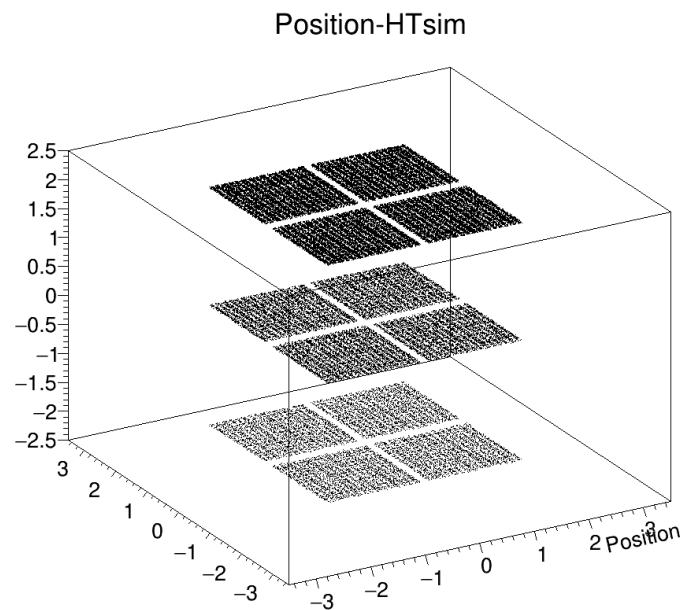


図 4.21: Quad-chip3 層でのヒット位置の分布 (軸は座標を表す (cm))

1 層目が最もヒット数が多く、下の層になるにつれてヒット数は減少していた。また、チップ間でヒットがないことも確認できたため、このジオメトリでガンマ線に対する応答を調べた。

#### 4.4 観測ロケット搭載用検出器のガンマ線に対する性能評価

図 4.20 のジオメトリを用いて、ガンマ線に対する応答を調べた。0.1~100 MeV の範囲のいくつかのエネルギー (0.10, 0.158, 0.251, 0.398, 0.630, 1.000, 10.0, 31.622, 100.0 MeV) のガンマ線を検出器の 0° (真上) と 36.8° の方向から当てて、シミュレーションを行った。このシミュレーションでは cosima と revan を用い、再構成された情報からエネルギー分解能や角度分解能を調べた ([13] の python スクリプトを使用した)。

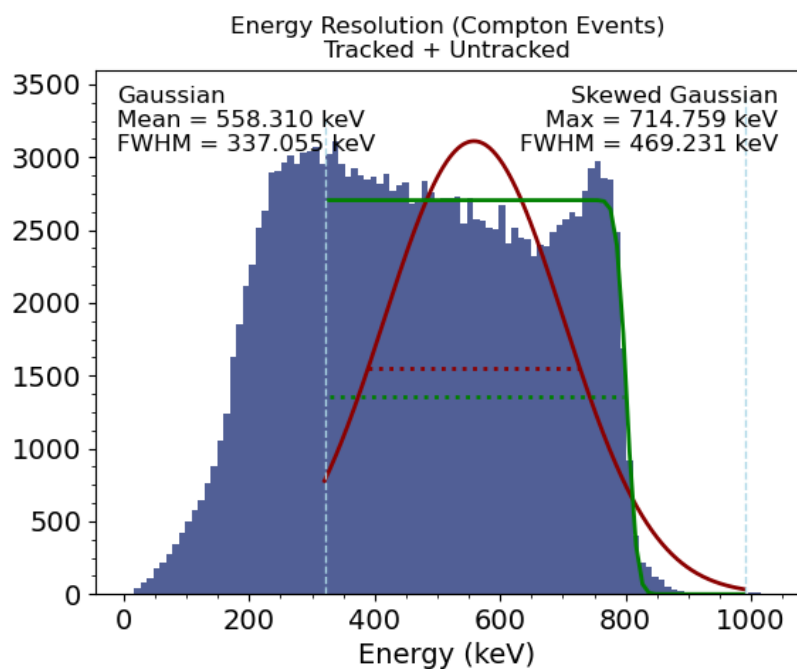


図 4.22: Quad-chip3 層, 1 MeV, 入射方向 0° のときのコンプトン散乱事象の再構成エネルギースペクトル

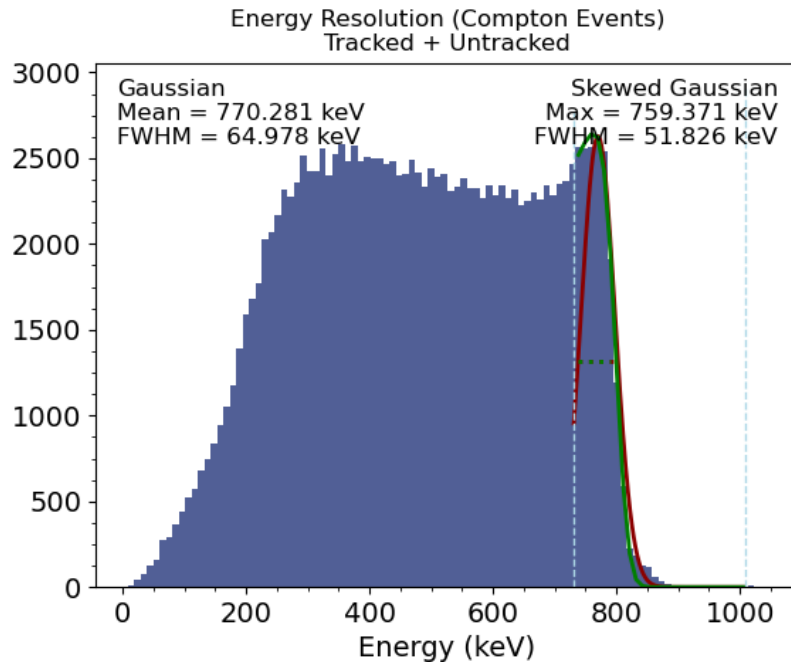


図 4.23: Quad-chip3 層, 1 MeV, 入射方向 36.8° のときのコンプトン散乱事象の再構成エネルギースペクトル

図 4.22、4.23 は入射エネルギーが 1 MeV のときのエネルギースペクトルである。ガンマ線が正しくコンプトン再構成されていれば、1000 keV の位置に全吸収ピークが見えるはずだが、ピークは見られなかった。また、800 keV 付近にはエッジが見られ、これは 1 MeV のコンプトンエッジ (796.5 keV) であると考えられる。1 MeV のピークが見えなかったのは、コンプトン散乱で散乱された光子が下の層で吸収されずに再度コンプトン散乱を起こすなどでエスケープしてエネルギーを落としきらなかったため正しく再構成ができなかったためであると考えられる。

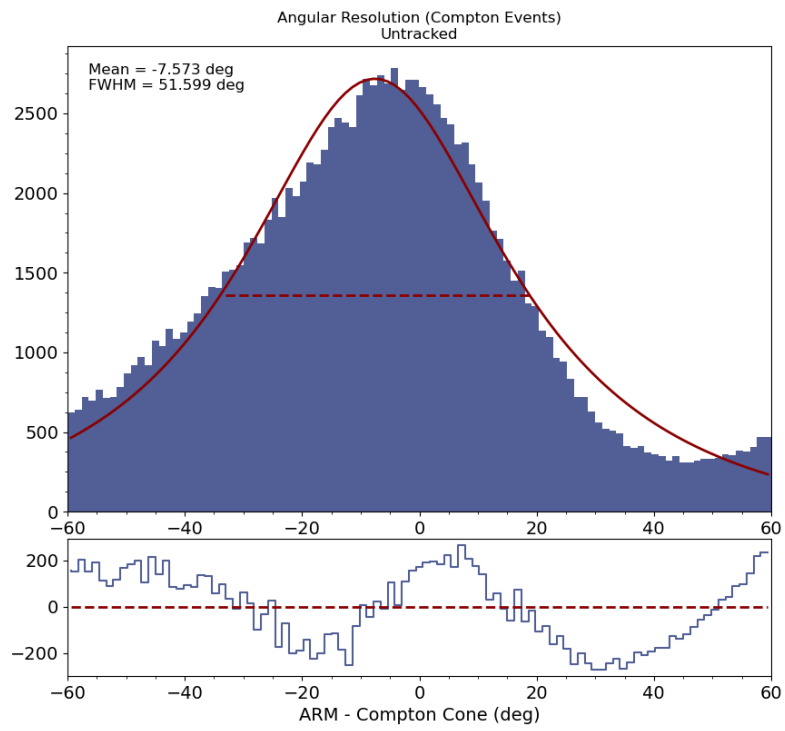


図 4.24: Quad-chip3 層, 1 MeV, 入射方向  $0^\circ$  のときのコンプトン散乱事象の再構成角度分解能



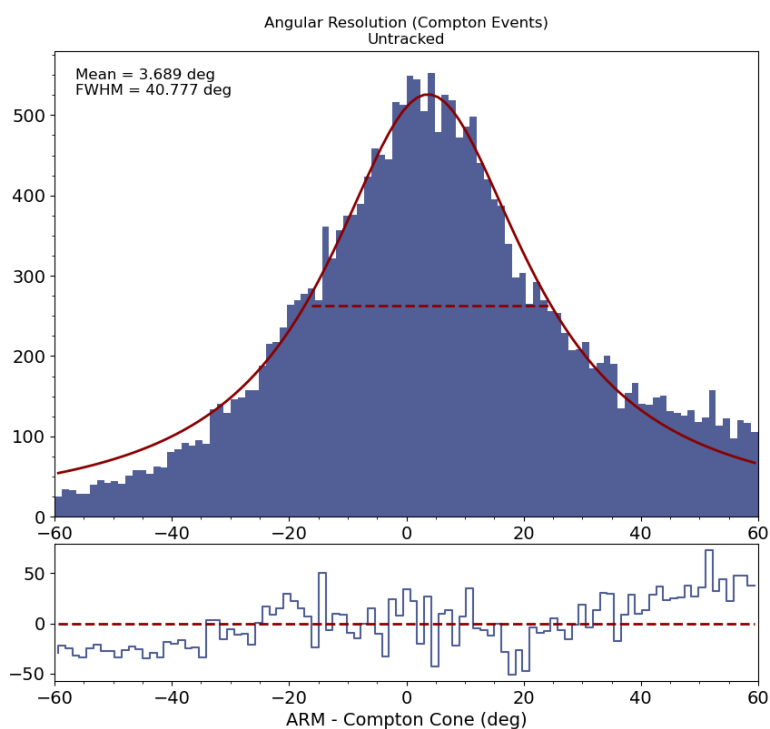


図 4.25: Quad-chip3 層, 1 MeV, 入射方向  $36.8^\circ$  のときのコンプトン散乱事象の再構成角度分解能

図 4.24、4.25 は同じく 1 MeV のときの角度分解能を示している。角度分解能は、コンプトン再構成されたイベントサークルと真の光源の位置の間の最小角度距離の半値幅で表される。1 MeV の角度分解能は  $0^\circ$  で  $51.6^\circ$ 、 $36.8^\circ$  で  $40.8^\circ$  だった。

ガンマ線の入射方向  $0^\circ$  のときと  $36.8^\circ$  のときの有効面積は図 4.26 のようになっていた。有効面積は、シミュレーションされたイベントに対する再構成されたイベントの割合にディスク面（ジオメトリファイルで定義している光子が発生する円盤）の面積をかけた値である。

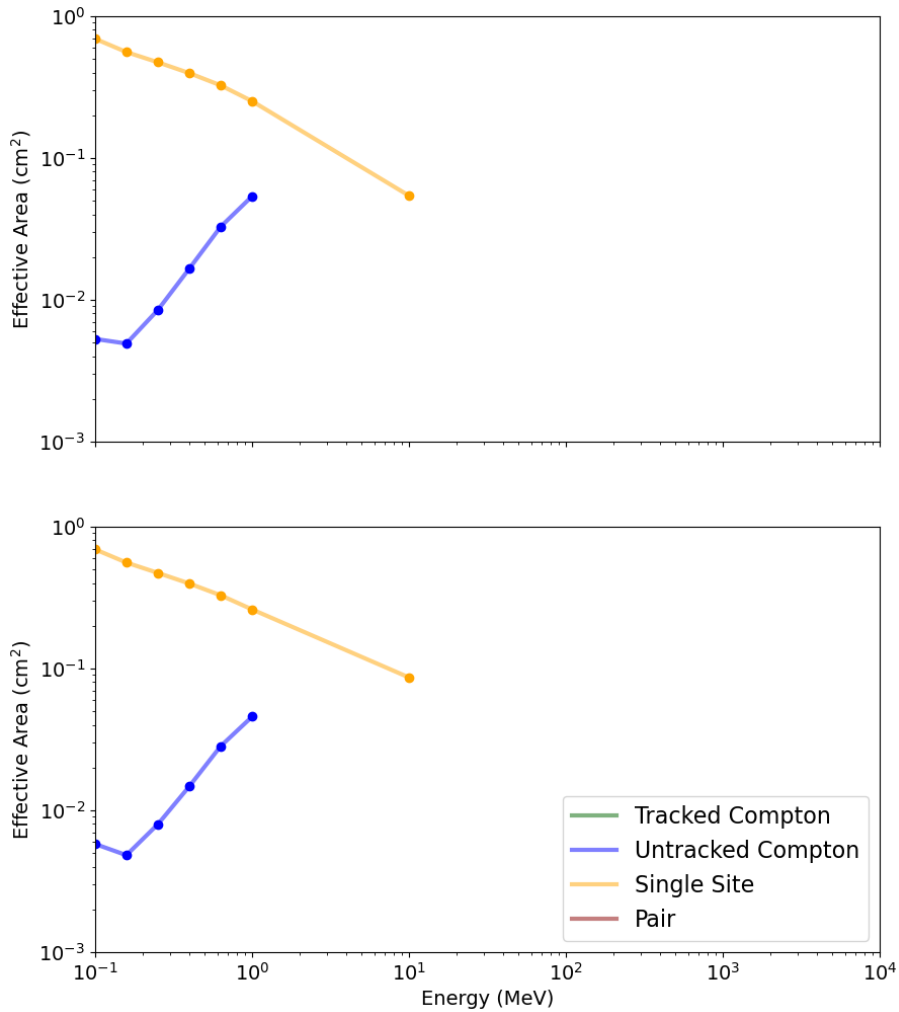


図 4.26: Quad-chip3 層検出器の有効面積 (上: 入射方向  $0^\circ$ 、下:  $36.8^\circ$ )

Single Site (黄色の線) は光電吸収を表し、Untracked Compton (青い線) は反跳電子を検出できず円環までのみ絞れたコンプトンイベントを表している。ガンマ線の照射角度による有効面積の大きな違いは見られなかった。検出部分の面積をおよそ  $16 \text{ cm}^2$  とすると、Untracked Compton の検出効率  $0.1 \text{ MeV}$  で  $0.031 \%$ 、 $1 \text{ MeV}$  で  $0.34 \%$  程度と求められる。また、光電吸収の検出効率は  $0.1 \text{ MeV}$  で  $4.3 \%$ 、 $1 \text{ MeV}$  で  $1.6 \%$ 、 $10 \text{ MeV}$  で  $0.34 \%$  となる。これより、3 層の検出器では  $1 \text{ MeV}$  より大きいエネルギーを検出することは難しいが、宇宙線バックグラウンドなどは検出できる可能性があることが分かった。

A-STEP では、直径  $30 \text{ cm}$  程のロケットの一区間に 3 層の AstroPix が搭載される予定である。そこで、輪切りにしたロケットに検出器を配置した状態を簡易的に再現したジオメトリが図 4.27 である。円筒の側面がロケット部分、上下の円盤がロケット内の仕切りであり、サイズは直径  $30.5 \text{ cm}$ 、高さ  $12 \text{ cm}$ 、厚さ  $0.94 \text{ cm}$  である。また、材質はアルミニウムが用いられる。今後はこのようにより現実のセットアップに近い状態で、宇宙線バックグラウンドなどの評価を行っていく必要がある。

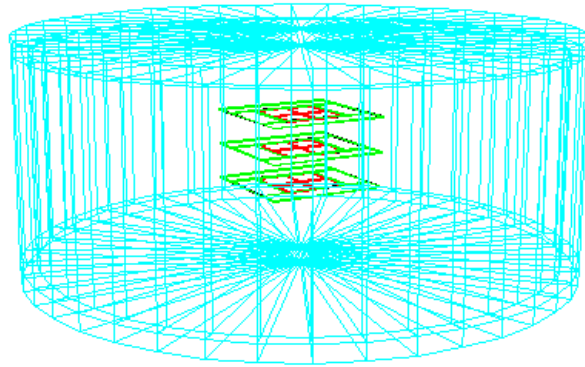


図 4.27: 観測用ロケットに検出器を搭載した場合のジオメトリ（中央が AstroPix、水色の円筒がロケット部分）

## 第5章 まとめと今後の展望

本研究では、MeV ガンマ線衛星 AMEGO-X 計画に向けて開発中であるシリコンピクセル検出器 AstroPix の基礎特性評価を行った。MeV ガンマ線の観測では、コンプトン散乱のような相互作用からガンマ線の入射方向とエネルギーの再構成が行われるため、検出器のエネルギー・位置分解能が重要となる。現在、検出部分と読み出し部分の一体化によりノイズや消費電力の少ない新型ピクセル検出器 AstroPix の開発が進められている。AstroPix には CMOS 技術が用いられており、逆電圧をかけることができるため広い空乏層領域を形成し X 線・ガンマ線を効率よく検出できる。

AstroPix v2 の基礎特性評価では、比抵抗の異なる 2 つのチップを用いて測定を行った。暗電流や空乏層厚の電圧依存性を調べ、線源を照射して取得したエネルギースペクトルからエネルギー較正曲線・分解能を求めた。その結果、エネルギー分解能 (FWHM) が 59.5 keV で 3.7 keV (低比抵抗チップ) と 3.4 keV (高比抵抗チップ) であり、要求仕様の値を満たしていることが分かった。また、空乏層が電圧の印加によって正しく発達していることも確かめられた。

測定結果の理解を深めるため、Geant4 に基づいたツールである MEGALib を用いてシミュレーションを行った。シリコンに X 線を照射したときのシミュレーション結果を実際の測定結果と比較して、サチュレーションの影響のような検出器の特性などが分かった。さらに、2024 年の観測用ロケットを用いた宇宙空間での AstroPix の技術実証試験に向けて AstroPix を 3 層重ねた検出器ジオメトリを再現し、ガンマ線に対する応答を調べた。エネルギー分解能や角度分解能、検出器の有効面積を調べ、検出器がシミュレーション上に正しく再現できていることが確認できた。

今後の課題としては、まず空乏層の厚さが理論値よりも大きい理由や分解能がばらついている理由の調査が挙げられる。シミュレーションは、電気ノイズなどの検出器の特性を考慮していくことでさらに理解が深まると考えられる。また、今回は特定のピクセルのみの応答を調べたが、センサー全体としての評価もシミュレーションと合わせて行い、理解を深める必要がある。観測用ロケットに向けて、宇宙線バックグラウンドのシミュレーションも行う必要がある。

# 謝辞

この論文を書くにあたり、多くの方に助けていただきました。主査の須田先生には、基本的な知識や測定に関すること、解析の方法など沢山のことを教えていただきました。ほぼ毎日、測定結果や次にすべきことについて話す時間を取っていただいたおかげで、一つ一つ理解しながら研究を進めることができました。私の理解が追い付かないときも根気強く丁寧に説明してくださり、本当にありがとうございました。また、深澤先生にも週1回のミーティングを通して様々なアドバイスをいただきました。自分ではスルーしてしまうようなことも、先生のご指摘によって気づくことができました。また、大部屋の先輩方をはじめ、研究室の皆さまにもパソコンの使い方や研究の進め方など様々な場面で大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] NIST XCOM: Element/Compound/Mixture  
<https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>
- [2] Henrike Fleischhack, AMEGO-X: MeV gamma-ray Astronomy in the Multimessenger Era, astro-ph.IM, 2021.  
<https://arxiv.org/pdf/2108.02860.pdf>
- [3] Regina Caputo, et al., The All-sky Medium Energy Gamma-ray Observatory eXplorer (AMEGO-X) Mission Concept, astro-ph.IM, 2022.  
<https://arxiv.org/pdf/2208.04990.pdf>
- [4] Isabella Brewer, et al., Developing the future of gamma-ray astrophysics with monolithic silicon pixels, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1019 (2021) 165795.
- [5] 井上一・小山勝二・高橋忠幸・水本好彦. シリーズ現代の天文学 第17巻 宇宙の観測 3-高エネルギー天文学. 第2版. 日本評論社. 2019
- [6] Development of novel high-voltage CMOS sensors (several themes)  
<https://adl.ipe.kit.edu/downloads/ThesisHVCMOS.pdf>
- [7] Amanda L. Steinhebel, et al., AstroPix: Novel monolithic active pixel silicon sensors for future gamma-ray telescopes, astro-ph.IM, 2022.  
<https://arxiv.org/pdf/2209.02631.pdf>
- [8] MEGALib  
<https://megalibtoolkit.com/documentation.html>
- [9] Julie E. McEnery NASA/GSFC, All-sky Medium Energy Gamma-ray Observatory: Exploring the Extreme Multimessenger Universe, astro-ph.IM, 2019.  
<https://arxiv.org/pdf/1907.07558.pdf>
- [10] 佐道恒太郎. 固体物理 電気伝導・半導体. 裳華房. 1993
- [11] IAEA, Update of X Ray and Gamma Ray Decay Data Standards for Detector Calibration and Other Applications Volume1, 2007.
- [12] 児玉涼太 京都大学 2021年  
修士論文 「次世代 X 線天文用 SOI ピクセル検出器の軟 X 線性能及びノイズ性能の定量的研究」
- [13] GitHub <https://github.com/ComPair/python>