

平成20年度 課題研究P6
新型半導体検出器MPPCによる γ 線測定

今野裕介 福間広明

平成21年3月23日

概要

MPPC(Multi Pixel Photon Counter) は近年になって開発された新しいタイプの光検出器である。優れたフォトンカウンティング能力、磁場に対する耐性、高いゲイン、低バイアスでの動作、Timing Resolution が良いなどといった性能から、様々な分野において光電子増倍管等の従来の光検出器に取って代わる存在として注目されている。

一方、 LaBr_3 は発光量の大きなシンチレータであり、光検出器と組み合わせて放射線を測定すると高いエネルギー分解能が得られる。 LaBr_3 は小さなサイズの結晶をパッケージすることが難しく、MPPC と組み合わせると受光面からはみ出て光量を損してしまうが、最新のもので 6mm 角の LaBr_3 が作られるようになり、また MPPC の受光面も 3mm 角になり両者のサイズが近づいた。

そこで我々は MPPC と LaBr_3 を組み合わせて γ 線を測定し、MPPC でどれほどのエネルギー分解能が出せるかを調べた。また、もうひとつシンチレータとして GSO を用い、MPPC もピクセル数の異なる 2 種類のものを用意して比較を行った。エネルギー分解能のほかにエネルギーと MPPC の出力の線型性等についても調べた。

目次

第1章	実験目的	2
第2章	MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)	3
2.1	MPPCの基本的性質	3
2.2	APDピクセルの動作原理	3
2.3	MPPCの動作原理	5
2.4	MPPCの検出効率(PDE)	6
2.5	今回使用したMPPC	6
第3章	無機シンチレータ	7
3.1	シンチレータの発光原理	7
3.2	実験に用いるシンチレータ	8
3.3	反射材	9
3.4	オプティカルグリッド	9
第4章	解析手法	10
4.1	フィッティング、エネルギー較正、エネルギー分解能の計算	10
4.2	エネルギー分解能の統計	11
第5章	MPPCによる γ 線測定	12
5.1	実験装置とセットアップ	12
5.2	実験方法	14
5.3	実験結果	15
5.3.1	スペクトル	15
5.3.2	エネルギー較正	15
5.3.3	エネルギー分解能	18
5.4	考察	21
5.4.1	エネルギーとチャンネルの関係について	21
5.4.2	エネルギー分解能について	24
5.5	補足:温度によるMPPCのゲインの変化	27
第6章	まとめと課題	28

第1章 実験目的

今回用いるのはMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)と呼ばれる光検出器です。この検出器は最近になって開発された検出器で、その優れた性能ゆえ、光電子増倍管(PMT)やAPD(Avalanche Photo Diode)に変わる検出器として現在注目を浴びています。今回の実験の目的の一つは、この検出器の取り扱いになれることです。そのためにシンチレータとしてGSO(Ce)をつかいMPPCと組み合わせ線を測定します。このGSO(Ce)の結晶は小型であり扱いやすく、また、MPPCの最大感度波長に近い光を出すので組み合わせることができます。今回はMPPCとLaBr₃という結晶も組み合わせ測定をします。このLaBr₃という結晶はエネルギー分解能のとても良いシンチレータです。また、最近になって小型にパッケージできるようになり、MPPCと組み合わせ使用できるようになりました。そこで、このMPPCとLaBr₃の組み合わせでどれほどの分解能が出せるかを測定する、というのを実験のもう一つの目的としました。

第2章 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)

2.1 MPPCの基本的性質

MPPC は、Pixed Photon Detector(PPD) と呼ばれる、近年開発が進んでいる半導体光検出器のひとつです。PPD は、受光面内に多数の APD(Avalanche Photo Diode) ピクセルが並んだ構造をしており、多数のピクセルからのシグナルの総和を出力とすることで光検出器として高い性能を実現している。PPD として様々な種類の素子が開発されているが、今実験においては浜松ホトニクス社製の MPPC を採用した。MPPC は主に以下のような性能がある

1. 低バイアス電圧で動作 (100V 以下)
2. 高ゲイン ($10^5 \sim 10^6$)
3. 磁場の影響を受けない
4. 高時間分解能
5. 室温での動作が可能
6. 光量が増えると線形性が落ちる

1 ~ 5 のように多くの利点を持つため、現在注目を浴びている光検出器である。

2.2 APD ピクセルの動作原理

まずはじめに MPPC を構成している APD ピクセルについて述べる。APD は半導体光検出器であるので、フォトダイオードについて順に説明してゆく。図 2.1 で示されるように、ダイオードに逆電圧をかけたとき、n 型半導体内の電子と p 型半導体内のホールとが付加された電位によってそれぞれ逆向きに力を受け、pn 接合部の空乏層の幅が増大する。この空乏層の部分に光子が入射すると、電子を励起し電子-ホール対を生成する。これらのキャリアは付加された電位による弱い電位勾配によってそれぞれ反対方向へドリフトし、光電流が流れる。以上が基本的なフォトダイオードの構造になる。pn 接合部に真性半導体を挿み、p-i-n の構造

をとらせることで空乏層の幅を広げたものが PIN フォトダイオードになる。PIN フォトダイオードも逆電圧を付加することで働く光検出器である。APD はアヴァランシェ増倍と呼ばれる現象を利用してシグナルの強度を増加させる仕組みをとったフォトダイオードである。先ほどの PIN フォトダイオードの n 型半導体側にさらに n 型の極性の強い半導体を付加させる構造をとることで、そこに逆電圧をかけることによって生じた高電場領域において電子雪崩を生じさせシグナルを増幅する仕組みをとっている。

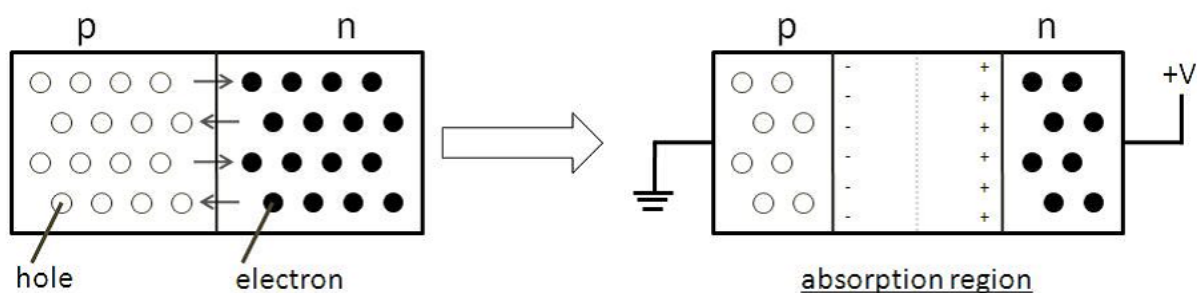


図 2.1: 逆電圧を付加したときのフォトダイオード動作原理

APD の動作モードには大きく分けて、ノーマルモード、ガイガーモードという 2 つのモードが存在する。

1. ノーマルモード

- ・ ブレイクダウン電圧 (V_{bd}) 以下の電圧で動作
- ・ ゲイン 100
- ・ APD へ入射した光子数に比例した電荷量の出力

2. ガイガーモード

- ・ ブレイクダウン電圧 (V_{bd}) 以上の電圧で動作
- ・ ゲイン $\sim 10^6$
- ・ APD へ入射した光子数に無関係の、電圧値に依存した決まった電荷量の出力

MPPC ではブレイクダウン電圧よりも数 V 高い電圧を付加させることで、全ての APD ピクセルをガイガーモードで動作させ、 $\sim 10^6$ という高ゲインを達成している。ひとつの APD ピクセルから出力される電荷量 Q は APD ピクセルに入射した光子の数には依らず、以下の式 (2.1) の様に表される。

$$Q = C(V - V_{bd}) \quad (2.1)$$

ここで V は付加されたバイアス電圧を、 C は APD ピクセルのキャパシタンスを示している。 C としての一般的な値は数十から数百 fF であり、 $(V - V_{bd})$ として一

一般的な値は1 ~ 1.5V である。そのため Q として一般的な値は数十から数百 fC になる。MPPC のゲインは、元々一個の光電子だったものがアヴァランシェによって幾つに増幅されたかで示されるものであるので、この値を素電荷で割った時の値になり、約 10^6 程度になる。

2.3 MPPC の動作原理

次に、MPPC の動作原理について述べる。MPPC は正方形の APD ピクセルが受光部に敷き詰められた構造をしている。全ての APD の読み出し線、及び電圧供給の線は共通になっている。そのために図 2.2 で示すように全ての APD ピクセルには同じ電圧値が付加され、全ての APD ピクセルからのシグナルの総和が1つの MPPC からの出力として得られる構造になる。MPPC では各 APD ピクセルからの応答が良く揃っているために、総和として出力されるシグナル Q_{total} は、式 (2.2) で示されるとおり光子を受光したピクセル数 N_{fired} に Q をかけた値になる。

$$Q_{total} = N_{fired} \times Q \quad (2.2)$$

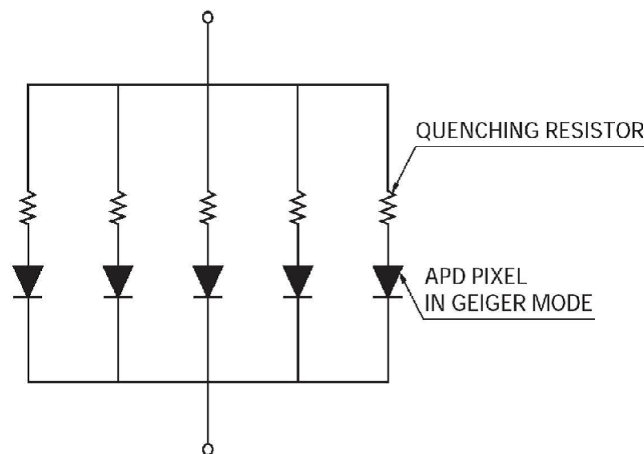


図 2.2: MPPC の動作原理

受光したピクセル数は、光が微弱である時入射する光量に比例する。そのために MPPC は非常に高い光子カウンティング能力を備えている。

2.4 MPPCの検出効率 (PDE)

MPPCの重要なパラメータとして検出効率 (PDE) がある。PDEは入射した光子のうち何%を検出できるかを示す特性であり、次式 (2.3) で定義される。

$$\text{検出効率} = \text{量子効率} \times \text{開口率} \times \text{励起確率} \quad (2.3)$$

$$\left(\text{開口率} = \frac{\text{有効ピクセルサイズ}}{\text{ピクセルサイズ}}, \text{励起確率} = \frac{\text{励起ピクセル数}}{\text{光子入射ピクセル数}} \right)$$

2.5 今回使用したMPPC

本実験では浜松ホトニクス社製のMPPC(S10362-33-025C、S10362-33-050C)を用いる。この製品の性質を表 2.1 にまとめる。また、検出効率と、MPPCの写真をそれぞれ、図 2.3、図 2.4 に示す。

型番	S10362-33-025C	S10362-33-050C
ピクセル数	14400	3600
ピクセルサイズ	$25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$	$50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$
有効受光面サイズ	$3\text{mm} \times 3\text{mm}$	$3\text{mm} \times 3\text{mm}$
最大感度波長	400nm	400nm
ブレイクダウン電圧	68.79 (at 25)	68.79 (at 25)
増倍率	7.48×10^5 (at 25)	2.75×10^5 (at 10)

表 2.1: MPPC の性能

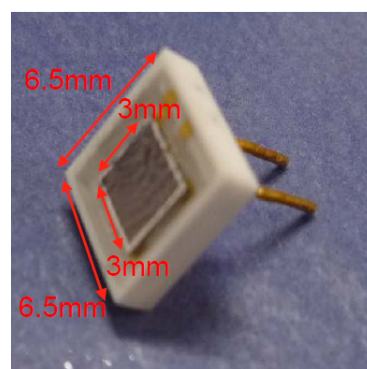
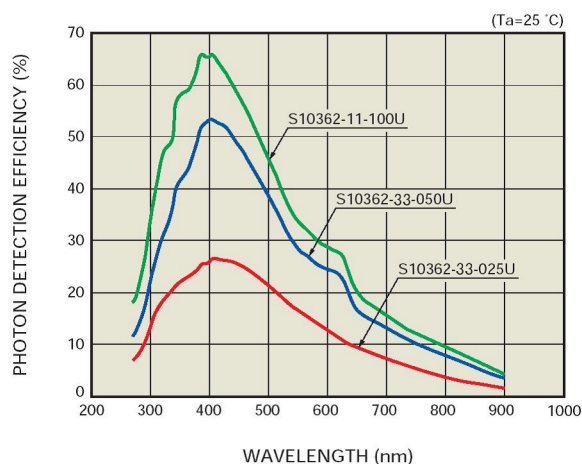


図 2.4: 使用した MPPC

図 2.3: MPPC の検出効率

¹一番上の緑の曲線は、今回使用していないMPPCである

第3章 無機シンチレータ

無機シンチレータの発光原理を簡単に説明し、われわれが 線測定で用いる無機シンチレータの紹介をしておく

3.1 シンチレータの発光原理

放射線が入射した際に発光現象を起こす物質をシンチレータという。シンチレータは化学組成により無機シンチレータと有機シンチレータに大別できるが、われわれが実験で用いるのは無機シンチレータのみであるので、無機シンチレータに限って発光原理を簡単に説明する。

無機シンチレータ内で電子のとりうるエネルギー状態は、構成原子に強く束縛された価電子帯と、自由に動き回れる伝導帯に分かれている。 線がシンチレータに入射すると、価電子帯にある電子と光電吸収やコンプトン散乱を起こす。すると電子が励起されてエネルギーの高い伝導帯に上げられる。

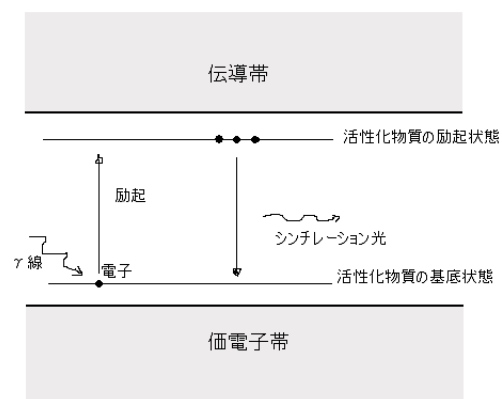


図 3.1: シンチレータの原理

この励起された電子は、結晶中を動き回り、クーロン散乱により他の電子を励起させる。これらの電子が再び価電子帯に落ち込むときにエネルギーが光子の形

で放出される。これが無機シンチレータの基本的な発光原理である。一般には価電子帯と伝導帯のエネルギー差は大きすぎるので、少量の不純物（活性化物質）が加えられていて、電子が励起されやすく、可視光を放出するように工夫されている。

シンチレータには、特に次のような性質が要求される。

1. 放射線のエネルギーが蛍光のエネルギーに変換される効率が高いこと
2. エネルギー分解能が良いこと
3. 発光の減衰時間が短いこと
4. 発光の波長が検出器の感度波長に合っていること

3.2 実験に用いるシンチレータ

今回の実験でわれわれが用いる無機シンチレータは GSO(Ce)、LaBr₃(Ce) の二種類である。形状は GSO(Ce) は $3 \times 3 \times 13\text{mm}^3$ の直方体、LaBr₃(Ce) は結晶部分が $6 \times 6 \times 20\text{mm}^3$ の直方体、パッケージされたものが $11 \times 11 \times 27\text{mm}^3$ の直方体である。

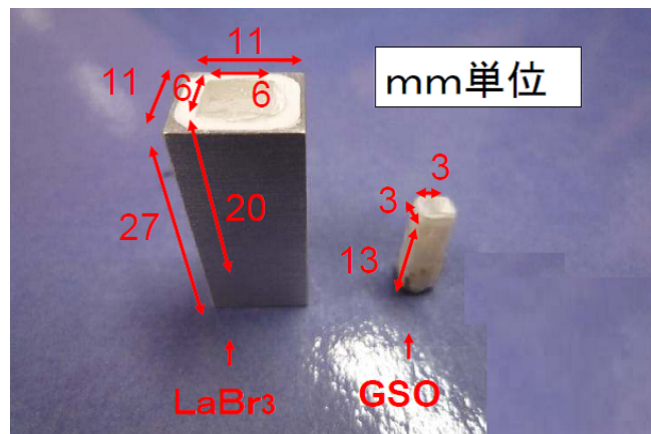


図 3.2: 実験で用いたシンチレータ

GSO(Ce)

GSO とは Gd_2SiO_5 の略である。この結晶は、発行量は少ないが、大きな原子番号と密度を持ち、阻止能が高い。エネルギー分解能は (FWHM @ 662keV) で 8-9

%である。又、蛍光減衰時間は60nsと短い。発光波長は440nmで、MPPCによる検出に適している。

LaBr₃(Ce)

LaBr₃(Ce)は非常に大きな発光量をもつ(63000 photons/MeV)。また、エネルギー分解能は(FWHM @ 662keV)で3%とかなり良い。蛍光減衰時間は25nsと短く、高速応答である。ただし阻止能はGSO(Ce)に劣る。潮解性を持つので、ケースに封入されている。発光波長は380nmで、MPPCによる検出に適している。最近になって小さくパッケージできるようになりMPPCと組み合わせて使えるようになった。

	密度 (g / cm ³)	蛍光減 衰時間 (ns)	最大発 光波長 (nm)	エネルギー ¹ 分解能 (%)	Light output (/ MeV)	潮解性
GSO (Ce)	7.13	30 -60	440	8-9	9,000	なし
LaBr ₃ (Ce)	5.29	20	360	3	63,000	非常に強

表 3.1: シンチレータの性能

3.3 反射材

シンチレータ内で発生したシンチレーション光はランダムな方向に飛散する。従って、検出器の受光面と接する面以外は反射材で覆って、受光面にシンチレーション光をあつめなければならない。

GSO(Ce)にはテフロン材を巻いて使用する。LaBr₃(Ce)に用いられている反射材は公表されていない。

3.4 オプティカルグリス

シンチレーション光が検出器の受光面に到達したとしても、そこで反射、散乱されてしまえば意味がない。そこで、われわれは一貫して検出器とシンチレータの間にオプティカルグリスを塗り両者を接着する。これはシンチレータと検出器の屈折率の違いによりシンチレーション光が反射、散乱されるのを防ぐ役目を持つ。

¹FWHM @ 662keV

第4章 解析手法

今回の実験で行った主な解析は、 γ 線のスペクトルのピークをガウシアンでフィッティングしてエネルギー較正を行い、エネルギー分解能を求めるというものである。そこでこれらの解析の仕方について簡単に述べておく。

4.1 フィッティング、エネルギー較正、エネルギー分解能の計算

測定で γ 線のスペクトルが得られると、まずは光電ピークを次のようなガウシアンと一次関数の和の関数でフィッティングする。

$$a \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x-b}{c} \right)^2 \right\} + dx + e \quad (4.1)$$

ただしピークが2つ以上重なっている場合には適宜ダブルガウシアンと一次関数の和でフィッティングをした。

フィッティングで得られたパラメータ b はピークの中心のチャンネルを表す。 γ 線のエネルギーに対しピークのチャンネル b をプロットするとあるエネルギー範囲で線型関係が成り立つ。そこで、プロットした点を直線でフィッティングし、以下の関係を得る。

$$(\text{ピークの中心チャンネル}) = A \times (\gamma\text{線のエネルギー}) + B \quad (4.2)$$

この作業をエネルギー較正と呼ぶ。

エネルギー分解能はガウシアンの高さ a が半分になる幅(半値幅)のエネルギー E に対する割合であり、半値幅はパラメータ c (ガウシアンの標準偏差)を用いて $2.35c$ と表される。従って、エネルギー分解能は次の式で求められる。

$$\{ \text{エネルギー分解能 (FWHM)} \} = \frac{2.35c/A}{E} \times 100 \quad (4.3)$$

半値幅はエネルギー較正で得られた式(4.2)によってエネルギー幅に換算している。

4.2 エネルギー分解能の統計

シンチレータに γ 線が入射したことによるシンチレーション光子の発生過程はポアソン過程でよく近似される。従って、シンチレーション光子の数を N とすると、その統計的なゆらぎ (分布の標準偏差) は \sqrt{N} となる。検出効率 ϵ も考えると ϵN は MPPC の励起ピクセル数を表す。入射 γ 線のエネルギーが励起ピクセル数にほぼ比例する場合、その比例係数を K とすると励起ピクセル数の統計的変動のみに起因するエネルギー分解能の限界値 R は次のようになる。

$$R_{\text{ポアソン統計}} = \frac{\Delta E}{E} = \frac{2.35K\sqrt{\epsilon N}}{K\epsilon N} = \frac{2.35}{\sqrt{\epsilon N}} \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \quad (4.4)$$

これより、 γ 線のエネルギーに対しエネルギー分解能を両対数でプロットすると、傾きが -0.5 の直線に乗ることが見込まれる。また、発光量の大きなシンチレータ、あるいは検出効率の良い MPPC を用いると分解能が良くなることが予想される。

なお、(4.4) 式はシンチレーション光子数の統計ゆらぎだけを考慮したものであるが、実際にはシンチレーション光の集光率や回路ノイズの影響などがある。

第5章 MPPCによる γ 線測定

5.1 実験装置とセットアップ

今回の実験はMPPCとシンチレータを組み合わせて γ 線を測定するというものである。用いたMPPCは浜松ホトニクス社製S10362-33-050CとS10362-33-025Cである。また、シンチレータにはGSO(日立化成製)とLaBr₃(サンゴバン社製)を用いた。MPPCとシンチレータの仕様については2章と3章を参照。

シンチレータはMPPCの受光面に接するように取り付けられ、接する面にはシンチレーション光の反射、散乱を防ぐためにオプティカルグリス(応用光研工業、OKEN6262A)を塗った。また、GSOをMPPCに取り付ける際に取り付け直す度に γ 線のピークのチャンネルが変わり再現性が悪いということがあった。これはGSOの光が出る面とMPPCの受光面のサイズが同じであり、取り付け位置がずれると入射光量が変わることによると考えられる。そこでMPPCとGSOの装着キットをアクリル板で作製し、できるだけ同じ位置で取り付けられるように工夫した。図5.1に装着キットを示す。

MPPCを使用するにあたってMPPCの信号を読み出すための回路を作製した。読み出し回路を図5.2に示す。回路は金属の箱にいれられており、測定の際には箱を閉じて遮蔽した。

実験のセットアップを図5.3に示す。放射線源とMPPCの読み出し回路は暗箱に入れて光が入らないようにし、読み出し回路にはバイアス電源(CLEAR-PULSE社E6665)で電圧をかける。線源からの γ 線がシンチレータに入射してできたシンチレーション光子がMPPCに入るとMPPCは信号を出す。MPPCからの信号はプリアンプ(4ch AMP KYOTO.U GN0579-1)により増幅された後、シェーパー(ORTEC 571)で波形整形、増幅される。そのパルスのピーク電圧値をPeak Hold ADC(HOSHIN V014)で読み出す。また、プリアンプからの信号をLogic Fan-In/Out(Phillips Scientific MODEL740)、Discriminator(Phillips Scientific MODEL 704)、Gate Generator(テクノランドコーポレーション N-TM307)に通し、信号に合わせてPHADCのゲートを開くようにした。

バイアス電源の電圧は050Cで68V、025Cで70Vに設定した。これはブレイクダウン電圧の違いからである。プリアンプ用電源にはKIKUSUI PMR24-1QUを用い、 $\pm 15V$ をかけた。プリアンプの時定数は $2.63\mu s$ 、シェーパーの時定数は $0.5\mu s$ 、Discriminatorのスレシヨルドは $40 \sim 60mV$ 、ゲート幅は $40\mu s$ にそれぞれ設定した。シェーパーのゲインについてはシンチレータとMPPCによって異なる

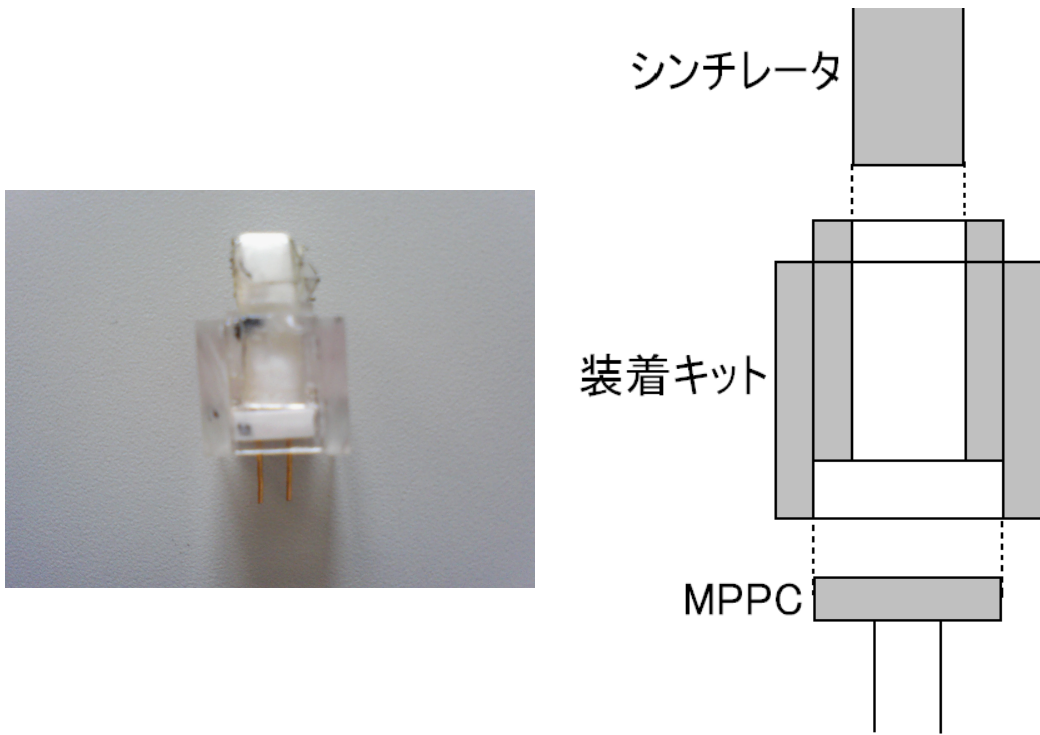


図 5.1: 装着キット

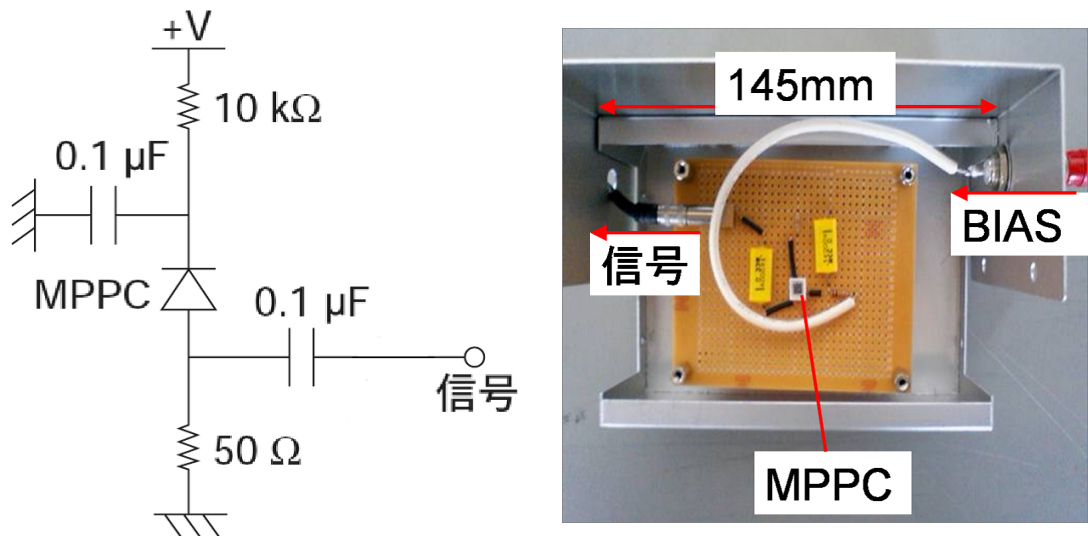


図 5.2: 読み出し回路

が、PHADCで計測できる最大チャンネルが16000Ch程度であるため、今回の測定で最もエネルギーの大きいピークである ^{22}Na の1275keVのピークがその範囲に収まるように設定した。050C+GSOでは10.0、025C+GSOでは32.5、050C+LaBr₃では10.0、025C+LaBr₃では20.0である。ただし050C+LaBr₃ではゲインを最小にしても ^{22}Na の1275keVと ^{54}Mn の835keVのピークが16000Chの範囲に収まらなかった。

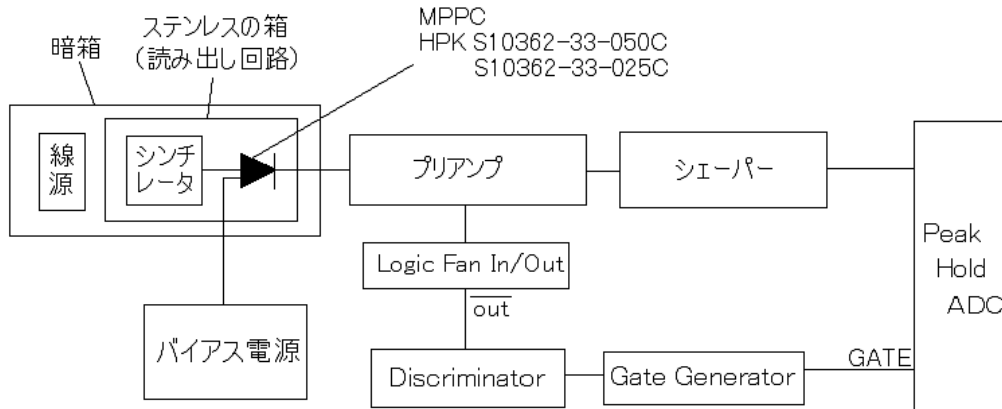


図 5.3: 実験のセットアップ

5.2 実験方法

今回の実験で用いるMPPCとシンチレータはそれぞれ2種類あるので、その4通りの組み合わせについて線源をあててスペクトルを測定し、エネルギー較正を行いエネルギー分解能を求めて解析をした。用いた線源は ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{22}Na である。1つのMPPCとシンチレータの組み合わせについて、測定ごとにMPPCとシンチレータを取り付けなおして4回測定し、平均値をとって標準偏差 σ を誤差とした。それぞれの測定ごとにペDESTALを測定し、解析の際には測定で得られたADCチャンネルからペDESTALを引いた。ファンクションジェネレータ(テクトロニクス CFG253)から矩形波を出力し、CR微分回路、Discriminator、Gate Generatorを通してPHADCのGATEに入力した状態でデータを取り、MPPCのシグナルと無関係にゲートを開くことでペDESTALを測定した。温度計(testo社 605-H1)で測定中の暗箱の中の温度を測定し、記録した。

5.3 実験結果

シンチレータとMPPCの4通りの組み合わせについての実験結果を示す。なお測定時の温度は050C+GSOで 18.5 ± 0.2 、025C+GSOで 15.0 ± 0.2 、050C+LaBr₃で 17.0 ± 0.2 、025C+LaBr₃で 16.7 ± 0.2 である。

5.3.1 スペクトル

読み出し回路からのMPPCの生信号を図5.4に、測定で得られたスペクトルを4通りの組み合わせについてそれぞれ図5.5~5.8に示す。

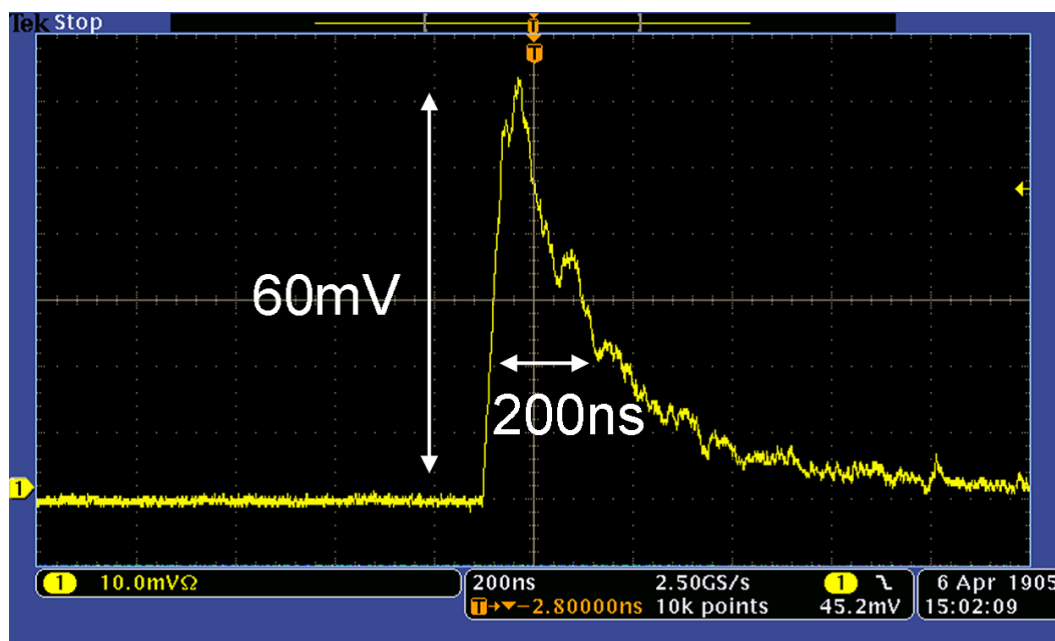
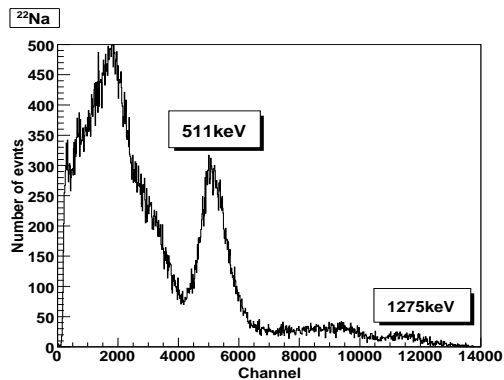
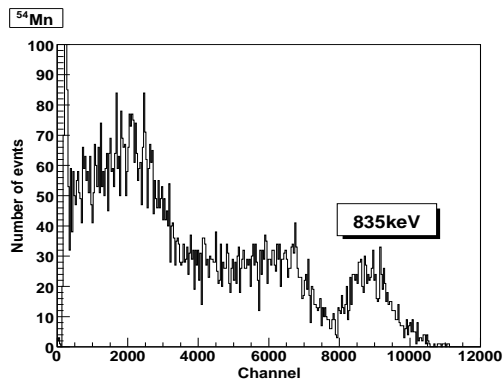
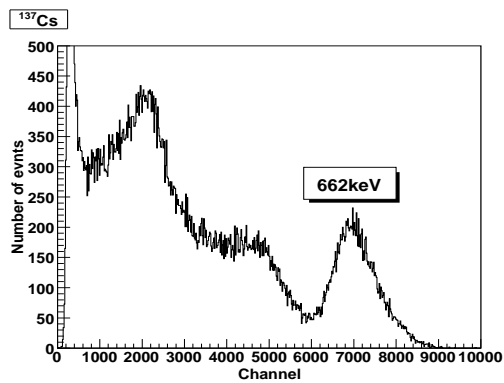
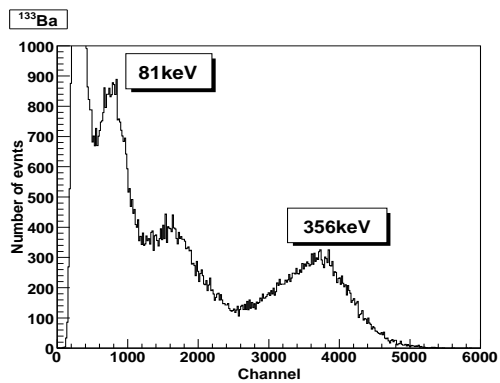


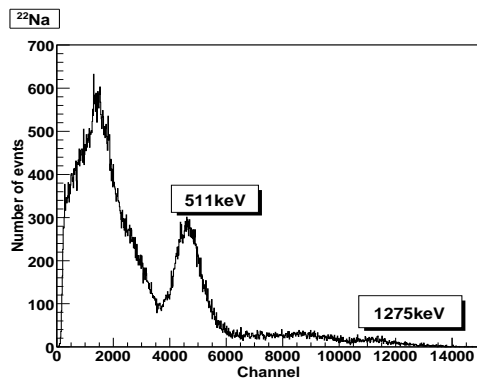
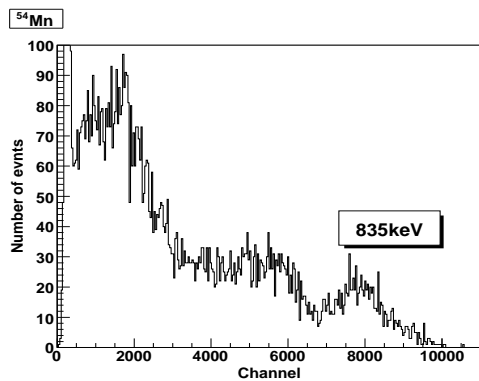
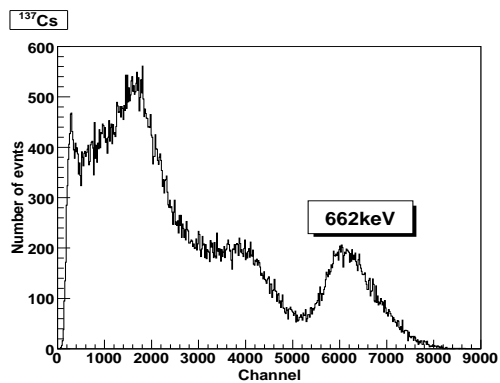
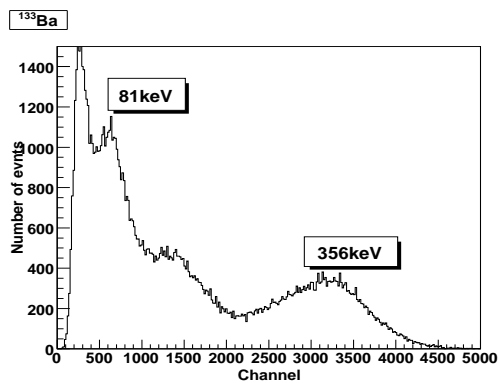
図 5.4: MPPC の生信号 (050C+GSO、線源は¹³⁷Cs)

5.3.2 エネルギー較正

エネルギーに対しピークのチャンネルをプロットし直線でフィットしたものを図5.9に示す。ただし²²Naの1275keVは直線から外れているためフィットの際には除いた。また、050C+LaBr₃では線型関係が成り立たなかったため図中の直線は単純に最もエネルギーの低い2点を結んだものである。フィットの結果得られたエ



☒ 5.5: スペクトル (050C+GSO)



☒ 5.6: スペクトル (025C+GSO)

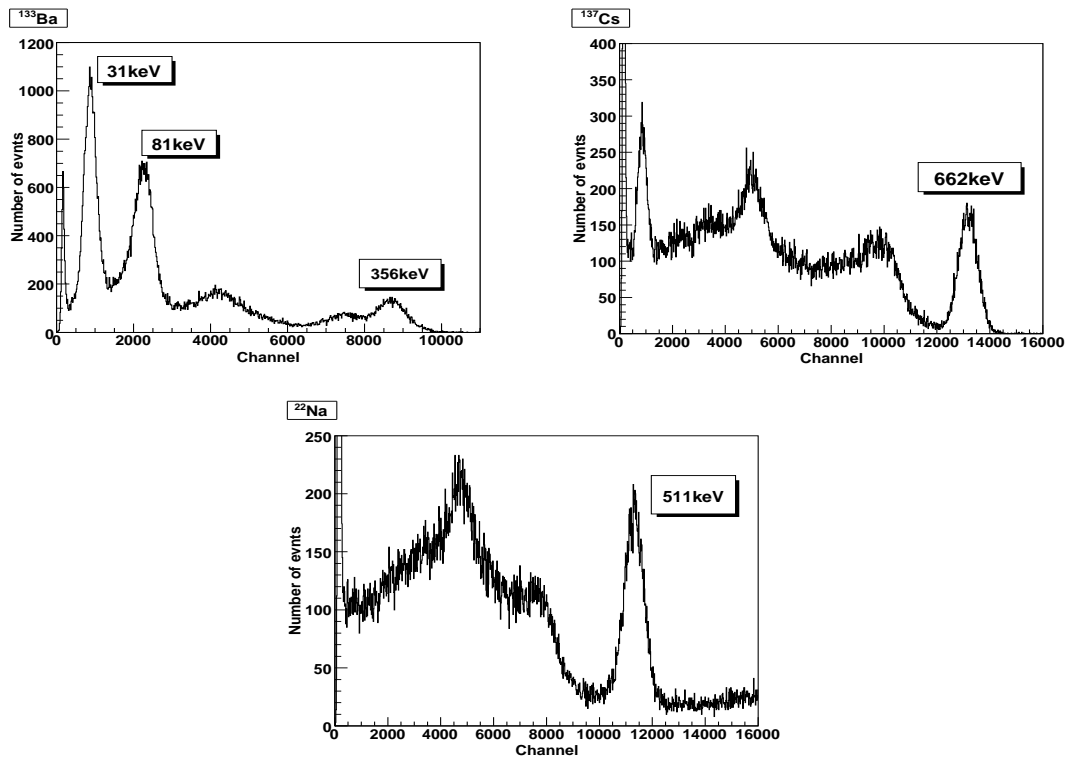


図 5.7: スペクトル (050C+LaBr₃)

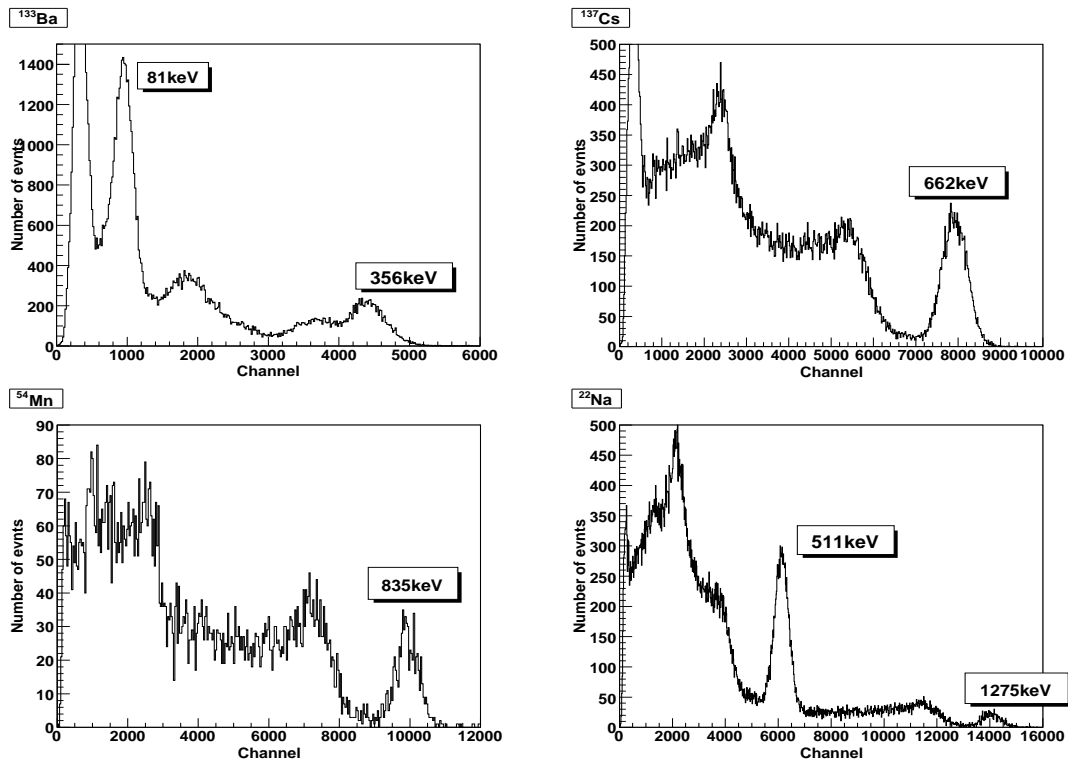


図 5.8: スペクトル (025C+LaBr₃)

エネルギーとチャンネルの関係は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 050\text{C}+\text{GSO} : \text{Ch} &= (10.6 \pm 0.1) \times E[\text{keV}] + (-38 \pm 41) \\
 025\text{C}+\text{GSO} : \text{Ch} &= (9.3 \pm 0.1) \times E[\text{keV}] + (-148 \pm 48) \\
 025\text{C}+\text{LaBr}_3 : \text{Ch} &= (12.3 \pm 0.3) \times E[\text{keV}] + (-10 \pm 49)
 \end{aligned}$$

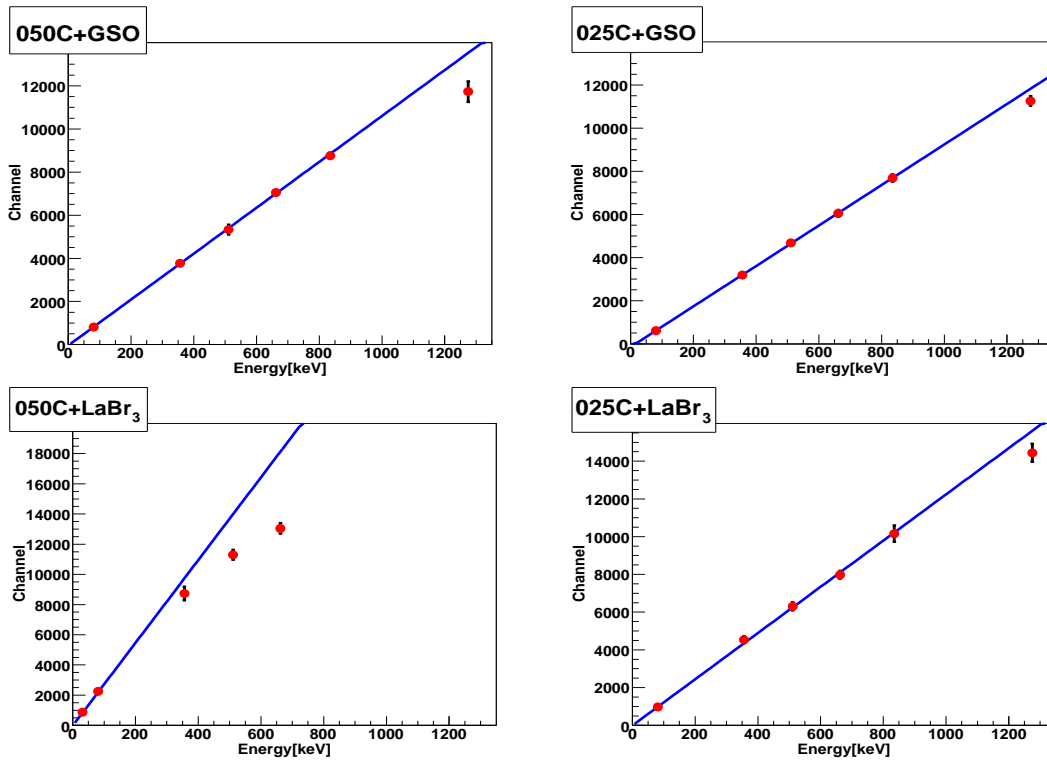


図 5.9: エネルギーとチャンネルの関係

5.3.3 エネルギー分解能

各ピークでのエネルギー分解能を表 5.1 に、エネルギーに対しエネルギー分解能を両対数でプロットし (4.4) 式よりエネルギーのべき乗でフィットしたものを図 5.10 に示す。フィットの結果得られたエネルギーとエネルギー分解能の関係は次の

よくなる。この式は 662keV で規格化したものである。

$$050\text{C}+\text{GSO} : (\text{エネルギー分解能})[\%] = (17.6 \pm 1.0) \times \left(\frac{E}{662\text{keV}} \right)^{-0.42 \pm 0.06}$$

$$025\text{C}+\text{GSO} : (\text{エネルギー分解能})[\%] = (19.1 \pm 0.7) \times \left(\frac{E}{662\text{keV}} \right)^{-0.46 \pm 0.09}$$

$$050\text{C}+\text{LaBr}_3 : (\text{エネルギー分解能})[\%] = (9.8 \pm 0.9) \times \left(\frac{E}{662\text{keV}} \right)^{-0.47 \pm 0.06}$$

$$025\text{C}+\text{LaBr}_3 : (\text{エネルギー分解能})[\%] = (8.6 \pm 0.2) \times \left(\frac{E}{662\text{keV}} \right)^{-0.58 \pm 0.02}$$

ただし 050C+LaBr₃ の測定ではエネルギーとチャンネルの線型性が成り立たなかったため、MPPC の励起ピクセル数 N_{fired} と入射光子数 N_{photon} , 全ピクセル数 N_{total} , 検出効率 (PDE) の関係

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} \times \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{N_{\text{total}}} \right) \right\} \quad (5.1)$$

より曲線でエネルギー対チャンネルのプロットをフィット (図 5.11) して得られる次式

$$\text{Ch} = (2.4 \times 10^4 \pm 2.5 \times 10^3) \times [1 - \exp\{-(1.2 \times 10^{-3} \pm 1.7 \times 10^{-4}) \times E[\text{keV}]\}]$$

の各点での傾きを用いてエネルギー分解能を計算した。

エネルギー [keV]	線源	エネルギー分解能 (FWHM)[%]			
		050C+GSO	025C+GSO	050C+LaBr ₃	025C+LaBr ₃
31	¹³³ Ba			41.5±6.6	
81	¹³³ Ba	42.2±4.1	44.4±9.5	26.2±4.3	28.8±1.3
356	¹³³ Ba	26.5±3.3	29.0±3.1	12.9±2.0	13.2±0.7
511	²² Na	18.7±1.2	21.2±0.7	10.8±1.5	10.3±0.7
662	¹³⁷ Cs	18.7±1.9	20.4±1.4	9.9±1.5	8.6±0.3
835	⁵⁴ Mn	15.5±3.2	12.8±2.5		7.2±0.7

表 5.1: 各ピークのエネルギー分解能

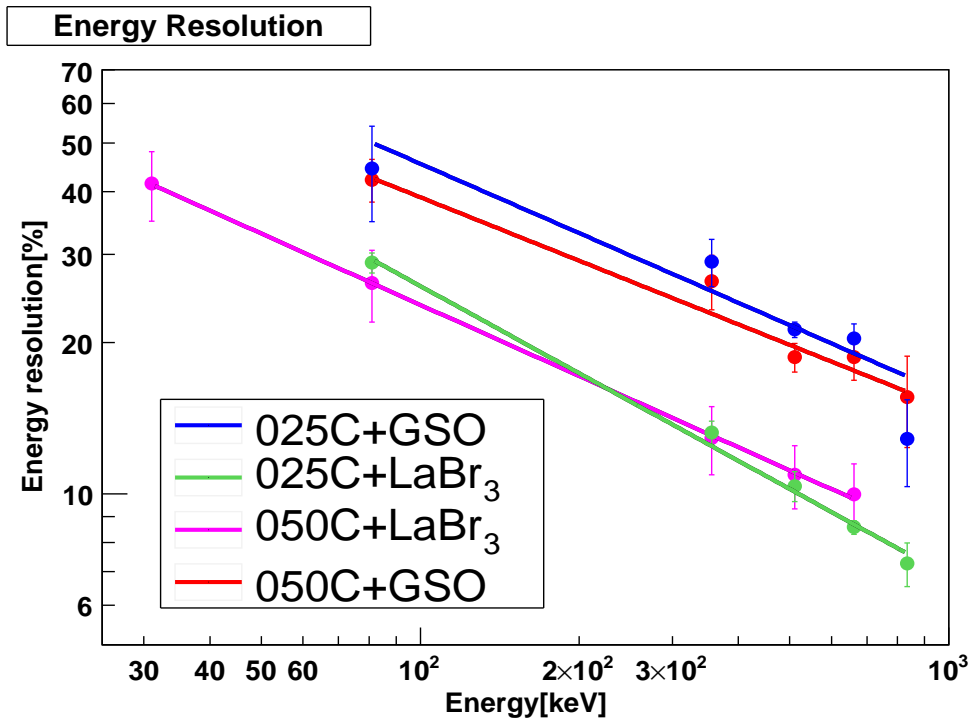


図 5.10: エネルギー対エネルギー分解能

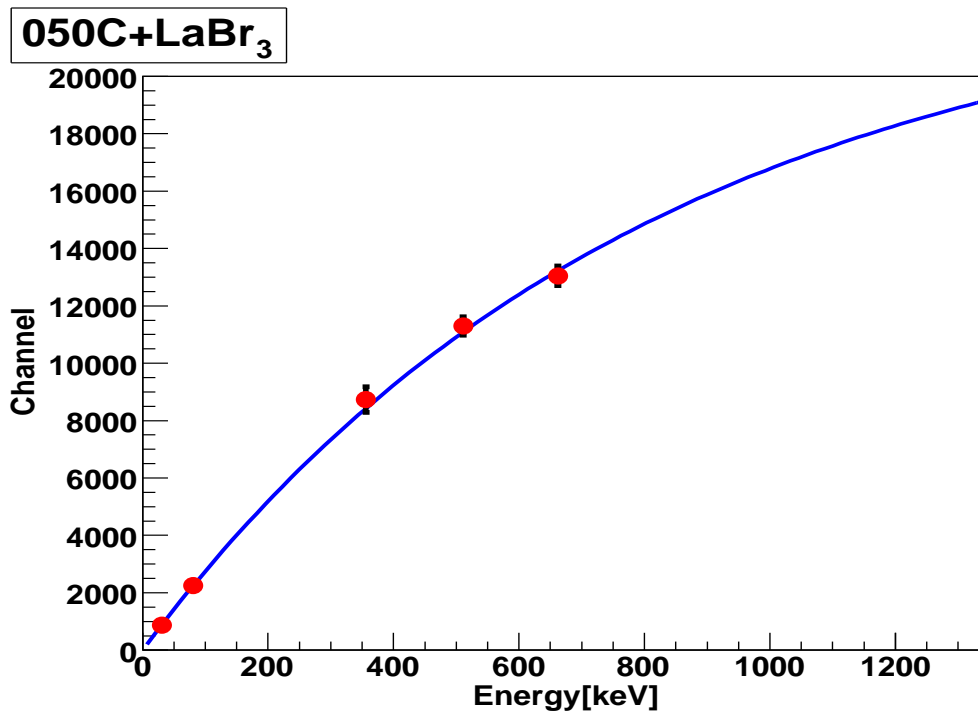


図 5.11: 050C+LaBr₃ のエネルギー較正

5.4 考察

5.4.1 エネルギーとチャンネルの関係について

エネルギーとチャンネルの線型性の比較

図 5.9 において ^{22}Na の 1275keV は直線から外れており、エネルギーとチャンネルの線型性が成り立っていない。また、050C+LaBr₃ では大きく線型性が低下しており、全く直線にのっていない。これは全ピクセル数に対して入射光子数が多くなり 1 ピクセルに 2 個以上の光子が入り始めることによる。MPPC の各ピクセルは光子が入射したかしないかの判定しかしないため、1 ピクセルに 2 個以上の光子が入ると光子検出の直線性が低下する。従って、同じシンチレータを用いた場合ピクセル数が多い 025C の方が、同じ MPPC を用いた場合発光量の小さい GSO の方がより広い範囲で線型性が成り立つことが予想される。

MPPC とシンチレータの各組み合わせにおける 1275keV のピークチャンネルの直線からの残差を表 5.2 に示す。050C+LaBr₃ では 1275keV のデータが無いが、最も線型性が悪いことは明らかである。これらの結果をみると確かに予想の通り同じシンチレータでは 025C の方が、同じ MPPC では GSO の方がより直線に近づいていることがわかる。特に LaBr₃ を用いたときに 050C と 025C の違いは顕著であり、050C では全く直線にのらなかったが 025C では 1275keV 以外は直線にのっている。

MPPC+シンチレータ	直線からの残差 [%]
050C+GSO	13.3±3.7
025C+GSO	4.7±2.5
025C+LaBr ₃	7.5±3.7

表 5.2: 1275keV の直線からの残差

理論式との比較

励起ピクセル数 N_{fired} と入射光子数 N_{photon} の関係は (5.1) 式で表されるが、この式について簡単に説明する。 N_{photon} の光子が MPPC に入射したとき、1 ピクセルが検出する光子数の平均は

$$\frac{N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{N_{\text{total}}}$$

となる。ただし実際には MPPC の各ピクセルでは検出した光子の数はわからない。1 ピクセルが検出する光子数はポアソン分布に従うと考えられ、このピクセルが

光子を検出しない確率は

$$\exp\left(\frac{-N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{N_{\text{total}}}\right)$$

となる。これより励起ピクセル数が (5.1) 式で表されることがわかる。

γ 線エネルギーあたりの MPPC への入射光子数を α とすると、(5.1) 式は γ 線のエネルギー E と ADC チャンネル Ch を用いて次のように書ける。

$$\text{Ch} \propto 1 - \exp\left(\frac{-\alpha E \times \text{PDE}}{N_{\text{total}}}\right) \quad (5.2)$$

シンチレータの放出光子数は GSO で 9 個/keV、LaBr₃ で 63 個/keV である。MPPC の 3mm 角の受光面に対して LaBr₃ の大きさは 6mm 角であるため、 $\alpha = 63 \times 0.25$ となる。GSO ではそのまま $\alpha = 9$ となる。検出効率 PDE はそれぞれのシンチレータの最大発光波長から 050C+GSO で 0.5、025C+GSO で 0.25、050C+LaBr₃ で 0.45、025C+LaBr₃ で 0.23 とする。これらの値を (5.2) 式に入れて適当に比例係数 β をかけたグラフを、実験で得られたエネルギー対チャンネルのプロット (図 5.9) と重ねたものを図 5.12 に示す。050C+GSO 以外の組み合わせでは、(5.2) 式を用いて実験で得られた点に沿うように曲線を描くことができた。 β は 050C+GSO で 10000、025C+GSO で 62000、050C+LaBr₃ で 18000、025C+LaBr₃ で 53000 である。

(5.2) 式の右辺は全ピクセル数に対する励起ピクセル数の割合だから、1 ピクセルが励起されたときに出力する電荷量を Q 、増幅器のゲインを G 、ADC 変換量 (1ch あたりの電荷量) を k とすると、

$$\beta = \frac{1}{k} \times G \times Q \times N_{\text{total}}$$

と書ける。また、1 ピクセルの容量を C 、付加した逆電圧とブレイクダウン電圧との差を ΔV とすると $Q = C\Delta V$ である。ここで、MPPC の端子間容量を C_t とすると $C = C_t/N_{\text{total}}$ となるから結局、

$$\beta = \frac{1}{k} \times G \times C_t \Delta V \quad (5.3)$$

と書ける。端子間容量は 050C と 025C とともに 320pF である。ブレイクダウン電圧は測定していないため正確にはわからないが ΔV も 050C と 025C でだいたい同じであったと思われる。したがって、 β の比はおおよそシェーパーのゲインの比に等しいと考えられる。測定結果に沿うように曲線が描けた 3 通りの組み合わせの β の比は、

$$025\text{C}+\text{GSO} : 050\text{C}+\text{LaBr}_3 : 025\text{C}+\text{LaBr}_3 = 62000 : 18000 : 53000 = 3.4 : 1 : 2.9$$

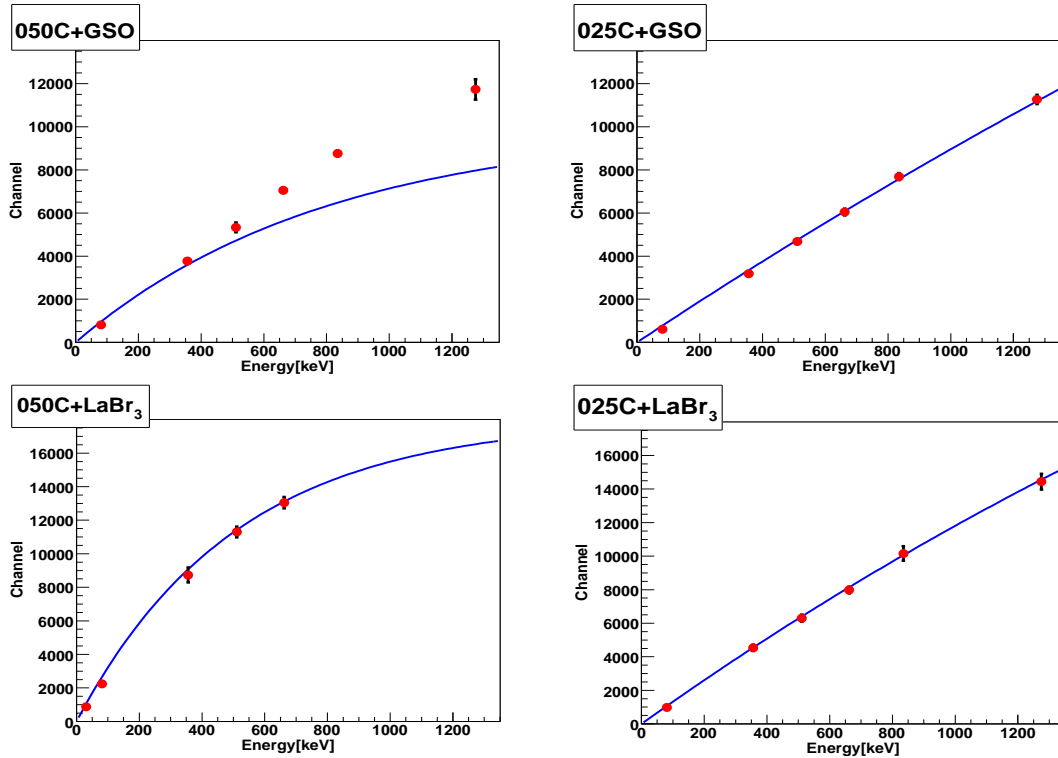


図 5.12: (5.2) 式より描いた曲線

一方、ゲインの比は、

$$025\text{C}+\text{GSO} : 050\text{C}+\text{LaBr}_3 : 025\text{C}+\text{LaBr}_3 = 32.5 : 10.0 : 20.0 = 3.3 : 1 : 2.0$$

となり、大きなずれはない。

図 5.12 の曲線からエネルギーとチャンネルの線型性が成り立つとみなせるおおよその範囲を評価すると、025C+GSO では 950keV まで、050C+LaBr₃ では 200keV まで、025C+LaBr₃ では 850keV までとなり、同じシンチレータを用いた場合ピクセル数が多い 025C の方が、同じ MPPC を用いた場合発光量の小さい GSO の方がより広い範囲で線型性が成り立つという結果が再び得られた。

050C+GSO の曲線が実験結果に沿わないのは曲がり方が急なためであり、シンチレータからの光漏れ等を考えて α を 0.3 倍くらいにすれば実験結果に重ねることができるとは思われる。しかしこのとき $\beta = 200000$ となり、ゲインの比を説明できない。050C+GSO でのシェーパーのゲインは 10.0 である。また、MPPC とシンチレータの取り付け方が同じである 025C+GSO では説明がついている点とも矛盾してしまう。結局のところ原因は不明である。

5.4.2 エネルギー分解能について

エネルギーとエネルギー分解能の関係

5.3.3 節で示したフィッティングで得られたエネルギーとエネルギー分解能の関係式をみると、(4.4) 式から予想されるように概ね分解能はエネルギーの -0.5 乗に比例するという結果になっている。

ピクセルサイズによるエネルギー分解能の比較

同じシンチレータを用いたときに 050C と 025C で分解能がどう変わるかを比較する。

図 5.13 に GSO をシンチレータに用いたときの ^{137}Cs の 662keV のピークでの分解能を 050C と 025C で比較したものを示す。662keV での分解能は 050C+GSO が $(18.7 \pm 1.9)\%$ 、025C+GSO が $(20.4 \pm 1.4)\%$ で 050C の方が少しだけ良いが誤差も含めるとほぼ差はない。検出効率を考えると、(4.4) 式から 025C の分解能は 050C の分解能の $\sqrt{2}$ 倍になるはずである。この原因としては温度の違いや統計によらない成分の影響が考えられる。

また、 LaBr_3 を用いたときには低いエネルギーでは 050C の方が、高いエネルギーでは 025C の方が分解能が良い(図 5.10)。050C+ LaBr_3 では線型性が成り立たないため (4.4) 式はあてはまらないが、低いエネルギーで線型性が成り立つ範囲では検出効率の高い 050C の方が分解能が良く、高いエネルギーになると線型と仮定した場合に比べ励起ピクセル数が少なくなる 050C は分解能が悪くなると考えられる。5.4.1 節で 050C+ LaBr_3 の線型性が成り立つ範囲を 200keV までと評価したが、図 5.10 で 050C+ LaBr_3 の直線と 025C+ LaBr_3 の直線が交わって分解能が逆転するのも 200keV 程度である。

シンチレータによるエネルギー分解能の比較

同じ MPPC を用いたときに GSO と LaBr_3 で分解能がどう変わるかを比較する。

図 5.14 に 025C を MPPC に用いたときの ^{137}Cs の 662keV のピークでの分解能を GSO と LaBr_3 で比較したものを示す。図からも明らかなように、662keV での分解能は 025C+GSO が $(20.4 \pm 1.4)\%$ 、025C+ LaBr_3 が $(8.6 \pm 0.3)\%$ で LaBr_3 の方が格段に良い。これは LaBr_3 の発光量が GSO に比べて 7 倍とかなり大きいことによると考えられる。MPPC に 050C を用いても同様の結果が得られた。

さらに ^{133}Ba のスペクトルで比較したものを図 5.15 に示す。356keV のピークが LaBr_3 では前のピーク (303keV と 207keV) から分離できていることがわかる。

(5.2) 式の $\alpha E \times \text{PDE}$ が (4.4) 式の ϵN に等しいので、5.4.1 節で代入した値を使って分解能の比を (4.4) 式から求めると、

$$050\text{C}+\text{GSO} : 025\text{C}+\text{GSO} : 025\text{C}+\text{LaBr}_3 = 4.3 : 6.1 : 4.8 (\text{統計限界}) = 0.9 : 1.3 : 1$$

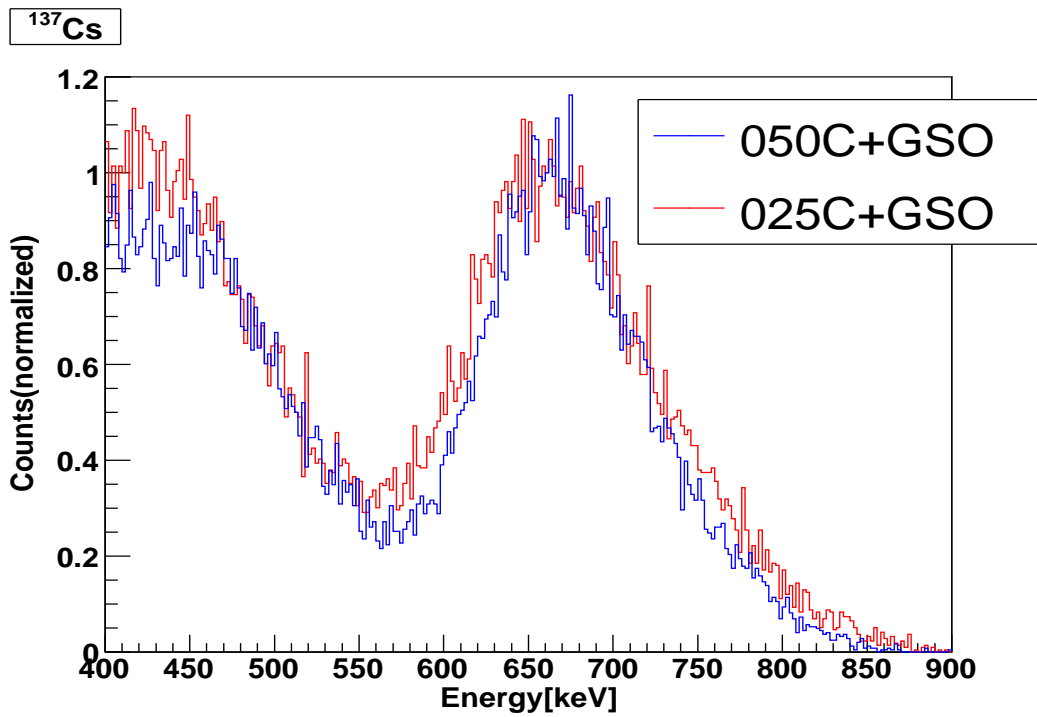


図 5.13: ピクセルサイズによる分解能の比較

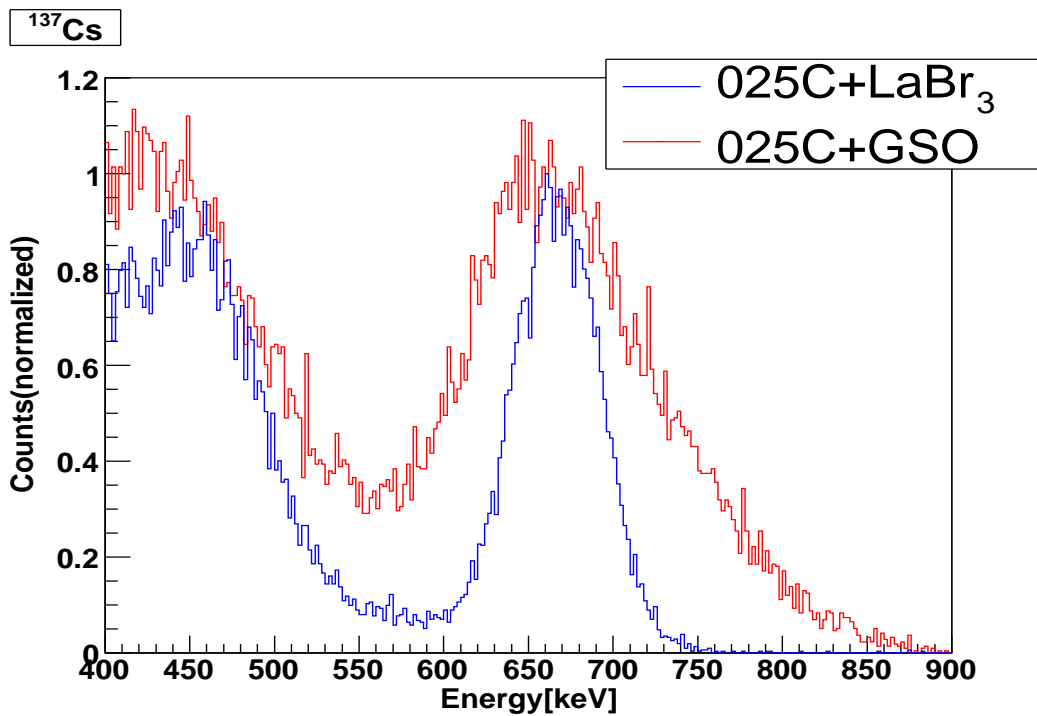


図 5.14: シンチレータによる分解能の比較 (¹³⁷Cs)

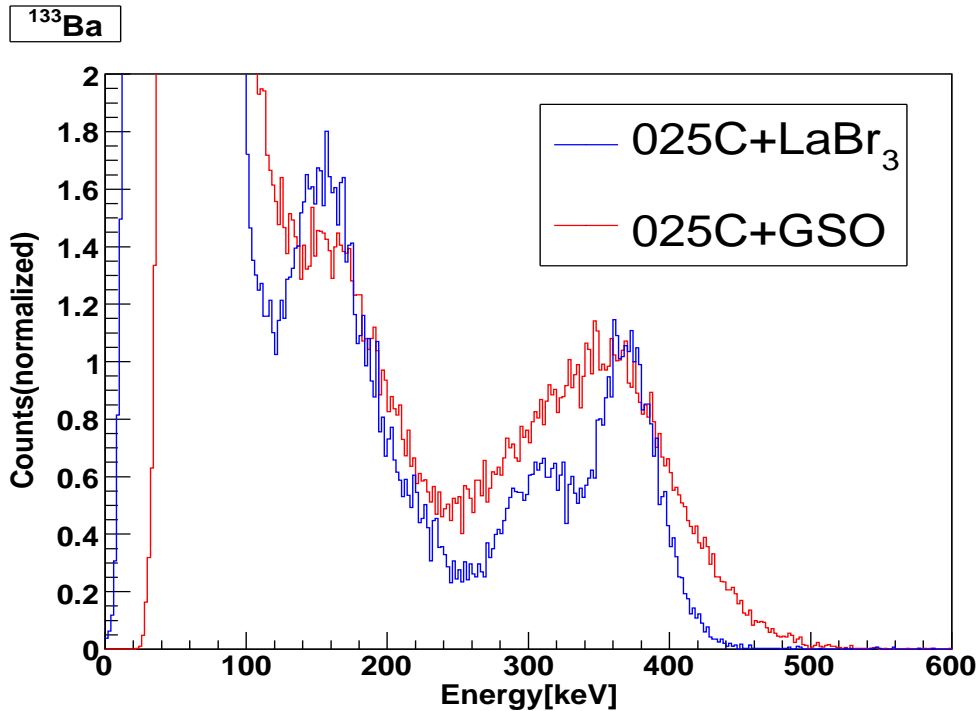


図 5.15: シンチレータによる分解能の比較 (^{133}Ba)

となる。ただし線型性の成り立たない 050C+LaBr₃ は除いた。一方、実験で得られた分解能の比は、

$$050\text{C}+\text{GSO} : 025\text{C}+\text{GSO} : 025\text{C}+\text{LaBr}_3 = 18.7 : 20.4 : 8.6 = 2.2 : 2.4 : 1$$

となる。

実験で得られた分解能は (4.4) 式から求められる分解能の統計による限界値よりかなり大きい。これは光の集光率や回路ノイズなどの影響であると考えられる。それでもシンチレータによる分解能の違いは (4.4) 式から求められる値にあらわれるはずである。しかし (4.4) 式から求めた比は実験で得られたような大きな差を表していない。これは LaBr₃ ではシンチレータの大きさと受光面大きさの違いを考えて入射光子数を 0.25 倍したために GSO の 7 倍という発光量が反映されないためである。試しに入射光子数を 0.25 倍せずに分解能の比を計算してみると、

$$050\text{C}+\text{GSO} : 025\text{C}+\text{GSO} : 025\text{C}+\text{LaBr}_3 = 4.3 : 6.1 : 2.4 = 1.8 : 2.5 : 1$$

となり実験結果に近づく。

MPPC のパッケージの表面と受光面との間にはわずかな隙間があるため、実際には受光面より広い範囲の光子を拾っているのだろうか。あるいは考えにくいですがシンチレータの端の部分からはあまり光がでていないのかもしれない。

5.5 補足:温度による MPPC のゲインの変化

本実験に入る前の段階で、MPPC のゲインが測定ごとに変化して再現性が悪いということがあった。それを改善する過程のなかで、温度によってゲインがどの程度変化するかを測定したのでここで述べておく。

実験のセットアップは本実験と同じものであり、暖房で温度を少しずつ上げながら ^{137}Cs のスペクトルを測定した。用いた MPPC とシンチレータは 050C と GSO で、シェーパーのゲインは 10.0 に設定した。

測定の結果得られた ^{137}Cs の 662keV のピークのチャンネルの温度による変化の様子を図 5.16 に示す。この図から温度が高くなるほどゲインが低くなることわかる。変化の割合は 1 で 10%程度である。これは温度が高くなると結晶の格子振動が激しくなり、半導体中のキャリアが動きにくくなることによってその分雪崩増幅を起こしにくくなるためである。

本実験での測定中の温度変化は ± 0.2 程度であり、温度によってピークの位置が $\pm 2\%$ 程度ずれていると考えられる。実際の 662keV のピークの位置のずれは 1.6% ~ 2.6% であり、温度によるずれ程度に抑えられている。

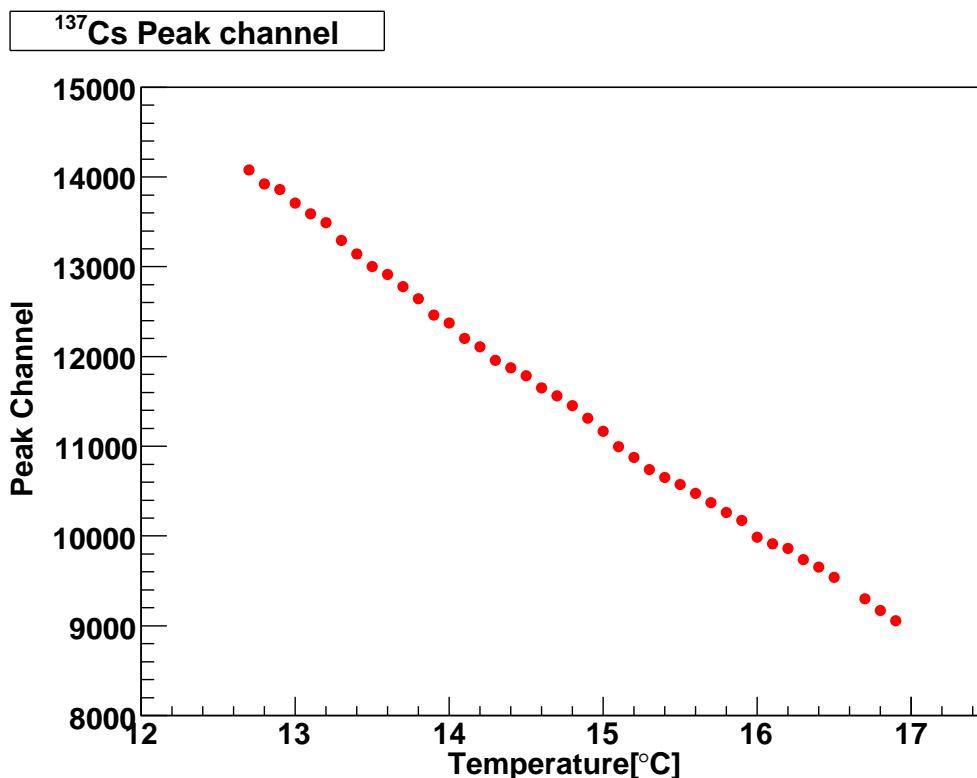


図 5.16: ^{137}Cs のピークチャンネルの温度変化

第6章 まとめと課題

まとめ

今回用いた MPPC とシンチレータの 4 通りの組み合わせでの測定結果について簡単にまとめておく。

エネルギーとチャンネルの線型性に関してはピクセル数の多い 025C の方が 050C よりも良く、発光量の大きい LaBr_3 を用いると GSO よりも線型性が悪くなった。これは理屈から予想される通りの結果である。特に 025C は LaBr_3 を用いても 835keV まで線型性が保たれ、優れた分解能と線型性を両立させた。

4 通りの組み合わせそれぞれの 662keV でのエネルギー分解能を表 6.1 に示す。表からわかるように LaBr_3 を用いると GSO よりも格段に分解能が良くなった。025C+ LaBr_3 で最も分解能が良く、 $(8.6 \pm 0.3)\%$ (662keV FWHM) という結果が得られた。

	050C	025C
GSO	18.7 ± 1.9	20.4 ± 1.4
LaBr_3	9.9 ± 1.5	8.6 ± 0.3

表 6.1: エネルギー分解能のまとめ ([%] 662keV FWHM)

課題

今回の実験では 4 通りの組み合わせについて測定温度がそれぞれ異なっている。1 つの組み合わせの中では温度が変わらないように気をつけていたが、各組み合わせでの比較をする以上、恒温槽を使用していなく温度管理が難しいとはいえ全ての測定で温度を統一するべきであった。なお P6 発表会の際のスライドでは温度が 17 で統一されているが、レポートを作成する際に実験ノートを見返して誤りを発見したのでここで訂正させていただく。

また実験の最終段階で MPPC の特徴であるフォトンカウンティングによる光量測定を試みたが、ノイズにまぎれてしまい 1 フォトンの検出ができないまま終わってしまった。これができれば各測定で検出したフォトン数を求められるため、5.4 節の考察のフォトン数の部分でもっと正確な議論をすることができたであろう。

最後に、本レポートは今野と福間の2人で分担して作成したのでそれぞれの担当部分を挙げておく。第1章、第2章、第3章は福間が担当し、他は今野が担当した。

関連図書

- [1] グレン F. ノル. 放射線計測ハンドブック. 木村逸郎, 阪井英次訳. 第3版, 日刊工業新聞社, 2001.
- [2] 信原岳. 新型光検出器 MPPC の開発. 京都大学, 2006, 修士論文.
- [3] 五味慎一. 半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築. 京都大学, 2008, 修士論文.
- [4] 生出秀行. 半導体光検出器 PPD の基本特性の解明と, 実践的開発に向けた研究. 東京大学, 2009, 修士論文.
- [5] 大家敬志, 坂下健郎. 無機シンチレータを用いた γ 線測定. 京都大学課題研究 P6, 2008.
- [6] 浜松ホトニクス社製 MPPC カタログ. 光技術・光産業浜松ホトニクス. http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/jpn/html/mppc/pdf/mppc_kapd0002j03.pdf, (参照 2008 年 12 月).
- [7] "Silicon Photomultiplier for Simultaneous PET-MRI". SensL. http://www.sensl.com/pdfs/SPM_Tech_App_Notes/AN_PET_MRI.pdf, (参照 2009 年 2 月)
- [8] "科学技術情報流通技術基準 参照文献の書き方". SIST 科学技術情報流通技術基準. http://sist-jst.jp/handbook/sist02_2007/main.htm, (参照 2008 年 3 月)

謝辞

この課題研究を行うにあたっていろいろ方にお世話になりました。お世話になった皆様に感謝致します。

特に直接実験をみて頂いた黒澤さんと上野さんには大変お世話になりました。2月に入るまでほとんど実験を進められずにいた私たちを見捨てることもせずに、発表までの道筋をたてて頂いたおかげでどうにかこのレポートまでこぎつけることができました。本当にありがとうございました。

最後に、4年間大学へ通わせてくれた両親とこの京都で出会った人たちに感謝致します。