

# $^{57}\text{Fe}$ を用いたアクシオン探索 ～感度向上を目指して～

2020 年度卒業研究

大西雅子

神戸大学理学部物理学科粒子物理学研究室

2021 年 2 月 22 日

# 概要

アクシオンは CP 問題を解決する未発見の新粒子として注目されている。また、暗黒物質の候補の一つである。本研究は太陽アクシオンを  $^{57}\text{Fe}$  を用いて探索することを最終目的とする。本研究では太陽アクシオン検出に使う回路を工夫し、予備実験として  $^{241}\text{Am}$  線源を用いた性能評価を行った。

# 目次

1章 実験理論 .....	4
1.1 太陽アクシオン .....	5
1.2 先行研究 .....	5
2章 実験装置 .....	7
2.1 実験装置 .....	7
2.2 PIN フォトダイオード .....	8
3章 予備実験 .....	9
3.1 実験セットアップ .....	9
3.1.1 BIAS 電源、±12V 電源、テストパルス .....	10
3.1.2 PIN フォトダイオード .....	10
3.1.3 Charge アンプ .....	11
3.1.4 反転増幅回路 .....	11
3.2 アンプのキャリブレーション .....	12
3.3 $^{241}\text{Am}$ に対する応答 .....	12
4章 議論と展望 .....	15
4.1 前段回路デザイン .....	15
4.2 回路シミュレーションと実際の結果 .....	16
5章 結論 .....	18
参考文献 .....	20

# 第1章

## 実験理論

QCD(Quantum Chromodynamics:量子色力学)において、強いCP問題というものがある。CP問題を解決するために新粒子「アクシオン」が予言される[1]。アクシオンは暗黒物質の候補でもある。現在、宇宙において全エネルギーの68%を暗黒エネルギー、27%を暗黒物質が占め、私たちが普段見ている普通の物質は5%しかないと考えられている。暗黒エネルギーや暗黒物質は、性質が解明されている途中段階であり、いまだ発見はされていない。

暗黒物質は、質量を持ち、何かしらの相互作用をすると考えられている。暗黒物質にはGeV~TeV領域の質量を持つと考えられるWIMP (Weakly Interacting Massive Particles) というものがあり、このWIMPより軽い暗黒物質の候補がアクシオンである。アクシオンを発見することで、強いCP問題の解決や暗黒物質の発見へとつながる。

本研究では、太陽アクシオンというものに注目する。太陽アクシオンは、太陽コアで生成され、地球に降り注ぐ。 $^{57}\text{Fe}$ の磁気双極子遷移という特徴から、アクシオンは地球にある $^{57}\text{Fe}$ を励起させ、14.4 keVの $\gamma$ 線に変わることができる。このアクシオンの信号である14.4 keVの $\gamma$ 線を検出することによって太陽アクシオンを探索するのが本研究の原理である。

$^{57}\text{Fe}$ 箔とPINフォトダイオードを用いた我々の研究室の先行研究では、アクシオンの質量 $m_a$ に対して、 $m_a < 428.3 \text{ eV}$ という制限を与えた[2]。一方、他のグループによる世界最高の制限としては、 $m_a < 216 \text{ eV}$ という値を与えられている[3]。本研究では先行研究の方法を改善し、世界最高感度でのアクシオン探索を目標とする。

## 1.1 太陽アクシオン

太陽アクシオンは、太陽中の  $^{57}\text{Fe}$  原子核が熱的に励起されて、脱励起の M1 遷移時に放出されるアクシオンである。太陽から放出された太陽アクシオンが、地上の  $^{57}\text{Fe}$  原子核を励起させて、その脱励起によって  $\gamma$  線が発生する。その  $\gamma$  線を検出することによって、太陽アクシオンを検出するのが本研究の原理である。

太陽アクシオンは、太陽中心部でのエネルギー分布を反映し、図 1.1 に示すように  $kT \sim 1.3 \text{ keV}$  の黒体輻射の形をした連続スペクトルをもつ。

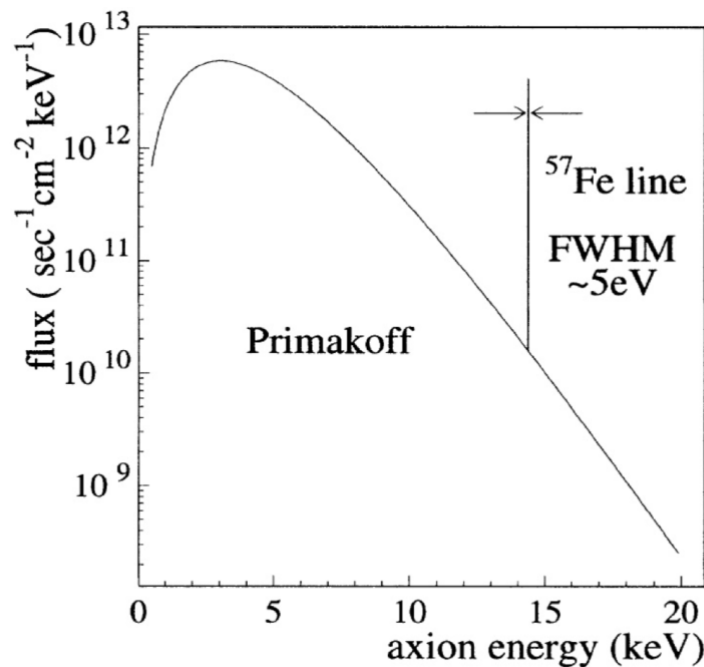


図 1.1 太陽アクシオンのエネルギースペクトル[4]

これに対して、 $m_a \sim \text{eV}$  領域であれば( $m_a$ はアクシオン質量)、磁気双極子遷移を持つ原子核からの線スペクトルが放射されることが期待されている。その代表がこの図 1.1 に示される  $^{57}\text{Fe}$  の 14.4keV ラインである。

## 1.2 先行研究

先行研究では、2018 年卒業研究で神戸大学の島田・乃一が  $m_a < 428.3 \text{ eV}$  (95% C.L.)の制限を与えた[2]。その時の結果のエネルギースペクトルを図 1.2 に示す。一方、最高の制限は、 $m_a < 216 \text{ eV}$  (95% C.L.)である[3]。本研究では、アクシオンの質量に対する感度を先行

研究から2倍更新し、世界最高感度での探索を目標とする。レートの値とアクシオンの質量には

$$m_a \propto R^{\frac{1}{4}}$$

という関係があり、レートの上限を16倍よくするとアクシオンの質量の制限は2倍よくなる。

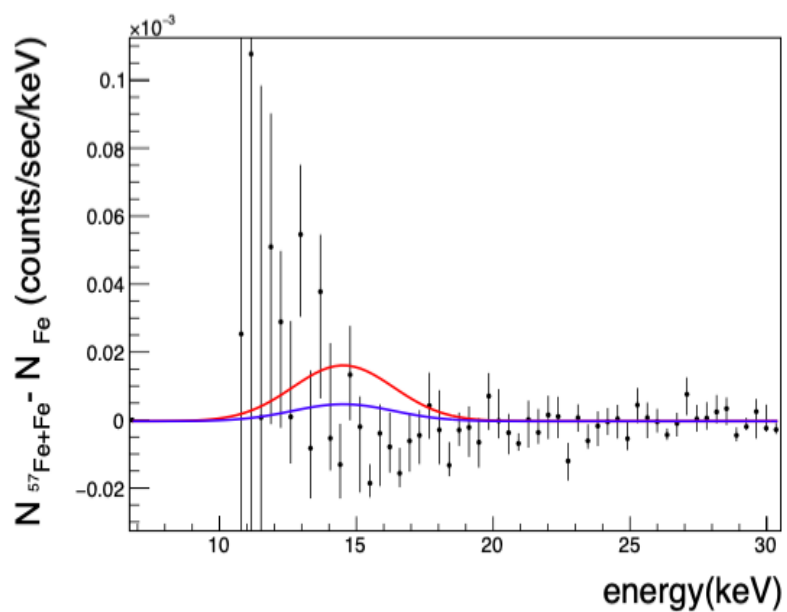


図 1.2  $^{57}\text{Fe}$ +通常 Fe のスペクトルから通常 Fe のスペクトルを差し引いたグラフと  $f(x) = \text{Gaus}(H, M, \sigma) + C$  で Fit したもの。青線は  $\Delta\chi^2 = 0$ 、赤線は  $\Delta\chi^2 = 3.84$  のときの H で Fit したもの。H, M,  $\sigma$  はそれぞれガウシアンの高さ、位置、幅である。[2]

## 第2章

### 実験装置

#### 2.1 実験装置

最高感度でのアクシオン探索を行うためには、前章の議論により統計量を16倍よくすればいいことが分かった。2018年の実験装置の検出器の大きさを4倍、枚数を2倍にし、計測時間を2倍にして、統計を16倍稼ぐ。そのために、図2.1のようなセットアップを設計した。 $^{57}\text{Fe}$  脱励起によって発生した $\gamma$ 線をPINフォトダイオードで検出する。 $\gamma$ 線の信号が微弱なため、回路で増幅し、データ収集する。

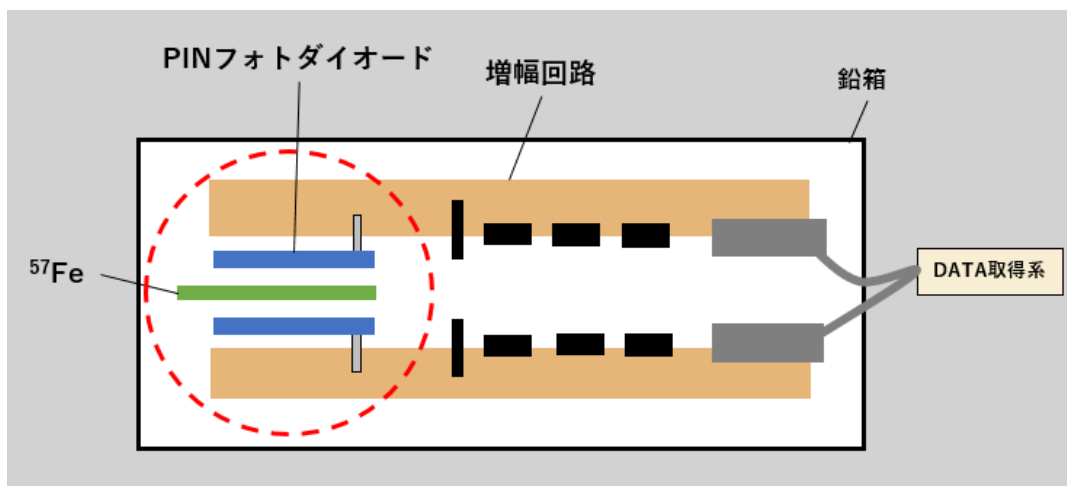


図2.1 実験セットアップ

本研究では、浜松フォトニクス製のSi PINフォトダイオード(S3584-09)を用いた。特にSiフォトダイオードには、入射光に対する優れた直線性、高い機械強度、低ノイズ、小型軽量という特徴がある。これはアクシオンの信号に対して良い感度を持つ。S3584-09の特性を表2.1に示す。

窓材質	未封止
受光面積	28×28 mm <sup>2</sup>
空乏層厚	0.3 mm
最大逆電圧	100 V
動作温度	-20~+60 °C

表2.1 S3584-09(PINダイオード)の特性

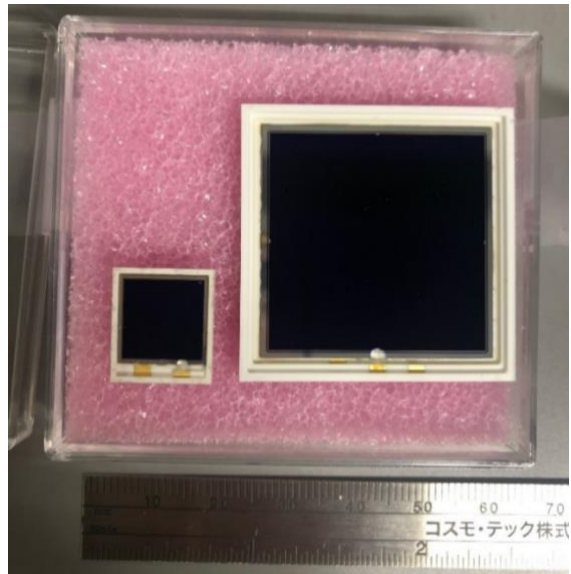


図 2.2 シリコン PIN フォトダイオード。左が先行研究と同じ PIN フォトダイオードで、右が今回使う PIN フォトダイオード(S3584-09)

## 2.2 PIN フォトダイオード

PIN フォトダイオードの断面構造を図 2.3 に示す。PIN フォトダイオードは、p 型半導体と n 型半導体の間に空乏層(I 層)と呼ばれるキャリアがない領域を持つ構造になっている。I 層に  $\gamma$  線が入射すると、光電効果によりエネルギーに応じた電子-正孔対が生成される。生じた電荷を収集することで、PIN フォトダイオードに落とされたエネルギーが検出される。逆バイアスがかかることで空乏層の領域を広げ、検出効率を向上させることができる。

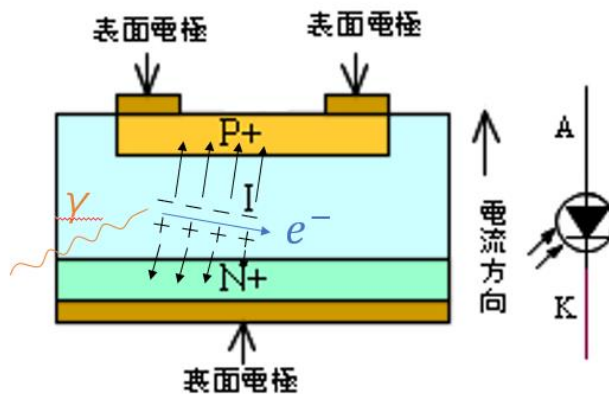


図 2.3 PIN フォトダイオードの断面図[5]



# 第3章

## 予備実験

アクションの信号としては、14.4 keV の単色エネルギースペクトルが期待される。したがって、10keV 程度の信号を検出することが必要である。そのため、まず 14.4keV と同じオーダーの放射線  $^{241}\text{Am}$  の 60keV を見ることを目的として、予備実験を行った。

### 3.1 実験セットアップ

実験セットアップの概略図を図 3.1 に示す。図 3.2 は実際の実験の様子である。PIN フォトダイオードの上に  $^{241}\text{Am}$  を載せている。

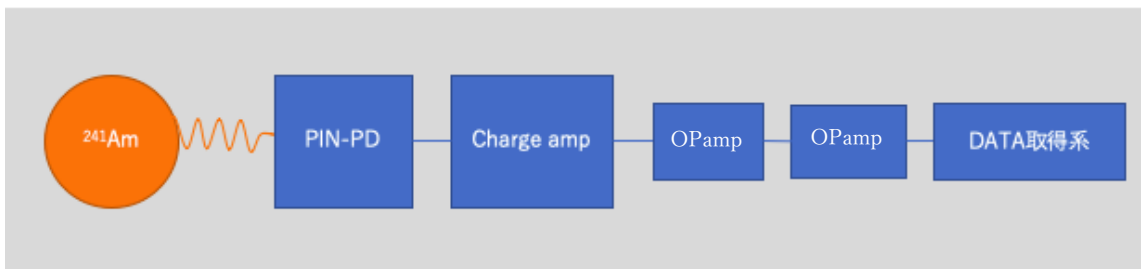


図 3.1 実験セットアップの概略図。 $^{241}\text{Am}$  からでた  $\gamma$  線を PIN-PD(PIN フォトダイオード)で検出し、Charge amp(Charge アンプ)で電圧に変換した後、二段の Opamp(オペアンプ)で増幅して、DATA 取得系でデータを取得する。

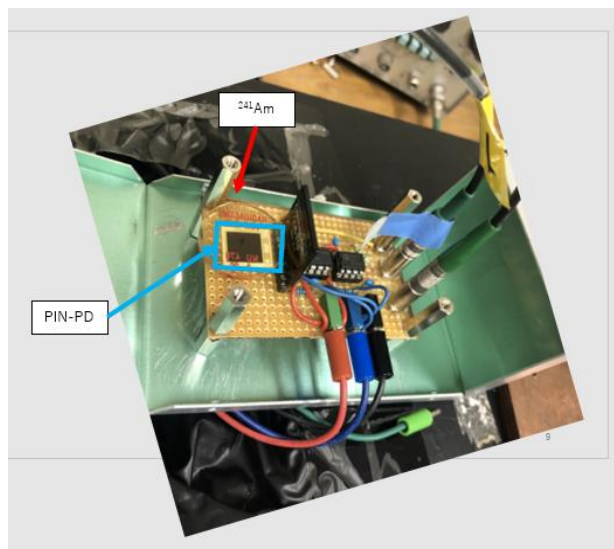


図 3.2 予備実験の様子

### 3.1.1 BIAS 電源、±12V 電源、テストパルス

BIAS 電源としては CLEAR PULSE MODEL E6625、±12V 電源は TEXIO PW18-1.8AQ を用いた(表 3.1、表 3.2)。

出力電圧	0~200V
出力コネクタ	BNC コネクタ(裏面パネル)
出力極性	正また負(裏面スイッチ切り替え)
出力安定度	±1%
出力電圧表示	パネルメータ(200V F.S.)
所要電源	AC100V 50/60Hz
外形寸法	120(W)×81(H)×150(D)mm

表 3.1 BIAS 電源 CLEAR PULSE MODEL E6625

定格電圧(CH1)	+18V
定格電圧(CH2)	-18V
定格電流(CH1)	+1.8A
定格電流(CH2)	-1.8A
出力電圧表示	-20~+60 °C
電源容量	AC100V 2.55A 約 191W/255VA
外形寸法	138×380×124mm

表 3.2 ±12V 電源 TEXIO PW18-1.8AQ

### 3.1.2 PIN フォトダイオード

検出器は先行研究と同じ PIN フォトダイオード(S3590-08)1枚を用いた。特性を表 3.3 に示す。

窓枠材質	エポキシ樹脂
受光面積	10×10 mm <sup>2</sup>
空乏層厚	0.3 mm
逆電圧 V <sub>R</sub> max	100 V
動作温度	-20~+60 °C

表 3.3 S3590-08(PIN フォトダイオード)の特性

### 3.1.3 Charge アンプ

データを記録するためには、PIN フォトダイオードの出力である電荷を電圧に変換する必要がある。このために Charge アンプ CR-110-2.1 を用いた。大きさ  $26\text{mm} \times 22\text{mm} \times 3\text{mm}$  である(図 3.4)。等価回路は図 3.4 のようになっており、帰還抵抗  $100\text{M}\Omega$ 、帰還コンデンサ  $1.4\text{pF}$  の回路である(図 3.5)。この CR-110-2.1 の特性を表 3.6 に示す。

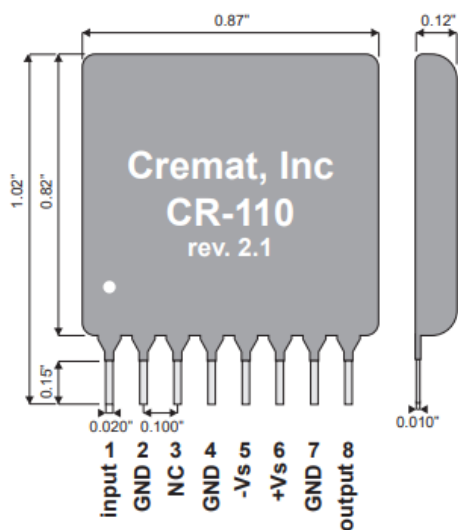


図 3.4 CR-110-2.1 外形[6]

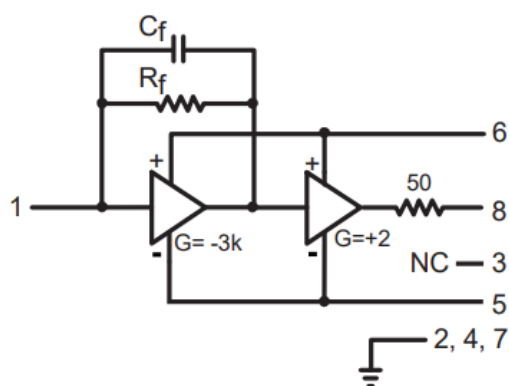


図 3.5 CR-110-2.1 等価回路[6]

電荷電圧変換係数	1.4 V/pC
雑音特性	1.7 keV(silicon)FWHM
容量勾配	3.8 eV/pF
帰還抵抗	$100\text{M}\Omega$
帰還コンデンサ	$1.4\text{pF}$
出力インピーダンス	$50\ \Omega$
所要電源	+13 V 9 mA、-13V 6mA
外形寸法	8 ピン $26 \times 22 \times 3\text{mm}$

表 3.6 CR-110-2.1 型の特性。波形整形時定数  $2\ \mu$  秒にて測定

### 3.1.4 反転増幅回路

チャージアンプの出力をオペアンプを用いて増幅する。帰還抵抗と帰還コンデンサを用いた簡単な増幅回路を組んだ。ローパスフィルタにより高周波のノイズを低減させるように設計した。2 段の反転増幅回路で 100 倍の増幅率である。

今回用いたオペアンプは LF356N である。供給電源は  $\pm 12\text{V}$  でも動作するようになっている。動作温度としては、 $0^\circ\text{C}\sim 70^\circ\text{C}$  になっている。

### 3.2 アンプのキャリブレーション

テストパルスを用いてアンプのキャリブレーションを行った(図 3.6)。

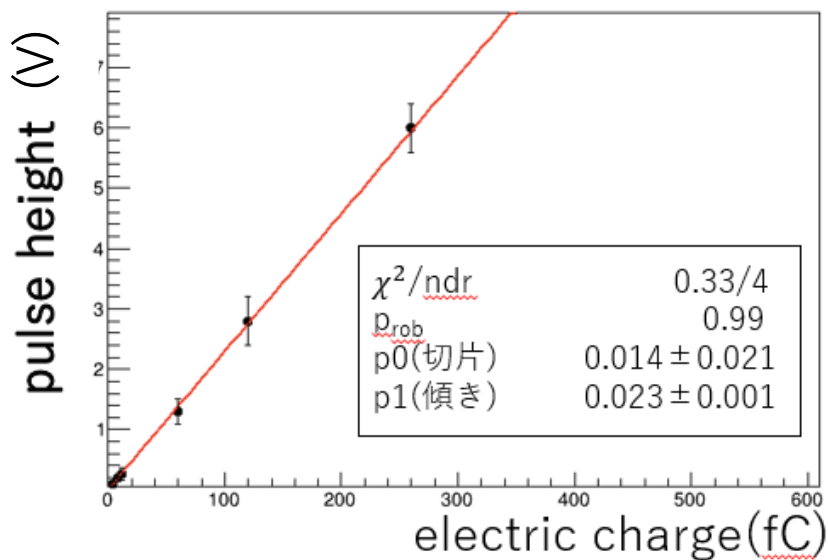


図 3.7 テストパルスを用いたアンプのキャリブレーション

誤差は目視でオシロスコープを見て決めた。今回の回路のゲインは

$$23 \text{ mV/fC}$$

であった。

### 3.3 $^{241}\text{Am}$ に対する応答

回路に PIN フォトダイオードを接続し、 $^{241}\text{Am}$  線源を用いた測定を行った。測定に際しては、 $50\text{V}$  の逆バイアスをかけた。得られたエネルギースペクトルは図 3.8 の通りである。

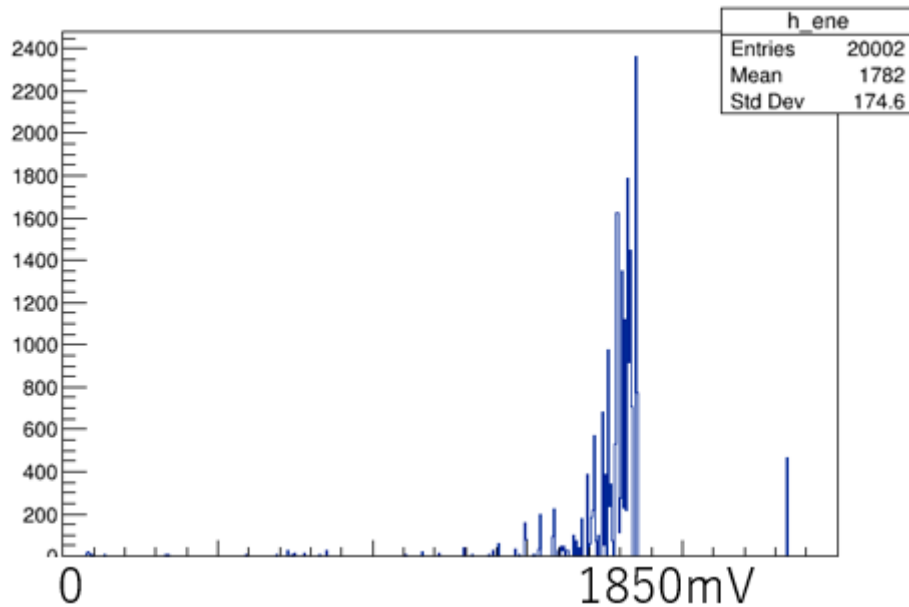


図 3.8 得られたエネルギースペクトル

アンプのキャリブレーションより、1850mV のピークは 80fC に対応している。検出された電荷と PIN フォトダイオードに与えられたエネルギー E の間には、以下の関係がある。

$$\frac{E (eV)}{W(eV)} \times e^{-}(C) = 80fC$$

ここで、 $e^{-}$  は電気素量、W は電子-正孔対生成に必要な平均のエネルギーである。

300K では  $W=3.62eV$  といわれている。

$W(eV) \sim 3eV$ ,  $e^{-} = 1.6 \times 10^{-19}$  として

$$E = 1.5MeV$$

$^{241}\text{Am}$  の  $\alpha$  線のスペクトルが図 3.9 のようになっているので、今回の実験で見えたものは Am の 5.5MeV の  $\alpha$  線に近いものだと考えられる。目標としていた 60keV の  $\gamma$  線を見るためにはしきい値を下げて低エネルギーまで見えるような工夫が必要と分かった。

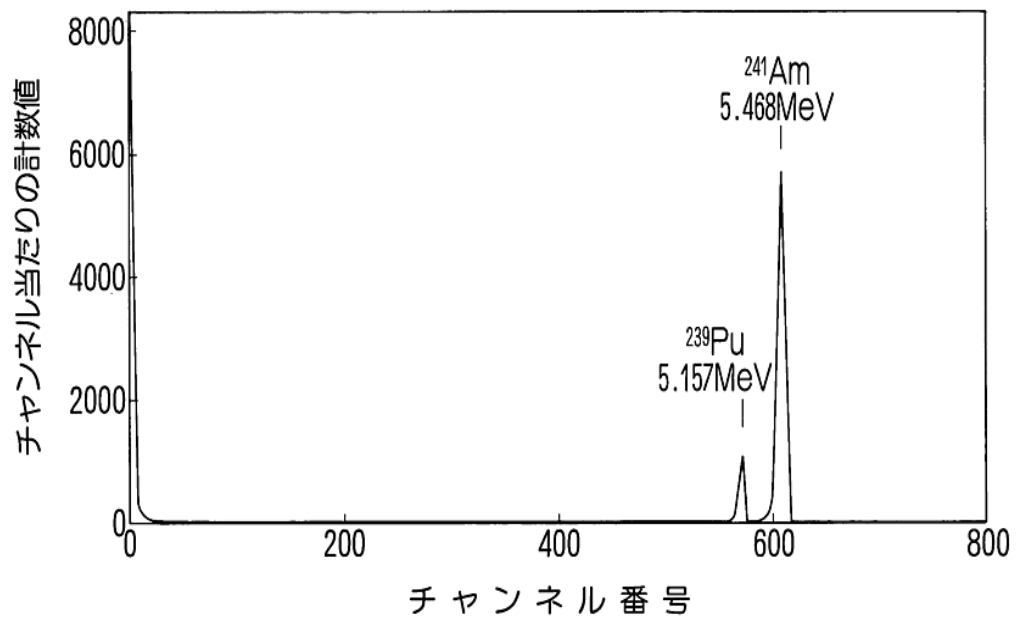


図2 イオン注入型シリコン半導体検出器による<sup>241</sup>Amのα線スペクトル

資料提供: 日本原子力研究所

図 3.9 <sup>241</sup>Am の α線スペクトル[8]

# 第4章

## 議論と展望

### 4.1 前段回路デザイン

予備実験で 1.5MeV 程度の信号が見えたことが分かった。これを 60keV まで見えるようにするためには、ゲインをさらに 25 倍する必要がある。予備実験ではオペアンプを 2 段しか使用していなかったため、3 段にする。図 4.1 に示すような回路を設計した。

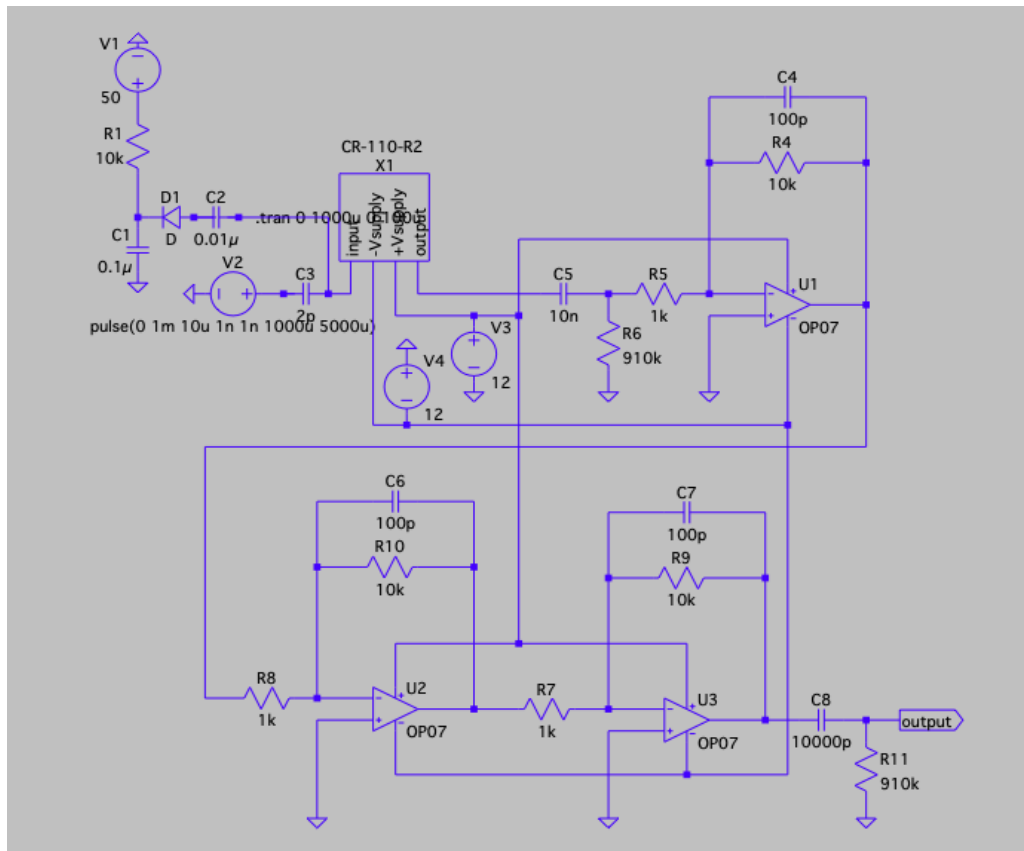


図 4.1 予備実験の結果を受けて設計した増幅回路

## 4.2 回路シミュレーションと実際の結果

LTspice を用いて増幅回路のシミュレーションをする。LTspice は高性能な Spice シミュレーション・ソフトウェアで、回路図入力や波形ビューワなどを容易にするためのモデルが搭載されている。CR-110-2.1 に関しては等価回路を作成し、PIN フォトダイオードの出力はパルスジェネレータとコンデンサを用いて電荷を回路に入力する。2fC の入力に対して 1360mV の出力が得られた(図 4.2)。

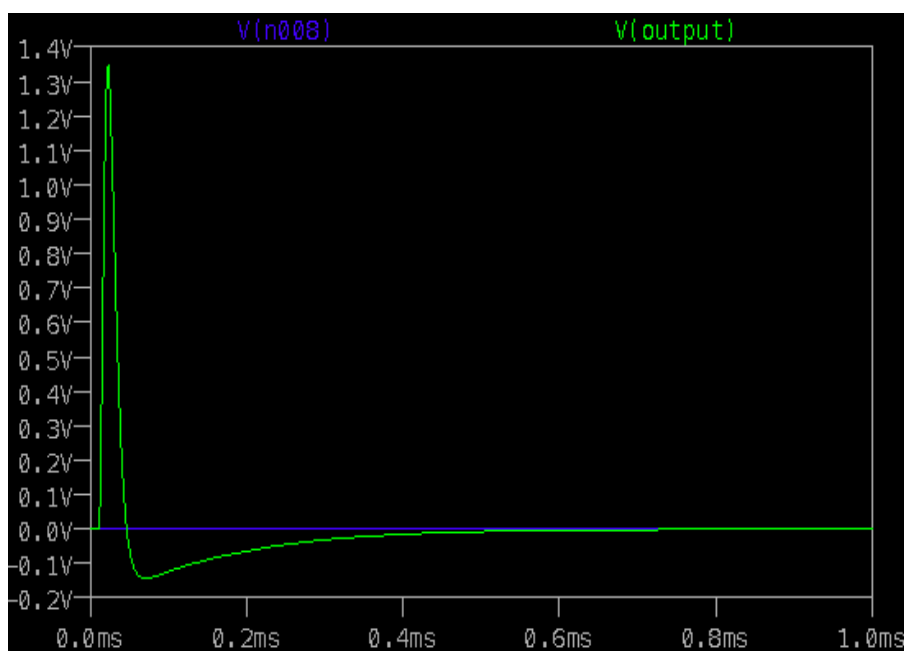


図 4.2 シミュレーション結果

制作した回路のノイズの様子をオシロスコープで観測した。約 10 fC の電荷を入力した応答を図 4.3 に示す。シミュレーション通りなら 13V 程度の信号が出るはずだが、作成した回路では 1V 程度になっており、10 fC に相当する電荷は観測できなかった。今後、適切な信号が見れるように、回路全体の修正をしていく。



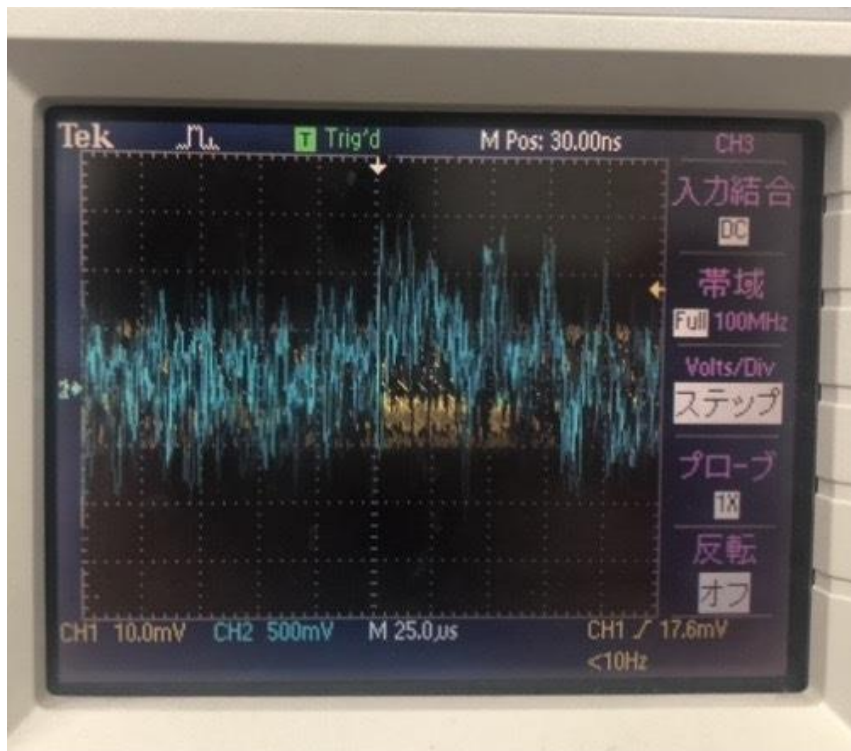
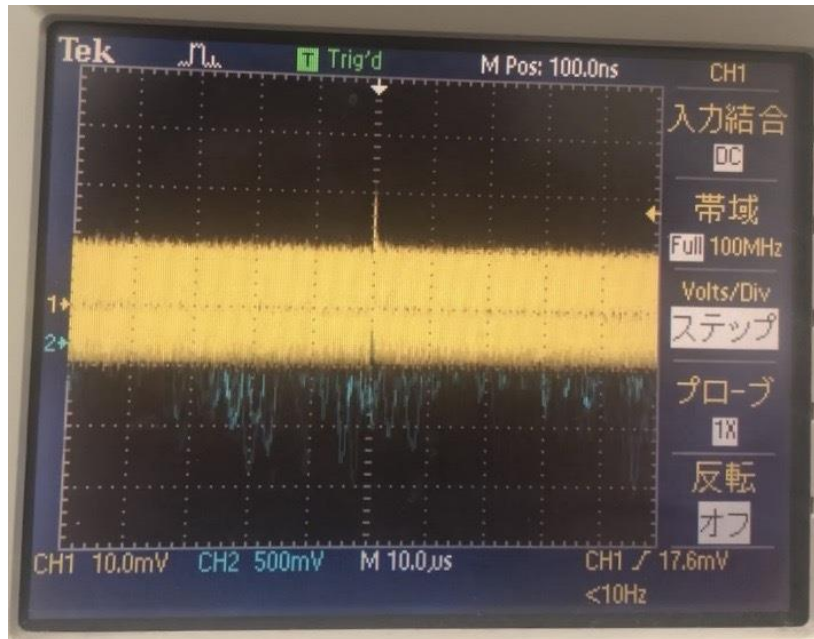


図 4.3 制作した回路のノイズの様子と 10 f C 入れた時のアウトプット

## 第 5 章

### 結論

本研究では、世界最高感度での太陽アクシオン探索を目指した。先行研究から、検出器を 2 個にして計測時間を増やすことで、統計を稼ぎ世界記録に近づくと考えた。予備実験を行ったところ、 $^{241}\text{Am}$  からの  $5.5\text{MeV}$  の  $\alpha$  線を観測できた。アクシオン由来の信号を観測するためには、ゲインの向上が必要であることが判明した。このためにゲインの高い回路を設計・制作した。制作した回路では出力が確認されなかったため、回路全体の修正をすすめている。今後、回路の改善を行い、その後アクシオン探索実験を行う。

# 謝辞

本論文は神戸大学理学部物理学科粒子物理学研究室在籍中の卒業研究の成果をまとめたものです。指導教員として同大学物理学専攻身内賢太郎准教授には本研究実施の機会だけでなく、実験に必要な装置を与えていただき、また様々な助言と共に最後までご指導をいただきました。同専攻前田順平教員にもまた、研究全般、資料の作り方について適切なお助言をいただきました。

また、大阪大学大学院理学研究科物理学専攻島田拓弥様には、実験のテーマや進め方を提案していただきました。実験に必要な回路を作る際に、素人の私に付き合ってくださいました。解析の仕方や、実験中のアドバイスも一通り教えていただき、研究を進めるうえでなくてはならない存在だったと心から思っております。島田拓弥様自身、研究やほかの方のサポートなど、決して暇ではない中で、貴重な時間を割いていただき、本当にありがとうございました。

本研究を行うにあたってご協力いただいたすべての皆様への感謝の気持ちと御礼を申し上げます。謝辞にかえさせていただきます。

## 参考文献

- [1] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 40 (1978) 223; F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. 40 (1978) 279.
- [2] 島田拓弥, 乃一雄也. 57Fe を用いたアクシオン探索. 2018
- [3] T.Namba, Phy. Lett. B645 (2007) 398.
- [4] S. Moriyama, Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 3222.
- [5] フォトダイオードの構造 <http://www.nteku.com/photo/photo-diode-kouzou.aspx>
- [6] Charge アンプ CR-110-R2.1 <https://www.cremat.com/CR-110-R2.1.pdf>
- [7] オペアンプ LF355N [https://www.mouser.jp/datasheet/2/389/ST\\_LF155D\\_to\\_LF357N-1204072.pdf](https://www.mouser.jp/datasheet/2/389/ST_LF155D_to_LF357N-1204072.pdf)
- [8]  $^{241}\text{Am}$  の  $\alpha$  線スペクトル [https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat\\_detail\\_09-04-03-19.html](https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_09-04-03-19.html)