

2021 年度 卒業論文

MeV ガンマ線 Compton camera への利用に向けた
pixel 検出器 SOIPIX の基礎特性試験

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

B185032 橋爪 大樹

主査：深澤 泰司
副査：清水 勇介

2022 年 3 月 23 日

概要

MeV 領域のガンマ線天文学は、未だに解明されていない重要な問題が残された天体が数多く存在するにもかかわらず観測衛星がないというのが現状である。MeV ガンマ線観測にはコンプトンカメラという技術が使われ、その構成要素となる Si pixel 検出器として SOIPIX 検出器「XRPIX」が候補の 1 つとなっている。XRPIX は SOI 技術を使うことで検出部と読み出し部が一体型となった CMOS 検出器で、各ピクセルに読み出し回路とトリガー回路を備え付けることで必要なイベントの信号のみを選択的に読み出すことを可能にしたもので、X 線撮像用に開発された。本研究では SOIPIX 検出器「XRPIX」の基礎特性を、エネルギー分解能や暗電流とイベントレートのバイアス依存性の観点から評価し、将来、MeV ガンマ線観測に使えるか調べる。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	MeV ガンマ線天文学	1
1.2	コンプトン散乱	2
1.3	コンプトンカメラ	2
1.4	MeV ガンマ線 コンプトンカメラ用 Si pixel 検出器	3
第 2 章	SOIPIX	5
2.1	SOI 技術	5
2.2	SOIPIX 検出器	6
2.2.1	SOIPIX 検出器の構造	6
2.2.2	イベント駆動型 SOIPIX 検出器「XRPIX」	6
2.2.3	ハードウェア	7
2.2.4	XRPIX の信号読み出し手順	8
2.3	研究の目的	9
第 3 章	Si PIN フォトダイオード検出器を使った実験	10
3.1	Am のスペクトル測定	10
3.2	暗電流の測定	11
3.3	容量測定	12
3.4	エネルギー分解能	14
第 4 章	SOIPIX を使った実験	16
4.1	セットアップ	16
4.2	暗電流・イベントレート	17
4.2.1	暗電流	18
4.2.2	イベントレート	18
4.3	しきい値の決定	19
4.4	ペDESTAL 分布	20
4.5	スペクトル分布	28
4.6	エネルギー分解能	33
4.6.1	較正直線	33
4.6.2	XRPIX8 のエネルギー分解能	35
第 5 章	まとめと今後	39

目次

1.1	MeV ガンマ線による観測対象 [1]	2
1.2	コンプトンカメラの模式図（左側） [1]	3
2.1	SOI の模式図 [2]	5
2.2	SOIPIX の構造 [3]	6
2.3	XRPIX8	7
2.4	ハードウェアと信号の流れ	8
3.1	使用した Si PIN フォトダイオード検出器	10
3.2	Am-241 のスペクトル	11
3.3	暗電流の逆バイアス依存性	12
3.4	足を取り付けた検出器	13
3.5	容量測定の設定アップ	13
3.6	容量の逆バイアス依存性	14
3.7	入力容量に対する雑音特性量 [4]	15
4.1	実験セットアップ	16
4.2	測定中の様子	17
4.3	暗電流の逆バイアス依存性	18
4.4	イベントレートの逆バイアス依存性	19
4.5	ガンマ線源 Na-22 のスペクトル	20
4.6	各ピクセルのペDESTALの中央値	21
4.7	各ペDESTALの中央値	21
4.8	各ピクセルのペDESTALの標準偏差	22
4.9	各ペDESTALの標準偏差	22
4.10	各ピクセルのペDESTALの中央値-2	24
4.11	各ペDESTALの中央値-2	25
4.12	各ピクセルのペDESTALの中央値-Fe	26
4.13	各ペDESTALの中央値-Fe	26
4.14	各ピクセルのペDESTALの中央値-Cd	27
4.15	各ペDESTALの中央値-Cd	27
4.16	各ピクセルのスペクトルの中央値-Fe	28
4.17	各スペクトルの中央値-Fe	29
4.18	各ピクセルのスペクトルの標準偏差-Fe	29

4.19	各スペクトルの標準偏差-Fe	30
4.20	CountMap-Fe	31
4.21	線源 Fe-55	31
4.22	線源 Am-241	31
4.23	CountMap-Am	32
4.24	スペクトル-Fe	33
4.25	スペクトル-Am	33
4.26	スペクトル-Cd	34
4.27	エネルギー較正直線	35
4.28	スペクトル-Fe-FWHM	36
4.29	スペクトル-Am-FWHM	36
4.30	スペクトル-Cd-FWHM	37
4.31	各ペダスタルの標準偏差-再	37
4.32	各スペクトルの中央値-Fe-再	38

表目次

3.1	測定条件	11
3.2	エネルギー分解能の比較	15
4.1	各電源の設定値と出力値	17
4.2	各ペDESTAL値とそのばらつき	25
4.3	各ピークの ADC channel 値	34
4.4	各エネルギーに対する分解能	35

第1章 序論

1.1 MeV ガンマ線天文学

MeV 領域のガンマ線を多く放出する天体現象には、未だに解明されていない重要な問題が多く残されている。例えば超新星は、爆発の瞬間に激しい核融合が起こり鉄よりも重い元素やガンマ線を出す放射性同位元素が作られる。この放射性同位元素の崩壊に伴う核ガンマ線はエネルギーの値が決まっているので、これを測ることができれば生成された放射性同位元素の量を直接探ることができる。超新星が爆発するたびに重元素が銀河の中に放出されるので、寿命の異なる放射性同位元素からの核ガンマ線が銀河系の中にもどのように分布しているかを測定すれば、銀河系における超新星爆発の歴史、さらには銀河系の成り立ちを知ることができる。

その他活動銀河核ジェット天体ブレーザーやガンマ線バーストが挙げられる。ガンマ線バーストは数秒から数十秒の間に膨大なエネルギーをガンマ線領域を中心とする電磁波で放出する現象である。1968年に核実験探知衛星 Vela によって発見されて以来、CGRO 衛星による観測で全天で一様に起こっていることがわかり、BeppoSAX 衛星による残光が初めて観測されて位置が同定されたことで遠方で莫大なエネルギーを放出する現象であることがわかったが、その発生メカニズムは未だ解明されていない。ガンマ線バーストは MeV 領域で最も明るいため、MeV 領域の観測ができるようになれば何か新しいことがわかるかもしれない。

このように未解決の問題が多く残されているが、MeV 領域の観測は1990年代のCGRO衛星搭載のCOMPTEL検出器による観測以降進展がなく、現在活躍しているガンマ線衛星Fermi-LAT検出器でも100MeV以下では感度が落ちてしまう。先述の通り期待されるサイエンスが多いにもかかわらず衛星がない、観測できないというのが現状である。よって、MeV 領域の新しい衛星、検出器は必須であると言える。

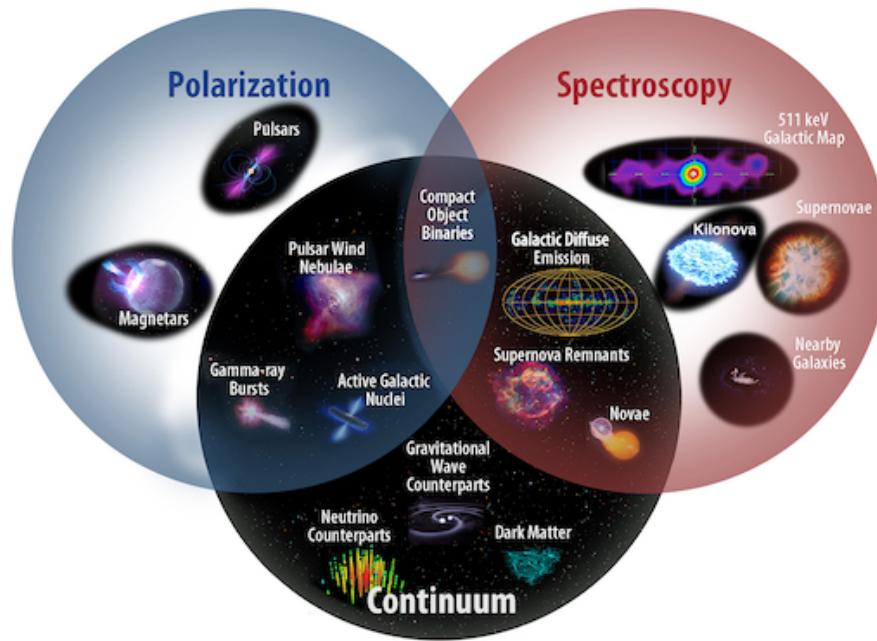


図 1.1: MeV ガンマ線による観測対象 [1]

1.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱が主な反応となる MeV 領域のガンマ線観測は他のエネルギー領域と比べて最も困難である。それは、コンプトン散乱では入射光子が電子に当たって方向を変えて散乱してしまい、散乱された光子が検出器から出て行ってしまうため、全エネルギーを検出器に与える確率が小さいからである。コンプトン散乱とはガンマ線と物質との相互作用の一つで、数十 keV から数 MeV までのエネルギー範囲で支配的となる反応である。ガンマ線がその一部のエネルギーを電子に与え電子を弾き飛ばすと同時に、運動量保存則とエネルギー保存則に従ってエネルギーが小さくなったガンマ線が散乱される。

1.3 コンプトンカメラ

コンプトン散乱において、散乱されたガンマ線を独立に検出して入射光子のエネルギーとその到来方向を求めようとするのがコンプトンカメラである。コンプトンカメラは、入射光子を散乱させる散乱体と散乱ガンマ線を吸収する吸収体が必要である。入射光子が電子に与えたエネルギーと散乱したガンマ線のエネルギーが分かれば、運動量保存則とエネルギー保存則から入射光子の散乱角が求まる。さらに散乱や吸収の位置が分かれば、元のガンマ線の光源位置は天球上で円環まで絞ることができる。ここで、図中の散乱角は、入射光子のエネルギーを E_1 、散乱したガンマ線のエネルギーを E_2 として以下の式で求められる。

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

ところが、円環では複数の光源と交わってしまう可能性がある。そこで、散乱時に出てくる反跳電子の飛跡を測定することで各ガンマ線の到来方向を図 1.2 のように円環の一部の方位角範囲に制限する。すると光源位置は円環から円弧にまで絞られ、より正確なコンプトンイメージングが可能となる。この円環の線幅の太さは、電子に与えられたエネルギーと散乱したガンマ線のエネルギーの測定精度で決まるため、角度分解能の高いコンプトンカメラを実現するためには、各検出器が位置分解能だけでなく、優れたエネルギー分解能を備えていることも要求される。

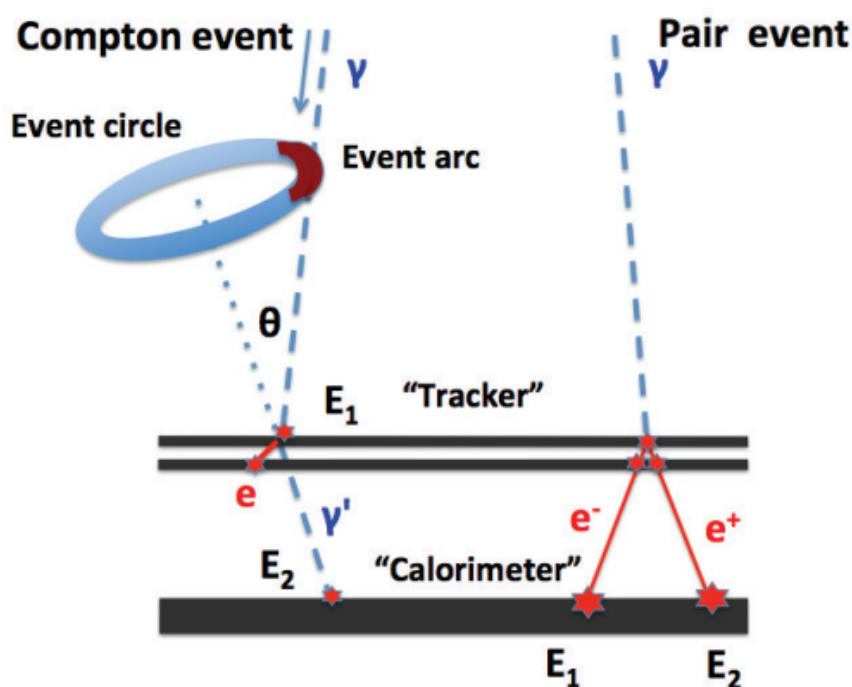


図 1.2: コンプトンカメラの模式図 (左側) [1]

1.4 MeV ガンマ線 コンプトンカメラ用 Si pixel 検出器

今までコンプトンカメラの散乱体として使われてきた半導体検出器は、Si 両面ストリップ検出器と Si pixel 検出器である。例えばひとみ衛星の軟ガンマ線検出器では、32 層の Si pixel 検出器が使われていた。Si は半導体となる元素の中でも C の次に原子番号が小さい。そのため、ターゲットとなる MeV 領域ではコンプトンカメラの散乱体として適していると言える。原子番号が大きすぎると光電吸収が効いてきてしまい、光子を散乱できなくなる。また、コンプトン散乱時に、束縛電子の持つ運動量も小さいので、散乱角を求める際の不安定性 (Doppler broadening) も小さい。

電子の飛跡を測定する方法の一つとして、ピクセルサイズの小さい Si 検出器を用いる方法がある。数 100 keV 以上の光子でたたき出された電子は Si 層を飛び出るので各層でのヒット位置が分かれば電子飛跡のベクトルを描くことができるが、低エネルギーの場合電子が Si 層から飛び出ることができないので、センサーの中で飛跡情報を得る必要があり、そのためピクセルサイズの小さい Si pixel 検出器が必要となる。ひとみ

衛星の Si pixel 検出器のピクセルサイズは 3.2mm 角で、反跳電子の飛跡は分解できない。

MeV ガンマ線 コンプトンカメラ用 Si pixel 検出器として「AstroPix」と「SOIPIX」の2つが挙げられる。AstroPix は全天 MeV ガンマ線観測衛星計画「AMEGO」用に開発されている検出器で、ピクセルサイズは 0.5~1.0mm 角と少し大きく、1 MeV 以下のガンマ線の散乱に対して電子飛跡を捉えるのは難しい。それによって性能に限界が出てくる。SOIPIX は、X 線観測用に開発されている検出器でピクセルサイズは 36 μm と細かいため、数 100 keV のガンマ線の散乱に対する電子飛跡も捉えることが期待できる。一方、各 pixel に回路を備え付けようとするると多くの回路が必要となり消費電力が大きくなってしまいう課題があり、性能と電力のトレードオフスタディーが必要である。本研究では SOIPIX を用いて、その基礎特性を調べることによって、MeV ガンマ線コンプトンカメラ開発の足掛かりとする。

第2章 SOIPIX

この章では、SOIPIX の詳しい説明と、本研究で用いる SOIPIX 検出器「XRPIX」の紹介をする。

2.1 SOI 技術

SOI とは、Silicon on Insulator の略で、シリコンウェハ表面に酸化膜 (SiO₂) の絶縁層を作り、さらにその上に別の薄いシリコン層を形成する技術である。これによって抵抗率の異なる 2 種類のウェハを、1 枚のウェハ上に備え付けることができる。メリットとして、絶縁層によって各トランジスタが分離されているためラッチアップによる回路の故障を起こすことがなく、省電力で高速な回路動作が可能である。また、素子間の寄生容量も低減することができる。さらに回路間の距離を小さくできることで回路全体のサイズの縮小、ノイズの低減に繋がる。このようにメリットが数多くあるため産業界では既によく用いられており、PC の CPU などにも使われている。

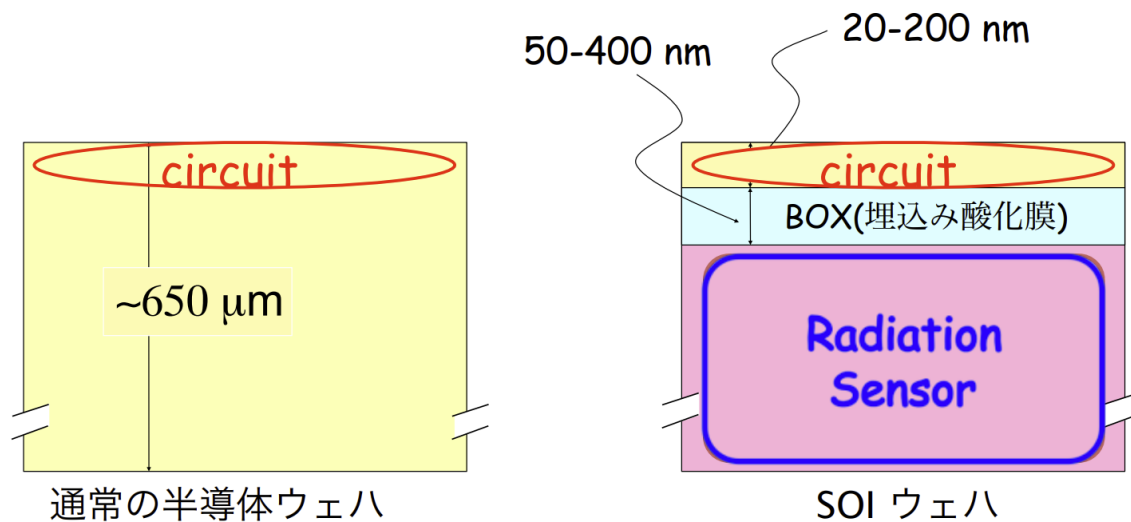


図 2.1: SOI の模式図 [2]

2.2 SOIPIX 検出器

2.2.1 SOIPIX 検出器の構造

SOIPIX 検出器は、通常 CPU などでは使われない酸化膜下のシリコン層に逆バイアスをかけて空乏層を広げ X 線の検出器として利用しようとした pixel 検出器で、KEK が中心となって研究、開発された。数 100 μm のセンサー層、0.2 μm の酸化膜層、約 10 μm の回路層から成り、センサー層には高抵抗率のシリコンを、回路層には低抵抗率のシリコンを用いることで、厚い空乏層による高い X 線感度と CMOS 回路による高速な信号処理を両立することができる。このように SOI 層に読み出し回路を搭載することで検出部と読み出し部が一体型となっていることが最大の特徴である。また、回路は一般的な CMOS 回路により構成されていることで各ピクセルに読み出し回路とトリガー回路を備え付けることが可能であり、これによって時間分解能、位置分解能の向上が期待される。SOIPIX 検出器の大事な開発項目として、バックゲート効果の抑制が挙げられる。SOIPIX ではセンサー層を空乏化させるために高い逆バイアスを印加する。この電圧によって回路部のトランジスタの閾値電圧が変化してしまうことをバックゲート効果という。これを防ぐために、CMOS 回路の真下のセンサー部表面に Buried P-Well(BPW) と呼ばれる薄い P 型半導体層を備え付け、BPW の電位を一定に固定することでバックゲート効果を抑制している。

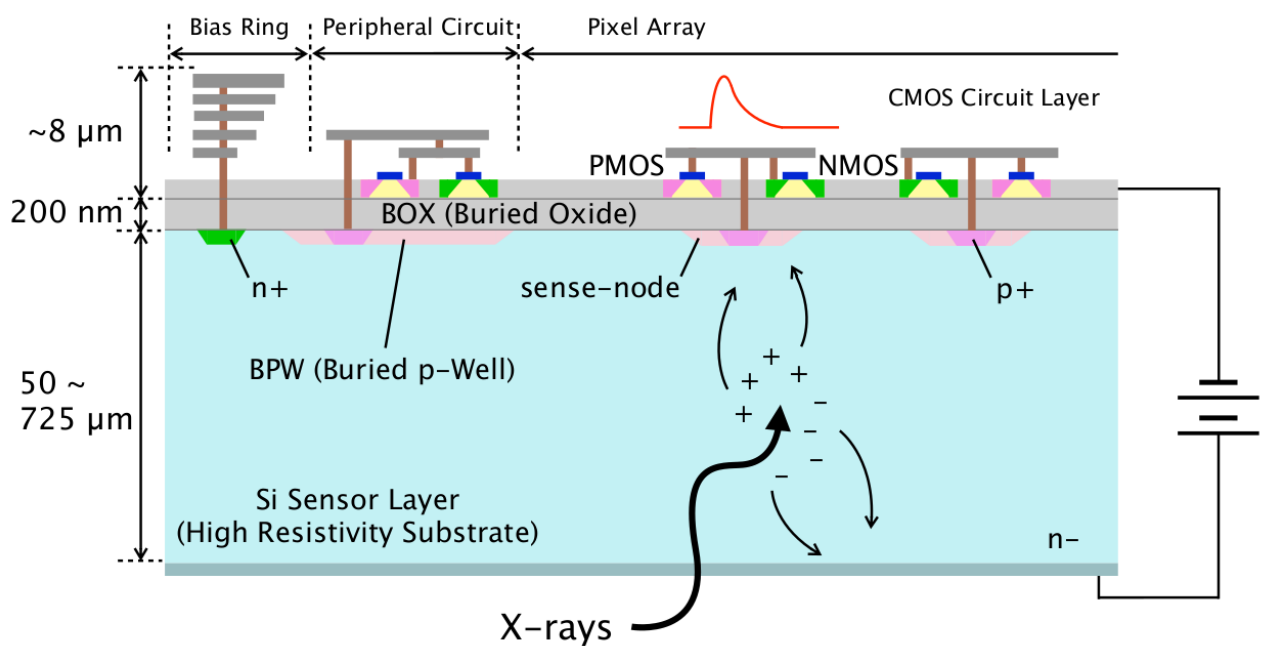


図 2.2: SOIPIX の構造 [3]

2.2.2 イベント駆動型 SOIPIX 検出器「XRPIX」

各ピクセルに読み出し回路とトリガー回路を導入した SOIPIX が「XRPIX」と名付けられたイベント駆動型 SOIPIX 検出器で、必要なイベントの信号のみを選択的に読み出す「イベント駆動読み出し」を可能とした。XRPIX は 2008 年に京都大学で開発され、その後も XRPIX シリーズは京都大学と宮崎大学を中心に

開発、研究がされてきている。本研究では、2019年に完成した「XRPIX8」を用いる。

ここから XRPIX8 の仕様を述べる。チップサイズは 6.0 mm 角、ピクセルサイズは 36 μ m 角である。ピクセル数は 96 \times 96 であり、この内有効画素は 80 \times 94 = 7,520 のピクセル、面積にして 2.9 mm \times 3.4 mm となる。14 \times 94 のピクセルは TEG 領域であり、最外周 1 ピクセルはダミーピクセルである。

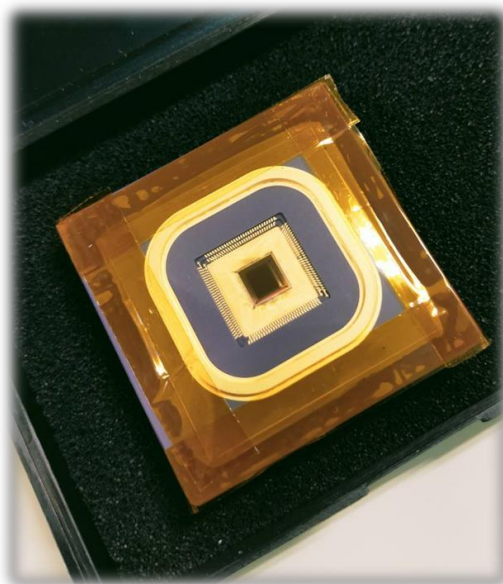


図 2.3: XRPIX8

2.2.3 ハードウェア

XRPIX は、素子の制御とデータの出力に 2 つのハードウェア、読み出しボードを用いる。

まず SEABAS には、素子制御用の User FPGA と、ネットワークでのデータ転送用の SiTCP FPGA が搭載されている。使用する素子に合わせて User FPGA を書き換えることで各制御を行うことができる。SiTCP FPGA は User FPGA から出力された信号を Ethernet を通じて転送できる形式に変換するものである。これによって、SEABAS と PC を LAN ケーブルで接続することで簡単にデータの転送ができる。

もう 1 つの Sub ボードには、素子を取り付けるソケット、逆バイアスをかけるための端子、2.2.1 章で述べた BPW に電圧をかけるための端子、そして、素子からのアナログ信号を処理する計装アンプと ADC が備わっている。素子と FPGA との間で信号を繋ぐ働きがある。

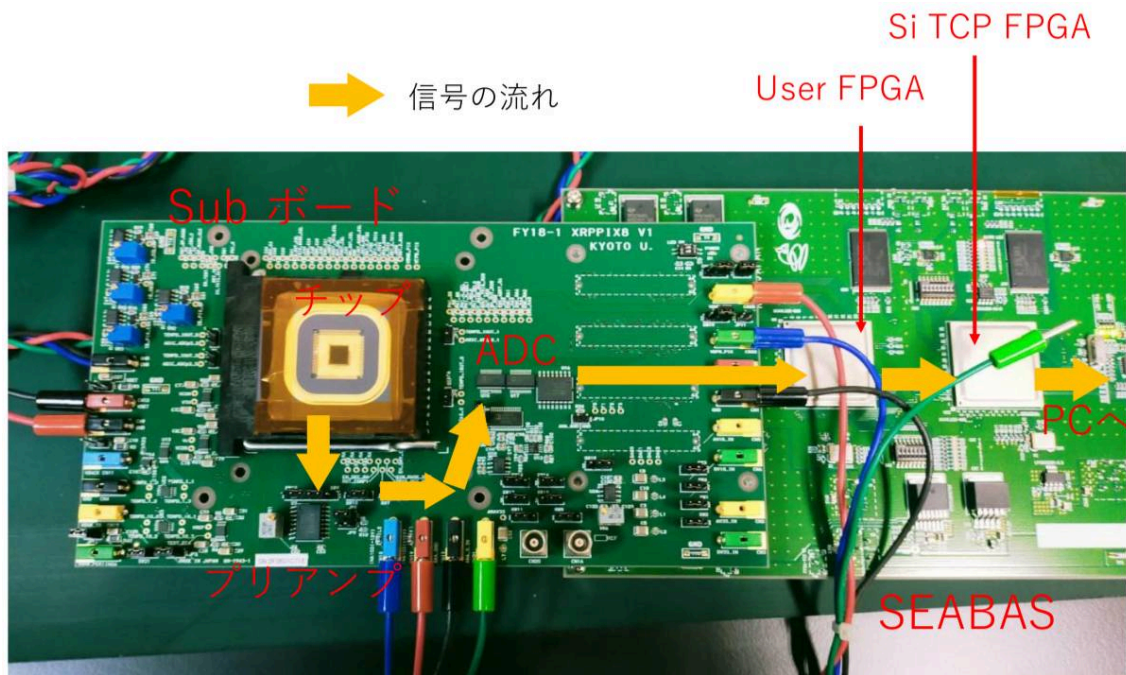


図 2.4: ハードウェアと信号の流れ

2.2.4 XRPIX の信号読み出し手順

XRPIX における信号の読み出し方法は、「イベント駆動読み出し」と「フレーム読み出し」の 2 種類が存在する。コンプトンカメラにはイベント駆動読み出しが必要であり、以下にイベント駆動読み出しの手順を示す。

1. あるピクセルにしきい値を超える X 線が入射し、トリガー信号が出力される。
2. ヒットのタイミング情報、アドレス情報、パターン情報 (複数のピクセルでヒットがあるかどうか) が出力される。
3. 2 で出力された情報を元に User FPGA で読み出しを行うイベントかを判断する。
4. 読み出すと判断された場合は、素子からのアナログ信号が計装アンプを通して ADC へ送られ、アナログ信号からデジタル信号へ変換される。
5. SiTCP FPGA へ送られ、Ethernet を経由して PC へ転送される。

フレーム読み出しはイベント駆動読み出しと異なり、トリガー情報を用いずに読み出しを行う方法である。XRPIX ではピクセルごとに読み出し回路が備わっているため、特定の領域のみを選択して読み出すことが可能となっている。本研究ではイベント駆動読み出しで特性を評価していく。

2.3 研究の目的

本研究の目的は、SOIPIX 検出器「XRPIX8」の基礎特性を、エネルギー分解能や暗電流とイベントレートのバイアス依存性の観点から評価し、将来、MeV ガンマ線観測に使えるか調べることである。MeV ガンマ線観測に使えるかとは、コンプトンカメラの散乱体として使えるかということを目指す。先述の通り、コンプトンカメラとしてよい性能を出すためには、検出器の位置分解能とエネルギー分解能が優れていることが求められる。SOIPIX は pixel 検出器なので反応位置の特定には長けている。しかし、ピクセルごとのエネルギー分解能のばらつきが大きいと、検出器全体で見た時に結果として良いエネルギー分解能とは言えず、コンプトンカメラの性能にも悪影響が出てしまう。これまで XRPIX シリーズは X 線領域での性能評価が中心であったが、コンプトンカメラではエネルギーの高いガンマ線に対する応答が重要である。そこで本研究では、エネルギーの高いガンマ線を照射してコンプトンカメラの散乱体として適しているかを評価していく。まずは Si で光電吸収させるためにエネルギー値が既知である X 線をあててピクセルごとのペDESTアル分布とスペクトル分布を測定し、そのばらつき度合いを見た上で検出器全体としてのエネルギー分解能を割り出す。

SOIPIX の実験の前に、半導体検出器について学びその実験のノウハウを身につける目的で、Si PIN フォトダイオード検出器を使った各実験を行った。その結果については 3 章で、SOIPIX の実験、解析については 4 章でまとめている。

第3章 Si PIN フォトダイオード検出器を使った実験

この章では、シリコン検出器の理解のため、Si PIN フォトダイオード検出器を使った各実験について、それぞれのセットアップと結果を示す。使用した検出器は、浜松ホトニクス株式会社製の s3590-08 である。これは、1 ピクセルしかないシリコン検出器と思えば良い。

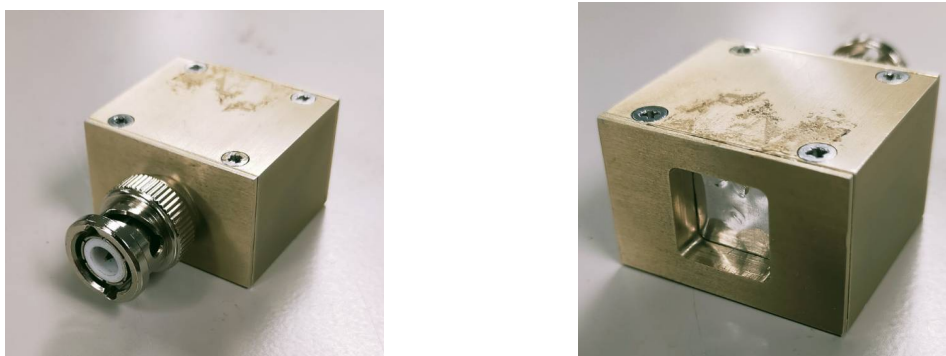


図 3.1: 使用した Si PIN フォトダイオード検出器

3.1 Am のスペクトル測定

まず Am-241 を用いてそのスペクトル測定を行った。検出器に入った信号は、プリアンプ (CLEAR PULSF MODEL 580H)、シェーパー (EGG ORTEC) を通して増幅、整形され、ADC (Pocket MCA MCA8000D) によってアナログ信号からデジタル信号に変換され PC へ送られる。

測定条件

以下に測定条件を示す。

表 3.1: 測定条件

線源	Am-241
逆バイアス	50V
測定時間	300s
温度	20 °C
ゲイン	500
シェーピングタイム	3 μ s

測定結果

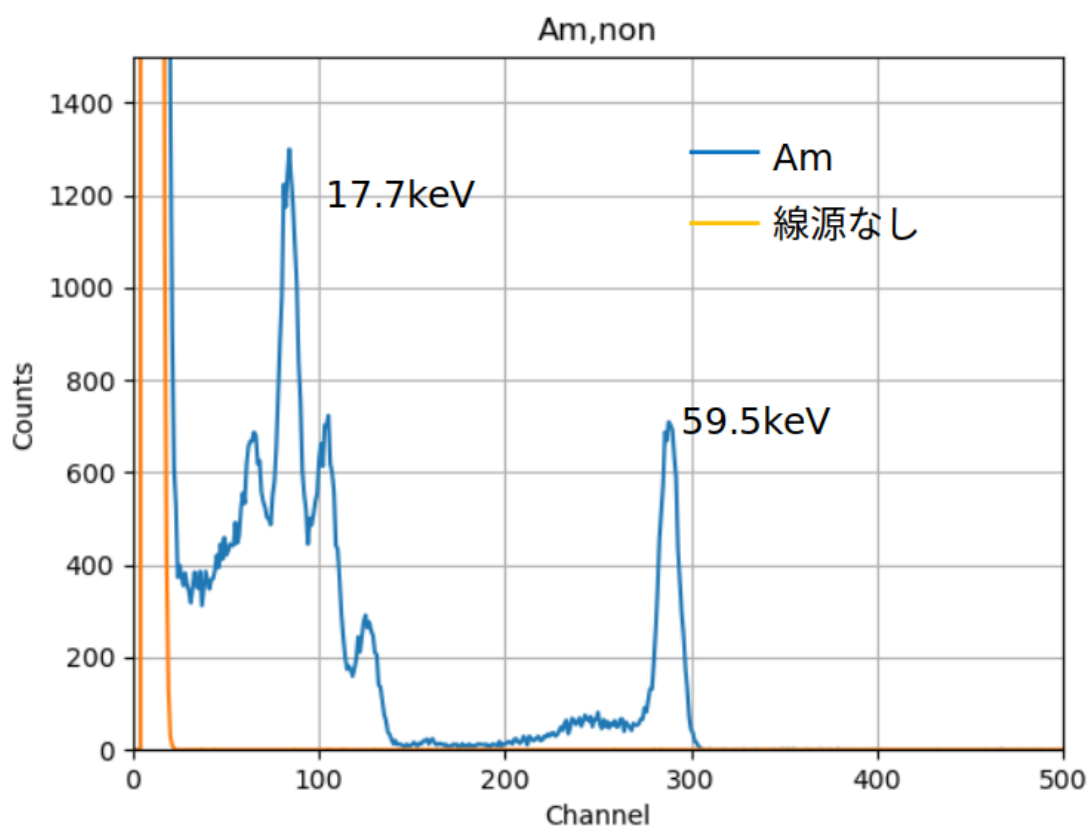


図 3.2: Am-241 のスペクトル

17.7keV のピークに対して、半値幅 3.46keV というエネルギー分解能を得た。

3.2 暗電流の測定

半導体内部の熱励起によって電子正孔対が生成され、それが微弱な電流として検出される。これを暗電流といい、回路系ノイズの主な原因であるためエネルギー分解能に大きく影響する。また、暗電流は温度

に依存する。今回は電流計として KEITHLEY 2450 SourceMeter を用いた。また、恒温槽 (ESPEC SH-220) を用いて温度を 20 °C、0 °C、-20 °C に設定して測定を行った。

測定結果

温度に依存するはずなのだが、0 °C と -20 °C の違いがはっきりと現れなかった。この時恒温槽自体に異常がないことは別の温度計を用いて確認した。温度による違いがはっきり現れなかった原因については未解明である。グラフが横這いになった時の値 (以下、終端値と呼ぶ) は約 7.0nA であった。

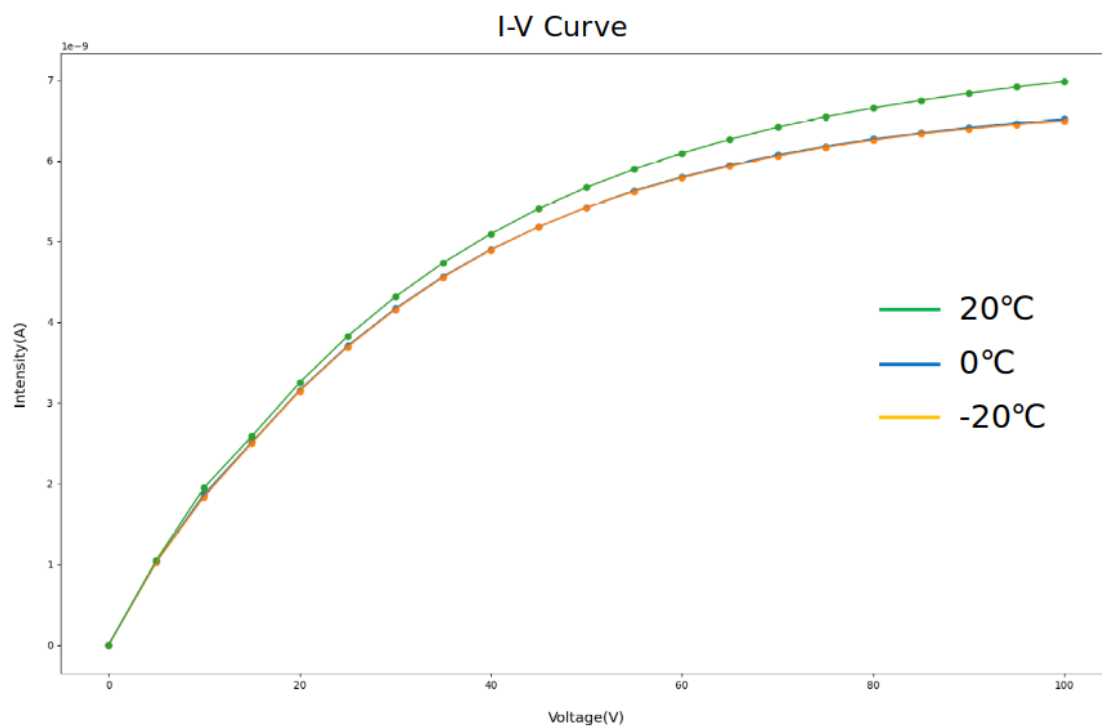


図 3.3: 暗電流の逆バイアス依存性

3.3 容量測定

pn 接合による半導体検出器では、その空乏層により、平行平板コンデンサーのような静電容量を持つ。逆バイアスをかけて空乏層を広げることで静電容量が小さくなり、放射線に感度を持つようになる。

セットアップ

容量計には HEWLETT PACKARD 4284A を使用した。さらに、容量計に取り付けられるように検出器に”足”を装着した。

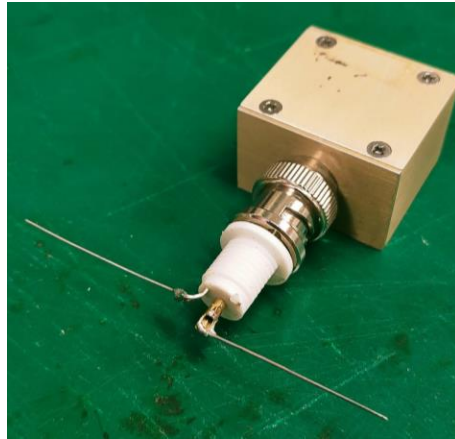


図 3.4: 足を取り付けた検出器



図 3.5: 容量測定の設定アップ

測定結果

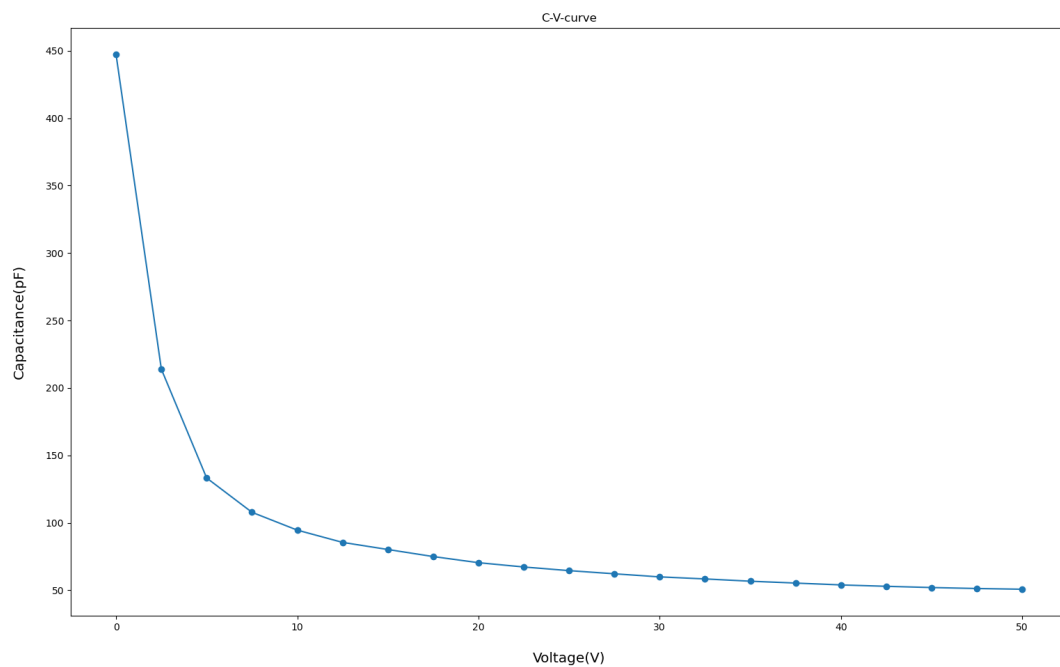


図 3.6: 容量の逆バイアス依存性

終端値は 51pF という結果を得た。十分に空乏化されたと言える。

3.4 エネルギー分解能

半導体検出器のエネルギー分解能は、暗電流と容量の終端値 I_n 、 C_{in} とシェーピングタイム τ を用いて次のような理論式で表される。

$$\Delta E^2 = 0.65 I_n \tau + f(C_{in})^2 / \tau \quad [keV^2] \quad (3.1)$$

$$f(C_{in}) = 0.016 C_{in} + 0.9 [keV] \quad (3.2)$$

ここで $f(C_{in})$ は入力容量に対する雑音特性量である。

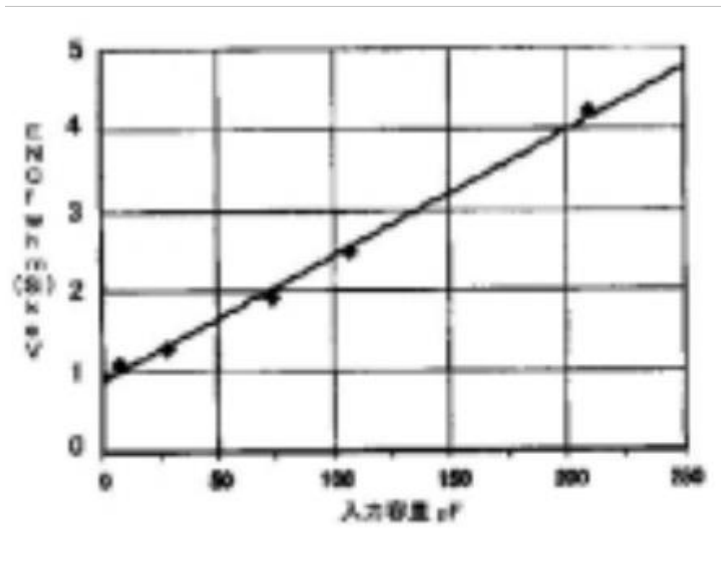


図 3.7: 入力容量に対する雑音特性量 [4]

式 3.1、3.2 に $I_n = 7.0nA$ 、 $C_{in} = 51pF$ 、 $\tau = 3 \mu s$ を代入して理論値を求め実測値と比較した。結果、理論値に近い値を測定によって出すことができた。よって、半導体実験の手法の確立ができたと言える。

表 3.2: エネルギー分解能の比較

理論値 ΔE	3.8 keV
実測値	3.5 keV

第4章 SOIPIXを使った実験

4.1 セットアップ

実験のセットアップの様子を紹介する。

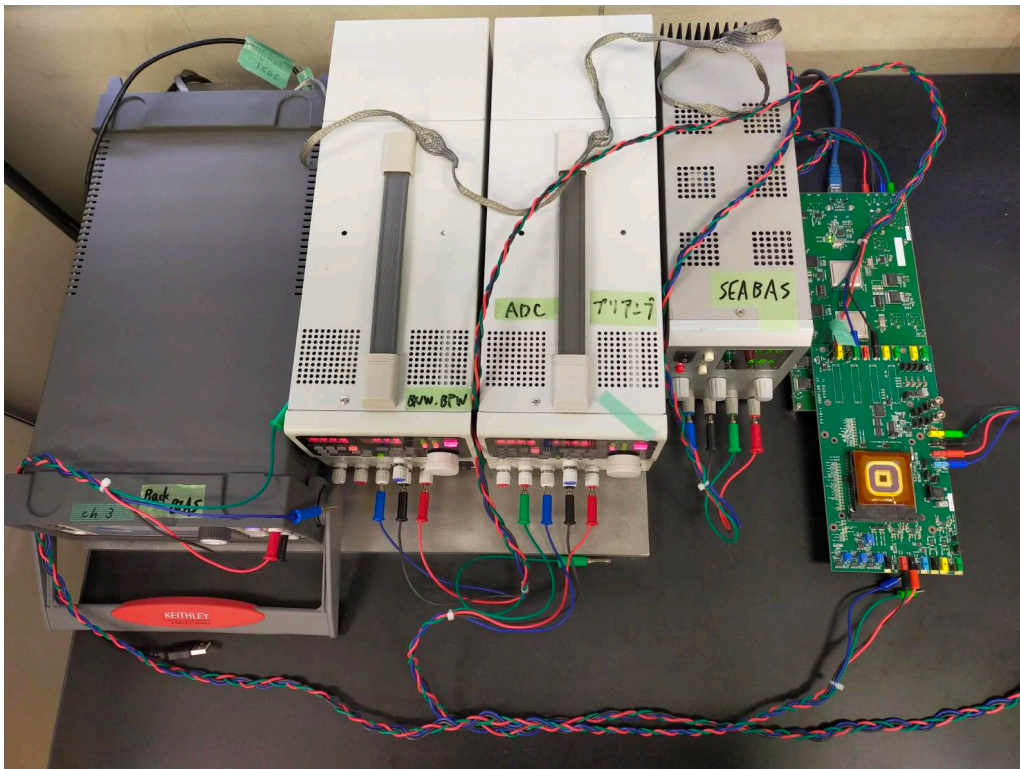


図 4.1: 実験セットアップ

各電源の電流と電圧の値を設定したら、まずは何も接続しない状態で一度出力しその値をテスターで確かめる。各電源の電流、電圧の設定値と出力値は表 4.1 の通り。異常がなければ各端子を接続し、SEABAS、プリアンプ・ADC、BPW・BNW の順で電源を入れる。この時再度出力値を確認する。LAN ケーブルが PC とうまく接続できていない時は、SEABAS の電流の出力が本来の値より小さくなるので、必ず確かめる。

素子は感度がとても良く、実験室の蛍光灯の光にさえ反応してしまうので、測定は暗幕をかぶせて行う。素子を傷つけないために OHP シートで保護し、その上に線源を置いて測定をする。今回は線源として Na-22, Fe-55, Am-241, Cd-109 を用いてそのスペクトルを取得した。実験によって、各イベントのヒットピクセルを中心とした 8×8 ピクセルの波高値が記録される。本実験は全て室温 (20 °C) のもとで行っている。

使用した素子：XRPIX8 (無印、KEK FY18-1 MPW ラン / MX2220 でプロセス)
 個体番号 = 200316F(穴あり)
 積分時間：100 μ s

表 4.1: 各電源の設定値と出力値

	設定値		出力値	
	SEABAS	+5.00V	+1.200A	+5.00V
	-5.00V	-1.200A	-5.00V	-0.096A
計装アンプ	+12.00V	+0.200A	+12.00V	+0.009A
	-12.00V	-0.200A	-12.00V	-0.011A
ADC	+3.3V	+0.300A	+3.3V	+0.090A
BNW	+1.00V	+0.002A	+1.00V	+0.00A
BPW	-2.50V	+0.002A	-2.50V	-0.00A

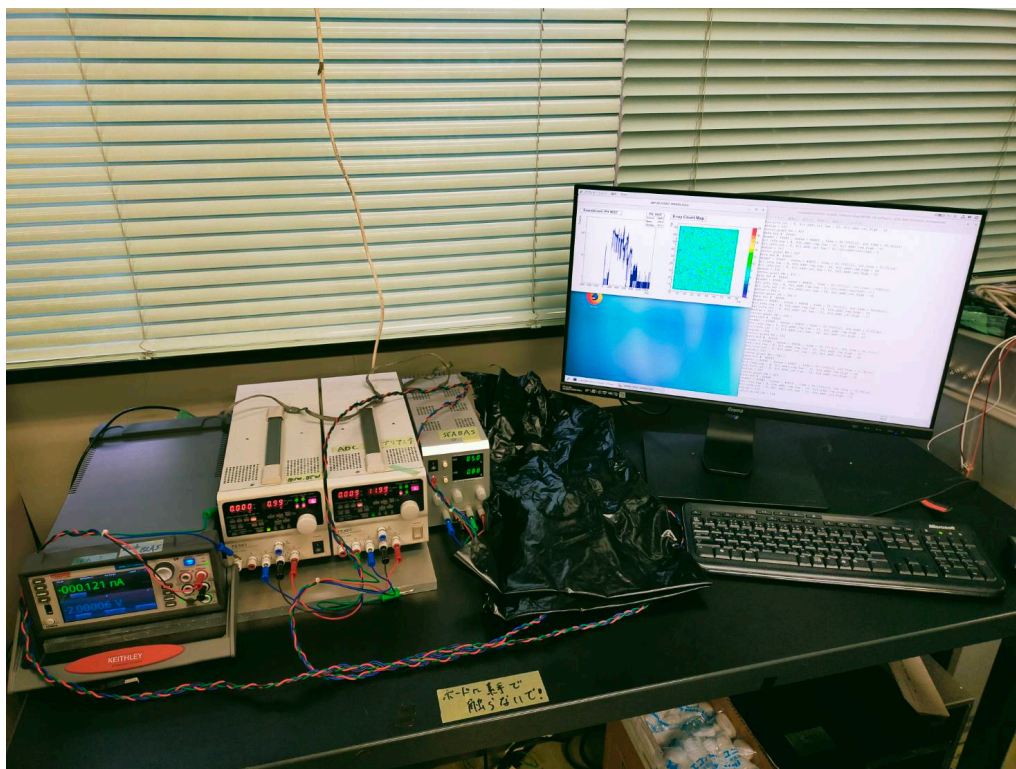


図 4.2: 測定中の様子

4.2 暗電流・イベントレート

まずは暗電流とイベントレートの逆バイアス依存性を調べ、その後の測定でどれくらいのバイアスを印加したらよいかを検討する。

4.2.1 暗電流

Si PIN フォトダイオード検出器を使った実験と同じように SOIPIX でも暗電流の測定を行った。電流計は KEITHLEY 2450 SourceMeter を使用し、温度は室温（ $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ）のもとで測定した。

測定結果

予想に反し、暗電流は逆バイアスに対し exponential で増加する振る舞いを見せた。これは Si PIN フォトダイオード検出器を使った時との大きな違いである。100V まではおおよそ一定と見なせ、それ以降は大きく上昇していく。

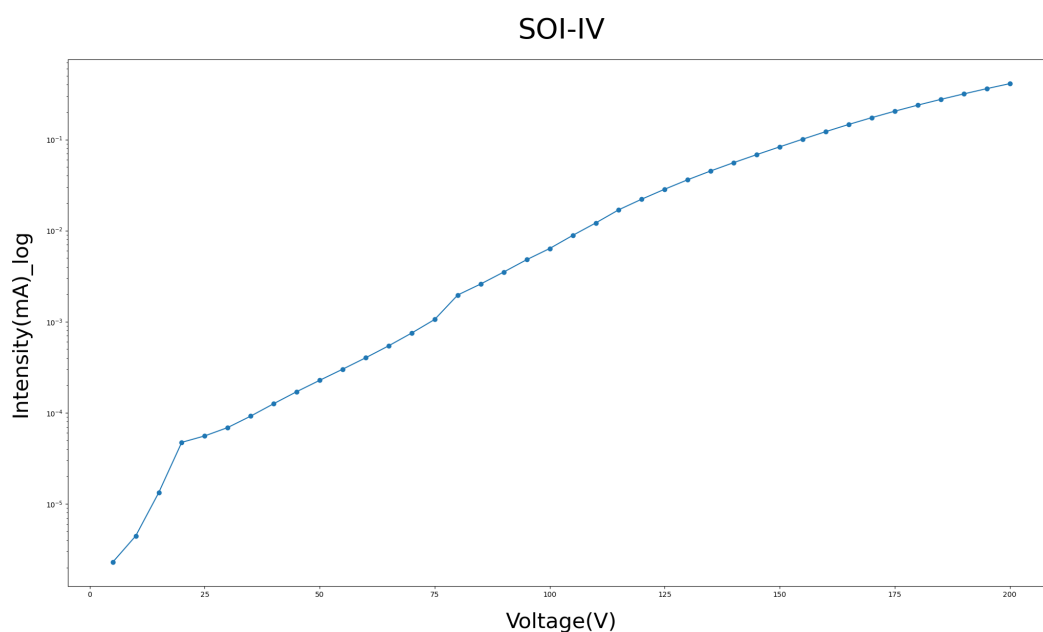


図 4.3: 暗電流の逆バイアス依存性

4.2.2 イベントレート

Si PIN フォトダイオード検出器では逆バイアスによって空乏層が広がる様子を見るために検出器の持つ容量を指標としたが、SOIPIX は容量計に取り付けることができないため代わりにイベントレートの測定を行う。線源には Am-241 を用いて、各測定で 20,000 イベントを取得、それに要した時間を測定しイベントレートを算出した。逆バイアスが大きく空乏層が厚い程、反応確率は大きくなるためイベントレートも大きくなり、空乏化が上限に近づくとつれて一定の値に収束すると予想できる。

測定結果

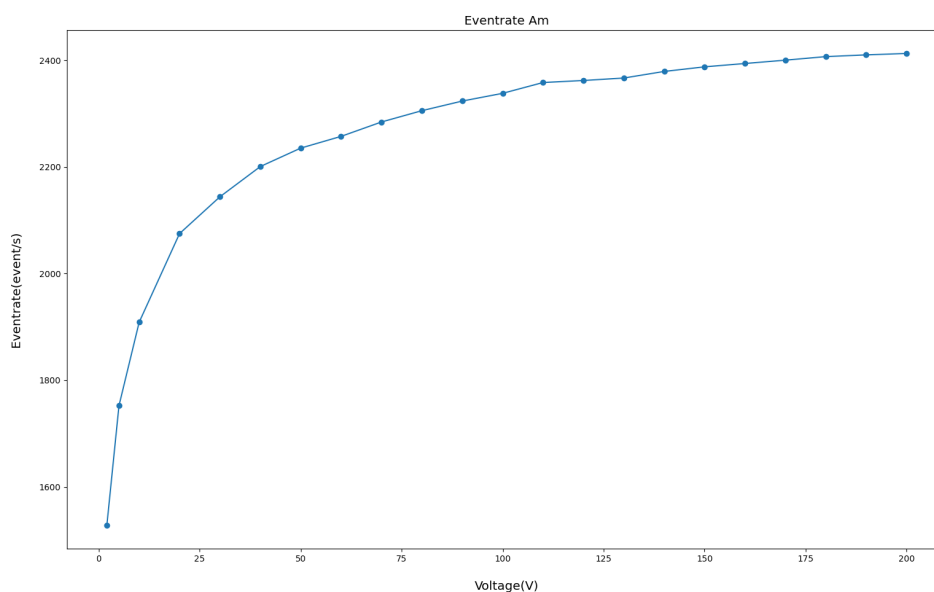


図 4.4: イベントレートの逆バイアス依存性

結果は予想通り、逆バイアスが大きくなるにつれて上昇していき、次第に収束していった。暗電流の結果と合わせて、これ以降の測定は 100V の逆バイアスを印加して行うこととする。

4.3 しきい値の決定

ペDESTAL (バックグラウンド、ゼロ点レベル) とガンマ線によるイベントのしきい値を決定する。本来はしきい値、スレッシュホールド電圧を予め設定しておき、イベント取得時にしきい値に満たないものは除かれるが、本研究の一連の実験ではペDESTALとガンマ線によるイベントの両方がスペクトルに現れているため、そのしきい値を自分で決定した。ペDESTALは、 8×8 ピクセルのヒットしていないピクセルの波高値から得ている。

しきい値の決定方法は、ガンマ線源 Na-22 を用いてそのスペクトルを取得することである。Na-22 による 511 keV や 1275 keV の輝線は SOIPIX ではコンプトン散乱してピークをつくらないため、純粹にペDESTALのみピークとして見るができる。得られた全ピクセルのスペクトルの和を図 4.5 に示す。

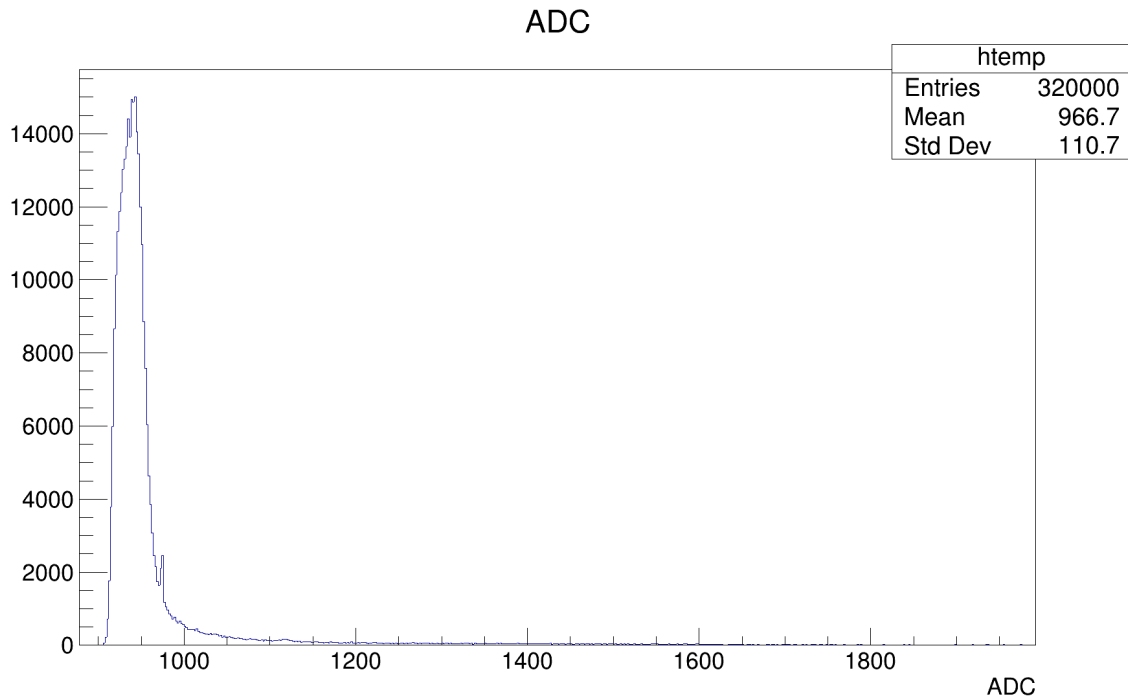


図 4.5: ガンマ線源 Na-22 のスペクトル

この結果から、しきい値を 1100 ADC channel と決定する。つまり、1100 channel 以下はペDESTAL、1100 channel 以上はガンマ線によるイベントと判断する。

4.4 ペDESTAL分布

7520 個ある全てのピクセルについて、そのペDESTAL分布を調べる。以下に解析方法を示す。

1. 全イベントからしきい値以下の信号を選び出し、その波高値とピクセルの位置情報を読み出す。
2. 各ピクセルごとに、そのピクセルで捉えた信号の波高値を一次元ヒストグラムにする。
3. 2 に対してガウシアンフィッティングを行う。これによって 7520 個のパラメータ（中央値と標準偏差）が得られる。

ペDESTALのばらつきは回路系のノイズに影響するので、これを調べることでエネルギー分解能の評価につながる。

結果

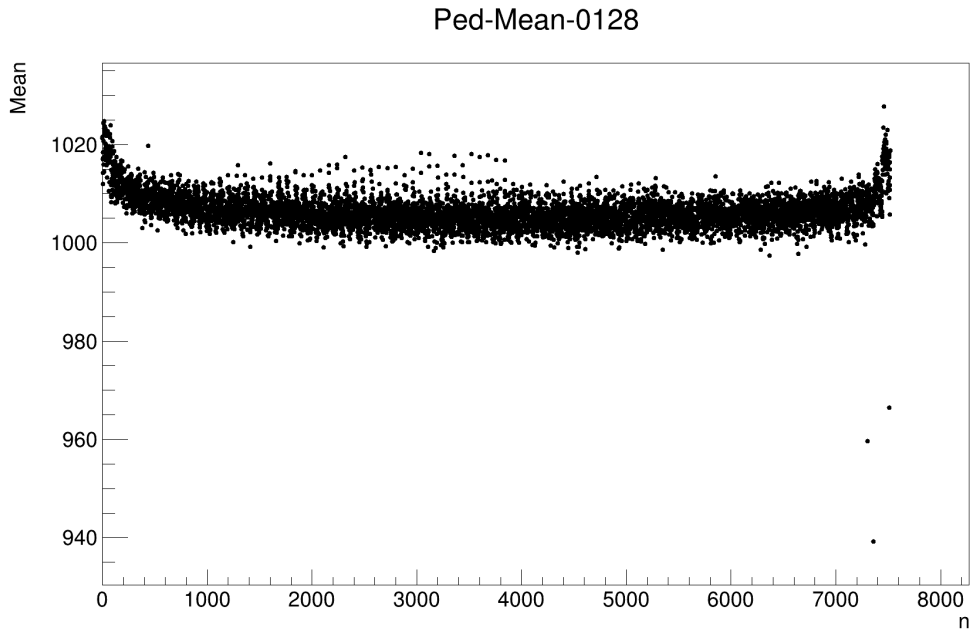


図 4.6: 各ピクセルのペダスタルの中央値

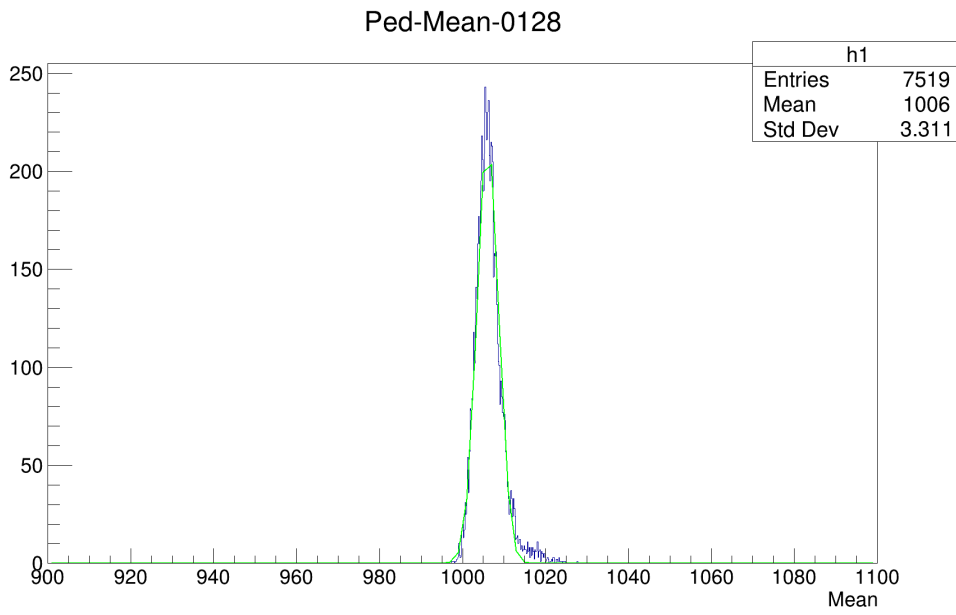


図 4.7: 各ペダスタルの中央値

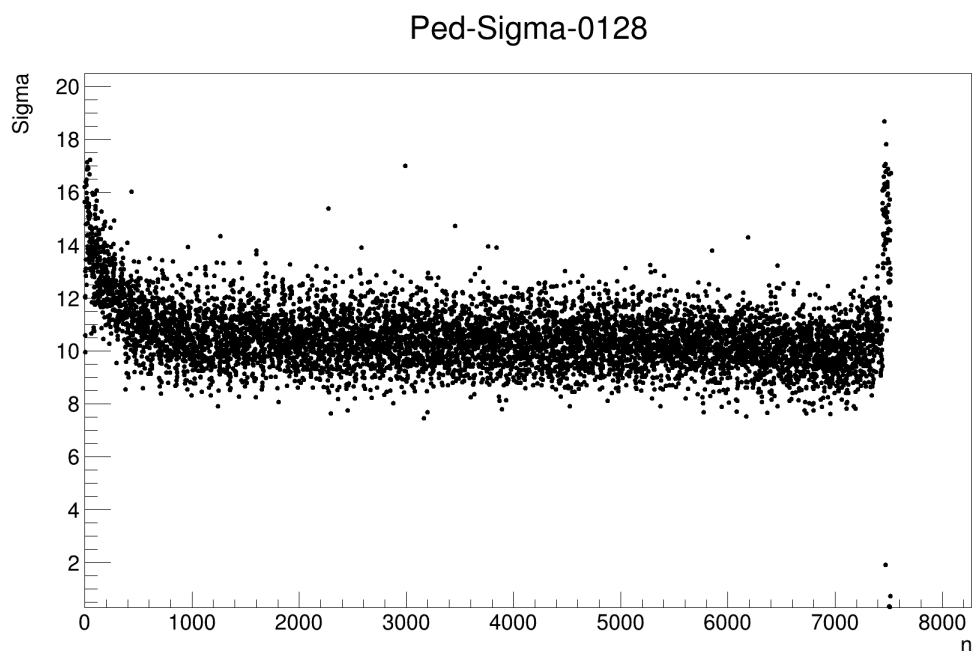


図 4.8: 各ピクセルのペDESTALの標準偏差

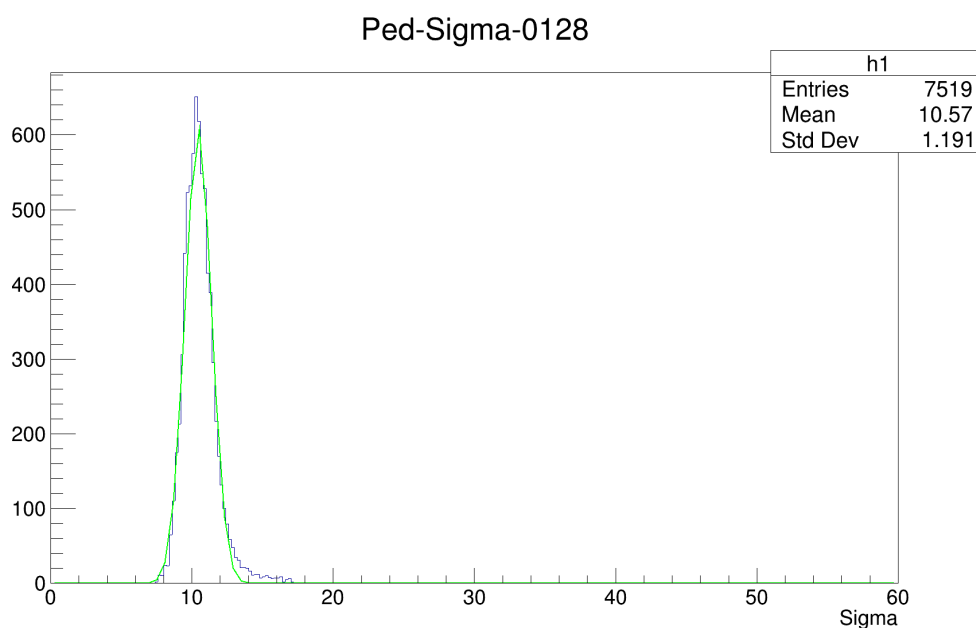


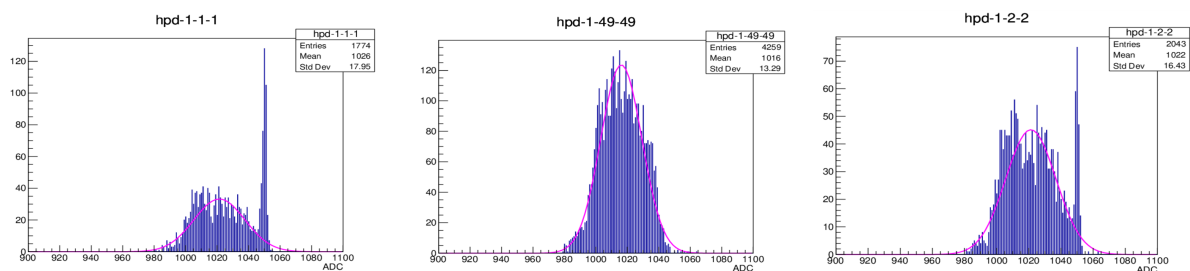
図 4.9: 各ペDESTALの標準偏差

線源には Am-241 を用いた。素子の左下から右上にかけて、7520 個あるピクセルに通し番号 n をつけている。図 4.6 は横軸に n 、縦軸に各ピクセルのペDESTAL 分布をガウシアンでフィットした時の中央値をプロットしている。これを見ると、全てのピクセルについてペDESTAL はほぼ一定の値をとることがわかる。

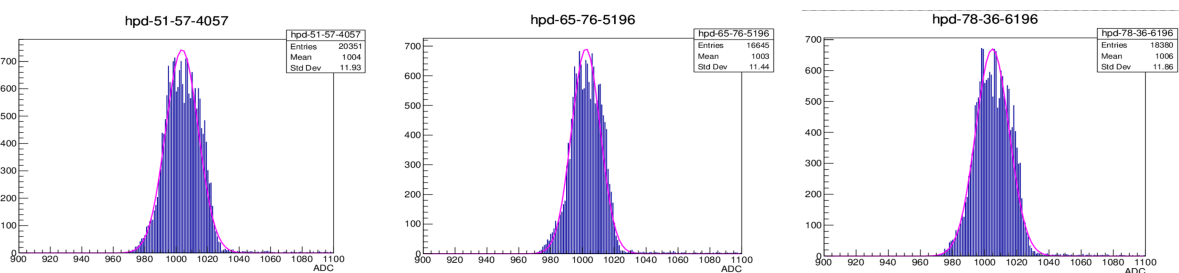
図 4.7 は各ペDESTALの中央値の一次元ヒストグラムである。これをさらにガウシアンでフィットすると、そのばらつきは 1%未満であることがわかった。よって全ピクセルで共通のペDESTAL値としてよいとする。「ばらつき」とは、ガウシアンフィットによって得られた標準偏差を 2.35 倍し、それをフィットした際の中央値で割ったものである。

図 4.6 と 4.8 を見ると、グラフの端で値が少し大きくなっていることがわかる。ピクセル番号の両端は素子でいうところの最下段と最上段の行にあたる。該当するピクセルのペDESTALを調べてみた。

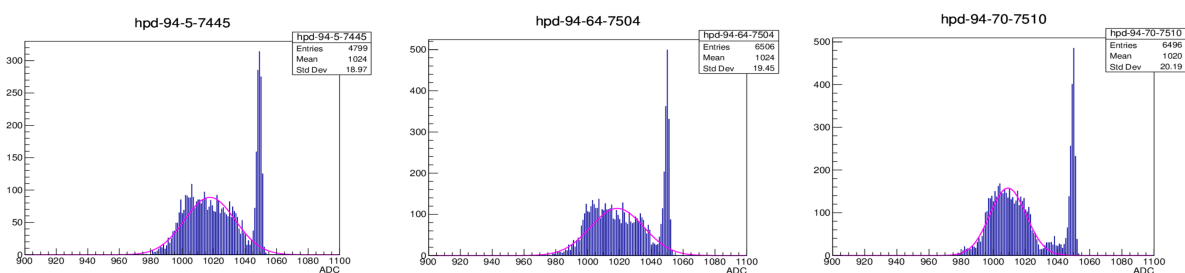
素子最下段のペDESTAL



素子中央のペDESTAL



素子最上段のペDESTAL



最下段と最上段では、ペDESTALの範囲内に細長いピークを発見した。このピークの原因はまだ不明だが、これによってフィッティングの際右側に引っ張られてしまい、中央値、標準偏差ともに大きくなったと考えられる。この鋭いピークに関しては今後調べていく必要がある。

下の図は、図 4.6 の結果を得た時と同じ線源 (Am-241)、同じ測定条件 (逆バイアス値や取得イベント数など) で、別日に全く同じようにペDESTALを測定した結果である。

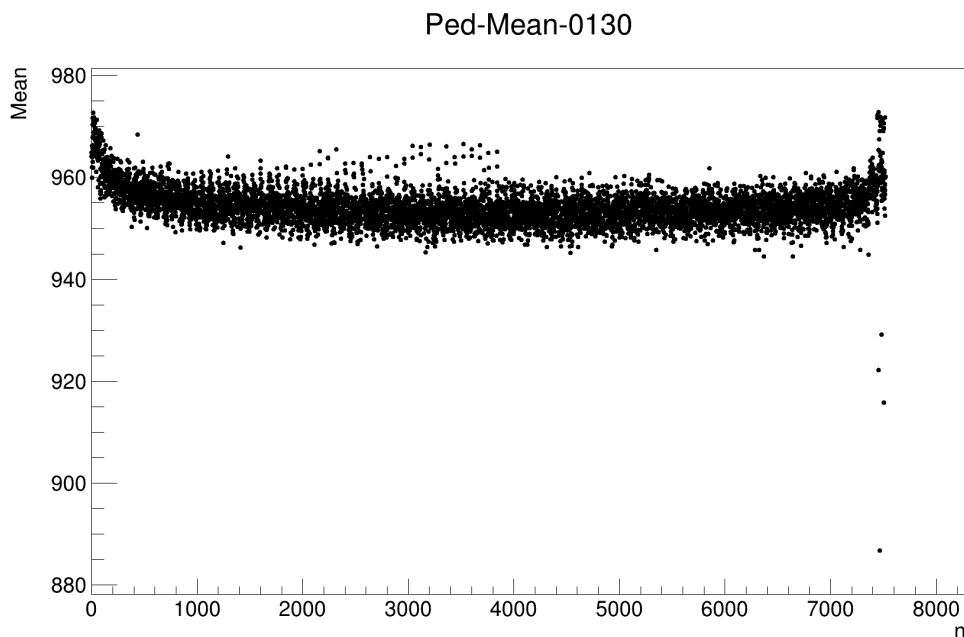


図 4.10: 各ピクセルのペDESTALの中央値-2

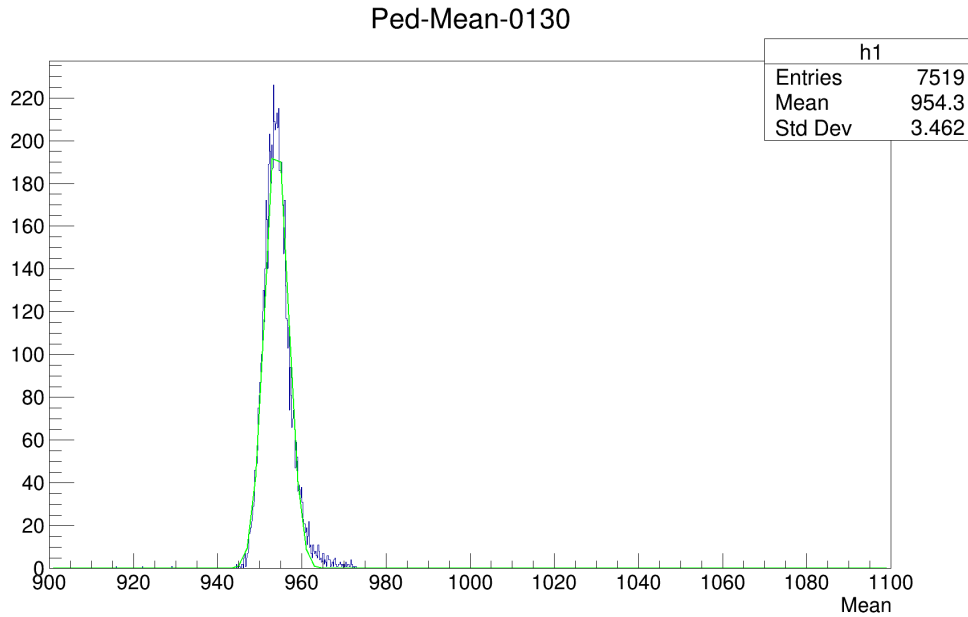


図 4.11: 各ペDESTALの中央値-2

図 4.6 と図 4.10 を比較すると、ペDESTALの値が異なることがわかる。本来ペDESTALは線源に依らず同じ値をとるはずである。にもかかわらず値が異なるのは、測定した日時の違い、その時の環境に左右される微量なノイズによるものだと考えられる。それだけ SOIPIX は感度が高いと言える。今後は原因をつきとめて、測定によらずペDESTALが変化しないようにするべきである。

この結果より、本研究では取得した全てのデータにおいてペDESTAL分布を出力し、その値とばらつきを確認した上で次の解析に進むこととする。最後に、各データについて、測定日時、ペDESTAL値、ばらつき度合いを表 4.2 にまとめておく。いずれの場合でも、ペDESTAL値のピクセルごとのばらつきは無視できるほど小さく、ペDESTALは全てのピクセルで共通として良いことは確かである。

表 4.2: 各ペDESTAL値とそのばらつき

線源	測定日時	ペDESTAL値 (ch)	ばらつき (%)
Am-241	2021-12-27-Mon-15:40	924.794	0.56
Am-241	2022-1-27-Thu-11:23	1006.07	0.61
Fe-55	2022-1-27-Thu-12:31	1009.69	0.67
Am-241	2022-1-30-Sun-16:07	953.964	0.69
Cd-109	2022-2-1-Tue-14:52	948.881	0.69

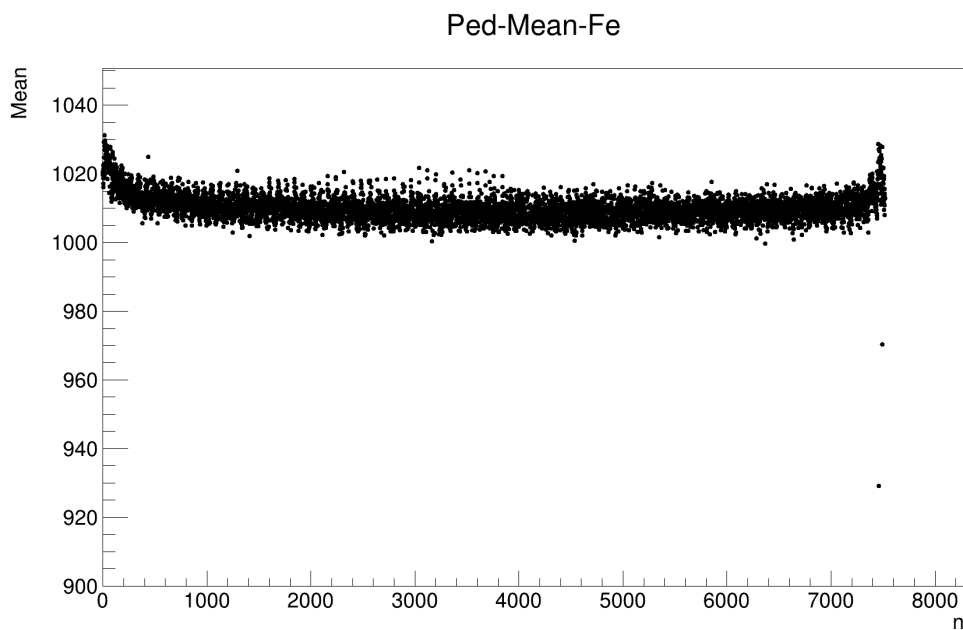


図 4.12: 各ピクセルのペDESTALの中央値-Fe

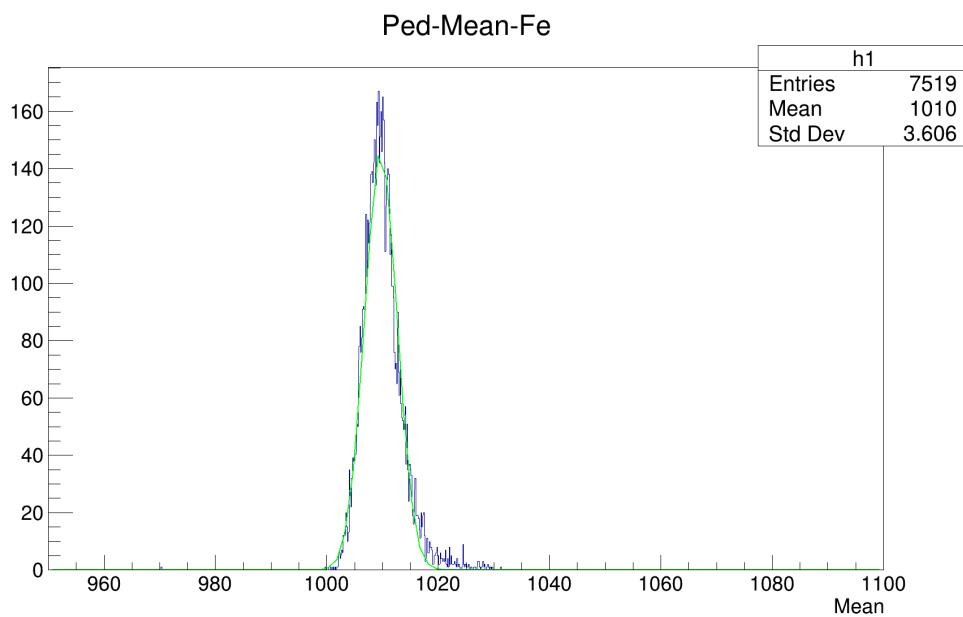


図 4.13: 各ペDESTALの中央値-Fe

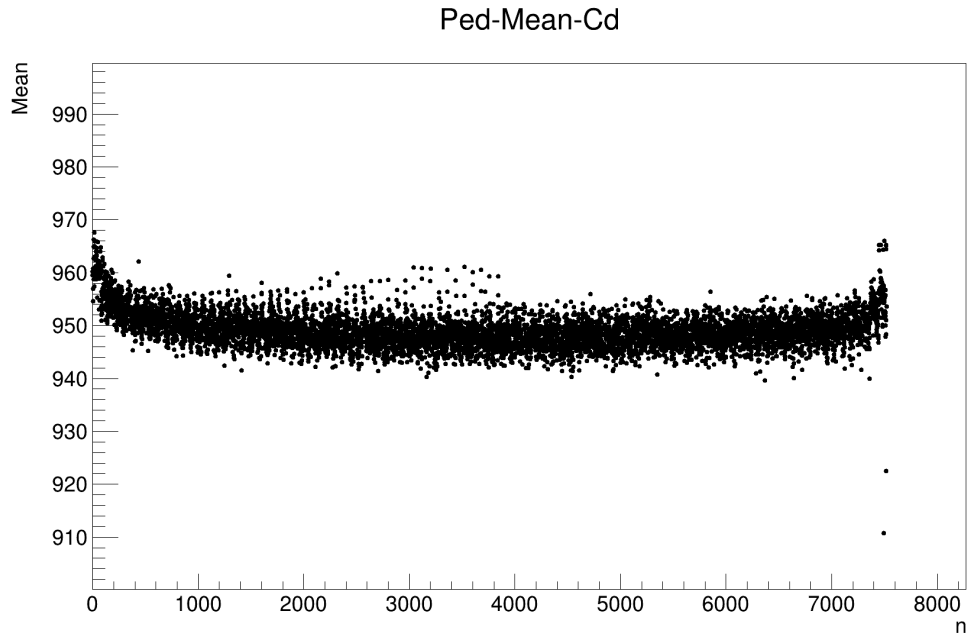


図 4.14: 各ピクセルのペダスタルの中央値-Cd

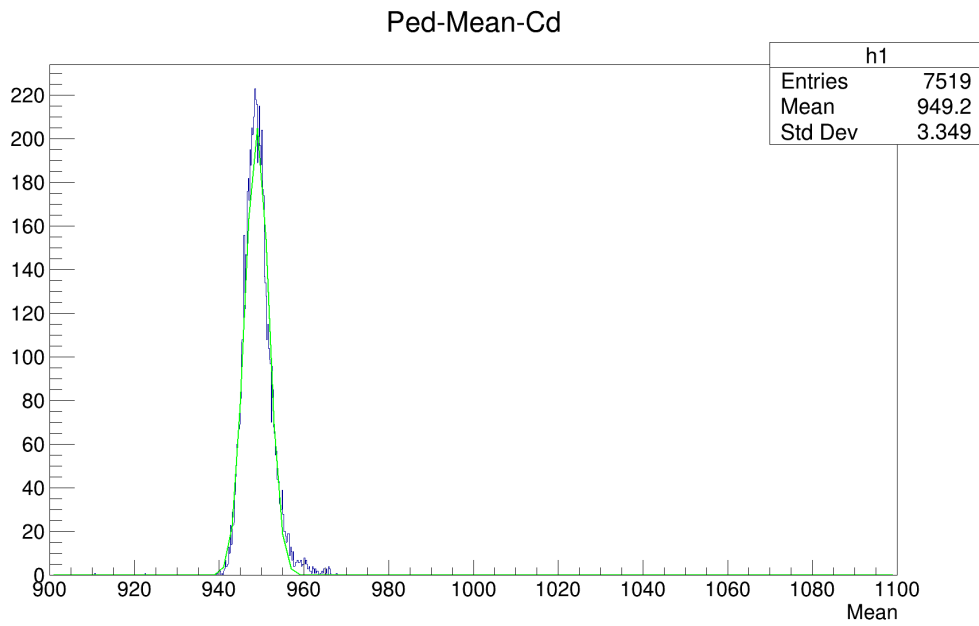


図 4.15: 各ペダスタルの中央値-Cd

4.5 スペクトル分布

Fe-55 を用いて、各ピクセルごとのスペクトルをペDESTALと同様に解析する。これはピクセルごとのゲインのばらつきを確認するためである。Fe-55 は 5.9 keV のピークしかないので 1 ピクセルごとに細かく見ても十分な統計が見込まれる。X 線によるピークのみを見たいため、4.4 章で求めたペDESTALを引く。ペDESTALは全てのピクセルにおいて一定としたので、各イベントの波高値から、Fe であれば 1009.69 を引き算すればよい。これ以降「スペクトル」と記載したときはペDESTALを引いた状態を指す。

今回はシングルヒットイベント（1 イベントの中でしきい値を超えた波高値が 1 つだけであるイベント）のみを選び出し、ペDESTALと同様の解析を行った。また、2 次元のカウントマップも作成した。

結果

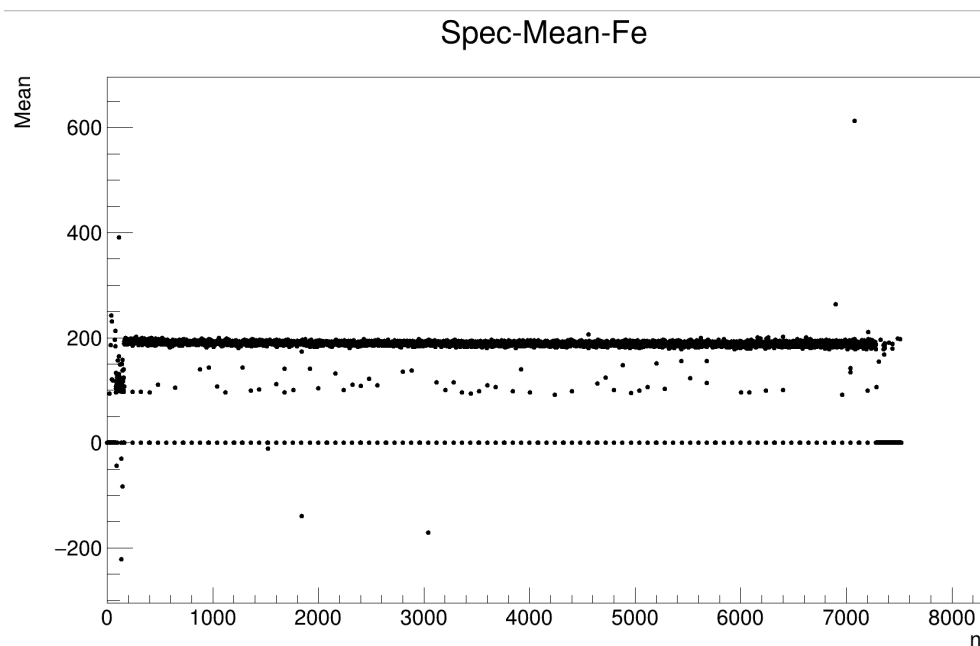


図 4.16: 各ピクセルのスペクトルの中央値-Fe

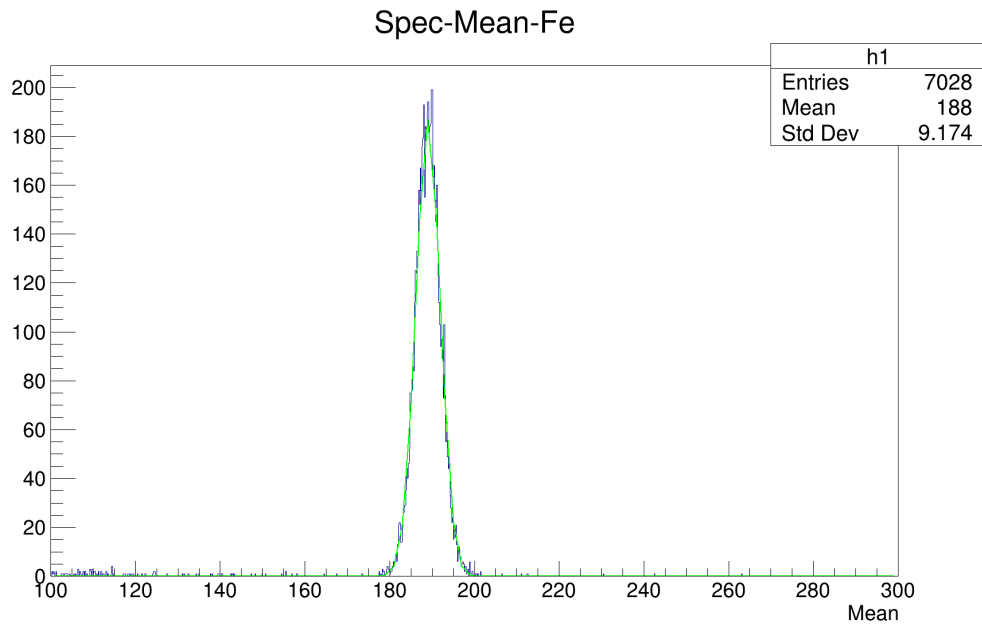


図 4.17: 各スペクトルの中央値-Fe

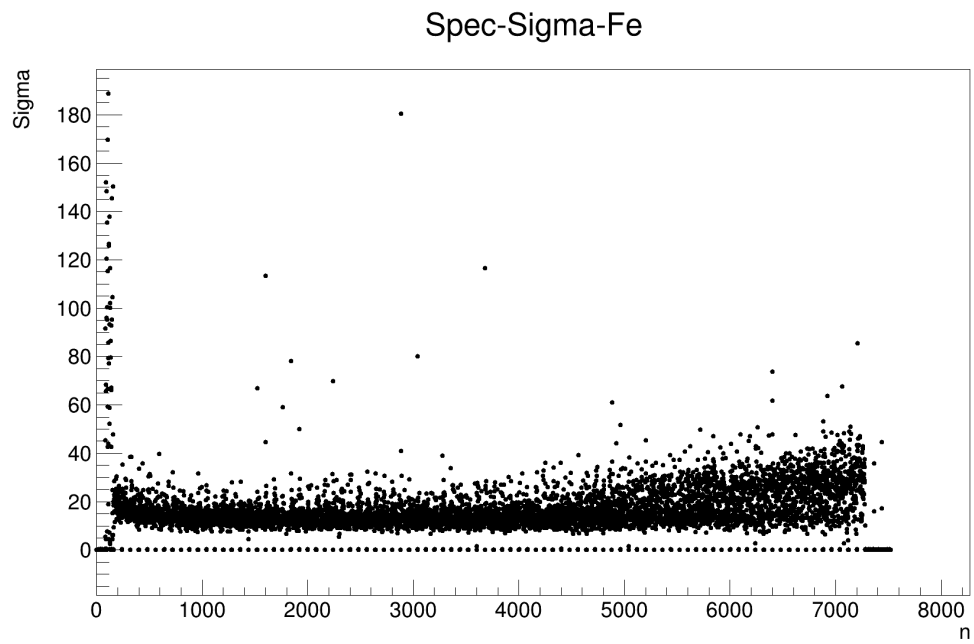


図 4.18: 各ピクセルのスペクトルの標準偏差-Fe

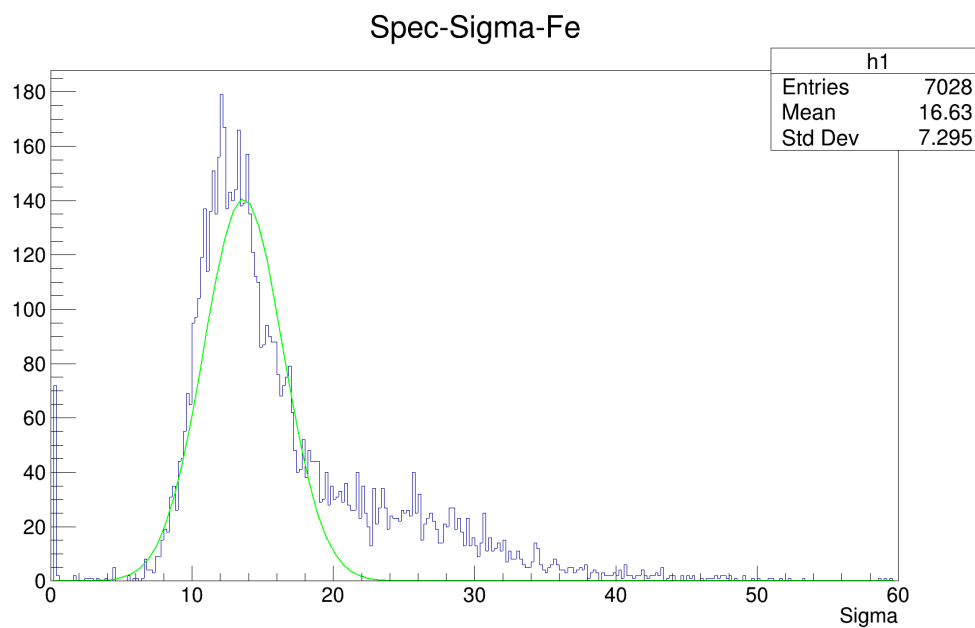


図 4.19: 各スペクトルの標準偏差-Fe

各ピクセルごとに、5.9 keV のピークに対しガウシアンフィッティングを行い、その中央値と標準偏差をプロットしている。図 4.16 を見ると、中央値はピクセルごとの差がほとんどなく、きれいに横一直線に並んでいる。図 4.17 の結果も併せて、ピクセルごとのゲインのばらつきも十分小さいと判断した。ここでのばらつきの定義はペダスタルの時と同様である。

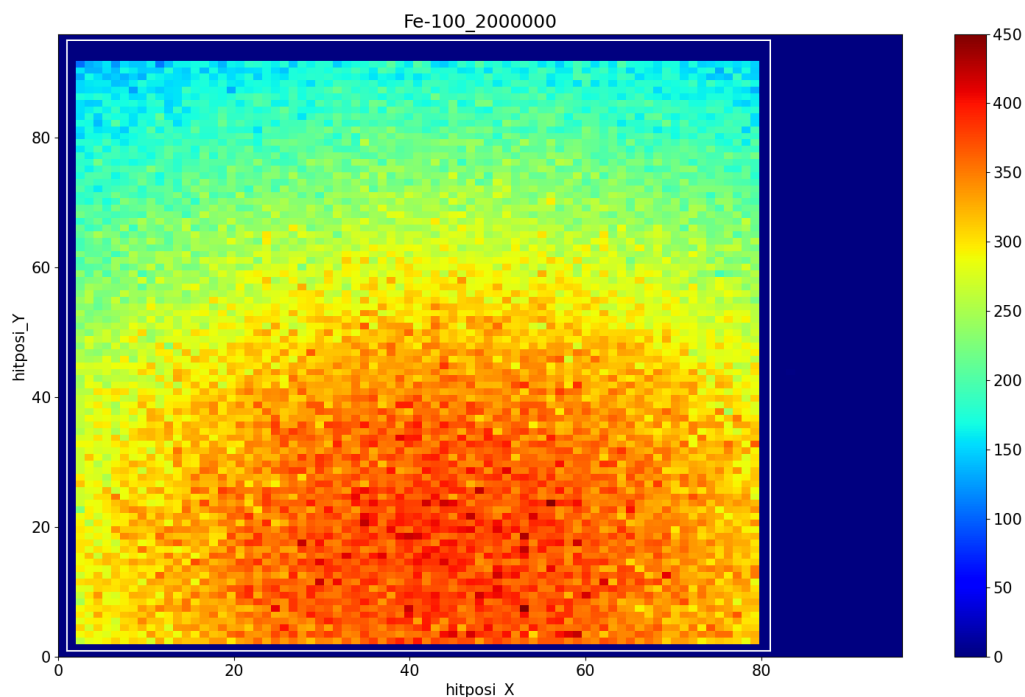


図 4.20: CountMap-Fe

次にカウントマップを見てみる。図 4.20 は Fe-55 でスペクトルを取得した時のカウントマップであり、図中の白枠は有効面積である。これを見ると検出器の下側にイベントが集中していて上側にはあまり当たっていないように見えるが、これは検出器の特性ではなく線源の置き方が悪かったためだと考えられる。SOIPIX は自分で素子の上に線源を置いて実験をする。その際検出部の中心を狙って置いても何かのタイミングで位置がずれてしまったのだらうと思われる。これによって検出器上部でのヒット数が減ってしまった。

使用した線源と、照射部の大きい（素子の有効面積ほどある）Am-241 で測定した時のカウントマップも掲載する。これを見ると、全てのピクセルでほぼ均一にヒットしていることがわかる。



図 4.21: 線源 Fe-55

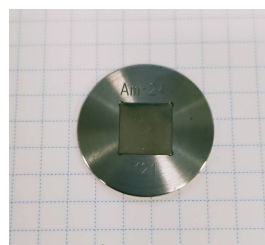


図 4.22: 線源 Am-241

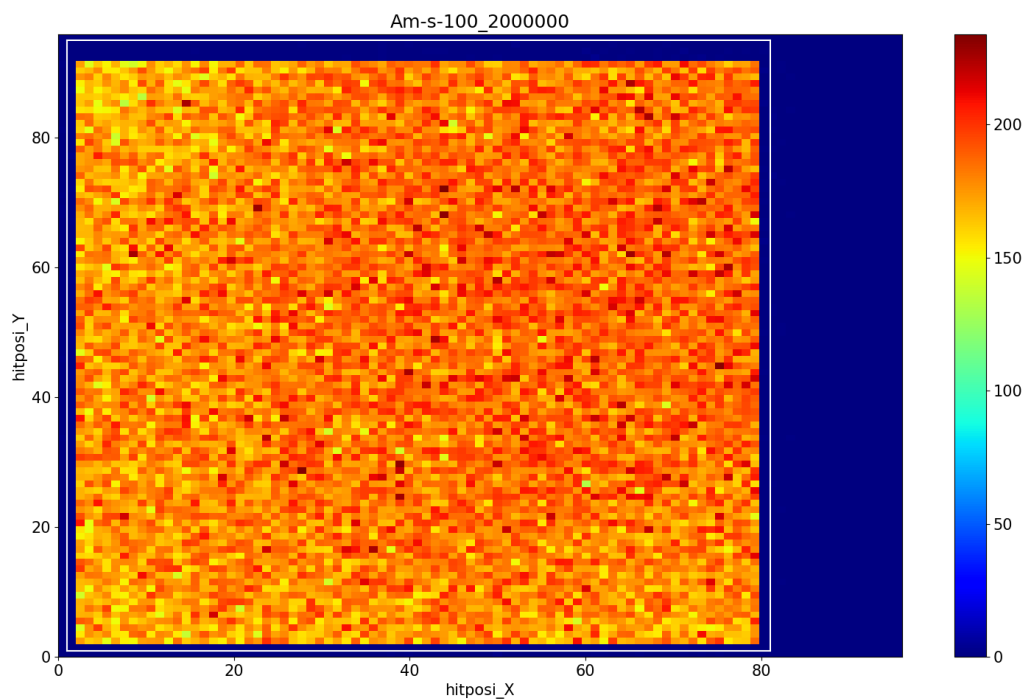
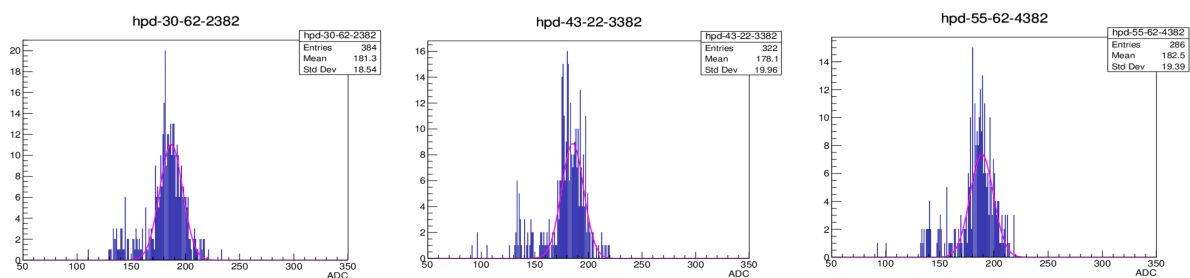


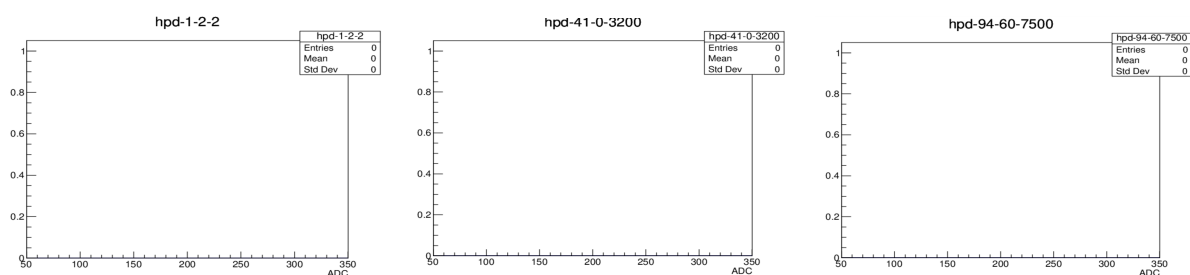
図 4.23: CountMap-Am

さらに、カウントマップから、有効面積であるにもかかわらずイベントを全く検出してないピクセルがあることがわかる。有効面積内の外周に位置するピクセルが該当する。図 4.16 と図 4.18 では中央値、標準偏差の値が 0 となって現れている。これは、マスクをかけてトリガーが出力されないようにしているためである。最外周のピクセルはポテンシャルとの兼ね合いで若干特性が異なる。また、8x8 読み出しのため、外周のピクセルのトリガを受け付けると範囲外を読み出すことになる。以上 2 点の理由でマスクをかけている。具体的なスペクトルを下に示す。

素子中央のスペクトル



素子外周のスペクトル



4.6 エネルギー分解能

4.5章よりゲインのばらつきは小さいことがわかったので、全てのピクセルについてスペクトルを足し合わせて解析を進める。まず、スペクトル分布を出すために選び出したシングルヒットイベントの波高値をピクセルごとに分けずに全てプロットして検出器全体としてのスペクトルを出す。その各ピークについてガウシアンフィッティングを行い、エネルギー較正直線を求める。求めた較正直線を使って ADC channel から Energy[keV]に変換し、エネルギー分解能を求める。これは個々のピクセルではなく、検出器全体としてのエネルギー分解能である。

4.6.1 較正直線

使用した線源は Fe-55、Am-241、Cd-109 である。まず、全ピクセル分足し合わせた検出器全体のスペクトルを示す。

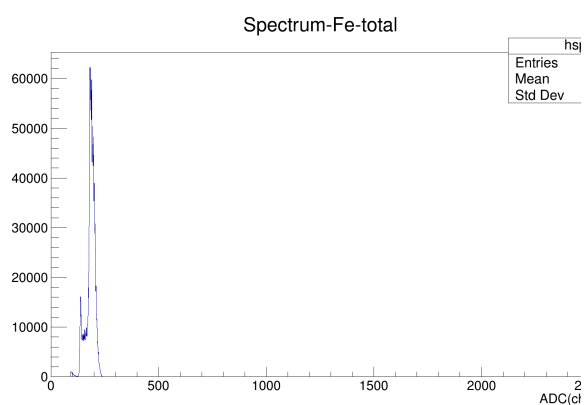


図 4.24: スペクトル-Fe

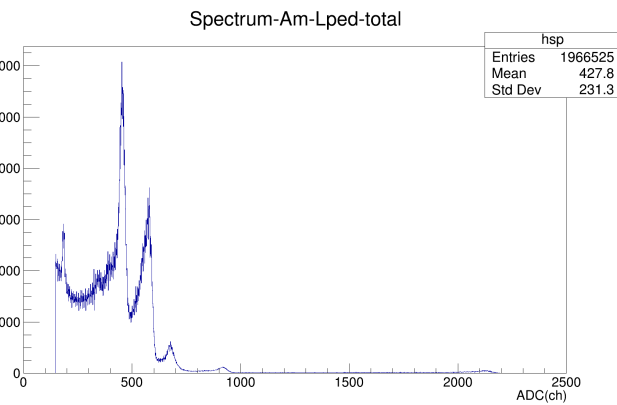


図 4.25: スペクトル-Am

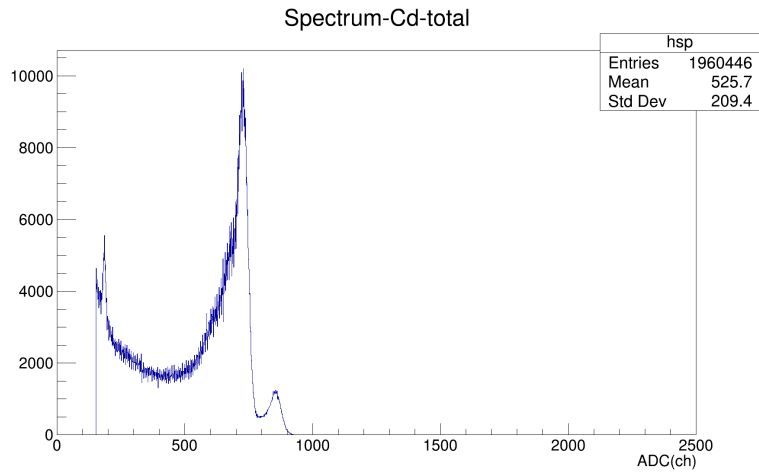


図 4.26: スペクトル-Cd

ここから較正直線を求める。結果、ADC 値とエネルギーは線形で表せることがわかった。

表 4.3: 各ピークの ADC channel 値

線源	Energy(keV)	ADC(ch)
Fe-55	5.9	184.702
Am-241	13.81	454.220
	17.7	574.291
	20.7	675.172
Cd-109	22.2	726.015
	24.9	853.910
Am-241	59.5	2126.68

較正直線

$$ADC(ch) = 35.5 \times E(keV) - 32.4 \quad (4.1)$$

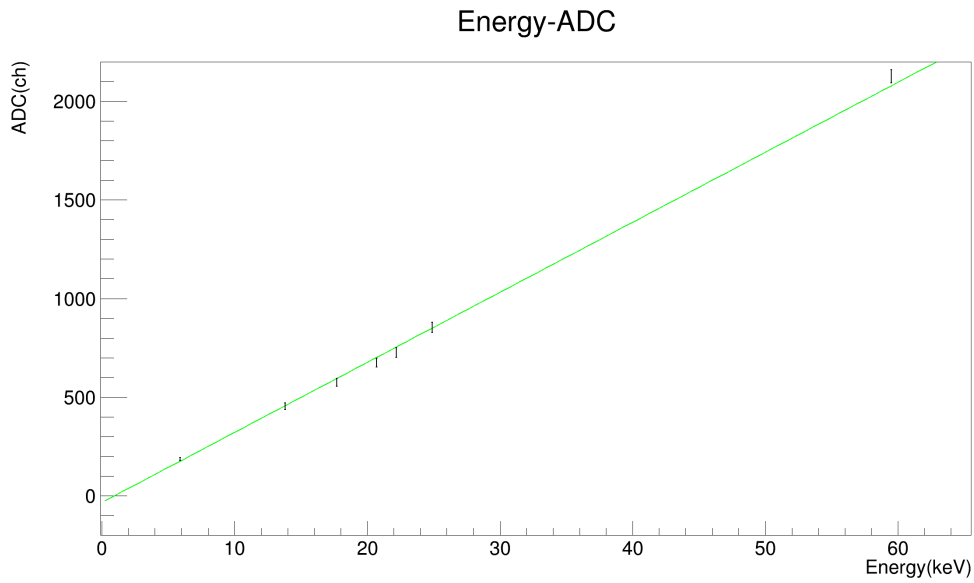


図 4.27: エネルギー較正直線

4.6.2 XRPIX8 のエネルギー分解能

求めた較正直線を使って横軸を ADC(ch) から Energy(keV) に変換した。以下に各スペクトル、それをフィットした結果、エネルギー分解能を示す。エネルギー分解能は、Fe-55 の 5.9 keV のピークに対して 683 eV、Am-241 の 13.81 keV のピークに対して 941 eV と、1 keV を下回る分解能を得た。Cd-109 の 22.2 keV のピークに対しては 1.37 keV という結果になった。

表 4.4: 各エネルギーに対する分解能

線源	Energy(keV)	FWHM(eV)
Fe-55	5.9	683
Am-241	13.8	941
Cd-109	22.2	1370

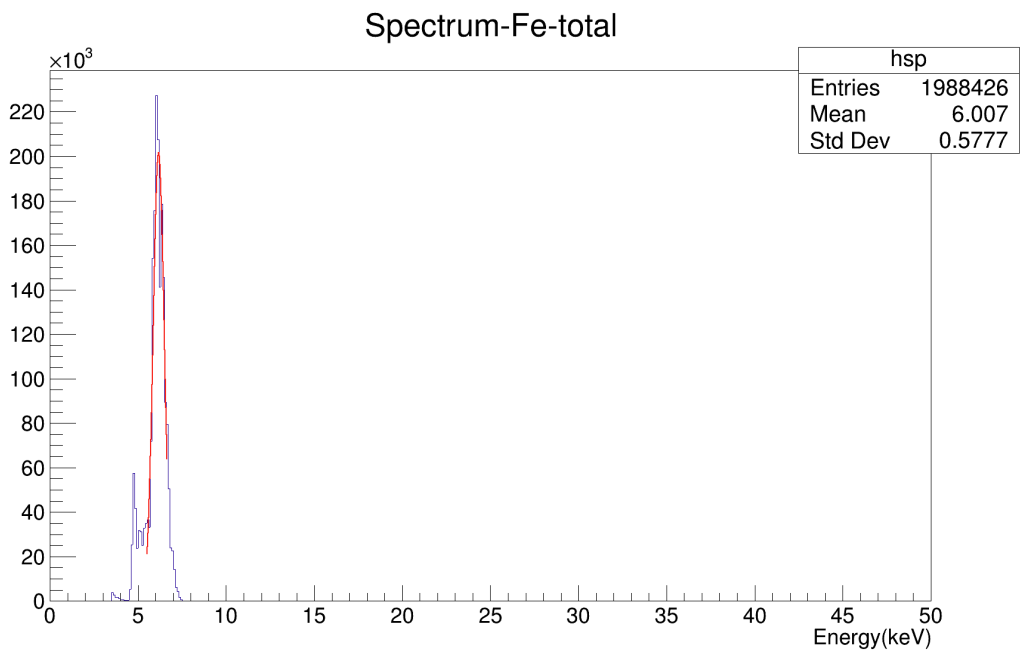


図 4.28: スペクトル-Fe-FWHM

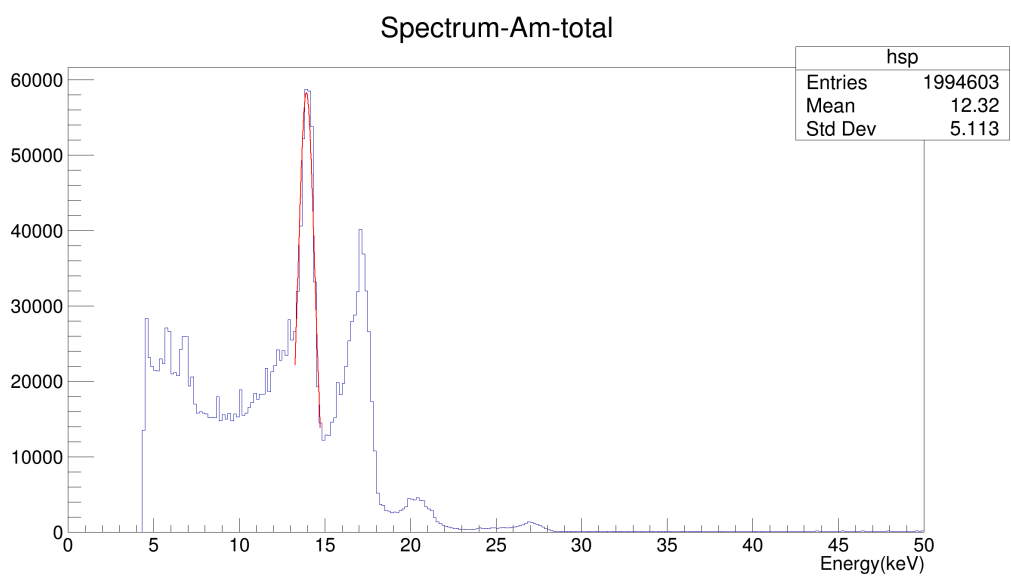


図 4.29: スペクトル-Am-FWHM

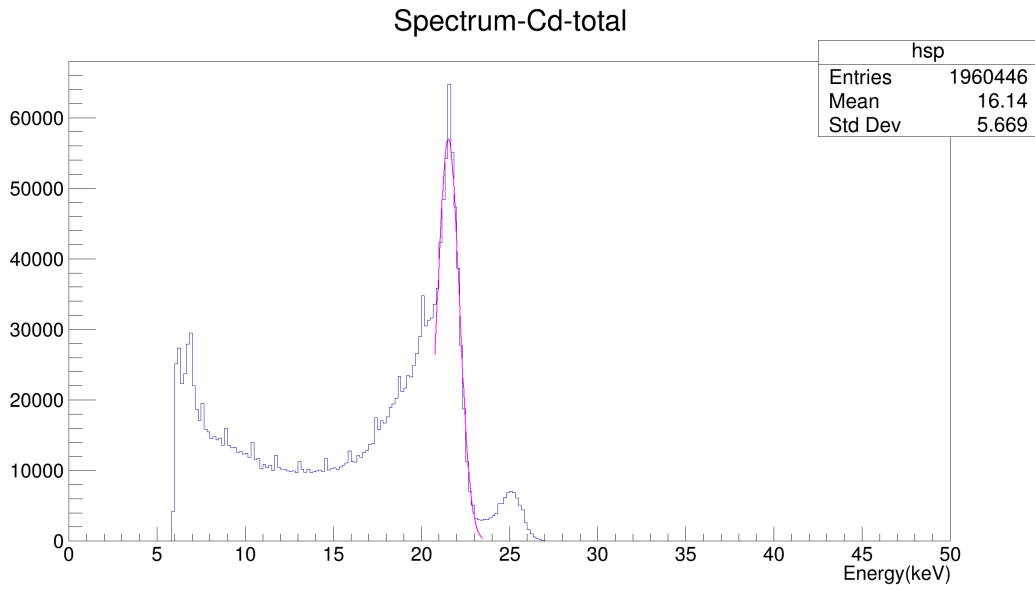


図 4.30: スペクトル-Cd-FWHM

ここでエネルギー分解能についてまとめておく。まずは図 4.9 を再掲する。

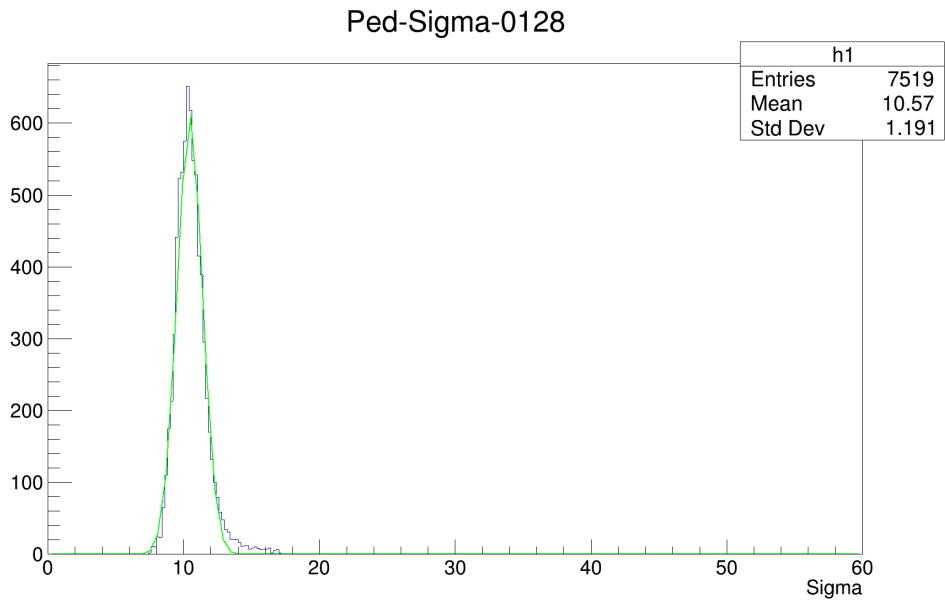


図 4.31: 各ペDESTALの標準偏差 -再

これは、4.4 章で述べた各ピクセルのペDESTALの標準偏差を、一次元ヒストグラムにしたものである。ガウシアンでフィットし、得られた中央値を較正直線を用いてエネルギーに直すと、ペDESTALのばらつき（これがノイズに相当する）は約 280 eV という結果が出た。

次に、図 4.17 を再掲する。

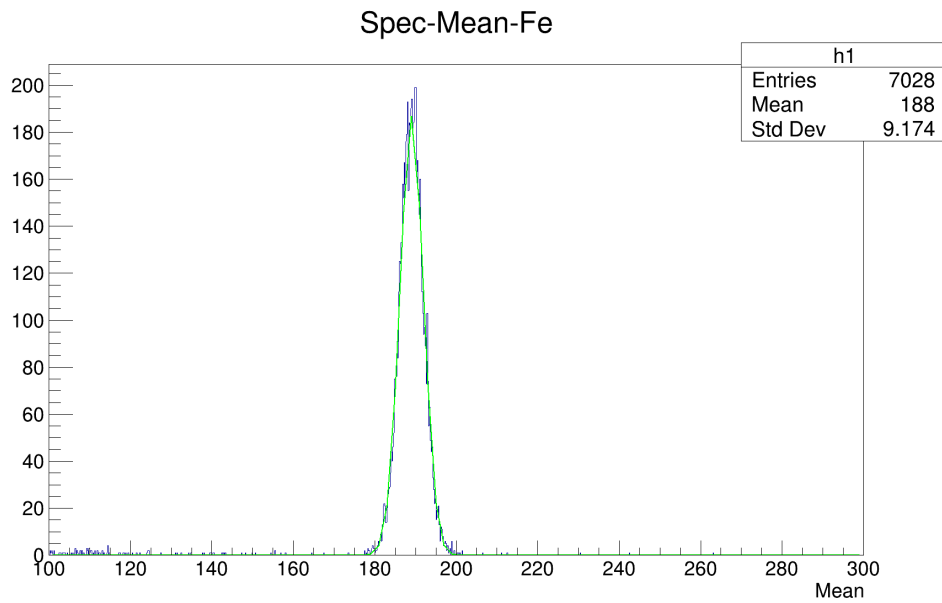


図 4.32: 各スペクトルの中央値-Fe -再

各ピクセルのスペクトルの中央値を一次元ヒストグラムで表し、先程と同様にガウシアンフィットで得られた中央値をエネルギーに直した。結果、ゲインのばらつきは約 190 eV となった。

ペダスタルとゲインのばらつきから式 4.2 を用いてエネルギー分解能を割り出し、実際に得られた値と比較する。

$$\text{エネルギー分解能} = \sqrt{(\text{ペダスタルのばらつき})^2 + (\text{ゲインのばらつき})^2} \quad (4.2)$$

式 4.2 によって求められたエネルギー分解能は 338 eV であり、実際に得られたエネルギー分解能は鉄の 5.9 keV のピークに対して 683 eV と、かなり大きい値となった。この原因の特定にはまだ至っていないが、回路の取り方によって余計なノイズが乗ってしまったと考えられる。この原因究明と、エネルギー分解能の向上を目指すことが今後の課題である。

第5章 まとめと今後

本研究は、Si pixel 検出器である SOIPIX の基礎特性評価を行い、現在観測が進んでいない MeV ガンマ線の観測に使えるかを検討することが目的である。コンプトンカメラの散乱体として使用できるかを評価するために、エネルギー分解能の測定、解析を、7520 個それぞれのピクセルについて行った。暗電流の測定と、イベントレートの逆バイアス依存性も評価している。

SOIPIX は、SOI 技術を使うことで検出部と読み出し部が一体型となった CMOS 検出器で、各ピクセルに読み出し回路とトリガー回路を備え付けることで必要なイベントの信号のみを選択的に読み出すことを可能にしたもので、X 線撮像用に開発された。今回は京都大学と宮崎大学が中心となって開発した XRPIX シリーズの「XRPIX8」という素子を使って実験、解析を行っている。

実験では X 線・ガンマ線を照射し、そのペDESTAL とスペクトルを測定した。結果、ピクセルごとのばらつきは小さく、ほとんど一定のペDESTAL、スペクトルをとることがわかった。エネルギー分解能は、Fe-55 の 5.9 keV のピークに対して 683 eV、Am-241 の 13.81 keV のピークに対して 941 eV と、1 keV を下回る分解能を得ることができたが、さらなる向上が求められる。

今後はまず、エネルギー分解能向上のためのセットアップの改善や、低温下での実験を行い素子の温度特性を調べることが挙げられる。さらにその他にも、空乏層の厚さを測定したり、散乱電子の飛跡を測定してコンプトンカメラの散乱体としての性能を評価していくことを考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたって、様々な方にお世話になりました。まず、深沢先生。深沢先生には大きく研究の方向性を決めていただき、毎週のミーティングで丁寧にご指導してくださいました。1月下旬から2月、解析に追われていたころは毎日のようにアドバイスをしてくださいました。そして、須田先生。須田先生には日々の研究だけでなく、宮崎大学へ出張の際もご同行してくださいました。研究の背景についてもとても丁寧に教えて頂きました。解析を進める際はスクリプト1つ1つを見ていただき、修正、アドバイスをくださいました。さらに本研究では京都大学の鶴剛教授にご協力いただき、宮崎大学の武田彩希准教授と米村さん、眞方さんからは、器材の初期設定の仕方や測定のノウハウを教えてくださいました。最後に同研究室の先輩方やB4の皆さんにも、実験や解析の際相談にのってもらったこともたくさんありました。

本研究においてご協力、ご指導くださった全ての方へ感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] AMEGO NASA
[https://asd.gsfc.nasa.gov/amego/files/AMEGO Decadal RFI.pdf](https://asd.gsfc.nasa.gov/amego/files/AMEGO%20Decadal%20RFI.pdf)
- [2] 武田 彩希 宮崎大学
X線天文学向け SOI ピクセル検出器の開発
- [3] 武田 彩希 宮崎大学
X線天文衛星搭載へ向けたイベント駆動型 SOI ピクセル検出器の開発
- [4] 中本 達也 広島大学 2001 年
卒業論文 「高阻止能結晶シンチレータとフォトダイオードを用いたガンマ線検出器の開発」
- [5] シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測-高エネルギー天文学
井上一・小山勝二・高橋忠幸・水本好彦 日本評論社
- [6] 道津 匡平 広島大学 2010 年
修士論文 「X線衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線観測装置用 Si-Pad センサーの基礎特性評価」
- [7] 久留飛 寛之 大阪大学
修士論文 「ピクセル型 X線検出器 XRPIX を用いた X線タルボ干渉計の開発」
- [8] 松村 英晃 京都大学 2014 年
修士論文 「宇宙 X線観測用 SOI ピクセル検出器における電荷収集効率の改善」
- [9] 奥野 智行 京都大学 2018 年
修士論文 「Chandra 衛星による超新星残骸の非熱的 X線放射の観測的研究および X線天文用 SOI ピクセル検出器のトリガー機能と多層化システムの検証」
- [10] 原田 颯大 京都大学 2018 年
修士論文 「固定電位層を導入した次世代 X線天文用 SOI ピクセル検出器の研究」