

平成19年度 課題研究P6

無機シンチレータを用いた γ 線測定

大家敬志 坂下健郎

平成20年3月27日

概 要

光子や荷電粒子が入射すると、主に可視光域の光を放つ物質をシンチレータと呼ぶ。このシンチレータは、天体物理学においてはガンマ線カメラの吸収体として用いられている他、医療機器にまで応用されている。それ故、その性能、特に各入射放射線のエネルギーを他とどれだけ分離出来るかを表す指標であるエネルギー分解能を研究することは重要である。また、エネルギー分解能はシンチレータと組み合わせる検出器によっても変わってくる。

そこで、我々はNaI(Tl)、CsI(Tl)、GSO(Ce)、LaBr₃(Ce)といった無機シンチレータに放射線源からの γ 線を当てたときに生じるシンチレーション光を、光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube、PMT)、PIN フォトダイオード (PIN Photo Diode、PIN PD)、アバランシェフォトダイオード (Avalanche Photo Diode、APD)、MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) を用いて検出し、エネルギー分解能を調べた。

上に挙げた無機シンチレータのうち、LaBr₃(Ce) は現時点で最も優れたエネルギー分解能を示す結晶として知られており、本実験でも優れたエネルギー分解能が得られた。特に、PMT (光電面はスーパーバイアルカリ) を用いることにより 662keV で 2.9% (CsI(Tl) では 7.1%) という分解能を達成できた。さらに、入射 γ 線のエネルギーと、発光量の優れた線型関係も確認できた (5.2 節)。

そして、シンチレーション光を検出する検出器を変えることで分解能が良くなるシンチレータもあれば、悪くなるものもあった。例えば、PMT (光電面はバイアルカリ) で測定した場合にはLaBr₃(Ce)、CsI(Tl) の 662keV における分解能はそれぞれ 3.2%、6.9%だったが、APD を用いた場合にはそれぞれ 4.0%、6.4%であった (5.2、5.3、5.4 節)。

また、シンチレータと検出器の性能を最大限に発揮させるためにも、各組み合わせに対して適切に実験装置をセットアップすることは重要である (7 章)。

4 種類の検出器のうち MPPC は比較的新しい検出器で、その性能は特に注目されるが、GSO(Ce) と組み合わせた本実験では芳しい結果は得られず、多くの課題を残した (5.5 節)。

目次

第 1 章 実験目的	3
第 2 章 無機シンチレータ	4
2.1 シンチレータの発光原理	4
2.2 実験に用いるシンチレータ	5
2.3 反射材	6
2.4 オプティカルグリス	7
第 3 章 検出器の動作原理と特性	8
3.1 フォトダイオード	8
3.1.1 PIN フォトダイオード (PIN Photo Diode、PIN PD)	8
3.1.2 アバランシェフォトダイオード (Avalanche Photo Diode、APD)	9
3.2 光電子増倍管 (PMT)	11
3.3 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)	13
第 4 章 解析手法	16
4.1 エネルギー分解能の計算	16
4.2 γ 線のエネルギーとエネルギー分解能の関係	17
第 5 章 シンチレータを用いた γ 線測定	18
5.0.1 整形増幅器の時定数とゲイン	18
5.0.2 温度管理について	18
5.1 PIN フォトダイオード (PIN PD) とシンチレータを用いた γ 線測定	18
5.1.1 PIN PD のセットアップ	18
5.1.2 予備実験：整形増幅器の時定数の決定	19
5.1.3 まとめと反省	20
5.2 光電子増倍管 (PMT) とシンチレータを用いた γ 線測定	21
5.2.1 PMT のセットアップ	21
5.2.2 PMT とシンチレータの組み合わせによる γ 線測定	23
5.2.3 まとめと考察	38
5.3 アバランシェフォトダイオード (APD) とシンチレータを用いた γ 線測定	41
5.3.1 APD のセットアップ	41
5.3.2 APD とシンチレータの組み合わせによる γ 線測定	42
5.3.3 まとめと考察	46

5.4	PMT(BA) と APD でのエネルギー分解能の比較	48
5.5	MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) とシンチレータを用いた γ 線測定	49
5.5.1	MPPC のセットアップ	49
5.5.2	MPPC からの生信号	51
5.5.3	エネルギーとチャンネルの関係について	51
5.5.4	MPPC とシンチレータの組み合わせによる γ 線測定	52
5.5.5	考察	56
5.5.6	補足:降伏電圧の測定	56
5.5.7	補足:ピークチャンネルの時間による変化について	57
第 6 章	光量比較	58
6.1	光電子増倍管を用いた光量比較	58
6.1.1	測定	58
6.1.2	結果	58
6.1.3	考察	59
6.2	APD を用いた光量比較	60
6.2.1	測定	60
6.2.2	結果	60
6.2.3	考察	61
第 7 章	整形増幅器の時定数の変更	63
7.1	PIN PD を用いた γ 線測定 (2 回目)	63
7.1.1	セットアップ	63
7.1.2	測定	64
7.1.3	結果	64
7.2	CsI(Tl)+PIN PD によるより正確な測定	64
7.2.1	測定	64
7.2.2	結果	65
7.2.3	考察	68
7.3	APD を用いた γ 線測定 (2 回目)	69
第 8 章	全体のまとめ	72

第1章 実験目的

天文学は飛躍的な進歩を遂げ、観測出来る γ 線のエネルギー領域は TeV 領域にまで達している。しかし、0.1 ~ 1MeV の MeV 領域での観測はほとんど進んでいないのが現状である。MeV 領域の γ 線を観測することが出来れば、ブラックホールや宇宙線起源など、現在最も盛んに研究されている分野に大きく貢献できると考えられている。MeV γ 線検出のため、現在注目を浴びているのが、ガス検出器と結晶シンチレータを組み合わせ、コンプトン散乱を利用して γ 線のイメージング検出を行う MeV γ 線線カメラである。

従って、無機シンチレータの性能を調べることは重要である。無機シンチレータの性能はそのシンチレーション光を検出する検出器によっても変わってくるので、状況に応じて最良のシンチレータと検出器の組み合わせを見つけなければならない。そこで、我々の目的は、シンチレータと各種検出器（光電子増倍管、PIN フォトダイオード、アバランシェフォトダイオード、MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)）を組み合わせ、 γ 線を検出し、それぞれの組み合わせにおけるエネルギー分解能の測定を行い、比較することである。

第2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、我々が γ 線測定で用いる無機シンチレータの紹介をしておく。

2.1 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、我々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得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。 γ 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。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過ぎるので、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、かつ可視光を放出するように工夫されている。

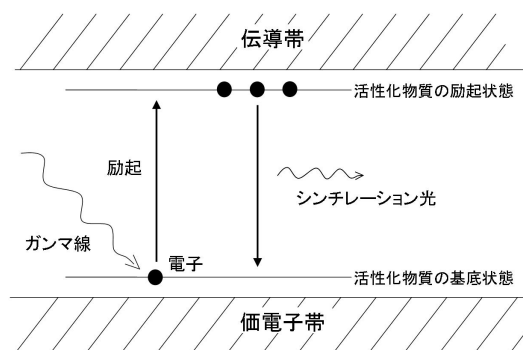


図 2.1: シンチレータの発光原理

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. 発生した蛍光の透過度が高いこと
3. 蛍光の減衰時間が短いこと
4. 蛍光の波長が検出器の感度波長に合っていること

2.2 実験に用いるシンチレータ

今回の実験で我々が用いる無機シンチレータは、NaI(Tl) (応用光研工業製)、CsI(Tl) (浜松中国工場製)、GSO(Ce) (日立化成製)、LaBr₃(Ce) (サンゴバン製) の4種類である (下図 2.2)。形状は、CsI(Tl) は $10 \times 10 \times 10\text{mm}^3$ の立方体、GSO(Ce) は $6 \times 6 \times 13\text{mm}^3$ の直方体、NaI(Tl) と LaBr₃(Ce) はともに $\phi = 13\text{mm}$ 、 $h = 13\text{mm}$ の円柱である。

これらのシンチレータの特性を以下にまとめる。後述する光電子増倍管との相性についても言及する。

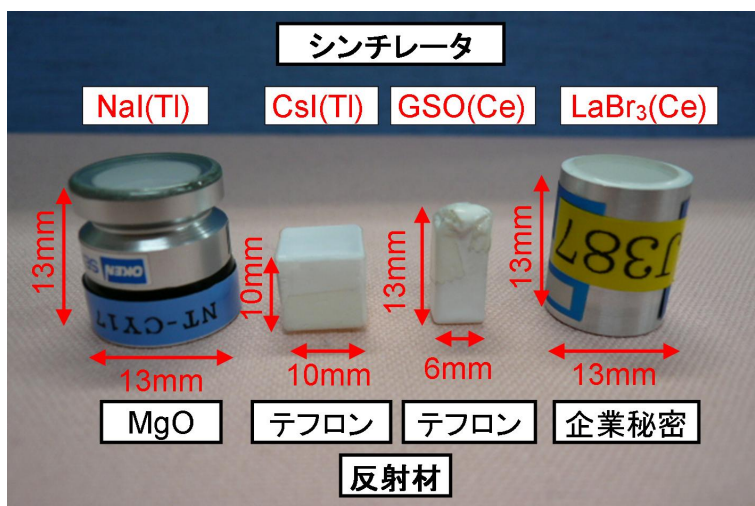


図 2.2: 今回の γ 線測定で使用する無機シンチレータ

NaI(Tl)

NaI は従来から使用されてきた最も典型的なシンチレータである。発光量が多いことが特徴である (39000photons/MeV)。蛍光減衰時間は 230ns と長めなので、高計数率の測定には向かない。強い潮解性を持つため、取り扱いには注意が必要で、我々はアルミニウムのケースに覆われたものを使う (図 2.2)。発光波長が 415nm なので、典型的な光電子増倍管の感度波長とよく一致する。

CsI(Tl)

CsI(Tl) は NaI(Tl) と比較して発光量は劣るが、原子番号と密度が大きく、より γ 線の阻止能に優れているといえる。蛍光減衰時間に関しては、1000ns と NaI(Tl) よりさらに長いので、やはり高計数率の測定には向かない。発光波長は 565nm であるので光電子増倍管でのシンチレーション光の検出には向かないが、フォトダイオードでは特に高い量子効率が得られる。

GSO(Ce)

GSO とは Gd_2SiO_5 の略である。この結晶は、発光量は少ないが、大きな原子番号と密度を持ち、阻止能が高い。また、蛍光減衰時間は 60ns と短い。発光波長は 440nm で、光電子増倍管による検出に適している。

LaBr₃(Ce) (ランタンプロマイド)

LaBr₃(Ce) は非常に大きな発光量を持つ (63000 photons/MeV)。また、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 CsI(Tl) や GSO(Ce) に劣る。NaI(Tl) 同様潮解性を持つので、やはりアルミニウムのケースに封入されている。発光波長は 380nm で、光電子増倍管による検出に適している。比較的最近開発されたシンチレータで、本実験でも特に注目される結晶である。

表 2.1: シンチレータの主な特徴

シンチレータ	密度 (g/cm ³)	発光波長 (nm)	蛍光減衰時間 (ns)	Light output (/MeV)	放射長 * (cm)	備考
NaI(Tl)	3.67	415	230	39000	2.59	潮解性
CsI(Tl)	4.51	565	1000	33000	1.86	潮解性
GSO(Ce)	7.13	440	60	9000	1.38	
LaBr ₃ (Ce)	5.29	380	25	63000	2.1	潮解性

*511keV の γ 線が 1/e に減衰する距離

2.3 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集めなければならない。

NaI(Tl) には MgO 白色粉末が用いられている。CsI(Tl)、GSO(Ce) にはテフロン材（それぞれバルカーテープシール（日本バルカー工業）、ナフロンシールテープ（ニチアス））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。

2.4 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、散乱されてしまっては意味がない。そこで、我々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（応用光研工業、OKEN6262A）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。

第3章 検出器の動作原理と特性

シンチレーション光を検出するための検出器を挙げておく。すべての検出器の性質はそれらの製造元である浜松ホトニクス株式会社により公開されている。

3.1 フォトダイオード

3.1.1 PIN フォトダイオード (PIN Photo Diode 、PIN PD)

PIN フォトダイオードの動作原理

半導体には、リン (P) 等のドナー原子を少量入れた N 型半導体と、ホウ素 (B) 等のアクセプタ原子を少量入れた P 型半導体がある。N 型半導体の電荷キャリアは電子で、P 型半導体の電荷キャリアは正孔である。この二種類の半導体を接合させる (PN 接合) と、一方のキャリアが拡散して他方に移り、その境界付近にキャリア密度が小さい空乏層ができる。この空乏層には P 側の電子を得たアクセプタイオンと、N 側の電子を失ったドナーイオンの存在により、電位差 V_0 が生じている。

この空乏層に光子が入射すると、価電子帯にあった電子が伝導帯に励起され、電子・正孔対が生じる (Si 半導体の場合、電子・正孔対を一組作るのに必要な平均エネルギーは約 3.8eV である)。すると、空乏層内の電場により電子、正孔がそれぞれ逆方向に移動し、電流が流れる。実際には、空乏層は非常に狭いので、逆バイアス V を印加することにより空乏層を広げ、また、キャリアを移動しやすくさせて検出効率を上げる。

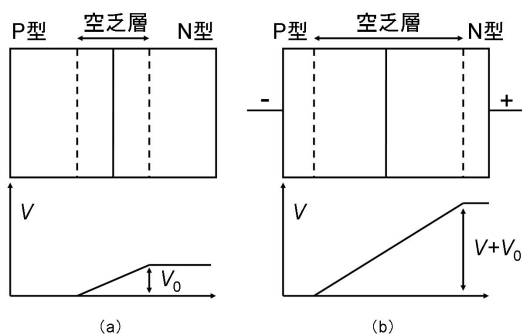


図 3.1: PN 接合 (a) 逆バイアス印加前 (b) 印加後

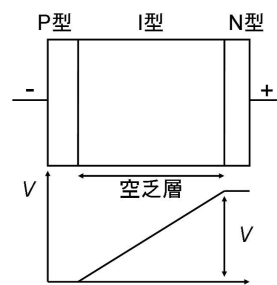


図 3.2: PIN PD の概念図

さらに、この P 型と N 型の間に、アクセプタ原子とドナー原子を等量含んだ領域 (I 型) を挟んだ構造をとるものを PIN フォトダイオードと呼ぶ。PIN フォトダイオードは、空乏層を厚く作れるので、飛程の長い粒子や、高エネルギー粒子の検出に適している。

本実験では、シンチレータをオプティカルグリスを介して PIN フォトダイオードに接着させ、シンチレータに γ 線を照射したときに発生するシンチレーション光を検出する。(我々の実験で PIN フォトダイオードと組み合わせるシンチレータは CsI(Tl) のみである)

PIN フォトダイオードの特性

本実験では、浜松ホトニクス社製の Si PIN フォトダイオード (S3590-01) を用いる。これは、CsI(Tl) の発光波長付近である 540nm で 85% という高い量子効率をもつ。この製品について主な性質を下表 3.1 にまとめておく。また、外観を図 3.3 に示す。

表 3.1: Si PIN フォトダイオード (浜松ホトニクス、S3590-01) の主な特徴

有効受光面 サイズ (mm)	感度波長 範囲 (nm)	最大感度 波長 (nm)	受光感度 (@540nm) (A/W)	暗電流 (nA)	端子間容量 (pF)
10 × 10	320 ~ 1060	920	0.31	1.5	75

受光面は正方形、データは 25 °C における値、暗電流は印加電圧が 30V のときの値

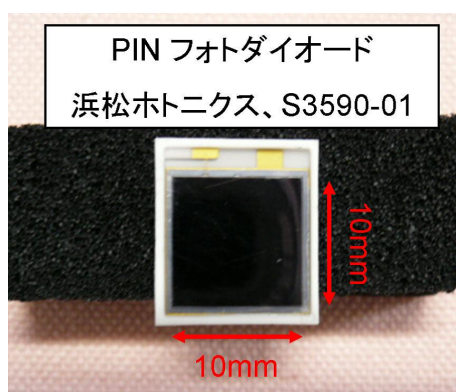


図 3.3: PIN PD の外観

3.1.2 アバランシェフォトダイオード (Avalanche Photo Diode、APD)

アバランシェフォトダイオードの動作原理

通常のフォトダイオードには、入射光子によって生じた電子・正孔対を増倍させる機能はない。アバランシェフォトダイオードは、高い電圧を印加することにより、増倍作用を持たせたフォトダイオードのことで

ある。その増倍作用は、以下のように説明される。

まず、フォトダイオードの時と同様に、光子の入射により空乏層で電子・正孔対が生成される。すると、電子は強い電場のかけられた領域（アバランシェ領域）に導かれる。その領域で電子は大きく加速され、他の束縛電子を衝突により励起させる。さらに、その新しい伝導電子が他の束縛電子を励起させ、これが繰り返されて高い増倍率を得ることになる（なだれ増幅）。正孔の加速によっても増倍作用が得られるが、一般に、電子のほうが増倍効率がよい。一般的には 50 ～ 100 の増倍率を実現される。

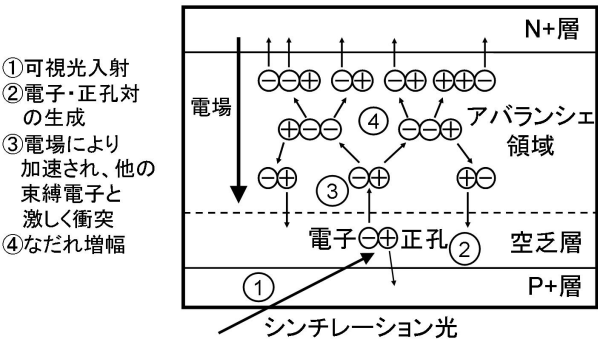


図 3.4: アバランシェフォトダイオードの概念図

本実験では、シンチレータをオプティカルグリスを介してアバランシェフォトダイオードと接着し、シンチレータに γ 線を照射したときに発生するシンチレーション光を検出する。

アバランシェフォトダイオードの特性

本実験では、浜松ホトニクス社製のアバランシェフォトダイオード（S8664-1010）を用いる。これは、PIN PD と同様に高い量子効率を持つ。この製品の性質を下表 3.2 にまとめ、量子効率と外観を図 3.5、3.6 に示す。

表 3.2: アバランシェフォトダイオード (浜松ホトニクス、S8664-1010) の主な特徴						
有効受光面 サイズ (mm)	感度波長 範囲 (nm)	最大感度 波長 (nm)	量子効率 (@420nm) (%)	暗電流 (nA)	端子間容量 (pF)	増倍率 (@420nm)
10 × 10	320 ～ 1000	600	70	10	270	50

受光面は正方形、データは 25 °C における値、暗電流と端子間容量は増倍率が 50 のときの値

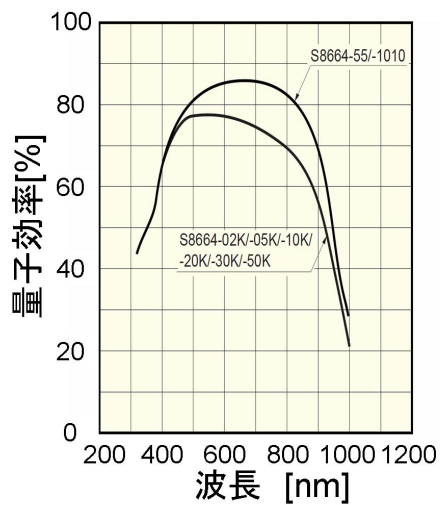


図 3.5: APD の量子効率

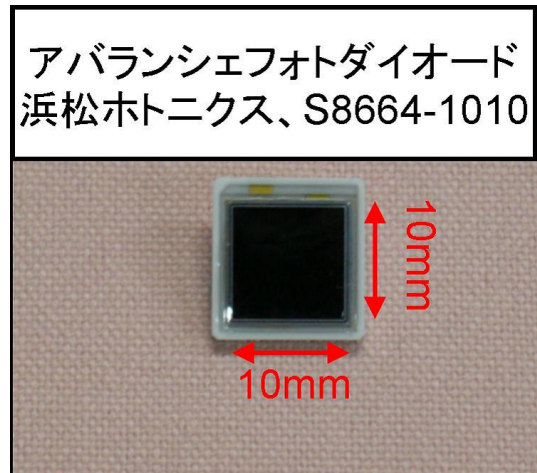


図 3.6: APD の外観

3.2 光電子増倍管 (PMT)

シンチレーション光を検出する光電子増倍管 (PMT) は、真空容器の中の半透明の光電面と何段かのダイノード、陽極からなる。その他電子を収束させる電極、加速電極、グリッドが必要に応じつけられている。シンチレーション光は PMT に入射して光電面を衝撃して電子を放出する。光電面から出た電子は電場により第 1 ダイノードに入射し 2 次電子を放出する。その後続く各ダイノードで 2 次電子放出が繰り返され、最終ダイノードから放出された 2 次電子群は陽極より取り出される。PMT の構造を図 3.7 に示す。

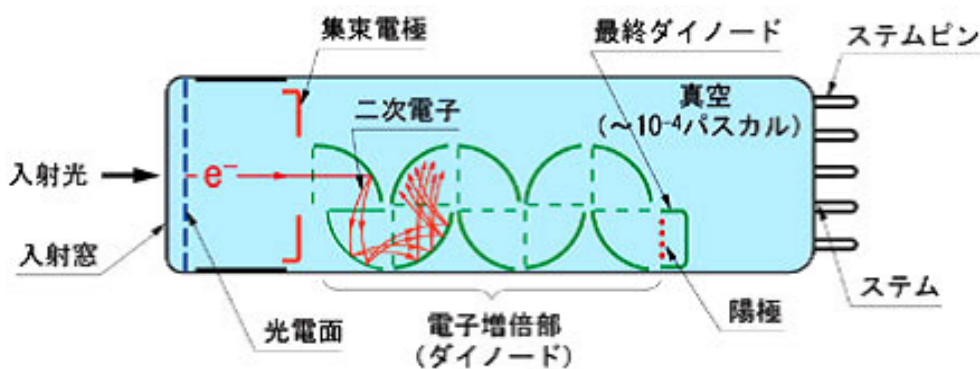


図 3.7: 光電子増倍管の構造

光電面には光子を効率よく光電子に変換する物質が必要となる。この変換の効率 (量子効率) は光の波長に依存する。PMT の量子効率について図 3.8 に示す。

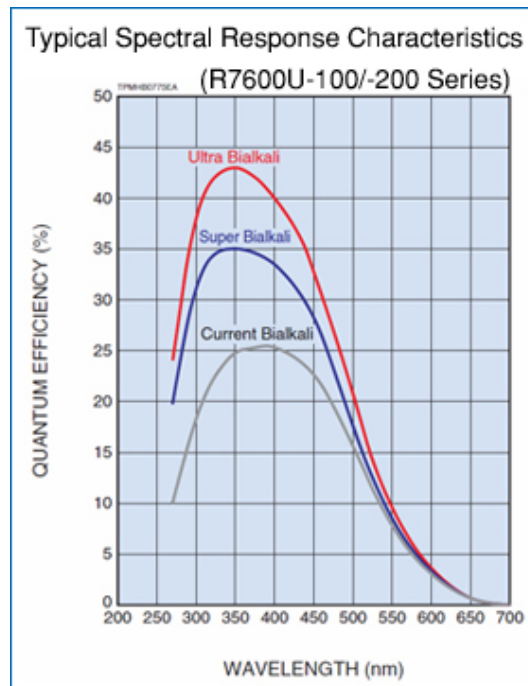


図 3.8: PMT の量子効率

一般に印加電圧を V として、 n 段ダイノードの PMT の増倍率 G は式 (3.1) で与えられる。

$$G = KV^{an} \quad (K, a : \text{定数}, a = 0.7 \sim 0.8) \quad (3.1)$$

この G の値は通常約 10^6 程度である。

光電子や 2 次電子はエネルギーが低いので磁場の影響を受けやすい。磁場により電子が曲げられダイノードを衝撃する電子の数が減り増倍率が減少するので注意が必要である。

重要な性質として、まったく光が入らないときにも陽極電流が流れる暗電流があり、加える電圧、温度などにより変化する。暗電流の原因は、絶縁体を通しての漏れ電流、残留ガスのイオン化、電極からの電子の放出、光電面、ダイノードからの熱電子放出などが考えられる。

光電子増倍管の特性

本実験では、浜松ホトニクス社製の光電面の違う 3 種類の光電子増倍管、バイアルカリ (BA) R6231、スーパーバイアルカリ (SBA) R6231-100、ウルトラバイアルカリ (UBA) R7600U-200 を使用した。各製品の性質を下表 3.3 にまとめる。また、写真を図 3.9 に示す。

表 3.3: 光電子増倍管（浜松ホトニクス社製）の主な特徴

型名	Lot No.	光電面 (nm)	最大感度波長 量子効率 (%)	最大感度波長での	増倍率 (nA)	暗電流
R6231	AA0590	BA	420	30	2.7×10^5	2
R6231-100	AA0967	SBA	350	35	2.3×10^5	10
R7600U-200	AA0968	UBA	350	43	1.0×10^6	2



図 3.9: 3 種類の PMT。(左図) BA(左側) と SBA(右側)。(右図) UBA。

3.3 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) は、Si-PM (Silicon Photomultiplier) と呼ばれる、新しいタイプの半導体光検出器である。

MPPC は APD のピクセルが 2 次元に並列に並んだ構造をしている。各 APD ピクセルはガイガーモードと呼ばれる動作電圧で動作する。ガイガーモードとは、APD の逆電圧を降伏電圧以上にして動作させることである。ガイガーモードではわずかな光の入射に対してもガイガー放電という放電現象が起こるようになる。このときひとつの 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よらず、次式 (3.2) で表される。

$$Q = C(V_R - V_{BR}) \quad (3.2)$$

ここで V_R は付加された逆電圧、 V_{BR} は降伏電圧、 C は APD ピクセルの容量である。MPPC の増倍率は Q を素電荷で割った値となり、 $10^5 \sim 10^6$ である。

各 APD ピクセルにはクエンチング抵抗という抵抗が接続され、光子の検出に対して一定のパルスを出力する回路になる。電荷が流れ出ていく時間は抵抗の値を R とすると $C \times R$ で決まる。

MPPC はガイガーモードで動作する APD ピクセルが 2 次元に並列接続されており、各ピクセルは光子が入射した場合は光子数によらない一定の出力なので、光子の入射情報だけがわかる。MPPC の出力は各

APD ピクセルの出力の総和となる。光子を検出した APD ピクセルの数を N_{fired} とかくと、パルスの電荷量は次式 (3.3) になる。

$$Q_{\text{out}} = Q \times N_{\text{fired}} = C \times (V_R - V_{\text{BR}}) \times N_{\text{fired}} \quad (3.3)$$

光子を検出したピクセル数は、光が微弱のときは入射する光量に比例する。ガイガーモード APD の様子と、MPPC の等価回路をそれぞれ図 3.10、図 3.11 に示す。

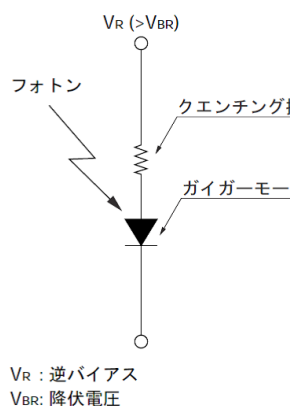


図 3.10: ガイガーモード APD

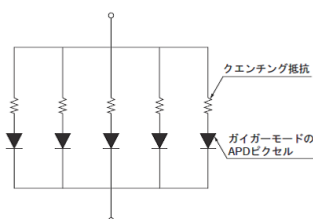


図 3.11: MPPC の等価回路

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 (3.4) で定義される。

$$\text{検出効率} = \text{量子効率} \times \text{開口率} \times \text{励起確率} \quad (3.4)$$

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

MPPC の特性としては以下のようなことが挙げられる。

- 低い電圧（100V 以下）で動作
- 高い増倍率（ $10^5 \sim 10^6$ ）
- 磁場の影響を受けない⇒医学利用
- 小型、耐衝撃、省電力⇒宇宙利用
- ノイズが多い

本実験では、浜松ホトニクス社製の MPPC (S10362-33-050C) を用いる。この製品の性質を下表 3.4 にまとめる。また、検出効率と、MPPC の写真をそれぞれ図 3.12、3.13 に示す。

表 3.4: MPPC (浜松ホトニクス、S10362-33-050C) の主な特徴

有効受光面 サイズ (mm)	ピクセル数	感度波長 範囲 (nm)	最大感度 波長 (nm)	検出効率 (@400nm) (%)	端子間容量 (pF)	増倍率
3 × 3	3600	270 ~ 900	400	53	320	7.5×10^5

受光面は正方形、データは 25 °C における値

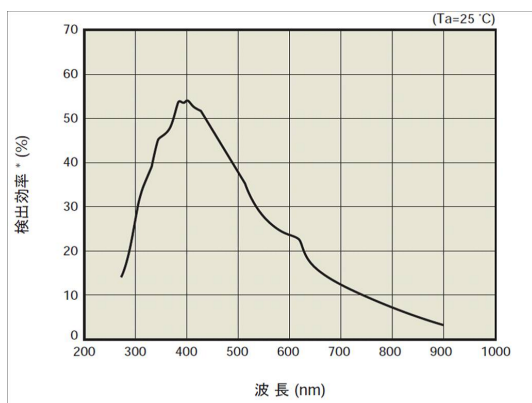


図 3.12: MPPC の検出効率

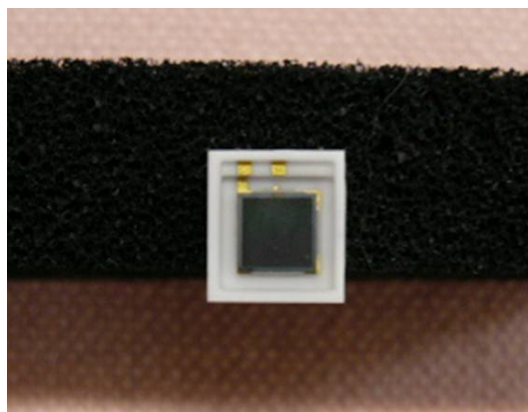


図 3.13: MPPC の外観

第4章 解析手法

エネルギー分解能の計算方法や、エネルギーとエネルギー分解能の関係について述べておく。

4.1 エネルギー分解能の計算

後に記すように、検出器からの信号をプリアンプで増幅し、さらに整形増幅器で波形整形されたパルスのピーク値を MCA（マルチチャンネルアナライザ）で読み取ることで我々はスペクトルを得る。例えば、CsI(Tl) と光電子増倍管を組み合わせると ^{137}Cs の放つ 662 keV の γ 線を測定したときのスペクトルは下図 4.1 のようになる。

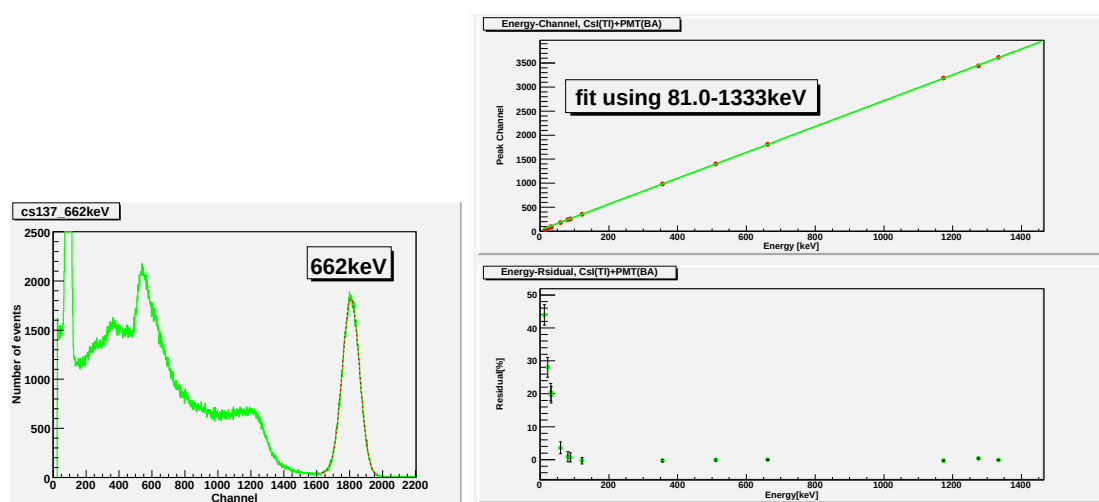


図 4.1: CsI(Tl)+PMT(BA) で測定した 662keV (^{137}Cs) のスペクトル図（左）とエネルギー較正の様子（右）

右端のピークが、662keV の γ 線がシンチレータ内で光電効果を起こしたことを示すピーク（あるいは、 γ 線がすべてのエネルギーをシンチレータ内の電子に与えたことを示すピーク）である。この光電ピークがどれだけ良く他と分離出来ているかを示す指標がエネルギー分解能である。光電ピークを、以下のようなガウス関数と直線の和で表される関数でフィッティングする。

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

パラメータ b は光電ピークの中心のチャンネルを表し、 γ 線のエネルギーと中心チャンネル b の関係をプロットすると、あるエネルギー範囲で線型関係が成り立つ (図 4.1 右)。ここで、図中の直線は線型関係を直線でフィッティングしたものである。するとエネルギーと中心チャンネルの関係がわかる：

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

この作業をエネルギー較正と呼ぶ。

次に、パラメータ c はガウス関数の標準偏差で、ガウス関数の高さ a が半分になる幅 σ (半値幅) とは

$$\sigma = 2.35c \quad (4.3)$$

の関係がある。したがって、この半値幅をエネルギー幅に換算するには次のような計算をすれば良い：

$$\text{半値幅に対応するエネルギー幅} = \frac{2.35 \times c}{A}. \quad (4.4)$$

これを γ 線のエネルギー E で割って、パーセント表示したものが半値幅におけるエネルギー分解能である：

$$\text{エネルギー分解能 (FWHM)} = \frac{2.35 \times c}{A} \times \frac{100}{E} \quad [\%]. \quad (4.5)$$

しかし、上図 4.1 のような場合には、エネルギーが 81.0keV (^{133}Ba) 以下の場合には線型性が崩れている。そこで、非線型の範囲においてエネルギー分解能を求めるとき、その点と両隣の 2 点とを結んだ直線の傾きの平均を上式の A の代用とした。例えば、59.5keV (^{241}Am) における分解能を求めたいときには 32.2keV (^{137}Cs) と 59.5keV、59.5keV と 81.0keV (^{133}Ba) をそれぞれ結んだ直線の傾きの平均を用いた。

また、ピークが 2 つ以上重なっている場合には適宜 (4.1) 式においてガウス関数をもう 1 つ加えてフィットした。

4.2 γ 線のエネルギーとエネルギー分解能の関係

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分布に従う確率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_p とすると、その統計的なゆらぎは $\sqrt{N_p}$ となる。しかし、シンチレーション光が検出器に入射し、光電子に変換される際の損失があるので、検出器内で発生する光電子数のゆらぎは検出器の量子効率を η として $\sqrt{\eta N_p}$ となる。また、入射 γ 線のエネルギー E と N_p は比例するので、量子効率も落とさずに考えると

$$\text{エネルギー分解能} \propto \frac{\Delta E}{E} \propto \frac{\sqrt{\eta N_p}}{\eta N_p} \propto \frac{1}{\sqrt{\eta E}} \quad (4.6)$$

の関係が成り立つ。よって、量子効率が高いほどエネルギー分解能が改善されることが期待され、 γ 線のエネルギーとエネルギーの関係を両対数グラフにプロットすると、それは傾きが -0.5 の直線に乗ることが見込まれる。

しかし、(4.6) 式の関係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。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。特に、増倍作用のないフォトダイオードでは検出器を出た信号が小さく、回路ノイズが支配的になり、式 (4.6) の関係からは大きく外れてしまう。一方、増倍作用の大きな光電子増倍管では回路ノイズの影響が相対的に小さくなり、エネルギー分解能は $E^{-0.5}$ によく比例すると考えられる。

第5章 シンチレータを用いた γ 線測定

5.0.1 整形増幅器の時定数とゲイン

整形増幅器（ORTEC 571）はどの検出器を用いた場合にも使うので、そのゲインと時定数を決定しなければならない。

我々は、CsI(Tl) と PIN フォトダイオードを組み合わせたときに最も良いエネルギー分解能が得られる時定数を一貫して採用することにした。本来ならば、用いる検出器ごと、あるいは組み合わせるシンチレータごとに最適な時定数を見つけるべきだが、測定に一貫性を持たせるという目的でそのようにした。

そうして定められた時定数に対して、我々の測定する最もエネルギーの高い 1333keV (^{60}Co) の光電ピークが MCA（ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション、MCA600）の計測できるチャンネルの最大値（4095ch）付近に収まるようにゲインを定める。従って、ゲインは検出器ごと、シンチレータごとに異なることになる。ただし、光電子増倍管を用いた実験では、低エネルギー γ 線にも着目し、 ^{57}Co の 122keV が MCA の計測できるチャンネルの最大値（4095ch）付近に収まるようにゲインを定めて測定した。

5.0.2 温度管理について

光電子増倍管、PIN フォトダイオード、アバランシェフォトダイオードはいずれも温度によって暗電流や増倍率などの特性が異なる。従って、実験開始から終了まで一定の温度を保つことが望ましい。しかし、我々の実験室は恒温槽を用いることのできる環境にない。そこで、0.5 $^{\circ}\text{C}$ 刻みに温度測定のできる温度計を用いて温度を確認し、実験室のエアコンやガスヒーターを調節することで温度を保った。不正確な方法といわざるを得ないが、温度計はほぼ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ しか変化しなかったので、各実験で示される温度の誤差は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度である。

5.1 PIN フォトダイオード（PIN PD）とシンチレータを用いた γ 線測定

PIN PD とシンチレータを組み合わせ γ 線測定を行うが、ここでは、主に整形増幅器の時定数を決めることと、 γ 線測定に慣れることが目的である。PIN PD を使ったより正確な測定は改めて第7章に述べる。

5.1.1 PIN PD のセットアップ

PIN PD と組み合わせるシンチレータは CsI(Tl) だけである。その組み合わせで γ 線を測定するためのセットアップと、CsI(Tl) と PIN PD の様子を下図 5.1、5.2 に示す。

まず、放射線源から γ 線がシンチレータに入射して発生したシンチレーション光がPIN PD（浜松ホトニクス、S3590-01）に入射し、PIN PDに電流が流れる。その信号はプリアンプ（クリアパルス、579/CsI型前置増幅器）により増幅され、信号分配器（クリアパルス、575Z型信号分配器）を通した後、整形増幅器（ORTEC 571）で波形整形される。その最終的なパルスのピークをMCA（ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション、MCA600）で読み取る。セットアップ図には示されていないが、実際には高圧電源からのケーブルは信号分配器につながっており、さらにプリアンプ内部を通してPIN PDにバイアスがかけられる仕組みになっている。また、CsI(Tl)、PIN PD及びプリアンプは、プリアンプに付属したケースに入れられている。

高圧電源はS3590-01の典型的な動作電圧である30Vに固定した。

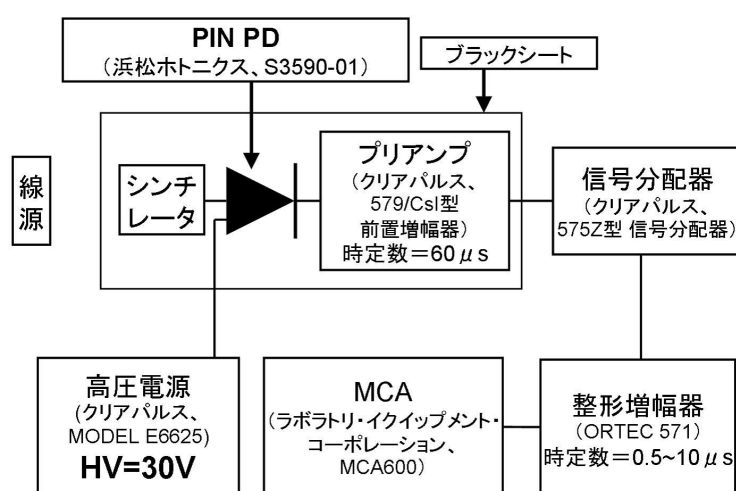


図 5.1: PIN PD を用いた測定のセットアップ

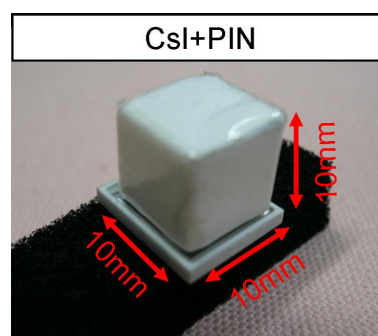


図 5.2: PIN PD と CsI(Tl)

5.1.2 予備実験：整形増幅器の時定数の決定

まず、整形増幅器の最適な時定数、すなわち、エネルギー分解能が最も良くなる時定数を求める。今回用いた整形増幅器（ORTEC 571）では0.5、1、2、3、6、10 μ sの6通りの時定数を定めることができる。そこで、各時定数ごとに ^{22}Na 、 ^{57}Co 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs の4種類の線源からの γ 線を測定し、122、511、662、1173、1275、1333keVにおけるエネルギー分解能を求めた。このとき、整形増幅器のゲインは5.0.1節にあるように定めた。

結果を図 5.3 に示す（時定数が10 μ sのときにはエネルギー分解能が明らかに悪化するので除外した）。時定数が2 μ sのときにエネルギー分解能が最も良くなることが見て取れる。グラフには示されていないが、122、1173、1275keVにおいても同様な傾向にあった。時定数が2 μ sの時のエネルギー分解能を下表 5.1 にまとめる。

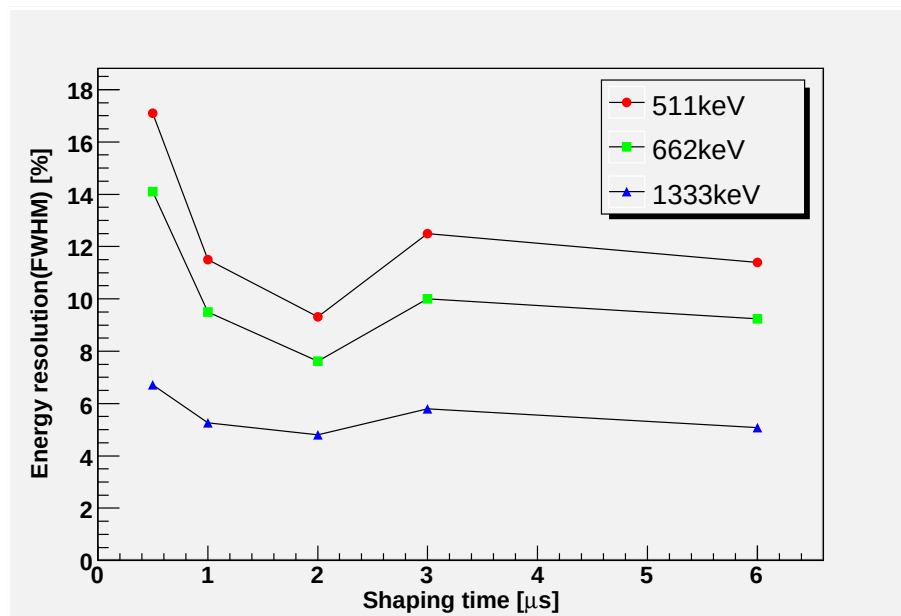


図 5.3: 各時定数におけるエネルギー分解能 (CsI(Tl)+PIN)

表 5.1: CsI(Tl)+PIN で測定したときのエネルギー分解能 (整形増幅器の時定数: $2\mu\text{s}$)

γ 線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)
^{57}Co	122	34.0
^{22}Na	511	9.3
^{137}Cs	662	7.6
^{60}Co	1173	4.7
^{22}Na	1275	5.2
^{60}Co	1333	4.8

5.1.3 まとめと反省

CsI(Tl) と PIN PD を組み合わせたとき、整形増幅器の最良の時定数は $2\mu\text{s}$ であることがわかった。ただし、最初の実験で不慣れということもあり、MCA でデータを取得したときの統計が少なく、また、5.0.2 で述べたような温度管理もされていない。さらに、CsI(Tl) と PIN PD を接着させるときにオプティカルグリスを使用していなかったと思われるので、まともな測定とはいえない。そのため、スペクトル図や細かい解析は省略することにするが、第 7 章で改めて CsI(Tl)+PIN での γ 線測定についてとり上げることにする。

とりあえず、PMT、APD での測定は時定数を $2\mu\text{s}$ に設定して測定することにする。

5.2 光電子増倍管（PMT）とシンチレータを用いた γ 線測定

5.2.1 PMT のセットアップ

PMT とシンチレータの組み合わせで γ 線を測定するときのセットアップ図を示す（図 5.4）。今回の実験ではバイアルカリ（BA）、スーパーバイアルカリ（SBA）、ウルトラバイアルカリ（UBA）という、光電面の異なる 3 種類の PMT を使用した。BA と SBA は型番が同じで、UBA だけが異なる型番である。各シンチレータと PMT の組み合わせでのプリアンプと高圧電源の設定値、整形増幅器のゲイン、測定時の気温を下表 5.2、5.3 に示す。高圧電源については高いエネルギーのガンマ線の測定で PMT がサチュレーションを起こさないように設定した。整形増幅器のゲインは高いエネルギーの γ 線の測定では 1333keV (^{60}Co) の光電ピーク、低いエネルギーの γ 線の測定では 122keV (^{57}Co) の光電ピークがそれぞれ MCA のチャンネルの最大値（4095ch）付近に収まるように定めた。

まず、線源から γ 線が入射して発生したシンチレーション光が PMT に入射し、光電子が増倍される。その信号はプリアンプにより増幅された後、整形増幅器（ORTEC571）で波形整形される。その最終的なパルスのピークを MCA（ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション、MCA600）で読み取る。整形増幅器の時定数は $2\mu\text{s}$ に設定した。各 PMT に CsI(Tl) を接着した写真を図 5.5 に示す。

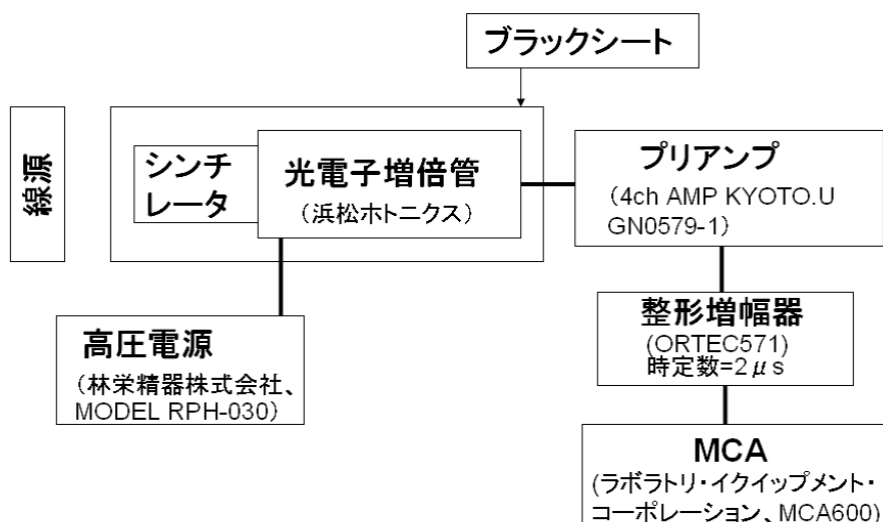


図 5.4: PMT を用いた γ 線測定のセットアップ図



図 5.5: CsI(Tl)+PMT の写真。(左) CsI(Tl)+BA。(右) CsI(Tl)+SBA。(下) CsI(Tl)+UBA。

表 5.2: 測定時の諸条件 (高いエネルギー)

PMT	シンチレータ	高圧電源の電圧 (V)	プリアンプの時定数 (μ s)	整形増幅器の ゲイン	気温 ($^{\circ}$ C)
BA	NaI(Tl)	900	5.4	4.7	20.5 $\pm$ 1.0
	CsI(Tl)	900	5.4	6.5	20.5 $\pm$ 1.0
	GSO(Ce)	1000	5.4	7.7	21.0 $\pm$ 1.0
	LaBr ₃ (Ce)	900	5.4	3	20.5 $\pm$ 1.0
SBA	CsI(Tl)	900	5.4	13.2	20.5 $\pm$ 1.0
	GSO(Ce)	1000	5.4	14	20.0 $\pm$ 1.0
	LaBr ₃ (Ce)	900	5.4	4.4	20.0 $\pm$ 1.0
UBA	CsI(Tl)	700	5.3	82	20.0 $\pm$ 1.0
	GSO(Ce)	670	5.3	206	20.0 $\pm$ 1.0
	LaBr ₃ (Ce)	650	5.3	58	20.0 $\pm$ 1.0

表 5.3: 測定時の諸条件（低いエネルギー）

PMT	シンチレータ	高圧電源の電圧 (V)	プリアンプの時定数 (μ s)	整形増幅器の ゲイン	気温 ($^{\circ}$ C)
BA	CsI(Tl)	900	5.4	57	21.0 $\pm$ 1.0
	GSO(Ce)	1000	5.4	79	21.0 $\pm$ 1.0
	LaBr ₃ (Ce)	900	5.4	28	20.0 $\pm$ 1.0
SBA	CsI(Tl)	1000	5.4	68	20.0 $\pm$ 1.0
	LaBr ₃ (Ce)	900	5.4	44	19.0 $\pm$ 1.0
UBA	CsI(Tl)	700	5.3	700	20.0 $\pm$ 1.0
	LaBr ₃ (Ce)	650	5.3	470	20.0 $\pm$ 1.0

5.2.2 PMT とシンチレータの組み合わせによる γ 線測定

PMT からの生信号

本実験の前に、PMT(BA) からの直接信号をオシロスコープ（テクトロニクス、TDS 2024）で確認したので、それを下図 5.6 に示す。PMT と組み合わせたシンチレータは CsI(Tl) と LaBr₃(Ce) である。PMT(BA) にかけた電圧は、CsI(Tl) と組み合わせたときは 900V で、LaBr₃(Ce) と組み合わせたときは 1000V であった。

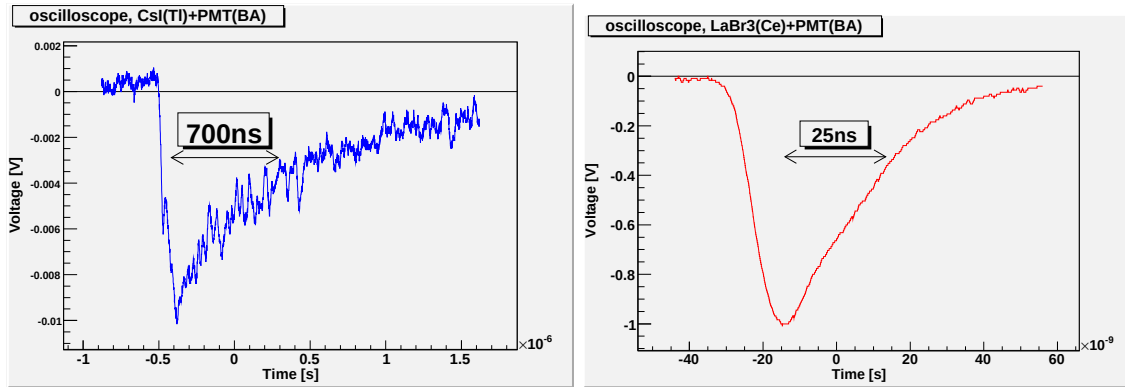


図 5.6: PMT(BA) と CsI(Tl)、LaBr₃(Ce) を組み合わせたときに、PMT から直接観測された出力波形

本実験

PMT と組み合わせるシンチレータは NaI(Tl)、CsI(Tl)、GSO(Ce)、LaBr₃(Ce) である。測定は ⁶⁰Co の 1333keV までを測定する高いエネルギーの測定と、⁵⁷Co の 122keV までを測定する低いエネルギーの測定の 2 回にわけて行った。NaI(Tl) は PMT(BA) の高いエネルギー、GSO(Ce) の低いエネルギーの測定につ

いてはPMT(BA)のみで測定した。各測定における、光電子増倍管にかける高電圧などの条件は表5.2、5.3に記す（ゲインの決め方については5.0.1節を参照）。

CsI(Tl)、LaBr₃(Ce)とPMT(BA)を用いたときのスペクトルを図5.7、5.8に示す。さらにLaBr₃(Ce)とPMT(SBA)、PMT(UBA)を用いたときの高いエネルギーのスペクトルを図5.13、5.16に示す（赤の破線はガウシアンによるフィット結果）。高いエネルギーの測定での図は122keV以上のスペクトルを示し、122keV以下のスペクトルは低いエネルギーの測定での図として示す。また、エネルギー較正の様子をすべてのシンチレータとPMTの組み合わせに関して図5.9、5.12、5.14、5.15、5.17、5.18に示す。直線性が悪くフィットできなかったものについてはフィット直線が描かれていない。

各シンチレータと3種類のPMTの組み合わせで得られたエネルギー分解能を、PMT(BA)について表5.4、5.5、PMT(SBA)について表5.6、5.7、PMT(UBA)について表5.8、5.9にまとめる。空欄はピークが確認できなかった、あるいは確認できても分解能を十分に分離されなかったことを表す。PMT(UBA)での高いエネルギーの測定ではPMTのサチュレーションにより1173keV以上のエネルギーではエネルギー較正ができず空欄にしている。エネルギーとエネルギー分解能の関係を図5.19に示す。

表 5.4: PMT(BA) を用いたときのエネルギー分解能（高いエネルギー）

放射線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)			
		NaI(Tl)	CsI(Tl)	GSO(Ce)	LaBr ₃ (Ce)
⁵⁷ Co	14.4	23.3 (1.24)	22.8 (1.63)		
¹⁰⁹ Cd	22.2	20.0 (0.24)	23.0 (0.24)	34.5 (1.90)	18.7 (0.34)
¹³³ Ba	31.0	21.3 (0.06)	20.8 (0.17)	34.8 (1.87)	16.7 (0.06)
¹³⁷ Cs	32.2	18.9 (0.20)	19.6 (0.16)	34.8 (1.94)	16.2 (0.36)
²⁴¹ Am	59.5	12.6 (0.13)	13.1 (0.23)	27.3 (0.27)	10.8 (0.14)
¹³³ Ba	81.0	12.9 (0.12)	13.9 (0.15)	19.9 (0.47)	9.3 (0.04)
¹⁰⁹ Cd	88.0	12.7 (0.40)	13.7 (0.30)	20.5 (0.70)	8.8 (0.28)
⁵⁷ Co	122	11.8 (0.22)	11.6 (0.14)	16.2 (0.27)	7.3 (0.06)
¹³³ Ba	276				4.8 (0.06)
¹³³ Ba	303				4.7 (0.03)
¹³³ Ba	356	9.9 (0.17)	8.6 (0.23)	8.9 (0.20)	4.4 (0.02)
²² Na	511	8.9 (0.09)	7.7 (0.02)	8.5 (0.05)	3.9 (0.01)
¹³⁷ Cs	662	7.9 (0.12)	6.9 (0.03)	8.0 (0.06)	3.2 (0.01)
⁶⁰ Co	1173	5.3 (0.14)	5.0 (0.05)	5.6 (0.09)	2.4 (0.01)
²² Na	1275	6.5 (0.07)	5.0 (0.03)	6.0 (0.10)	2.5 (0.01)
⁶⁰ Co	1333	6.0 (0.06)	4.9 (0.03)	5.5 (0.09)	2.3 (0.01)

括弧内の数値はフィッティングエラー

表 5.5: PMT(BA) を用いたときのエネルギー分解能（低いエネルギー）

放射線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)		
		CsI(Tl)	GSO(Ce)	LaBr ₃ (Ce)
⁵⁷ Co	14.4	25.2 (0.40)		22.8 (0.92)
¹⁰⁹ Cd	22.2	22.0 (0.16)	37.8 (0.62)	17.8 (0.17)
¹³³ Ba	31.0	19.9 (0.11)	34.2 (0.33)	16.1 (0.16)
²⁴¹ Am	59.5	13.3 (0.15)	23.9 (0.33)	11.1 (0.12)
¹³³ Ba	81.0	13.3 (0.13)	17.6 (0.24)	9.4 (0.07)
¹⁰⁹ Cd	88.0	13.3 (0.15)	17.7 (0.15)	9.2 (0.08)
⁵⁷ Co	122	11.3 (0.07)	15.4 (0.18)	7.5 (0.03)

括弧内の数値はフィッティングエラー

表 5.6: PMT(SBA) を用いたときのエネルギー分解能（高いエネルギー）

放射線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)		
		CsI(Tl)	GSO(Ce)	LaBr ₃ (Ce)
⁵⁷ Co	14.4	23.4 (1.31)		
¹⁰⁹ Cd	22.2	22.3 (0.34)	37.8 (2.11)	16.8 (0.19)
¹³³ Ba	31.0	23.9 (0.11)	34.5 (1.85)	14.8 (0.09)
¹³⁷ Cs	32.2	21.5 (0.21)	33.5 (1.80)	14.6 (0.41)
²⁴¹ Am	59.5	13.4 (0.14)	25.0 (0.44)	9.9 (0.06)
¹³³ Ba	81.0	13.4 (0.13)	17.6 (0.43)	8.3 (0.01)
¹⁰⁹ Cd	88.0			8.2 (0.17)
⁵⁷ Co	122	11.6 (0.28)	15.2 (0.36)	6.6 (0.04)
¹³³ Ba	276			4.4 (0.06)
¹³³ Ba	303			4.2 (0.03)
¹³³ Ba	356	9.3 (0.23)	8.5 (0.20)	3.9 (0.01)
²² Na	511	7.9 (0.02)	8.4 (0.02)	3.4 (0.01)
¹³⁷ Cs	662	7.1 (0.04)	7.4 (0.04)	2.9 (0.02)
⁶⁰ Co	1173	5.1 (0.05)	5.4 (0.08)	2.2 (0.02)
²² Na	1275	5.3 (0.03)	5.8 (0.08)	2.1 (0.02)
⁶⁰ Co	1333	5.2 (0.03)	5.6 (0.09)	2.1 (0.01)

括弧内の数値はフィッティングエラー

表 5.7: PMT(SBA) を用いたときのエネルギー分解能（低いエネルギー）

放射線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)	
		CsI(Tl)	LaBr ₃ (Ce)
⁵⁷ Co	14.4	27.9 (0.39)	
¹⁰⁹ Cd	22.2	22.4 (0.12)	16.6 (0.11)
¹³³ Ba	31.0	22.0 (0.06)	15.1 (0.14)
²⁴¹ Am	59.5	14.1 (0.08)	9.9 (0.03)
¹³³ Ba	81.0	13.7 (0.11)	8.3 (0.06)
¹⁰⁹ Cd	88.0	13.2 (0.11)	8.0 (0.07)
⁵⁷ Co	122	11.6 (0.06)	6.7 (0.02)

括弧内の数値はフィッティングエラー

表 5.8: PMT(UBA) を用いたときのエネルギー分解能（高いエネルギー）

放射線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)		
		CsI(Tl)	GSO(Ce)	LaBr ₃ (Ce)
⁵⁷ Co	14.4	29.7 (1.16)		
¹⁰⁹ Cd	22.2	25.4 (0.17)	40.0 (0.58)	18.6 (0.29)
¹³³ Ba	31.0	24.5 (0.16)	33.9 (0.56)	17.5 (0.09)
¹³⁷ Cs	32.2	23.1 (0.35)	34.5 (0.73)	18.6 (0.32)
²⁴¹ Am	59.5	15.6 (0.21)	27.1 (0.52)	11.5 (0.14)
¹³³ Ba	81.0	14.9 (0.21)	21.5 (0.49)	9.7 (0.05)
¹⁰⁹ Cd	88.0	15.3 (0.34)		9.9 (0.26)
⁵⁷ Co	122	13.6 (0.15)	16.3 (0.29)	7.8 (0.06)
¹³³ Ba	276			4.9 (0.06)
¹³³ Ba	303			4.7 (0.03)
¹³³ Ba	356	9.6 (0.27)	10.9 (0.30)	4.3 (0.03)
²² Na	511	8.6 (0.02)	9.1 (0.03)	3.7 (0.02)
¹³⁷ Cs	662	7.8 (0.04)	8.4 (0.04)	3.1 (0.02)
⁶⁰ Co	1173	5.5 (0.09)	6.1 (0.11)	
²² Na	1275	5.8 (0.04)	6.2 (0.04)	
⁶⁰ Co	1333	5.6 (0.05)	5.7 (0.09)	

括弧内の数値はフィッティングエラー

表 5.9: PMT(UBA) を用いたときのエネルギー分解能（低いエネルギー）

放射線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)	
		CsI(Tl)	LaBr ₃ (Ce)
⁵⁷ Co	14.4	31.2 (0.62)	
¹⁰⁹ Cd	22.2	26.6 (0.14)	18.6 (0.16)
¹³³ Ba	31.0	24.0 (0.29)	16.8 (0.17)
²⁴¹ Am	59.5	15.5 (0.16)	10.8 (0.12)
¹³³ Ba	81.0	14.6 (0.15)	9.4 (0.06)
¹⁰⁹ Cd	88.0	15.2 (0.16)	8.9 (0.06)
⁵⁷ Co	122	12.7 (0.12)	7.3 (0.03)

括弧内の数値はフィッティングエラー

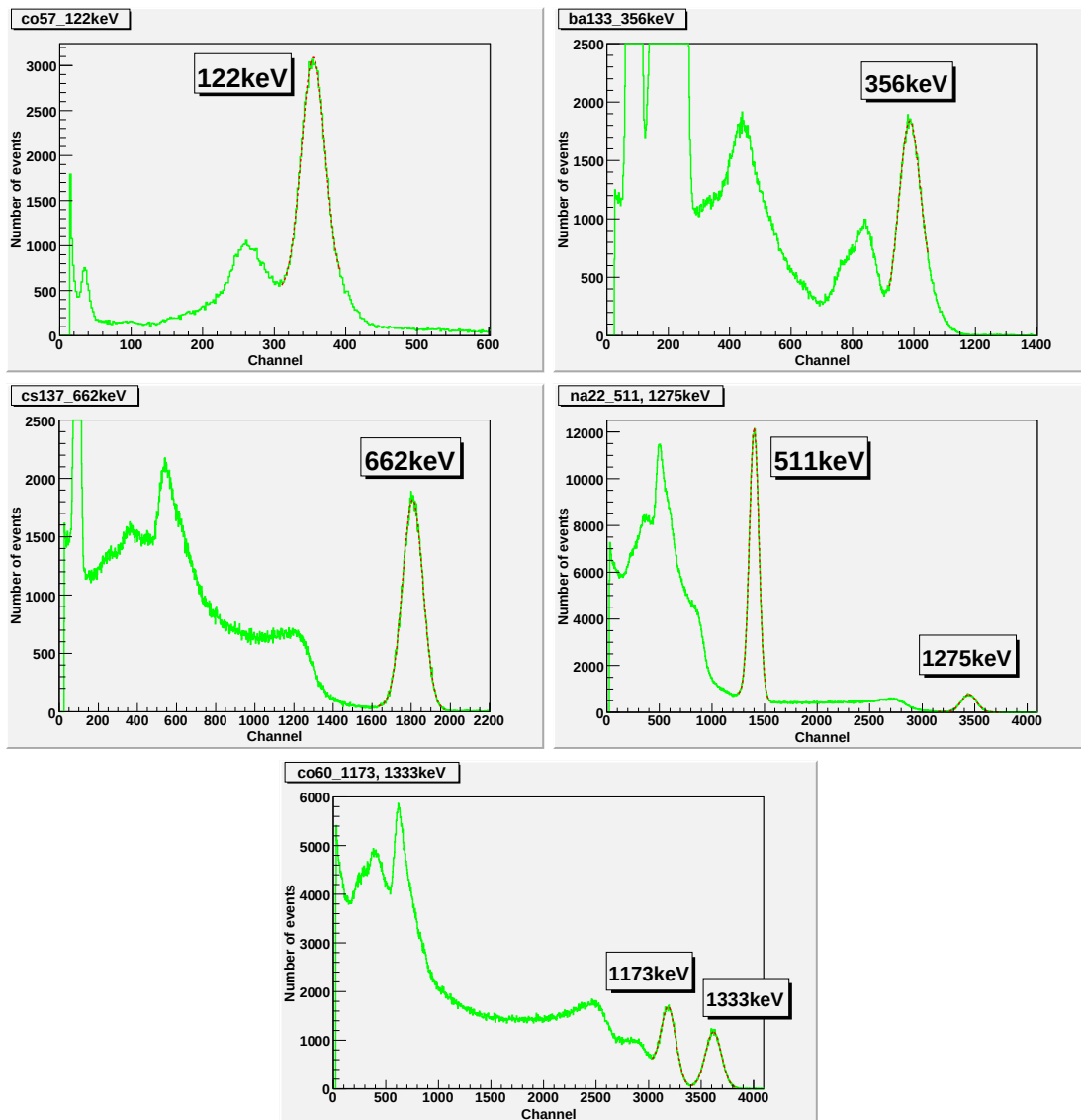


図 5.7: CsI(Tl)+PMT(BA) で測定した各 γ 線のスペクトル図 (高いエネルギー)

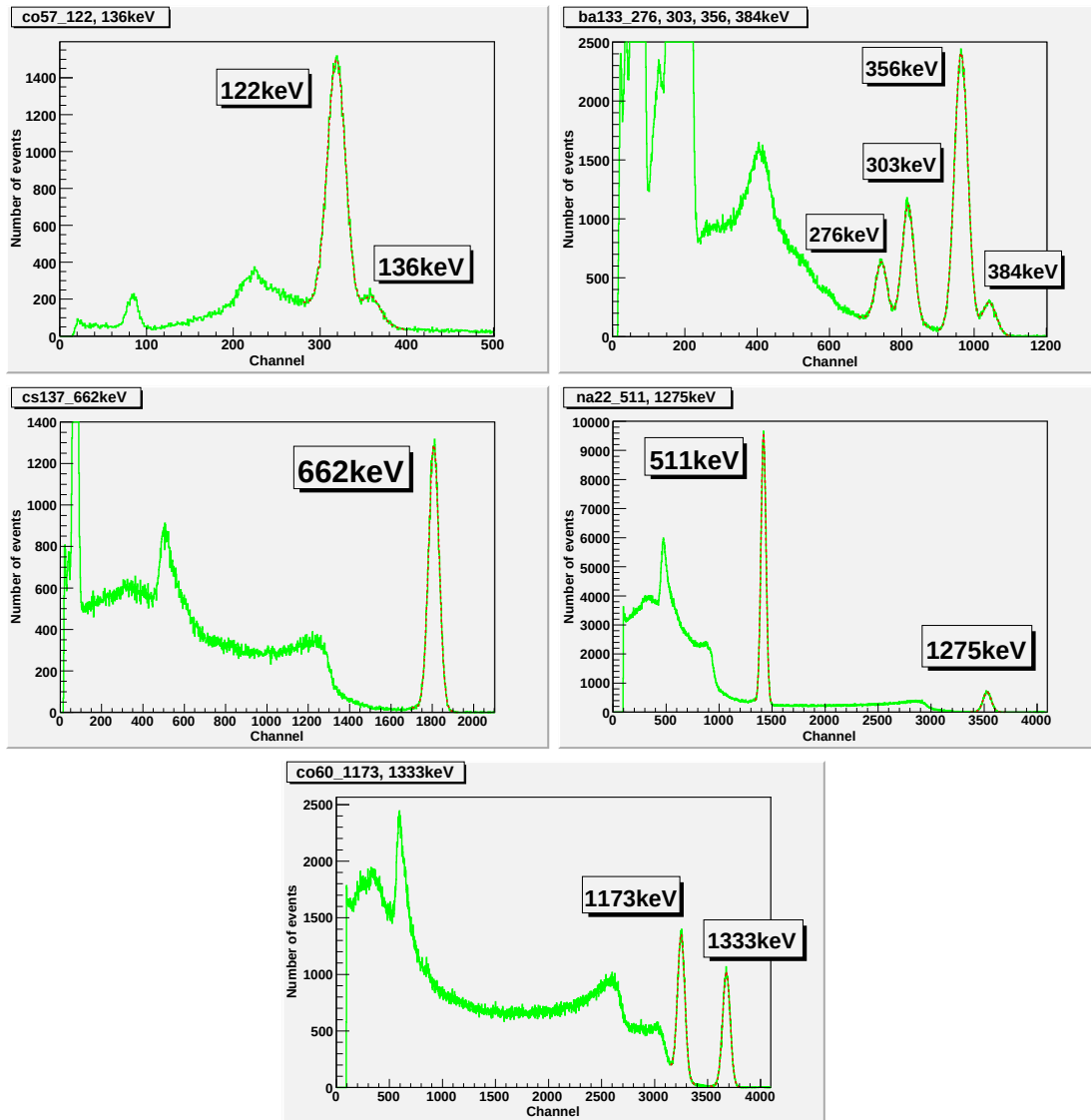


図 5.8: $\text{LaBr}_3(\text{Tl}) + \text{PMT}(\text{BA})$ で測定した各 γ 線のスペクトル図 (高いエネルギー)

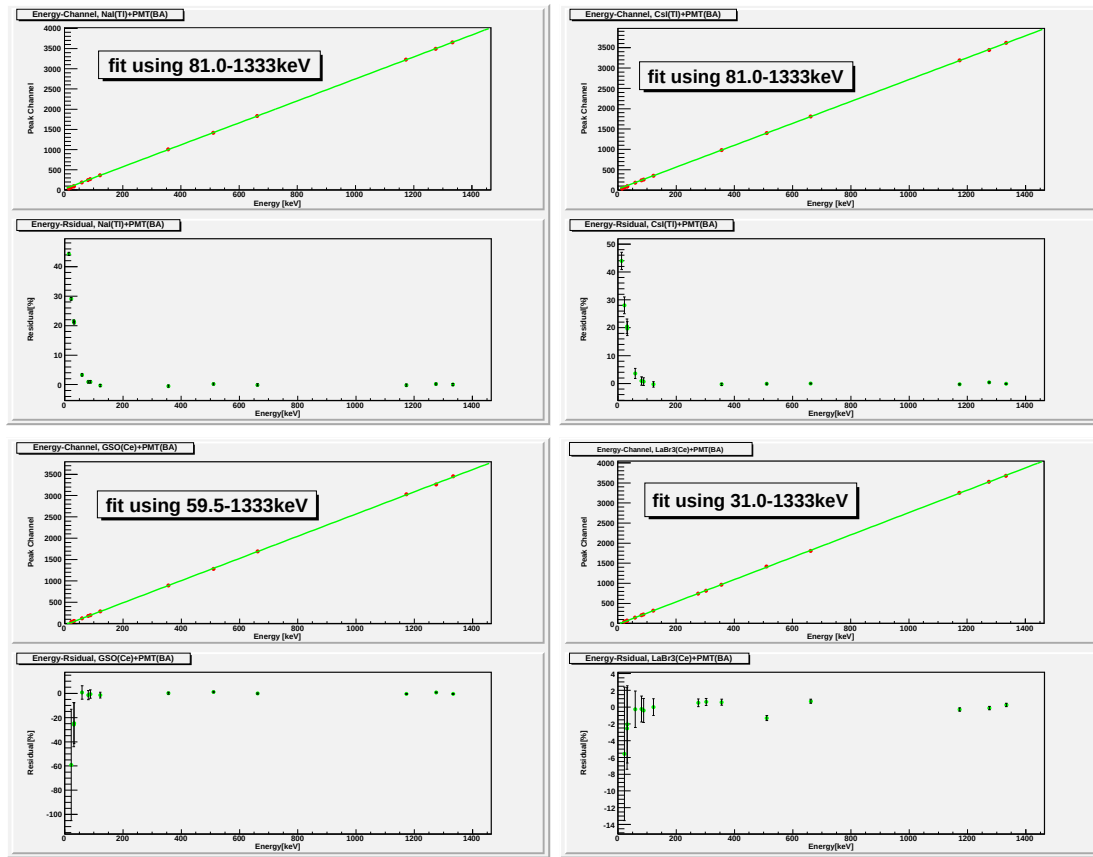


図 5.9: PMT(BA) で測定した γ 線のエネルギー較正 (高いエネルギー)

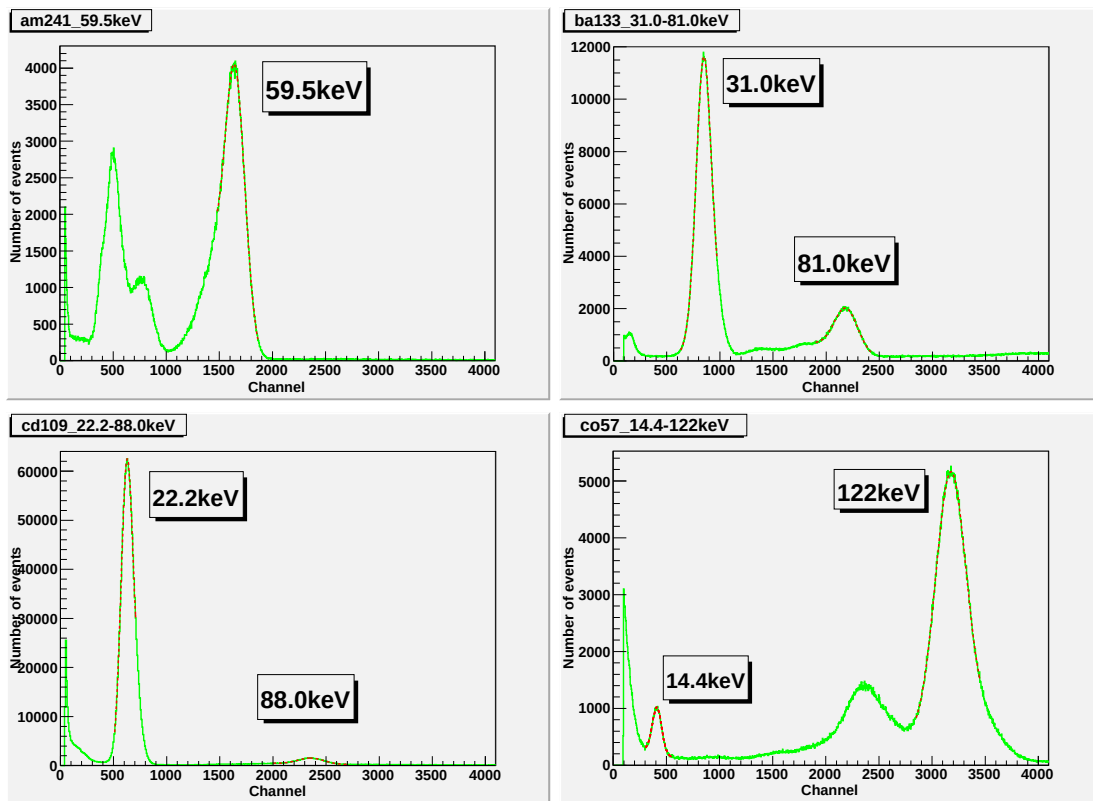


図 5.10: CsI(Tl)+PMT(BA) で測定した各 γ 線のスペクトル図 (低いエネルギー)

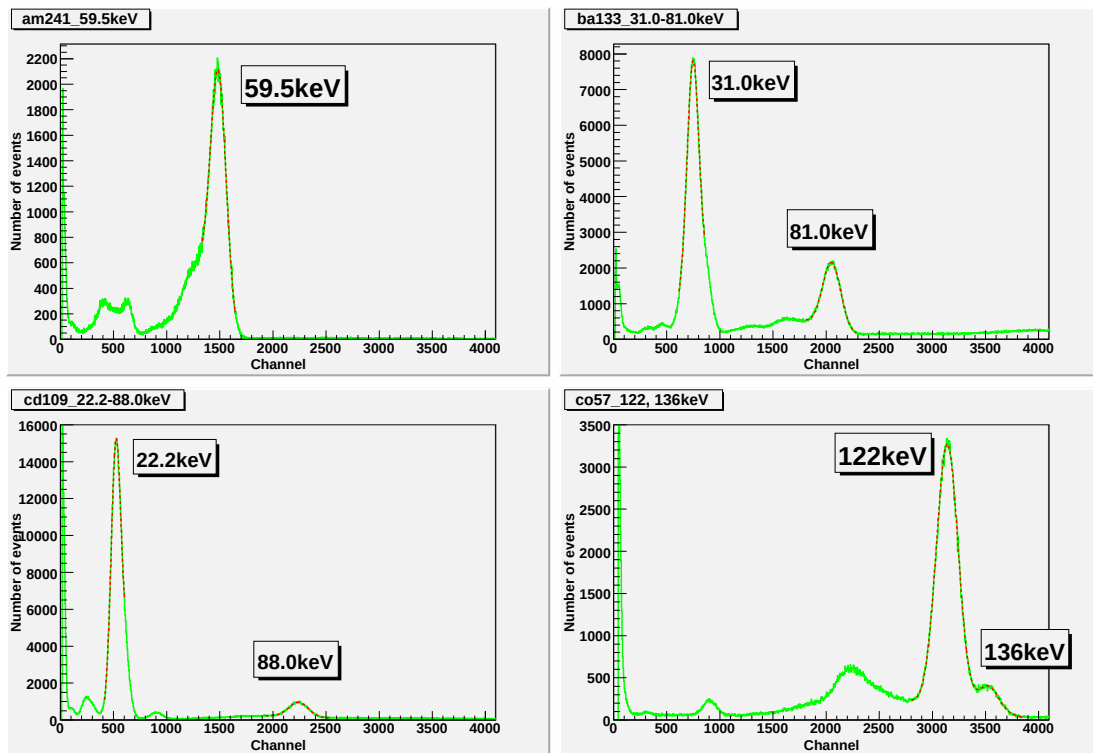


図 5.11: $\text{LaBr}_3 + \text{PMT(BA)}$ で測定した各 γ 線のスペクトル図 (低いエネルギー)

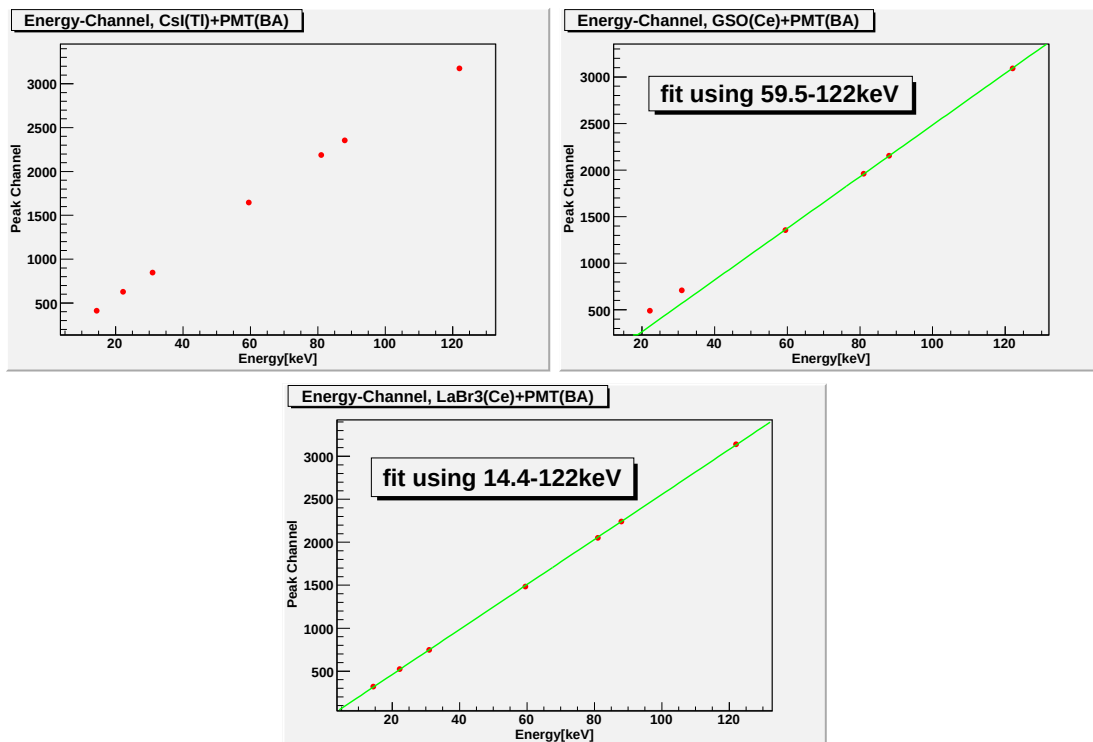


図 5.12: PMT(BA) で測定した γ 線のエネルギー較正 (低いエネルギー)

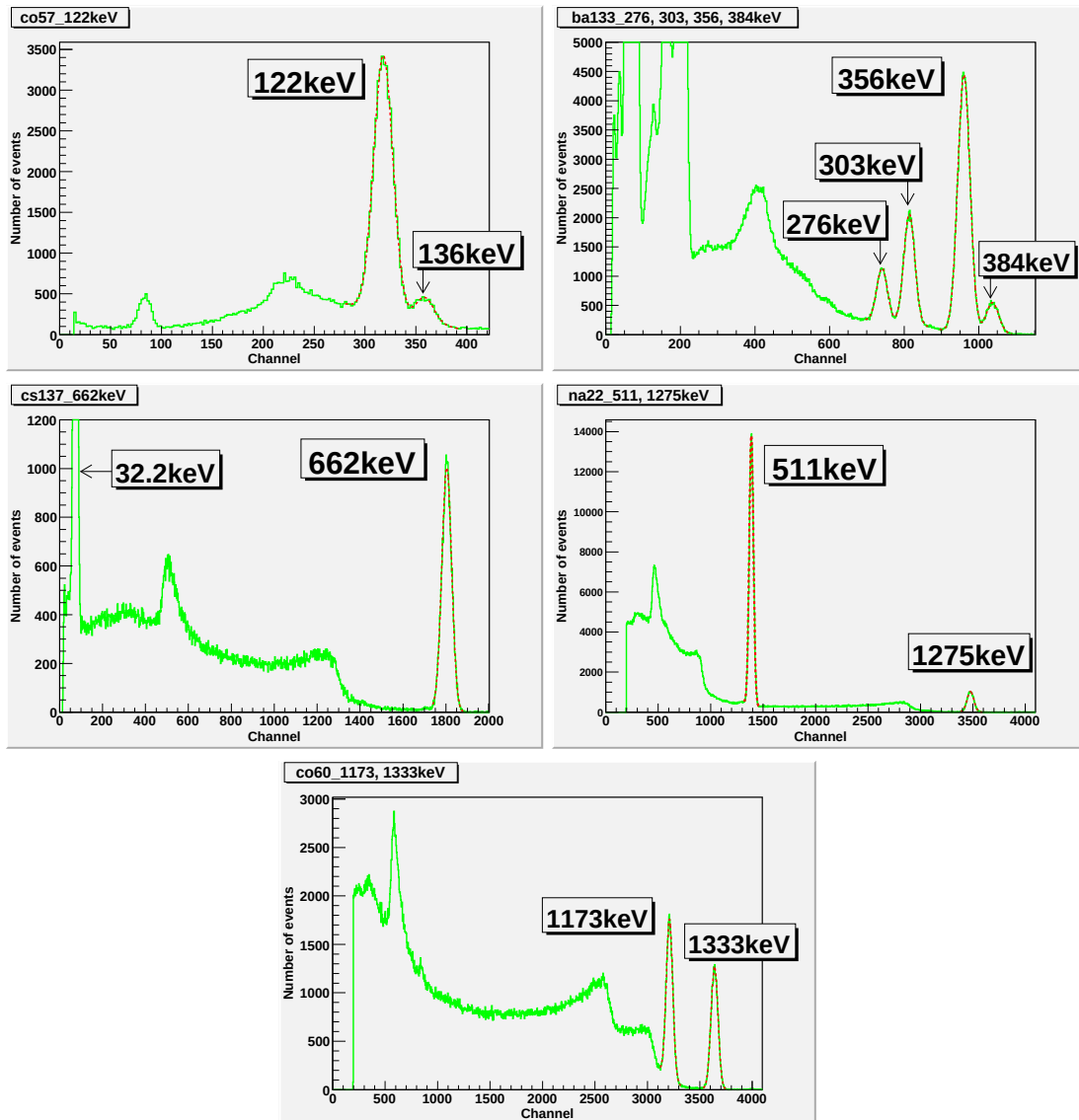


図 5.13: $\text{LaBr}_3(\text{Ce}) + \text{PMT}(\text{SBA})$ で測定した各 γ 線のスペクトル図 (高いエネルギー)

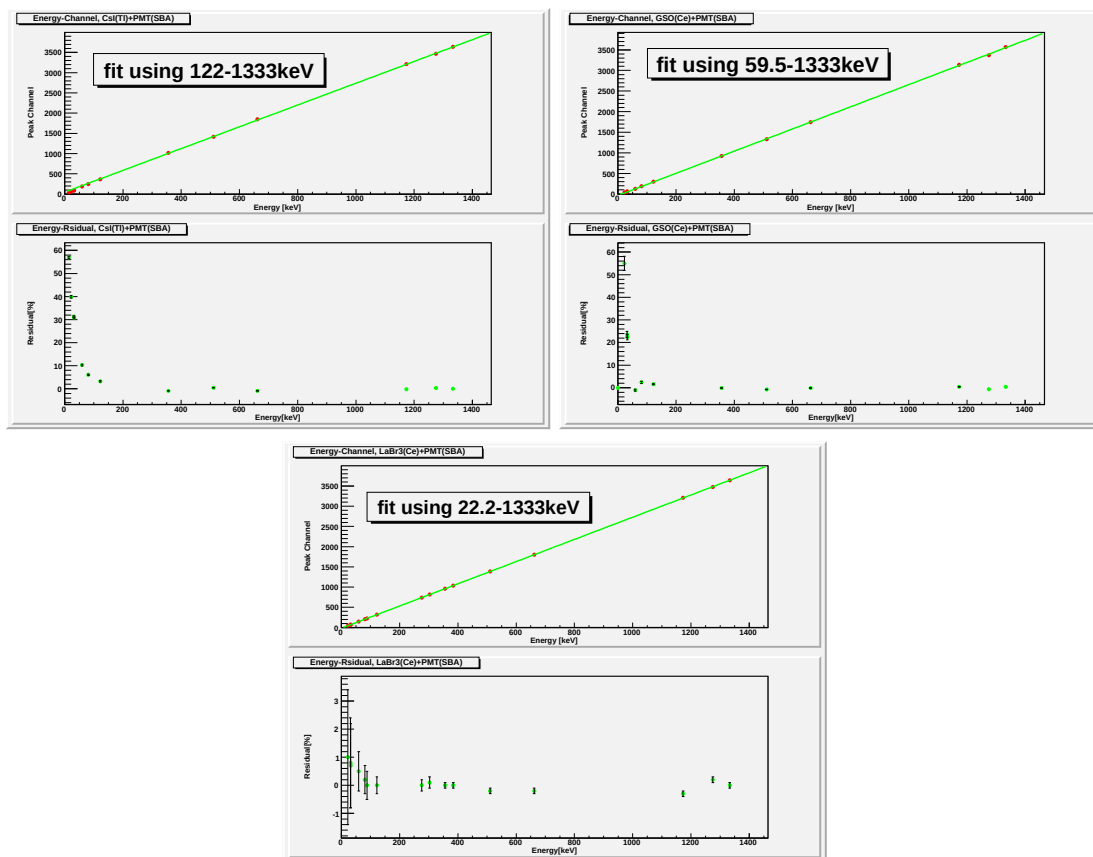


図 5.14: PMT(SBA) で測定した γ 線のエネルギー較正 (高いエネルギー)

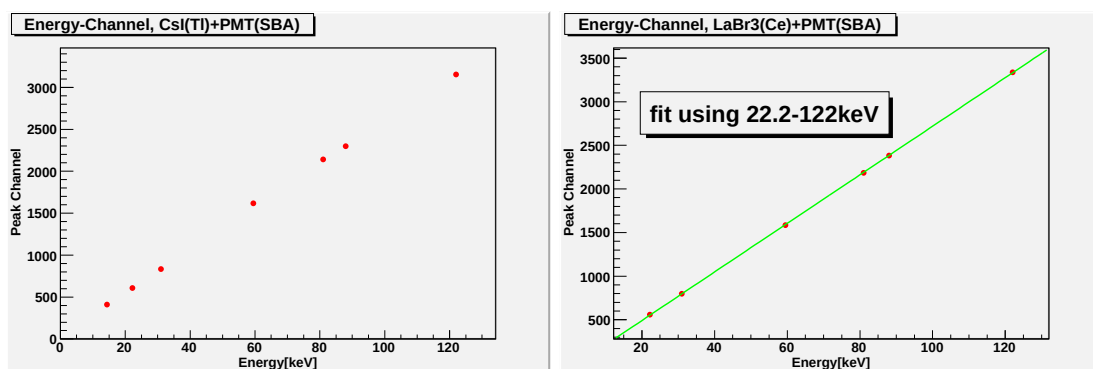


図 5.15: PMT(SBA) で測定した γ 線のエネルギー較正 (低いエネルギー)

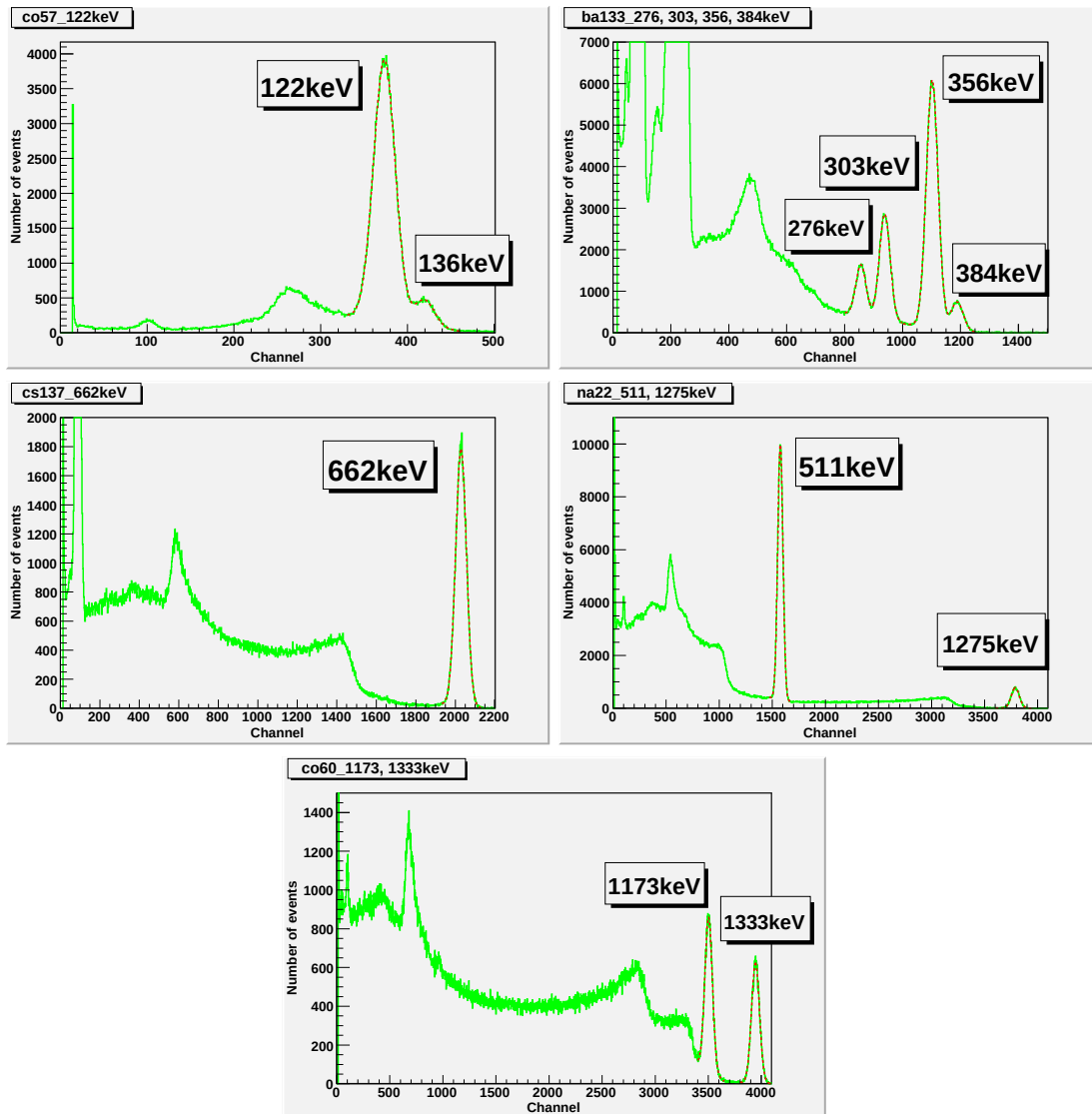


図 5.16: $\text{LaBr}_3(\text{Ce})+\text{PMT}(\text{UBA})$ で測定した各 γ 線のスペクトル図 (高いエネルギー)

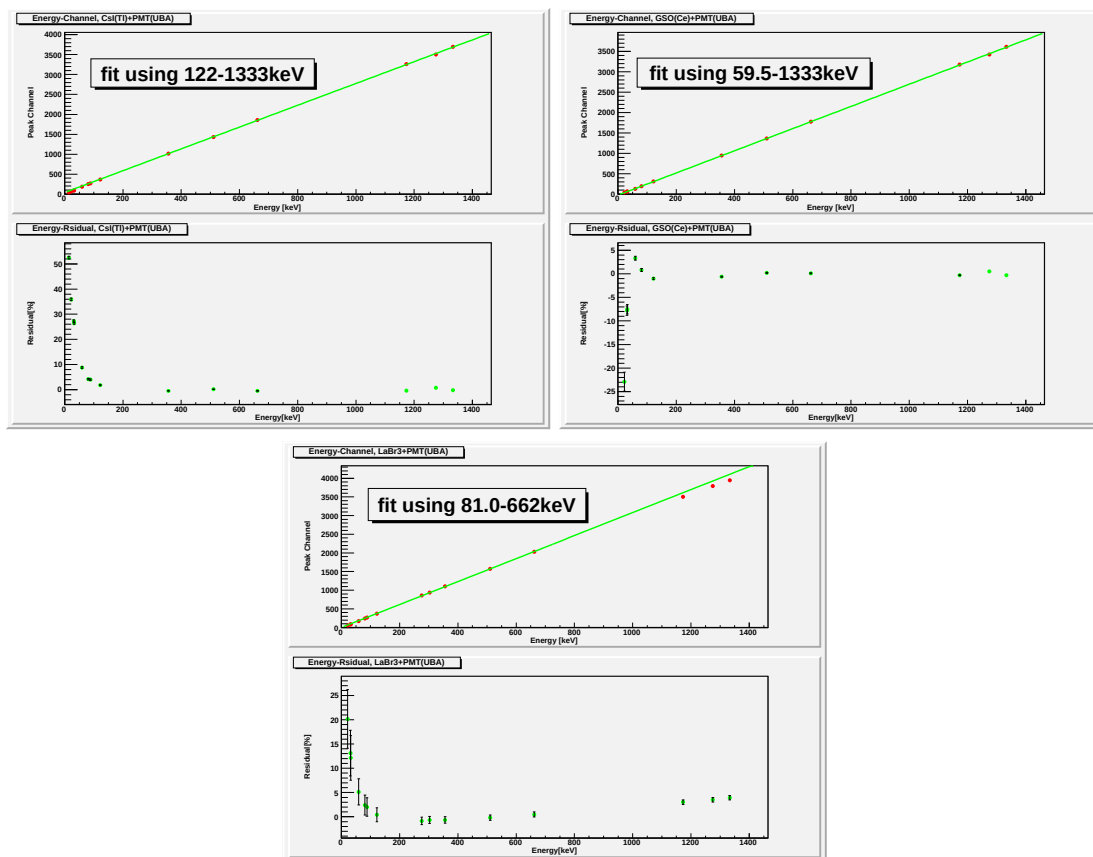


図 5.17: PMT(UBA) で測定した γ 線のエネルギー較正 (高いエネルギー)

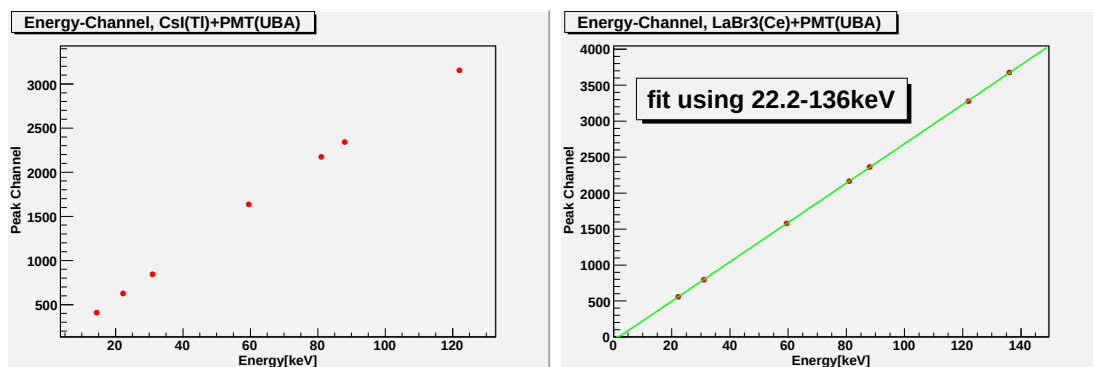


図 5.18: PMT(UBA) で測定した γ 線のエネルギー較正 (低いエネルギー)

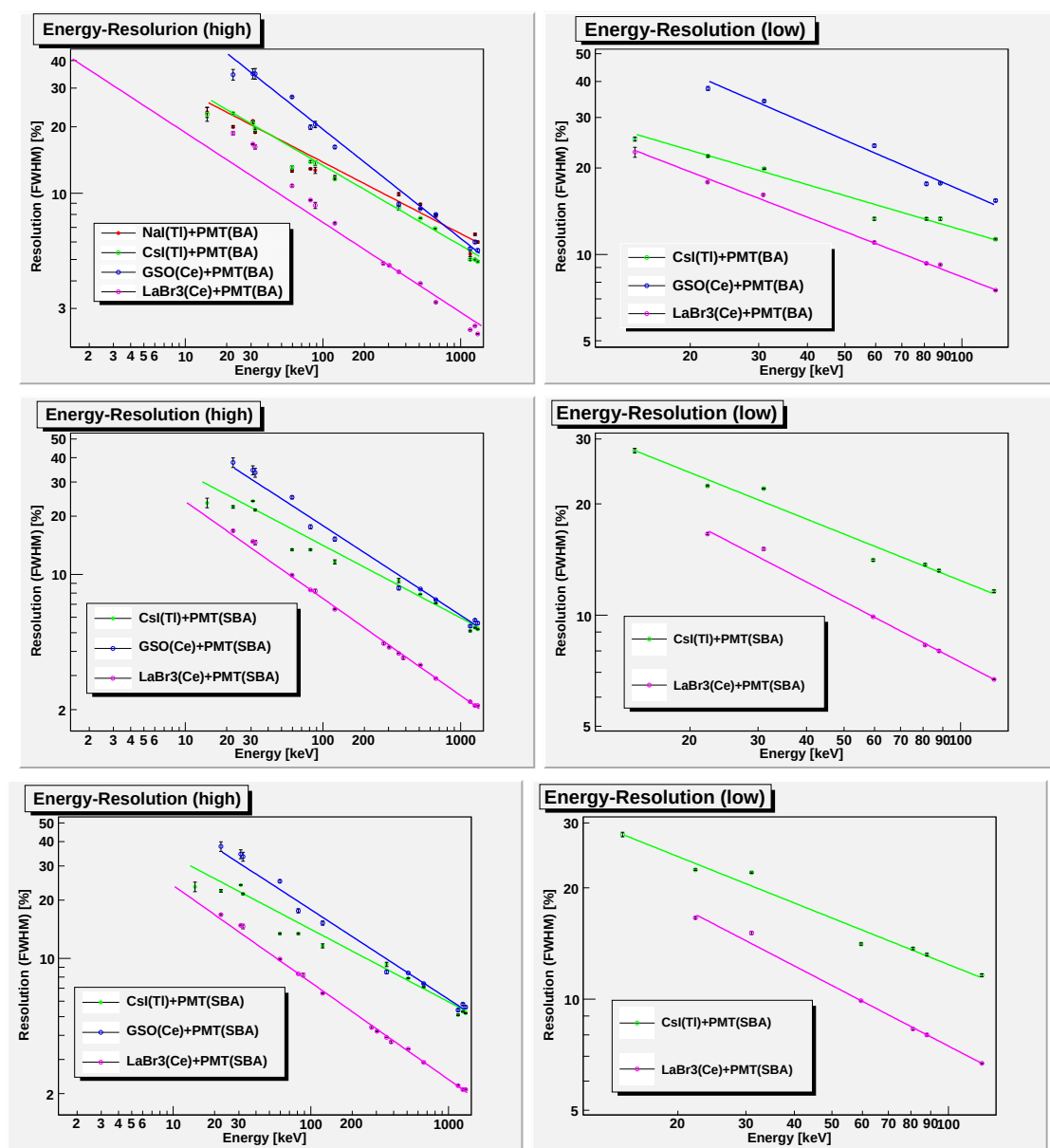


図 5.19: エネルギーとエネルギー分解能の関係

5.2.3 まとめと考察

エネルギー分解能

PMT(BA) を用いたときのエネルギー分解能はNaI(Tl)7.9%、CsI(Tl)6.9%、GSO(Ce)8.0%、LaBr₃(Ce)3.2%で、LaBr₃(Ce) のエネルギー分解能のよさが際立っている。LaBr₃(Ce) では、ほかのシンチレータでは分離できなかった ¹³³Ba の 276keV、303keV、356keV、384keV の 4 つのピークがすべて分離されていた。

エネルギーとエネルギー分解能の関係

5.19 の直線は、エネルギーとエネルギー分解能の関係をエネルギーのべき関数でフィットしたものである。フィット結果は下表 5.10、5.11 のようになる。高いエネルギーについては 662keV での分解能に着目して表示している。

表 5.10: エネルギーとエネルギー分解能の関係（高いエネルギー）

PMT	シンチ レータ	フィット関数
BA	NaI(Tl)	$\text{Res.}[\%] = 7.9 \times (E/662[\text{keV}])^{-0.32 \pm 0.002}$
	CsI(Tl)	$\text{Res.}[\%] = 6.9 \times (E/662[\text{keV}])^{-0.36 \pm 0.001}$
	GSO(Ce)	$\text{Res.}[\%] = 8.0 \times (E/662[\text{keV}])^{-0.49 \pm 0.003}$
	LaBr ₃ (Ce)	$\text{Res.}[\%] = 3.2 \times (E/662[\text{keV}])^{-0.41 \pm 0.001}$
SBA	CsI(Tl)	$\text{Res.}[\%] = 7.1 \times (E/662[\text{keV}])^{-0.37 \pm 0.001}$
	GSO(Ce)	$\text{Res.}[\%] = 7.4 \times (E/662[\text{keV}])^{-0.46 \pm 0.005}$
	LaBr ₃ (Ce)	$\text{Res.}[\%] = 2.9 \times (E/662[\text{keV}])^{-0.50 \pm 0.001}$
UBA	CsI(Tl)	$\text{Res.}[\%] = 7.8 \times (E/662[\text{keV}])^{-0.36 \pm 0.001}$
	GSO(Ce)	$\text{Res.}[\%] = 8.4 \times (E/662[\text{keV}])^{-0.46 \pm 0.003}$
	LaBr ₃ (Ce)	$\text{Res.}[\%] = 3.1 \times (E/662[\text{keV}])^{-0.55 \pm 0.002}$

表 5.11: エネルギーとエネルギー分解能の関係（低いエネルギー）

PMT	シンチ レータ	エネルギーとエネルギー分解能の関係式
BA	CsI(Tl)	$\text{Res.}[\%] = (75.7 \pm 1.3) \times (E[\text{keV}])^{-0.40 \pm 0.004}$
	GSO(Ce)	$\text{Res.}[\%] = (246.5 \pm 8.5) \times (E[\text{keV}])^{-0.59 \pm 0.008}$
	LaBr ₃ (Ce)	$\text{Res.}[\%] = (92.8 \pm 1.8) \times (E[\text{keV}])^{-0.52 \pm 0.004}$
SBA	CsI(Tl)	$\text{Res.}[\%] = (85.2 \pm 1.2) \times (E[\text{keV}])^{-0.42 \pm 0.004}$
	LaBr ₃ (Ce)	$\text{Res.}[\%] = (91.8 \pm 1.4) \times (E[\text{keV}])^{-0.55 \pm 0.004}$
UBA	CsI(Tl)	$\text{Res.}[\%] = (104.9 \pm 2.0) \times (E[\text{keV}])^{-0.44 \pm 0.005}$
	LaBr ₃ (Ce)	$\text{Res.}[\%] = (110.1 \pm 2.3) \times (E[\text{keV}])^{-0.56 \pm 0.005}$

NaI(Tl) と CsI(Tl) は-0.5 乗からやや外れている。光量の大きい LaBr₃(Ce) は、PMT(BA) の高いエネルギーの場合を除き-0.5 乗に近い。

3 種類の PMT でのエネルギー分解能の比較

シンチレータが同じである場合の 3 種類の PMT (BA、SBA、UBA) を用いたときのエネルギー分解能の比較をシンチレータが CsI(Tl) と LaBr₃(Ce) について行った。122keV、356keV、662keV の γ 線についてのそれぞれのエネルギー分解能を下表 5.12 に示す。また、エネルギースペクトルの横軸をエネルギーに換算し重ね書きして比較したものを BA と SBA について下図 5.20 に示す。

シンチレータ	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)		
		BA	SBA	UBA
CsI(Tl)	122	11.6 (0.14)	11.6 (0.28)	13.6 (0.15)
	356	8.6 (0.23)	9.3 (0.23)	9.6 (0.27)
	662	6.9 (0.03)	7.1 (0.04)	7.8 (0.04)
LaBr ₃ (Ce)	122	7.3 (0.06)	6.6 (0.04)	7.8 (0.06)
	356	4.4 (0.02)	3.9 (0.01)	4.3 (0.03)
	662	3.2 (0.01)	2.9 (0.02)	3.1 (0.02)

括弧内の数値はフィッティングエラー

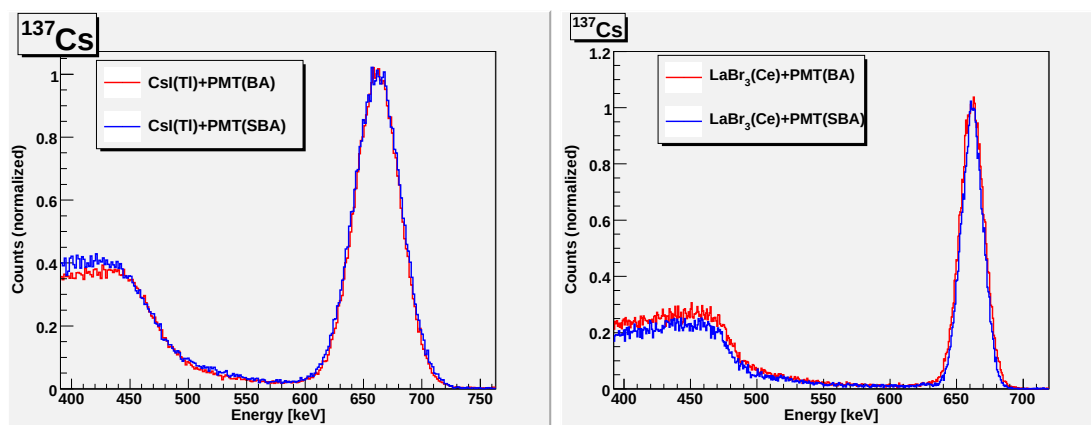


図 5.20: PMT(BA) と PMT(SBA) のエネルギー分解能の比較。(左) CsI(Tl)、(右) LaBr₃(Ce)

CsI(Tl) の発光が最大となる波長は 565nm であり、この波長での BA、SBA、UBA の量子効率はそれぞれ 6%、7%、8%である。実験では 662keV でのエネルギー分解能は 6.9%、7.1%、7.8%という結果であった。UBA については型番が違うのでエネルギー分解能は単純に量子効率のみで比較はできないがとりあえず量子効率で比較すると SBA,UBA のエネルギー分解能はそれぞれ BA の $\sqrt{6/7} = 0.9$ 倍、 $\sqrt{6/8} = 0.85$ 倍となり (式 (4.6)、17 ページ)、 $6.9\% \times 0.9 = 6.2\%$ 、 $6.9\% \times 0.85 = 5.9\%$ となるはずである。しかし実際のエネルギー分解能は、SBA は BA と変わらず、UBA では BA よりも悪くなった。

LaBr₃(Ce) の発光が最大となる波長は 380nm であり、この波長での BA、SBA、UBA の量子効率はそれぞれ 25%、35%、45%程度である。実験では 662keV でのエネルギー分解能は 3.2%、2.9%、3.1%という

結果であった。量子効率で比較すると、SBA、UBA のエネルギー分解能はそれぞれ BA の $\sqrt{25/35} = 0.85$ 倍、 $\sqrt{25/45} = 0.75$ 倍となり、 $3.2 \times 0.85 = 2.7\%$ 、 $3.2 \times 0.75 = 2.4\%$ となるはずである。実際は SBA では計算に近かったが、UBA は計算とは異なる結果になった。

CsI(Tl)、LaBr₃(Ce) とともにエネルギー分解能が量子効率によらなかった原因としては、PMT の増幅率の違いや、その他の統計によらない成分が考えられる。

5.3 アバランシェフォトダイオード (APD) とシンチレータを用いた γ 線測定

5.3.1 APD のセットアップ

APD とシンチレータの組み合わせで γ 線を測定するときのセットアップを図 5.21 に示す。また、APD とシンチレータの接着の様子を図 5.22 に示す

まず、線源から γ 線が入射して発生したシンチレーション光が APD (浜松ホトニクス、S8664-1010) に入射し、APD に電流が流れる。その信号はプリアンプ (クリアパルス、581 型 (改造) 電荷増幅器) により増幅された後、整形増幅器 (ORTEC 571) で波形整形される。その最終的なパルスのピークを MCA (ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション、MCA600) で読み取る。セットアップ図には示されていないが、実際には高圧電源からのケーブルはプリアンプにつながっており、それを通して APD にバイアスがかけられる仕組みになっている。また、APD を含む装置の一部をステンレスの箱で覆うことで静電遮蔽した。

高圧電源は 400V に設定した。整形増幅器の時定数は $2\mu\text{s}$ に設定した。

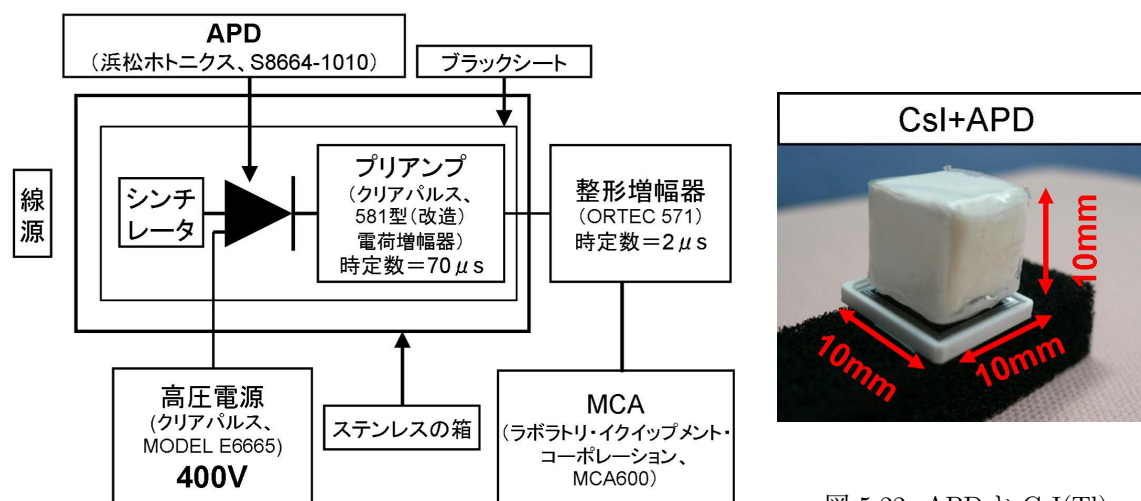


図 5.22: APD と CsI(Tl)

図 5.21: APD を用いた測定のセットアップ

5.3.2 APD とシンチレータの組み合わせによる γ 線測定

APD と組み合わせるシンチレータは NaI(Tl)、CsI(Tl)、GSO(Ce)、LaBr₃(Ce) である。5.0.1 節の方針に従って、整形増幅器のゲインはそれぞれ 8、3.85、14.8、5 に設定して測定した。また、いずれのシンチレータを用いた測定においても気温は 20.0 ± 1 °C であった。 γ 線源としては、²²Na、⁵⁷Co、⁶⁰Co、¹⁰⁹Cd、¹³³Ba、¹³⁷Cs、²⁴¹Am の 7 種類を用いた。

特に、CsI(Tl)、LaBr₃(Ce) を用いたときのスペクトルを図 5.23、5.24 に示す（赤の破線はガウス関数によるフィット結果）。また、エネルギー較正の様子をすべてのシンチレータに関して図 5.25 に示す。

各シンチレータを用いたときに得られたエネルギー分解能を下表 5.13 にまとめる。空欄は、ノイズのためピークが確認できなかったこと、あるいは確認できても分解能を求められるほどはっきりと分離されなかったことを表す。

エネルギーとエネルギー分解能の関係を図 5.26 に示す。

表 5.13: APD を用いたときのエネルギー分解能

γ 線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)			
		NaI(Tl)	CsI(Tl)	GSO(Ce)	LaBr ₃ (Ce)
¹⁰⁹ Cd	22.2		46.8 (0.23)		
¹³³ Ba	31.0		33.6 (0.23)		37.5 (0.35)
²⁴¹ Am	59.5	34.4 (0.25)	17.5 (0.39)		27.4 (0.35)
¹³³ Ba	81.0	26.1 (0.25)	14.9 (0.21)		18.6 (0.17)
¹⁰⁹ Cd	88.0	25.4 (0.19)	14.3 (0.17)		17.3 (0.19)
⁵⁷ Co	122	22.6 (0.41)	12.6 (0.24)	33.4 (0.63)	13.4 (0.18)
¹³³ Ba	276				6.9 (0.15)
	303				6.5 (0.06)
	356	10.8 (0.18)	7.9 (0.45)	16.1 (0.12)	5.9 (0.03)
²² Na	511	10.1 (0.03)	7.4 (0.02)	11.7 (0.03)	4.8 (0.01)
¹³⁷ Cs	662	8.6 (0.09)	6.4 (0.04)	10.0 (0.04)	4.0 (0.02)
⁶⁰ Co	1173	5.4 (0.13)	4.7 (0.05)	6.3 (0.09)	2.9 (0.02)
²² Na	1275	6.1 (0.08)	4.9 (0.02)	6.7 (0.05)	2.9 (0.02)
⁶⁰ Co	1333	6.0 (0.07)	4.8 (0.02)	6.0 (0.07)	2.7 (0.02)

括弧内の数値はフィッティングエラー、気温はいずれも 20.0 ± 1 °C

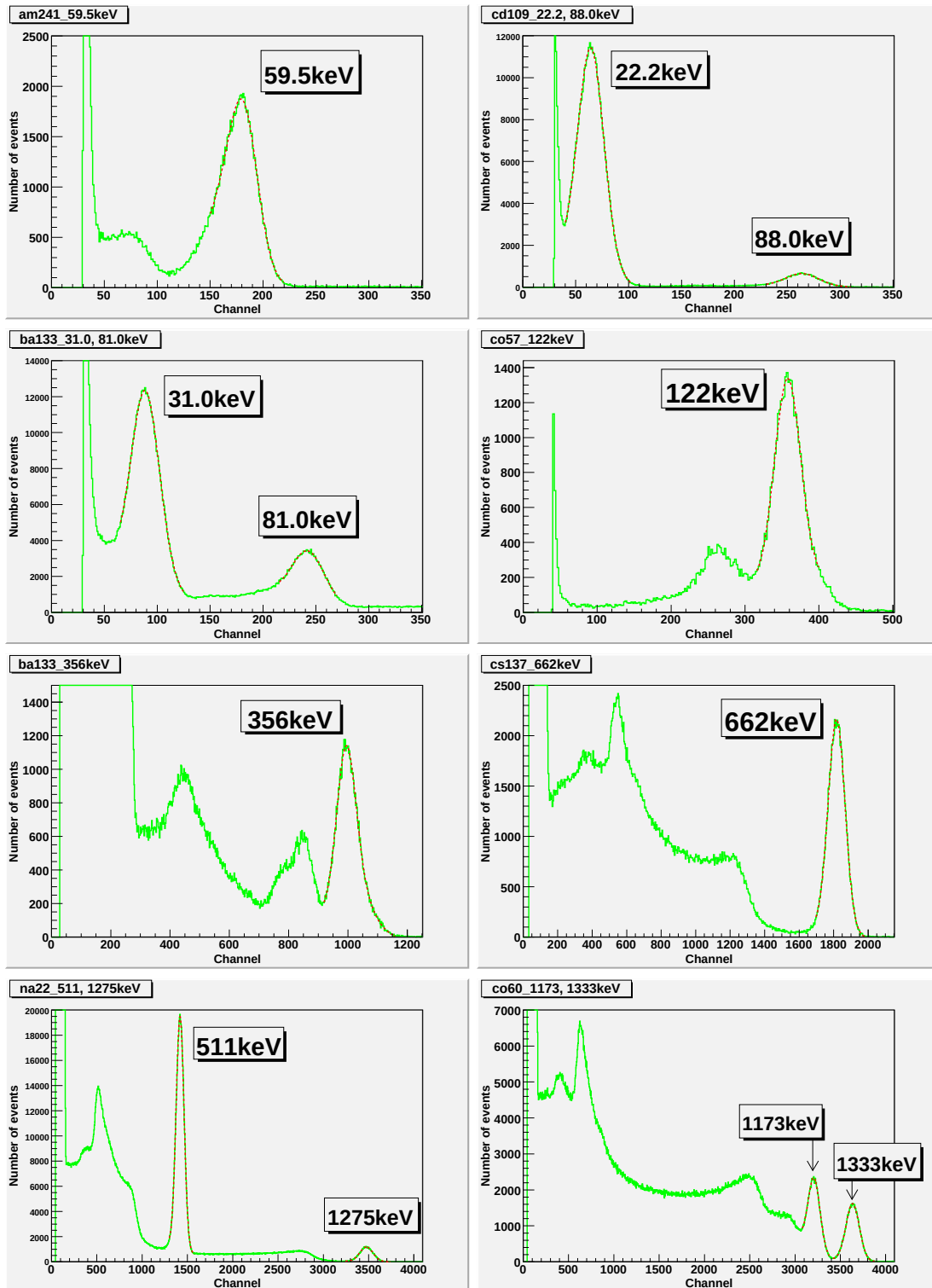


図 5.23: CsI(Tl)+APD で測定した各 γ 線のスペクトル図

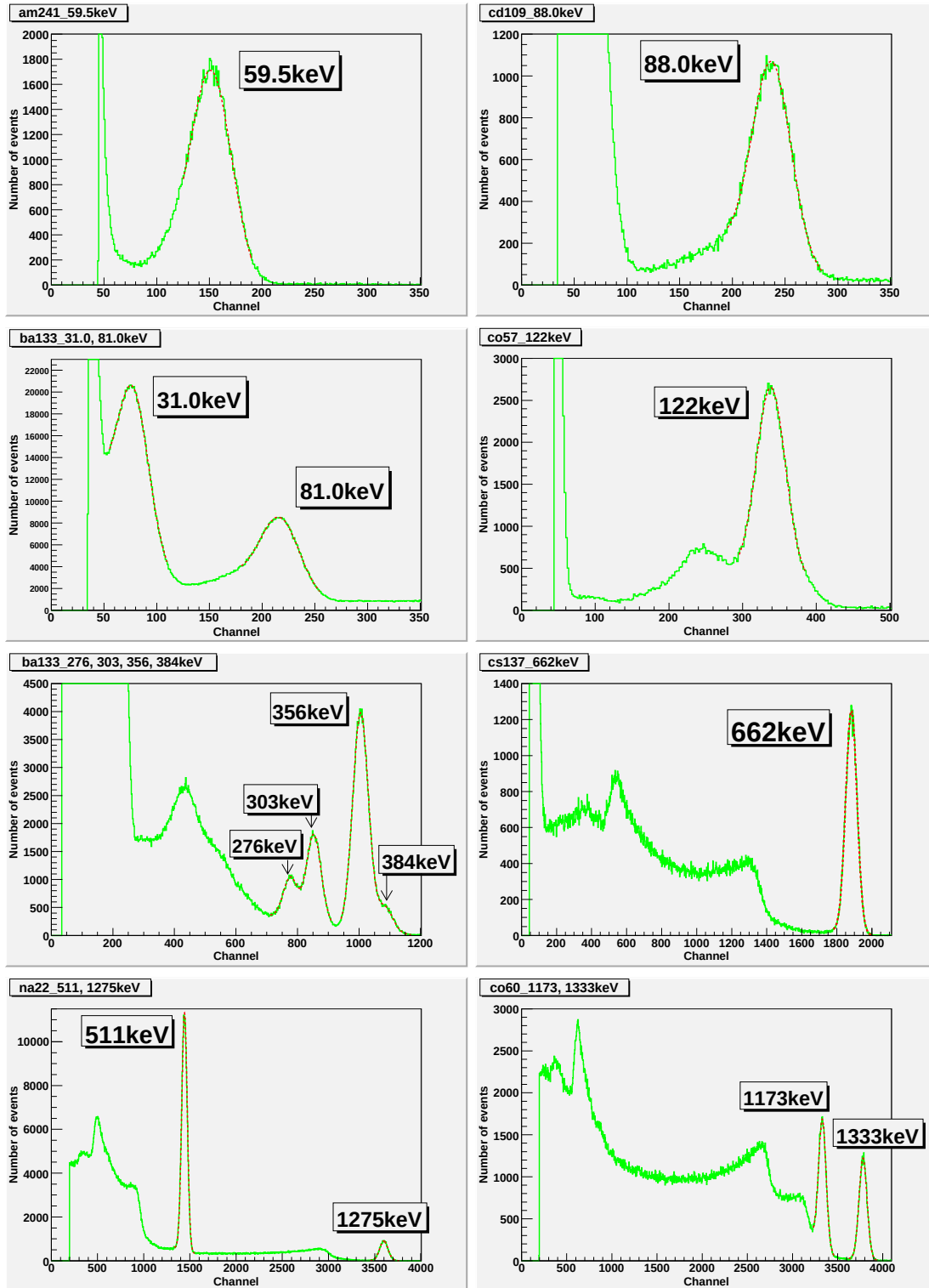


図 5.24: $\text{LaBr}_3(\text{Ce}) + \text{APD}$ で測定した各 γ 線のスペクトル図

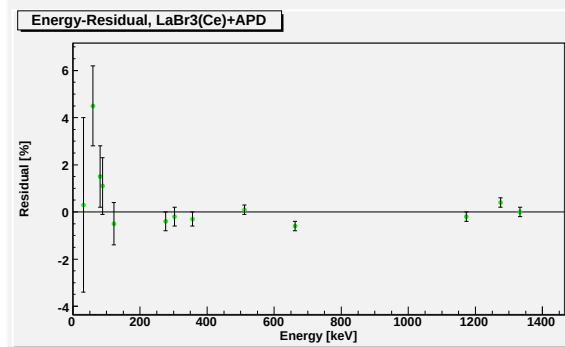
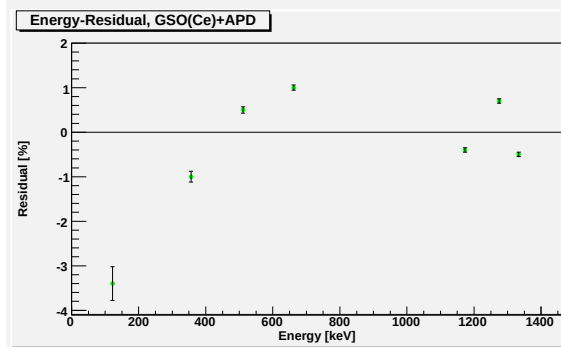
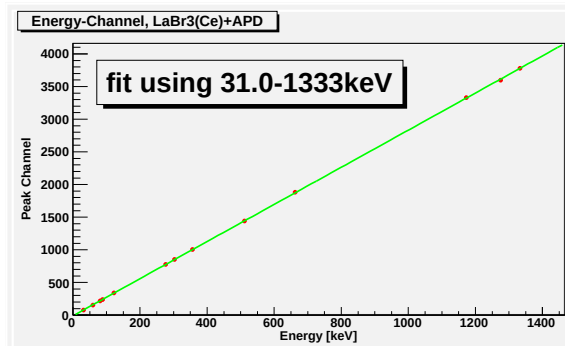
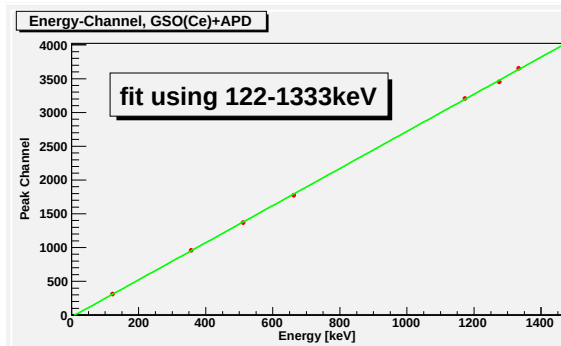
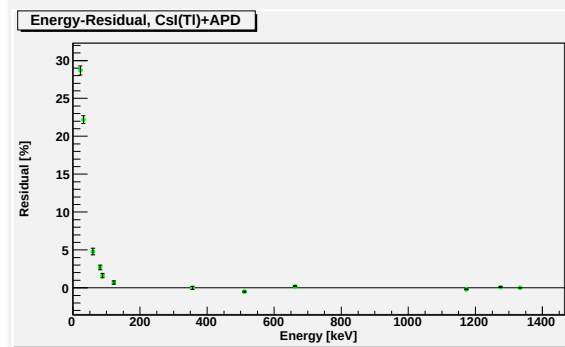
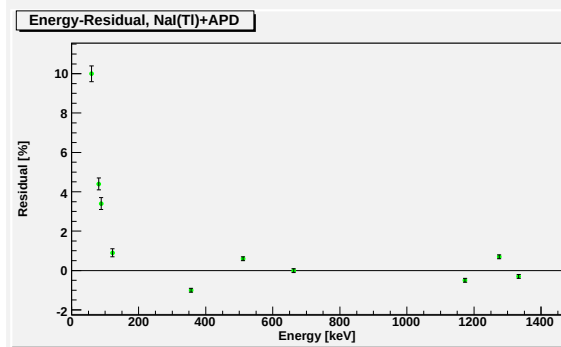
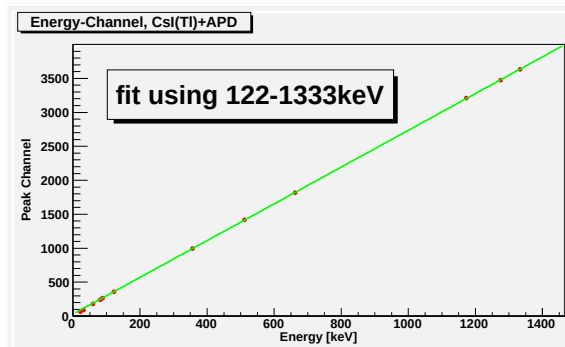
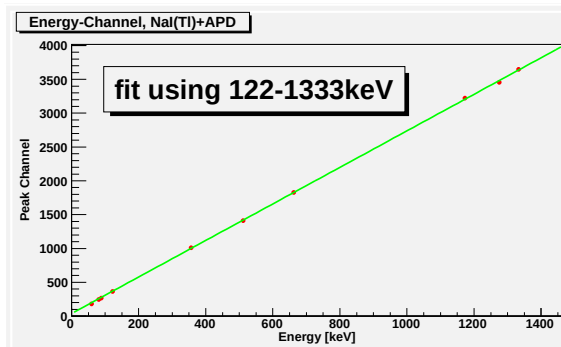


図 5.25: APD で測定した γ 線のエネルギー較正

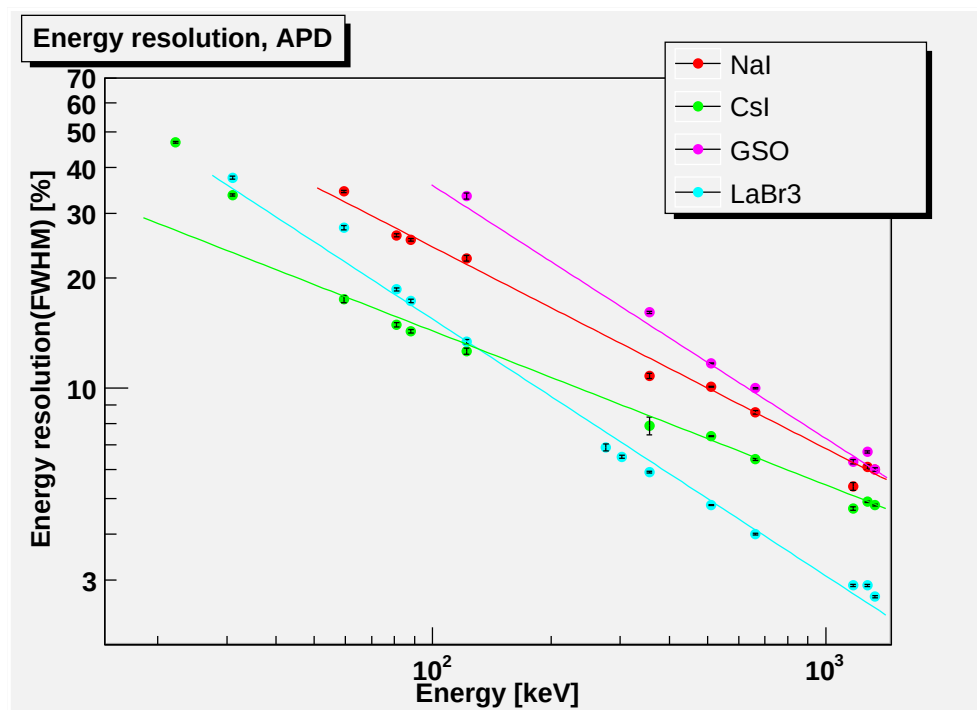


図 5.26: APD と各シンチレータで測定した γ 線のエネルギー分解能

5.3.3 まとめと考察

エネルギー較正

図 5.25 を見ればわかるように、NaI(Tl)、CsI(Tl) の場合は 122keV 以上では入射 γ 線と光量の線型性が成立している。しかし、それよりも低エネルギー側では線型性から次第に外れていく。また、それぞれ低エネルギー側では 59.5keV、22.2keV まで測定できた。GSO(Ce) も 122keV 以上で線型性が成立していると言えるが、それ以下のエネルギーではノイズが大きくて測定できなかった。LaBr₃(Ce) では 31.0keV から 1333keV まで測定できたが、全範囲で良い線型性が保たれている (59.5keV のみ若干外れている)。

エネルギー分解能

662keV におけるエネルギー分解能は NaI、CsI、GSO、LaBr₃ の順に 8.6%、6.4%、10.0%、4.0% となり、全体的にも LaBr₃(Ce) の分解能がよい (表 5.13)。図 5.23、5.24 を比較すると、特に ¹³³Ba のスペクトルの違いが印象的で、356keV 付近の 4 つのピークが存在が確認できる。しかし、光電子増倍管を用いたときと異なり、356keV と 384keV のピークは分離されていない。また、⁵⁷Co の 136keV もその存在を確認することは出来なかった。ただし、低エネルギー側 (122keV 以下) では CsI(Tl) のほうが優れていて、LaBr₃(Ce) の場合よりも低いエネルギーが観測された。

エネルギーとエネルギー分解能の関係

図 5.26 の直線は、エネルギーと分解能の関係をエネルギーのべき関数でフィットしたもので、662keV におけるエネルギー分解能に着目すれば、

$$\text{エネルギー分解能 (\% FWHM)} = \begin{cases} 8.6 \times \left(\frac{E}{662\text{keV}} \right)^{-0.55 \pm 0.002} & (\text{NaI}) \\ 6.4 \times \left(\frac{E}{662\text{keV}} \right)^{-0.42 \pm 0.003} & (\text{CsI}) \\ 10.0 \times \left(\frac{E}{662\text{keV}} \right)^{-0.69 \pm 0.006} & (\text{GSO}) \\ 4.0 \times \left(\frac{E}{662\text{keV}} \right)^{-0.70 \pm 0.002} & (\text{LaBr}_3) \end{cases} \quad (5.1)$$

と表される。ただし、CsI(Tl) に関しては 22.2keV と 31.0keV で大きく外れるのでフィット範囲から除外した。

$E^{-0.5}$ から外れてしまうのは、回路ノイズの影響が大きいからなのかもしれないが、その外れ方はシンチレータによってまちまちである。従って、結晶の特性を踏まえて個別の吟味が必要であるが、本レポートでは深入りしないことにする。

APD と PIN PD の比較

第 7 章に述べる CsI(Tl)+PIN での測定では、低エネルギー側では 59.5keV までしか見えないのに対し、CsI(Tl)+APD の測定では 22.2keV まではっきりと見えた。これは、PIN フォトダイオードは電荷キャリアの増倍作用を持たないが、APD は増倍作用を持ち、読み出し回路の早い段階で信号雑音比が大きくなったためと考えられる。

APD とシンチレータの大小関係

下図 5.27 に CsI(Tl)、LaBr₃(Ce) と APD の写真を載せる。これらの形状を見ればわかるように、CsI(Tl) は APD の受光面にちょうど収まるが、LaBr₃(Ce) は受光面からはみ出してしまう。このため、LaBr₃(Ce)+APD での測定では集光率が落ちてしまう。本来ならば、シンチレータが受光面に収まるように両者の大きさを選択しなければならないが、我々の用いた APD は現時点で市販品としては最大の受光面を持つもので、LaBr₃(Ce) は市販品としては最小のものである。

無駄になっているシンチレーション光子数は、結晶と、APD の受光面の面積でわかる。シンチレーション光子がすべて APD の受光面に入射したとすると、その数は 1.3 倍になり、式 (4.6) によればエネルギー分解能は $1/\sqrt{1.3}$ 倍程度になると考えられる。662keV では 3.5% 程度になり、光電子増倍管に匹敵する分解能となるだろう。また、NaI(Tl) も LaBr₃(Ce) と同じ形状なので、シンチレーション光が全て受光面に入射したとすると 662keV におけるエネルギー分解能は 7.5% 程度になると考えられる。

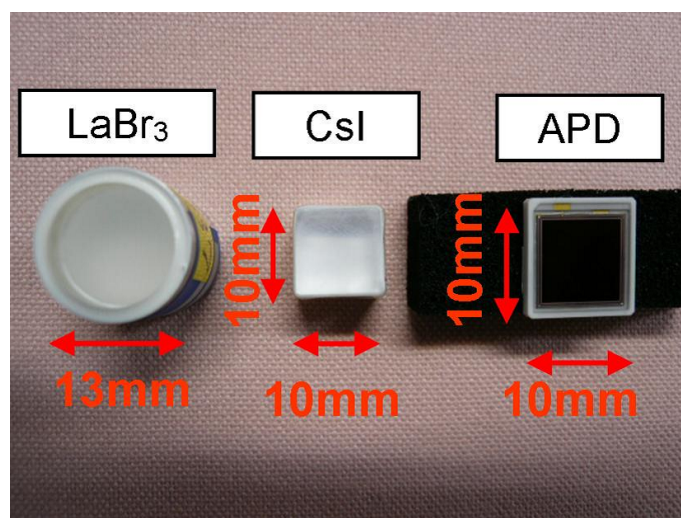


図 5.27: APD とシンチレータのサイズ

5.4 PMT(BA) と APD でのエネルギー分解能の比較

シンチレータが同じである場合の PMT(BA) と APD を用いたときのエネルギー分解能の比較をシンチレータが CsI(Tl) と LaBr₃(Ce) について行った。122keV、356keV、662keV、の γ 線についてのそれぞれのエネルギー分解能を下表 5.14 に示す。また、エネルギースペクトルの横軸をエネルギーに換算し重ね書きして比較したものを下図 5.28 に示す。

表 5.14: 3 種類の PMT のエネルギー分解能の比較			
シンチレータ	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)	
		PMT(BA)	APD
CsI(Tl)	122	11.6 (0.14)	12.6 (0.24)
	662	6.9 (0.03)	6.4 (0.04)
	1333	4.9 (0.03)	4.8 (0.02)
LaBr ₃ (Ce)	122	7.3 (0.06)	13.4 (0.18)
	662	3.2 (0.01)	4.0 (0.02)
	1333	2.3 (0.01)	2.7 (0.02)

括弧内の数値はフィッティングエラー

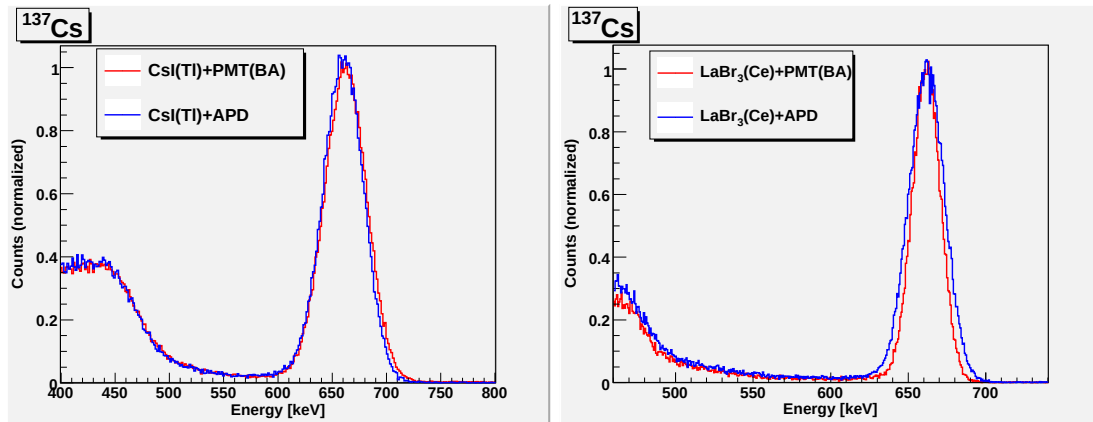


図 5.28: PMT(BA) と APD のエネルギー分解能の比較。(左) CsI(Tl)、(右) LaBr₃(Ce)

考察

CsI(Tl) の発光が最大となる波長は 565nm であり、この波長での PMT(BA)、APD の量子効率はいずれも 6%、80% 程度である。実験では 662keV でのエネルギー分解能はそれぞれ 6.9%、6.4% という結果であった。量子効率で比較すると APD のエネルギー分解能は PMT(BA) の $\sqrt{6/80} = 0.3$ 倍となり、 $6.9\% \times 0.3 = 2.0\%$ 程度になるはずである。実際の APD のエネルギー分解能は量子効率のみを考えた場合よりは悪いが、PMT(BA) より若干よくなった。

LaBr₃(Ce) の発光が最大となる波長は 380nm であり、この波長での BA、APD の量子効率はいずれも 25%、65% 程度である。実験では 662keV でのエネルギー分解能は 3.2%、4.0% という結果であった。量子効率で比較すると APD のエネルギー分解能は PMT(BA) の $\sqrt{25/65} = 0.6$ 倍、となり、 $3.2\% \times 0.6 = 2.0\%$ 程度となるはずである。実際は APD のエネルギー分解能は PMT(BA) より悪かった。ひとつの原因としては、5.3.3 節での記述のように結晶の受光面に接する面の面積が APD の受光面の 1.3 倍であり、そのためエネルギー分解能は $\sqrt{1.3}$ 倍だけ悪くなっていると考えられる。このことと量子効率を考慮すると、APD のエネルギー分解能は $2.0\% \times \sqrt{1.3} = 2.3\%$ と計算される。

実際の APD のエネルギー分解能は、その他に回路のノイズなどに影響されて悪くなると考えられる。

5.5 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) とシンチレータを用いた γ 線測定

5.5.1 MPPC のセットアップ

MPPC とシンチレータの組み合わせで γ 線を測定するときのセットアップ図と、MPPC に GSO(Ce) を接着した様子を示す。

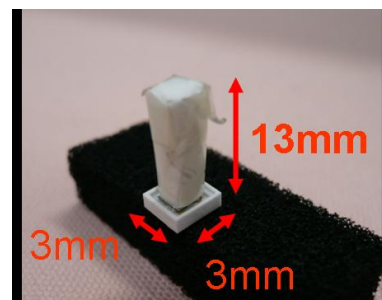
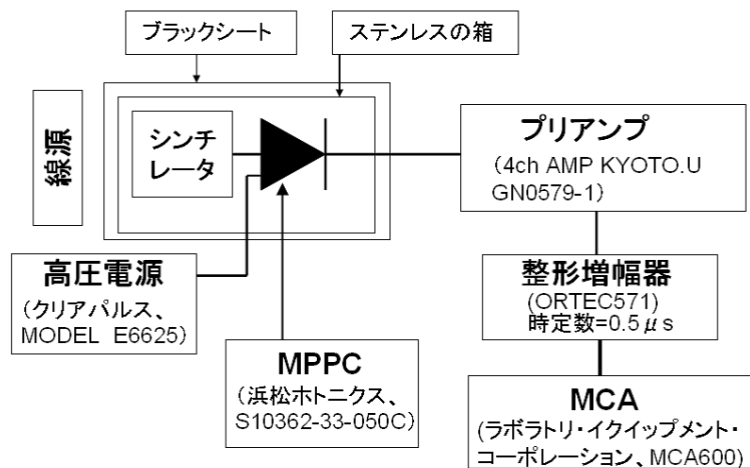


図 5.30: GSO(Ce)+MPPC

図 5.29: MPPC を用いた γ 線測定の設定アップ図

まず、線源から γ 線が入射して発生したシンチレーション光が MPPC (浜松ホトニクス、S10362-33-050C) に入射し、MPPC に電流が流れる。その信号はプリアンプにより増幅された後、整形増幅器 (ORTEC571) で波形整形される。その最終的なパルスのピークを MCA (ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション) で読み取る。パルスを読み取るための回路を作成し (図 5.31)、それをステンレスの箱に入れて測定した。整形増幅器の時定数は $0.5\mu\text{s}$ に設定した。

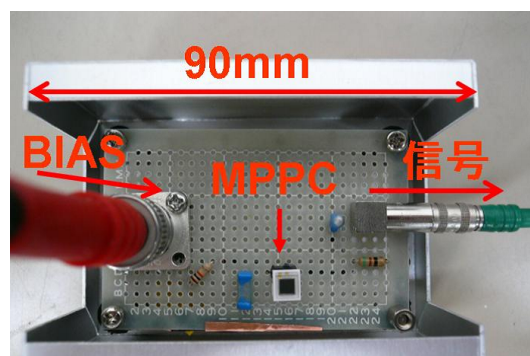
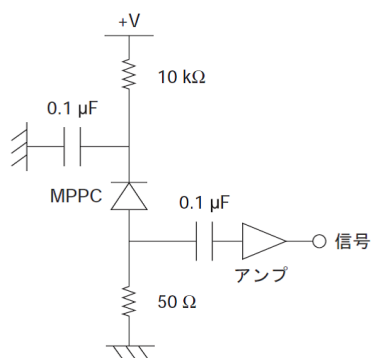


図 5.31: 信号読み取り回路

5.5.2 MPPC からの生信号

MPPC と組み合わせるシンチレータは 3mm× 3mm × 13mm の GSO(Ce) で、以下の節でも同様である。この組み合わせで ^{137}Cs の 662keV の γ 線を検出したとき、プリアンプを通す前の信号をオシロスコープ（テクトロニクス、TDS 2024）で確認したところ、下図 5.32 左のような波形が得られた。また、比較のため、同図右には同じ GSO(Ce) と PMT(BA) を組み合わせたときのプリアンプを通す前の信号を示す。MPPC にかけてられている電圧は記録がないが、70V 弱と思われる。また、PMT にかけての高電圧は 1000V である。

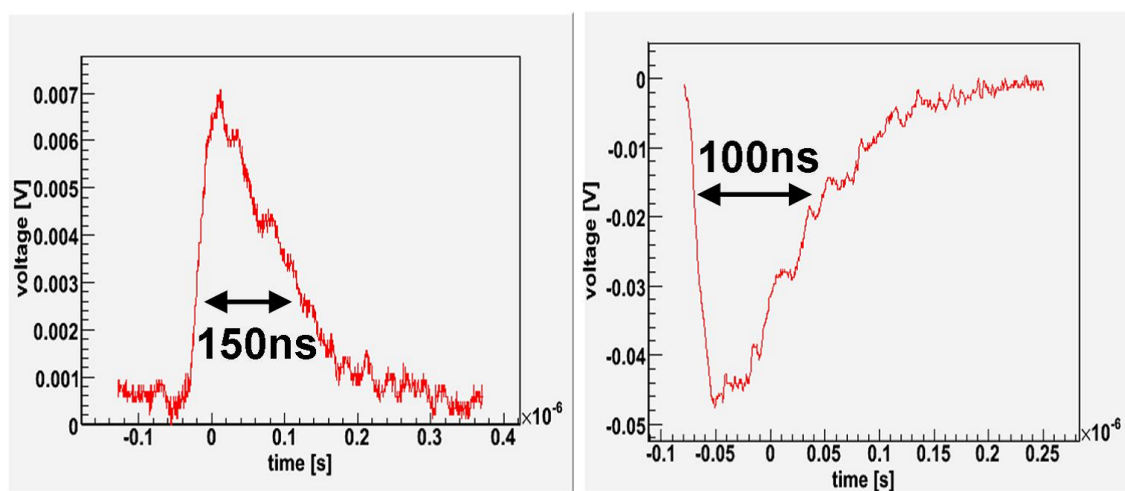


図 5.32: GSO(Ce) と MPPC(左)、光電子増倍管（右）の組み合わせで 662keV (^{137}Cs) の γ 線を検出したとき、MPPC から出た出力波形

5.5.3 エネルギーとチャンネルの関係について

MPPC の各ピクセルは光子の検出に対してオンかオフの判定しかしないため、全ピクセル数に対して、入射光子数が増えると、光子検出の直線性が低下する。これは 1 ピクセルに 2 個以上の光子が入り始めることによる。入射光子数と励起ピクセル数の関係は次式で表される。

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} \times [1 - \exp(-a \times N_{\text{photon}})] \quad (5.2)$$

ここで N_{fired} は励起ピクセル数、 N_{total} は全ピクセル数、 N_{photon} は入射光子数である。

そこで、122keV から 1333keV の範囲でエネルギーとピークチャンネルの関係をプロットし、光子の検出において直線とみなせるような範囲を確かめた。測定時の温度は 22.0 ± 1.0 °C、整形増幅器のゲインは 3.6、時定数は $0.5 \mu\text{s}$ 、逆バイアス電圧は 73.0[V] であった。エネルギーとピークチャンネルの関係を図 5.33 に示す。図中の曲線はプロットを $\text{Ch.} = a \times (\exp(-b \times E))$ の関数でフィットしたときの曲線である（式 5.2 参照）。

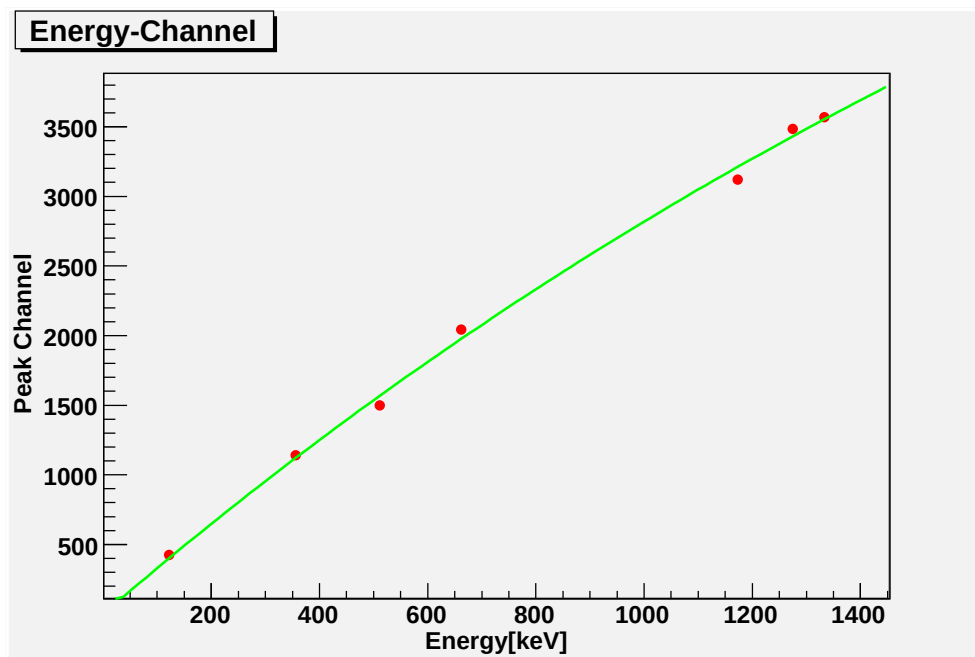


図 5.33: エネルギーとピークチャンネルの関係

測定の結果は上式のような関係にはならなかったが、1173keV 以上ではエネルギーとピークチャンネルの直線性は低下していると思われる。662keV 以下でもエネルギーとピークチャンネルの関係が不安定なのは、補足で述べるピークチャンネルの時間による変化が影響していると考えられる。

5.5.4 MPPC とシンチレータの組み合わせによる γ 線測定

MPPC と組み合わせるシンチレータは GSO(Ce) の大きさ $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 13\text{mm}$ のものである。 ^{241}Am 、 ^{133}Bq 、 ^{57}Co 、 ^{22}Na 、 ^{137}Cs のエネルギースペクトルを測定した。測定時の温度は $22.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 、整形増幅器のゲインは 6.3、時定数は $0.5\mu\text{s}$ 、逆バイアス電圧は 73.0[V] であった。エネルギースペクトルを下図 5.34 に示す（赤の破線はガウシアンによるフィット結果）。また、エネルギー較正の様子を下図 5.35 に示す。エネルギー較正では 59.5keV、81.0keV を除いた 4 点を用いたとき直線性がよかったため、122keV、356keV、511keV、662keV でフィットを行った。

PMT と MPPC の比較のため、同じ $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 13\text{mm}$ の大きさの GSO(Ce) と PMT(BA) の組み合わせでのエネルギー分解能の測定も行った。測定の設定アップは 5.2 節と同様で、高圧電源は 1000[V]、整形増幅器の時定数は $0.5\mu\text{s}$ 、ゲインは 6.9 に設定した。測定時の気温は $21.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ だった。

3mm 角 GSO(Ce) と MPPC、PMT(BA) の組み合わせで得られたエネルギー分解能を下表 5.15 にまとめ、エネルギーとエネルギー分解能の関係を下図 5.36 に示す。122keV より小さいエネルギーでのエネルギー分解能については、ピークチャンネルがエネルギー較正の直線から外れたため出さなかった。

表 5.15: GSO(Ce) と MPPC、PMT(BA) の組み合わせでのエネルギー分解能

放射線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)	
		MPPC	PMT(BA)
²⁴¹ Am	59.5		28.9 (0.47)
¹³³ Ba	81.0		20.6 (0.24)
¹⁰⁹ Cd	88.0		20.0 (0.32)
⁵⁷ Co	122	28.7 (0.58)	17.6 (0.31)
¹³³ Ba	356	15.9 (0.55)	11.4 (0.30)
²² Na	511	14.3 (0.21)	8.7 (0.07)
¹³⁷ Cs	662	12.0 (0.16)	8.1 (0.09)

括弧内の数値はフィッティングエラー

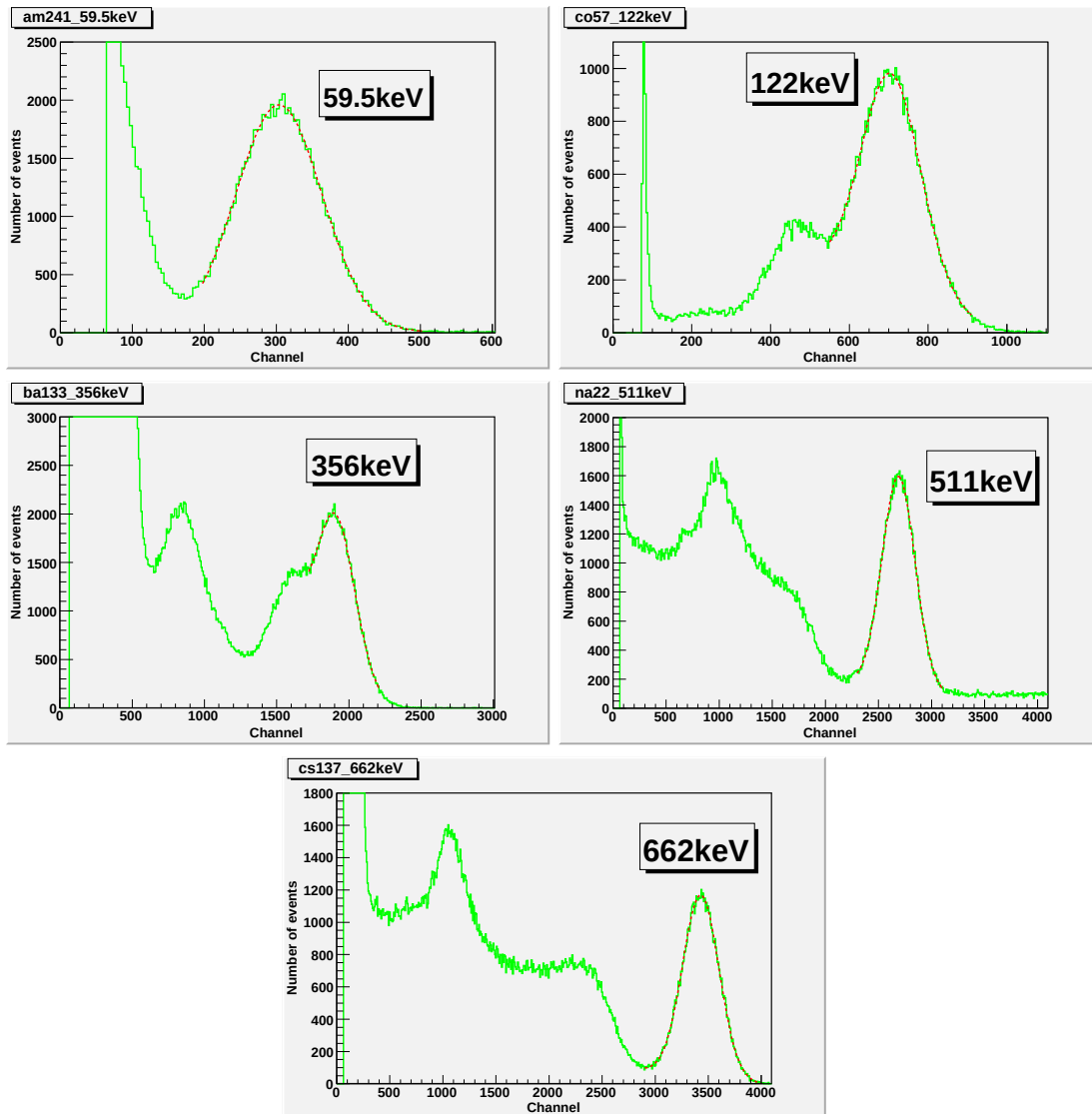


図 5.34: GSO(Ce)+MPPC で測定した各 γ 線のスペクトル図

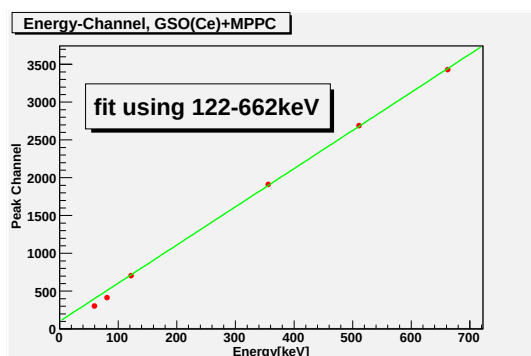


図 5.35: エネルギー較正

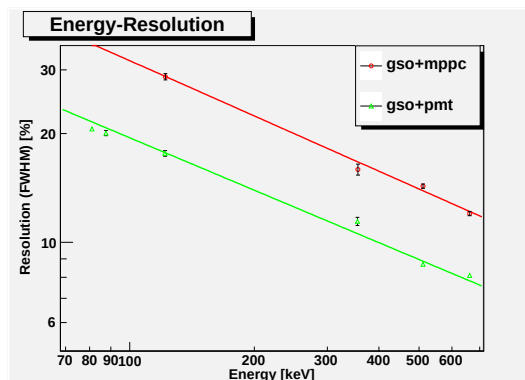


図 5.36: エネルギーとエネルギー分解能の関係

エネルギーとエネルギー分解能のプロットをフィットした結果はそれぞれ次式のようにになった。

$$\text{GSO}(\text{Ce}) + \text{MPPC} : \text{Resolution}[\%] = 12.0 \times (E/662[\text{keV}])^{(-0.51 \pm 0.01)} \quad (5.3)$$

$$\text{GSO}(\text{Ce}) + \text{PMT}(\text{BA}) : \text{Resolution}[\%] = 8.1 \times (E/662[\text{keV}])^{(-0.48 \pm 0.01)} \quad (5.4)$$

PMT と MPPC での 662keV でのエネルギー分解能の比較の図を 5.37 に示す。

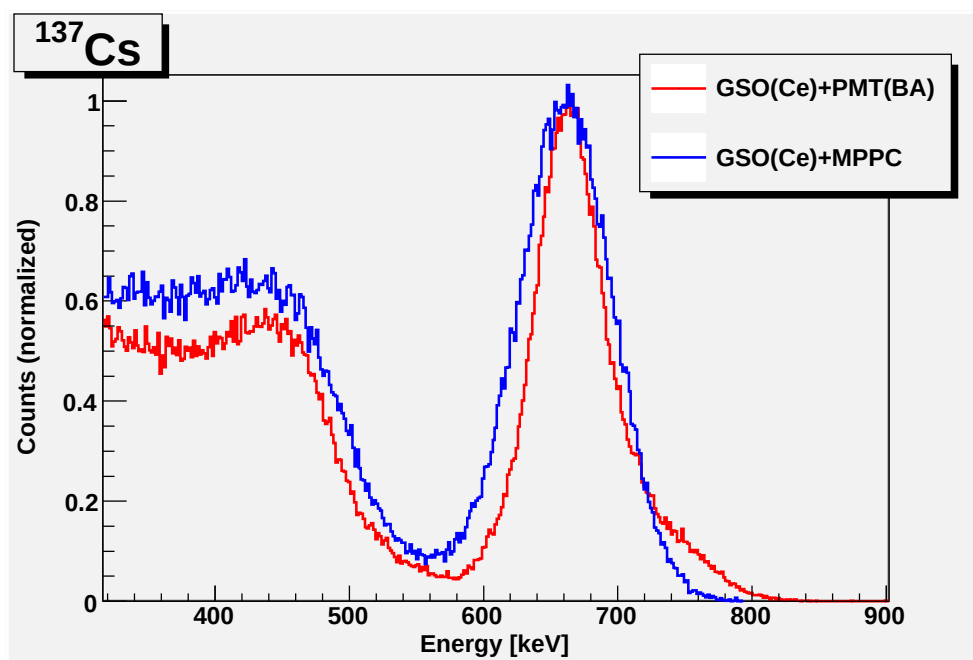


図 5.37: エネルギー分解能の比較

5.5.5 考察

GSO(Ce) の発光が最大となる波長は 440nm であり、この波長での PMT(BA) の量子効率 は 23%、MPPC の検出効率は 40%程度である。検出効率だけを考えれば、MPPC を用いたほうがエネルギー分解能がよくなると思われる。しかし、今回の MPPC を用いた実験では以下の補足で記すようにエネルギー較正の直線性の問題やピークチャンネルの時間的な変化の問題などがあったため、エネルギー分解能は 662keV で 12.0%となり PMT(BA) を用いたときの 8.1%に比べてかなり悪くなった。温度や逆バイアス電圧、その他の設定を変えるなどして PMT に匹敵するエネルギー分解能を出すことが今後の課題として挙げられる。

5.5.6 補足:降伏電圧の測定

はじめに MPPC の降伏電圧の測定を行った。他の条件を変えずに逆バイアス電圧のみを様々な値に設定し ^{22}Na のスペクトルを測定した。測定時の温度は 22.0 ± 1.0 °C、整形増幅器のゲインは 20、時定数は $0.5\mu\text{s}$ であった。511keV の γ 線のピークチャンネルと逆バイアス電圧の関係をプロットする。MPPC の出力電荷量が MCA のチャンネルに比例するとみなすと、 $Q = C \times (V - V_{BR})$ の関係から降伏電圧の値がわかる。逆バイアス電圧とピークチャンネルの関係を図 5.38 に示す。

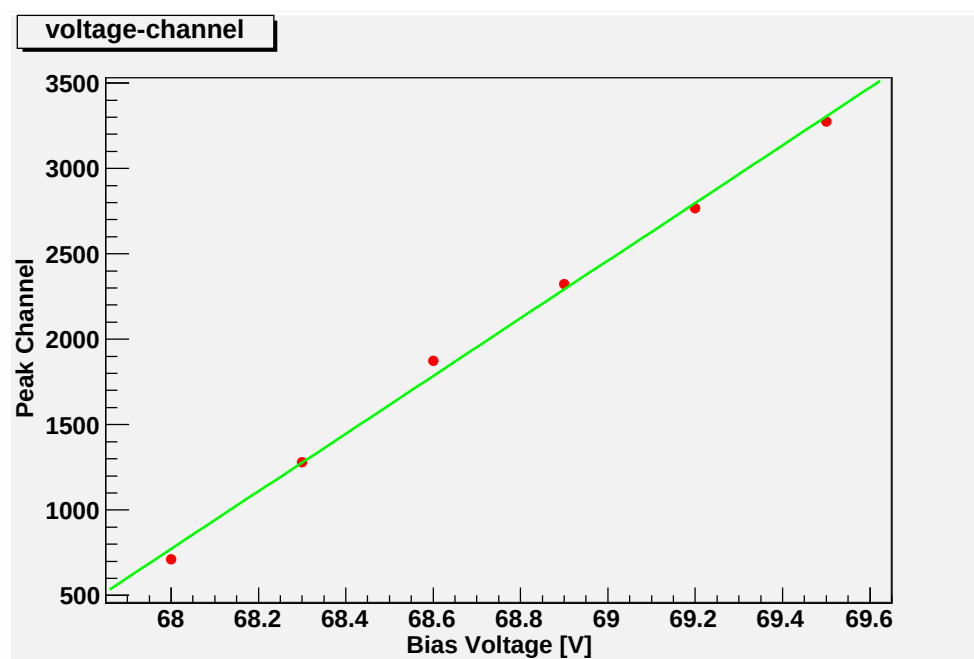


図 5.38: 逆バイアス電圧とピークチャンネルの関係

プロットを直線でフィットしたとき、次式のようになった。

$$\text{Channel} = (1688 \pm 55) \times V[\text{V}] + (-1.14 \times 10^5 \pm 3.8 \times 10^3) \quad (5.5)$$

この式から、チャンネルが0となるときの逆バイアス電圧を降伏電圧とすると、その値は $67.5 \pm 3.1[\text{V}]$ となった。

5.5.7 補足:ピークチャンネルの時間による変化について

MPPC を用いた測定の中で、スペクトルのピークチャンネルが時間とともに大きく変化するということがあった。そこで、同じ条件の下、 ^{22}Na のスペクトルを5分間ずつ10回に分けて測定し、511keV の γ 線のピークチャンネルの時間的な変化を測定した。測定時の温度は $22.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 、整形増幅器のゲインは5、時定数は $0.5\mu\text{s}$ 、逆バイアス電圧は $73.0[\text{V}]$ であった。測定回数に対するピークチャンネルの表と図を示す。10回の測定によるピークチャンネルの平均値は2175で、チャンネルの平均値からのずれは最大で1.2%であった。

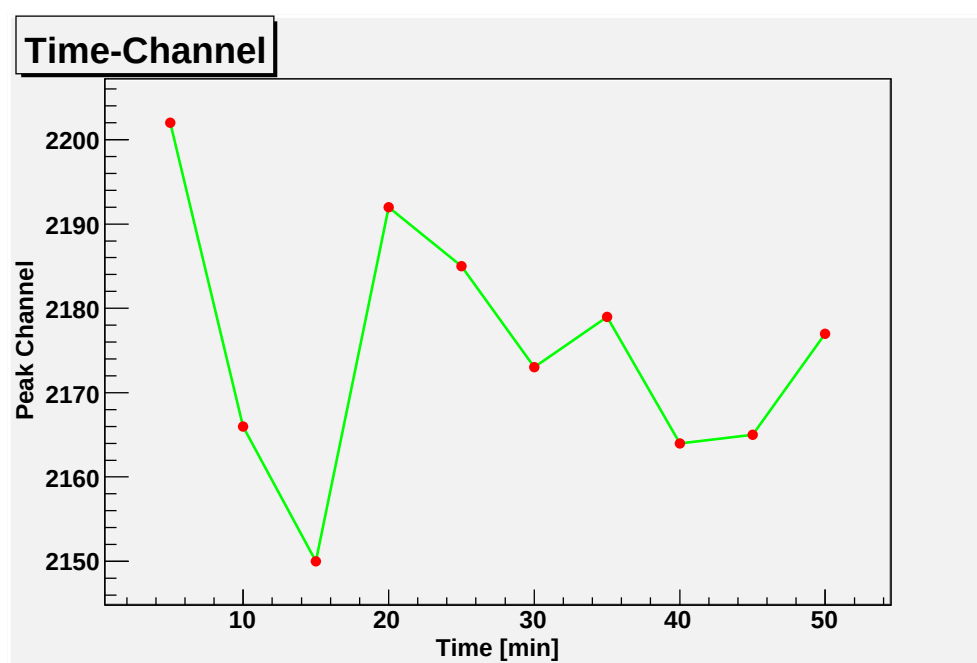


図 5.39: ピークチャンネルの時間的な変化

自作した読み出し回路を改良したり、バイアスをかけるための高圧電源を変えるなどすればこの不安定性は取り除けるかもしれないが、時間の都合によりそれは今後の課題としておく。

第6章 光量比較

この章では、すべてのシンチレータで同じ装置を用い、整形増幅器の時定数とゲインをそろえて γ 線を測定する。そうすることで、ある検出器を用いたときに、各シンチレータの光量を比較することが出来る。

また、条件をすべて同じにすることにより、より一般的に分解能の比較が出来る。

我々は、光電面がバイアルカリである光電子増倍管（浜松ホトニクス、R6231）とアバランシェフォトダイオード（浜松ホトニクス、S8664-1010）を用いてこの実験を行った。

6.1 光電子増倍管を用いた光量比較

6.1.1 測定

光電面がバイアルカリの光電子増倍管（浜松ホトニクス、R6231）を用いた光量比較実験を行う。実験装置やセットアップは5.2節と同じである。用いるシンチレータは、NaI(Tl)、CsI(Tl)、GSO(Ce)、LaBr₃(Ce)の4種類である。

いずれのシンチレータを用いる場合も、光電子増倍管にかかる高電圧は900Vに設定し、整形増幅器の時定数は2 μ s、ゲインは6にした。このゲインは、光電子増倍管で測定すると最も光量の大きいLaBr₃(Ce)を用いたときに、¹³⁷Csの662keVの光電ピークがMCAの測定できる最大チャンネル（4095チャンネル）付近に収まるように定めた。測定時の気温は一貫して20.0 $\pm$ 1 $^{\circ}$ Cである。

測定及びエネルギー較正に用いた γ 線のエネルギーは、NaI(Tl)、CsI(Tl)、GSO(Ce)の場合には⁵⁷Coの122keV、¹³³Baの356keV、²²Naの511keV、¹³⁷Csの662keVで、LaBr₃(Ce)の場合は⁵⁷Coの122keV、¹³³Baの276、303、356keV、¹³⁷Csの662keVである。

6.1.2 結果

¹³³Ba、¹³⁷Csを用いたときのスペクトルを図6.1に示す。さらに、横軸をエネルギーに換算し、縦軸をそれぞれ356keV、662keVでの計数で規格化したスペクトルとエネルギー分解能を図6.2に示す（図が込み入るので、GSOは省略されている）。

図6.1によれば、光電子増倍管を用いた場合にはLaBr₃(Ce)、NaI(Tl)、CsI(Tl)、GSO(Ce)の順に光量が大きいことがわかる。

また、図6.2を見ると、LaBr₃(Ce)のエネルギー分解能の良さがわかる。¹³³Baの4つのピークが分離できていて、¹³⁷Csの662keVのピークも鋭いことがわかる。図には示されていないGSO(Ce)のエネルギー分解能は、356keVにおいては10.2%、662keVにおいては8.5%であった。

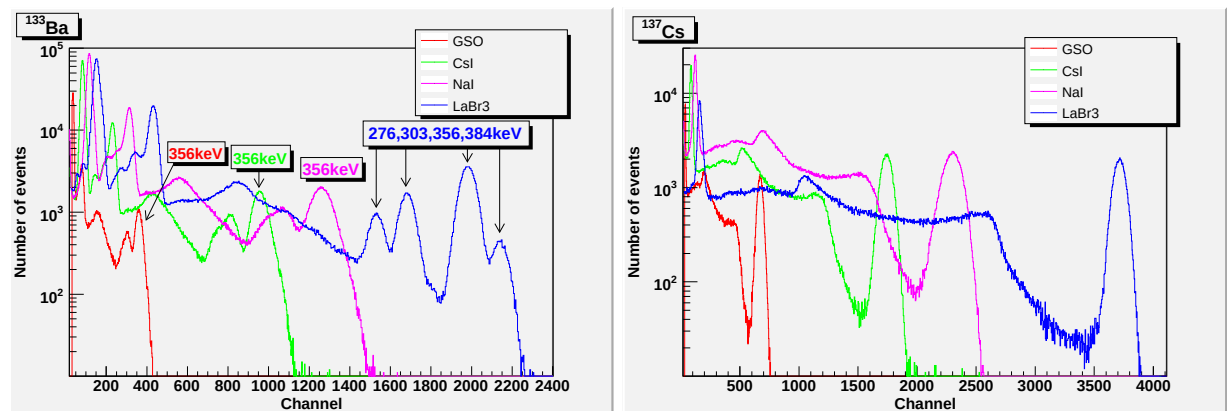


図 6.1: シンチレータ+光電子増倍管で得られたスペクトル (左: ^{133}Ba 、右: ^{137}Cs)

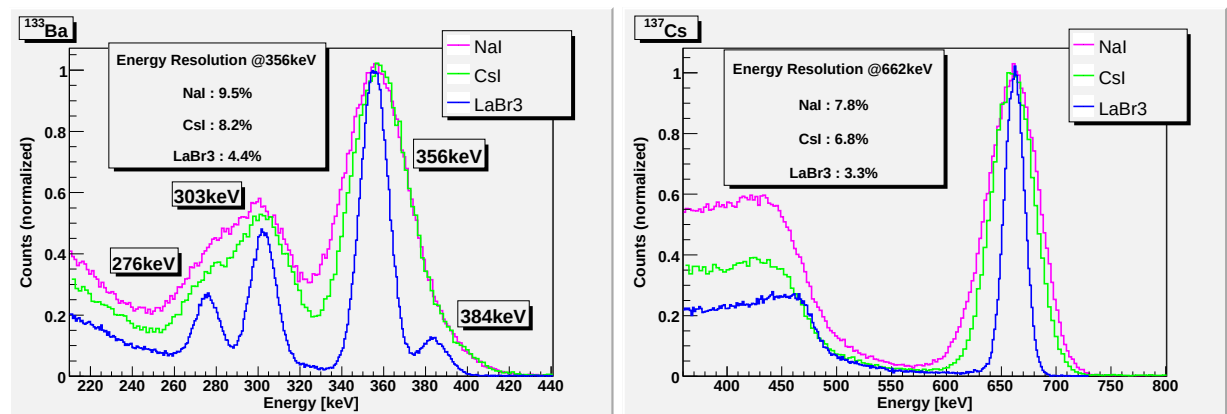


図 6.2: シンチレータ+光電子増倍管で得られたスペクトル (左: ^{133}Ba の 356keV 付近、右: ^{137}Cs の 662keV 付近)

6.1.3 考察

光量比

図 6.1 において、356keV、662keV のピークのチャンネルの比として光量比を求めると、下表 6.1 のようになった。同時に文献値も示す。だいたい一致していることがわかる。

表 6.1: 光電子増倍管で測定したときの各シンチレータの光量比較 (NaI(Tl)) との相対値)

	NaI(Tl)	CsI(Tl)	GSO(Ce)	LaBr ₃ (Ce)
実験値	1	0.76	0.30	1.7
文献値	1	0.7	0.2	1.6

コンプトン端

図 6.2 の 662keV のピークの左にはコンプトン端が見られる。この位置は、理論的に予測される 480keV とよく一致している。

さて、スペクトルに現れるコンプトン成分は、シンチレータ内でコンプトン散乱された γ 線が吸収されることなく逃げ去ったことを表している。したがって、シンチレータの γ 線阻止能が高いほど、また、サイズが大きいほどコンプトン成分は減少するはずである。表 2.1 (6 ページ) の放射長を見れば、CsI(Tl)、LaBr₃(Ce)、NaI(Tl) の順に γ 線阻止能が高いことがわかる。まずサイズが等しい ($\phi = 13\text{mm}$ 、 $h = 13\text{mm}$) NaI(Tl) と LaBr₃(Ce) を図 6.2 で比較すると、阻止能の劣る NaI(Tl) の方がコンプトン成分が大きく、より多くの散乱 γ 線が逃げ去ったことが見て取れる。次に、CsI(Tl) だが、LaBr₃(Ce) よりも阻止能が高いにもかかわらずコンプトン成分が大きくなっている。これは、CsI(Tl) のサイズが小さく ($10 \times 10 \times 10\text{mm}^3$)、コンプトン散乱された γ 線が逃げやすいためである。

6.2 APD を用いた光量比較

6.2.1 測定

APD (浜松ホトニクス、R6231) を用いた光量比較実験を行う。実験装置やセットアップは 5.3 節と同じである。用いるシンチレータは、NaI(Tl)、CsI(Tl)、LaBr₃(Ce) の 3 種類である。

いずれのシンチレータを用いる場合も、APD にかかるバイアス電圧は 400V に設定し、整形増幅器の時間数は $2\mu\text{s}$ 、ゲインは 7.2 にした。このゲインは、APD で測定した場合、最も光量の大きい CsI(Ce) を用いたときに、¹³⁷Cs の 662keV の光電ピークが MCA の測定できる最大チャンネル (4095 チャンネル) 付近に収まるように定めた。測定時の気温は一貫して $20.0 \pm 1^\circ\text{C}$ である。

測定及びエネルギー較正に用いた γ 線のエネルギーは、NaI(Tl)、CsI(Tl) の場合には ⁵⁷Co の 122keV、¹³³Ba の 356keV、²²Na の 511keV、¹³⁷Cs の 662keV で、LaBr₃(Ce) の場合は ⁵⁷Co の 122keV、¹³³Ba の 303、356keV、¹³⁷Cs の 662keV である。

6.2.2 結果

¹³³Ba、¹³⁷Cs を用いたときのスペクトルを図 6.3 に示す。さらに、横軸をエネルギーに換算し、縦軸をそれぞれ 356keV、662keV での計数で規格化したスペクトルとエネルギー分解能を図 6.4 に示す。

図 6.1 によれば、APD を用いた場合には CsI(Tl)、LaBr₃(Ce)、NaI(Tl) の順に光量が多いことがわかる。

また、図 6.2 を見ると、LaBr₃(Ce) のエネルギー分解能の良さがわかるが、356keV と 384keV のピークは分離できていない (光電子増倍管では分離される)。

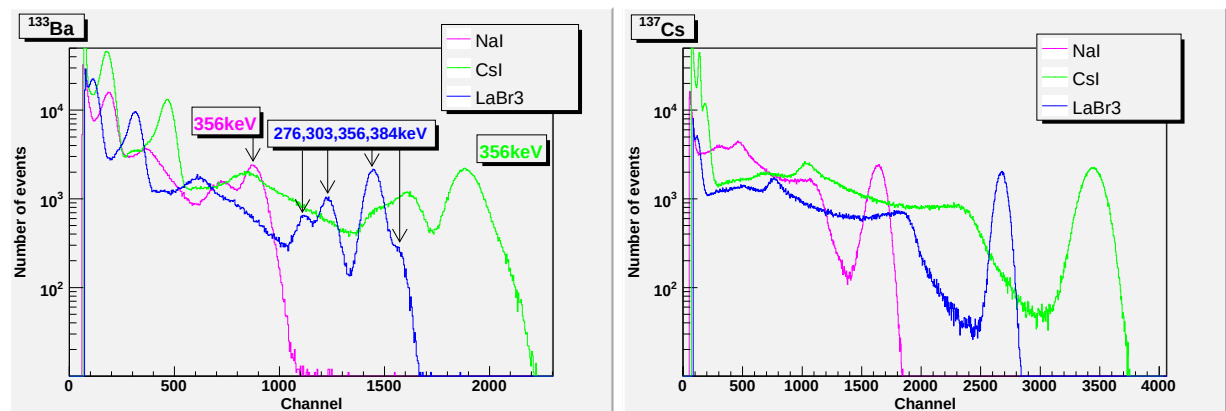


図 6.3: シンチレータ+APD で得られたスペクトル (左: ^{133}Ba 、右: ^{137}Cs)

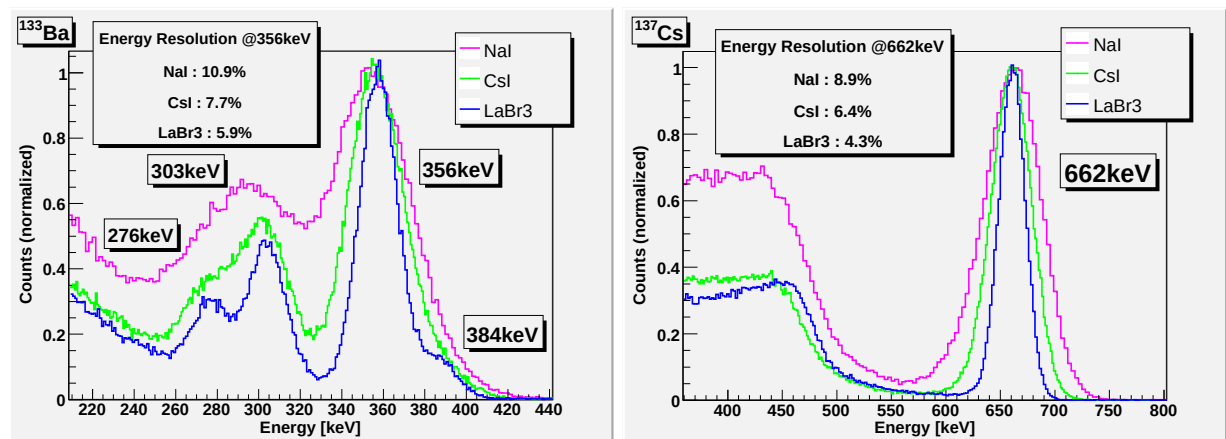


図 6.4: シンチレータ+APD で得られたスペクトル (左: ^{133}Ba の 356keV 付近、右: ^{137}Cs の 662keV 付近)

6.2.3 考察

光量比

図 6.3 において、356keV、662keV のピークのチャンネルの比として光量比を求めると、下表 6.2 のようになった。APD に関しては文献値は見あたらなかった。光電子増倍管のときの光量比 (表 6.2) と比較すると、NaI(Tl) と LaBr₃(Ce) の光量比はあまり変わらない。これは、NaI(Tl) の発光波長と LaBr₃(Ce) のそれが大体同じ (それぞれ 415nm、380nm) であるので、検出器を光電子増倍管から APD に変えても、両シンチレータで量子効率が同じだけ変化するからである (光電子増倍管では 25%程度、APD では 70%程度)。一方、光電子増倍管のときに比べて CsI(Tl) の相対光量は非常に大きくなっていることがわかる。これは、CsI(Tl) の発光波長である 565nm においては、光電子増倍管の量子効率が 10%にも満たないのに対して、APD の量子効率は 80%以上にも達するからである。

表 6.2: APD で測定したときの各シンチレータの光量比較 (NaI(Tl)) との相対値)

	NaI(Tl)	CsI(Tl)	LaBr ₃ (Ce)
実験値	1	2.1	1.6

コンプトン端

図 6.4 に関して、コンプトン端についての議論は 6.1.3 節と同じであるので、光電子増倍管の場合 (図 6.2) と比較してみる。

まず、CsI(Tl) における光電ピークとコンプトン端の高さの比は両者で変わらない。一方、NaI(Tl) と LaBr₃(Ce) の場合は、APD の場合のほうが光電ピークの高さに対するコンプトン端の高さが大きくなっている。これは、5.3.3 節にも述べたように、NaI(Tl) と LaBr₃(Ce) は APD の受光面からはみ出ていることに関係していると思われる。

第7章 整形増幅器の時定数の変更

7.1 PIN PD を用いた γ 線測定 (2 回目)

5.1 節にも述べたように、CsI(Tl) と PIN PD を組み合わせて整形増幅器の時定数を決定した実験は、はなはだ不正確である。そこで、再び同じ実験を試みる。

7.1.1 セットアップ

前回 (5.1 節) の測定とは、2 つだけ変更点がある。それは、

1. CsI(Tl) と PIN PD を接着させる際にはオプティカルグリスを使う
2. PIN PD を含む装置の一部をステンレス製の箱で静電遮蔽する

の 2 点である。ステンレス製の箱は、APD を用いた測定のとおりと同じものを使った。前回の測定とほぼ同じだが、セットアップ図を再掲する。

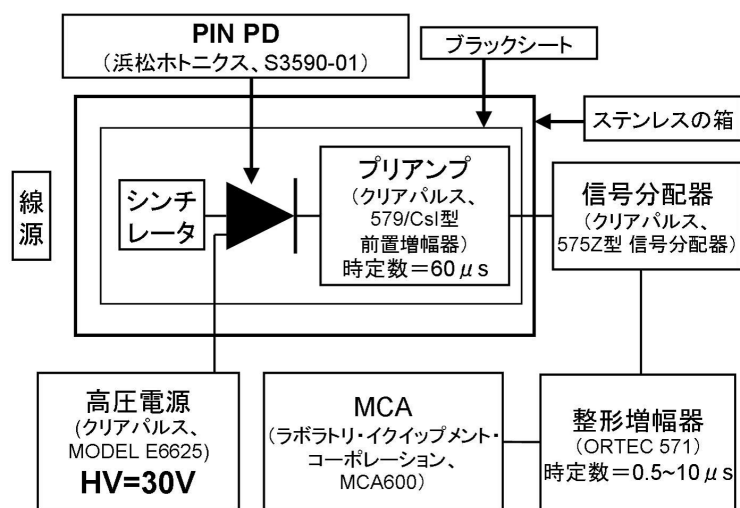


図 7.1: PIN PD を用いた測定のセットアップ (2 回目)

7.1.2 測定

整形増幅器の時定数を 0.5、1、2、3、6、10 μ s と変えつつ、各時定数ごとに ^{22}Na 、 ^{57}Co 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs の 4 つの γ 線源を用いた。整形増幅器のゲインは 5.0.1 節に従って定めた。エネルギー較正及びエネルギー分解能の計算に用いた γ 線のエネルギーは 122、511、662、1173、1333keV である。ただし、時定数が 2 μ s のときには、ノイズが大きくなり、122keV のピークは確認できなかった。

7.1.3 結果

各時定数ごとにエネルギー分解能を求めたところ、結果は 5.1.2 と異なり、時定数が大きくなるにつれて分解能が良くなる傾向にあった (図 7.2)。図には示されていない 122、1173keV でも同じ傾向だった。時定数が 2 μ s のときは 662keV におけるエネルギー分解能は前回 (5.1 節) の 7.6% からほとんど変わらなかったが、時定数が 6、10 μ s のときの測定では、6% ほどになり、大幅に改善された。

ステンレスの箱を取り除いた状態で、整形増幅器からの信号をオシロスコープ (テクトロニクス、TDS 2024) で確認すると、明らかにノイズ成分が増加した。よって、この箱で装置を覆い静電遮蔽したことがエネルギー分解能の改善に大きく寄与したと考えられる。

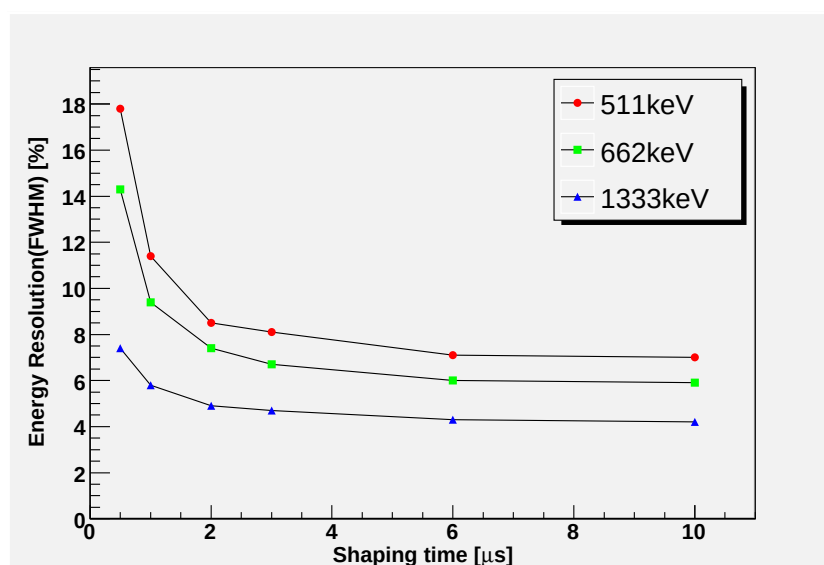


図 7.2: 各時定数におけるエネルギー分解能 (CsI(Tl)+PIN)

7.2 CsI(Tl)+PIN PD によるより正確な測定

7.2.1 測定

前節の結果を踏まえて時定数を 2、6、10 μ s に設定し、用いる γ 線源を増やして測定した。整形増幅器のゲインは、それぞれ 120、99、95 にして測定した。測定時の気温は時定数が 2 μ s のときは 22.0 ± 1 $^{\circ}\text{C}$ で、

6、 $10\mu\text{s}$ のときは $21.5 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ であった。

7.2.2 結果

エネルギー分解能は以下の表 7.1 のようになった。やはり $10\mu\text{s}$ のときに分解能が良くなることがわかる。最も分解能が良くなった $10\mu\text{s}$ の場合のスペクトルを図 7.4 に示す。また、エネルギー較正の様子と時定数が 2、 $10\mu\text{s}$ の場合のエネルギーとエネルギー分解能の関係を図 7.3 に示す。

表 7.1: CsI(Tl)+PIN で測定したときのエネルギー分解能

γ 線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)		
		時定数 = $2\mu\text{s}$	時定数 = $6\mu\text{s}$	時定数 = $10\mu\text{s}$
^{241}Am	59.5	41.1 (0.71)	32.1 (0.37)	31.2 (0.37)
^{133}Ba	81.0	31.2 (0.44)	23.1 (0.29)	24.0 (0.41)
^{109}Cd	88.0	30.0 (0.35)	22.0 (0.31)	22.6 (0.46)
^{57}Co	122	27.2 (0.24)	18.8 (0.28)	18.6 (0.33)
^{133}Ba	356	11.0 (0.26)	8.8 (0.13)	7.6 (0.26)
^{22}Na	511	8.8 (0.02)	7.1 (0.02)	6.8 (0.03)
^{137}Cs	662	7.5 (0.03)	6.3 (0.03)	5.9 (0.04)
^{60}Co	1173	5.1 (0.05)	4.2 (0.04)	4.0 (0.04)
^{22}Na	1275	5.3 (0.02)	4.4 (0.03)	4.1 (0.05)
^{60}Co	1333	5.1 (0.03)	4.3 (0.03)	4.1 (0.03)

括弧内の数値はフィッティングエラー、気温は $2\mu\text{s}$ のとき $22.0 \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ で、6、 $10\mu\text{s}$ のとき $21.5 \pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$

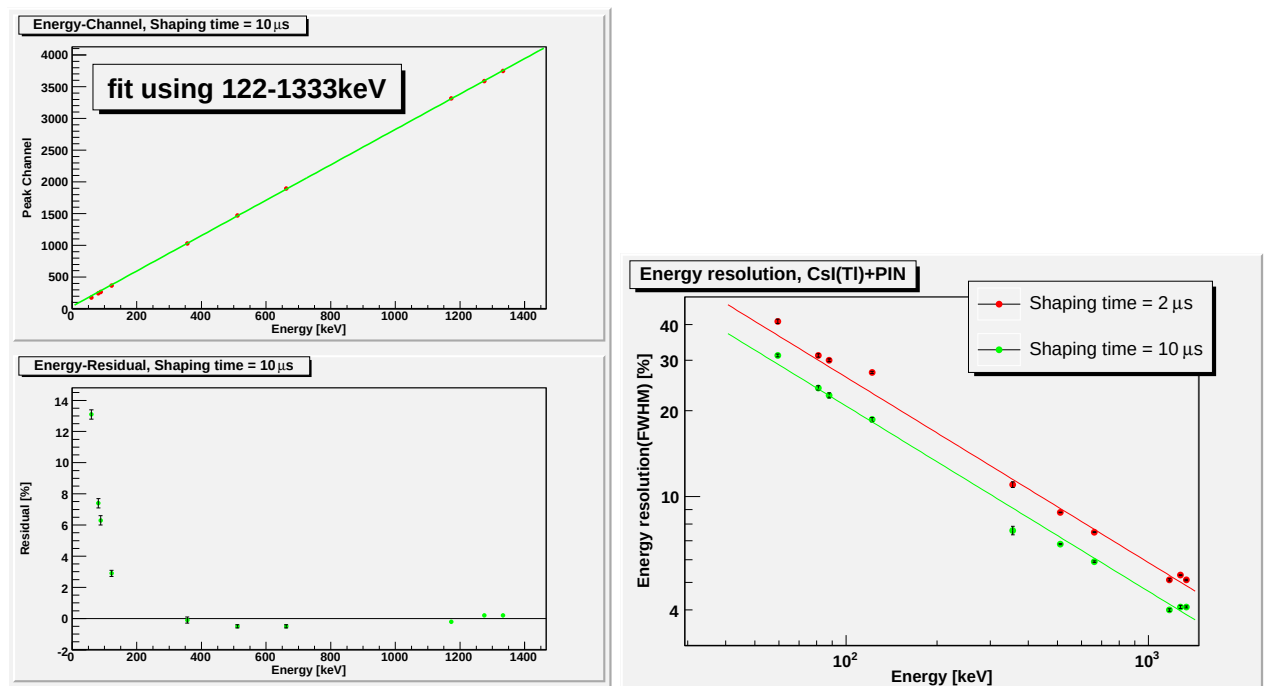


図 7.3: CsI(Tl)+PIN を用いて γ 線を測定したときのエネルギー較正の様子（左、時定数は $10\mu\text{s}$ ）と、エネルギー分解能（右、時定数は 2、 $10\mu\text{s}$ ）

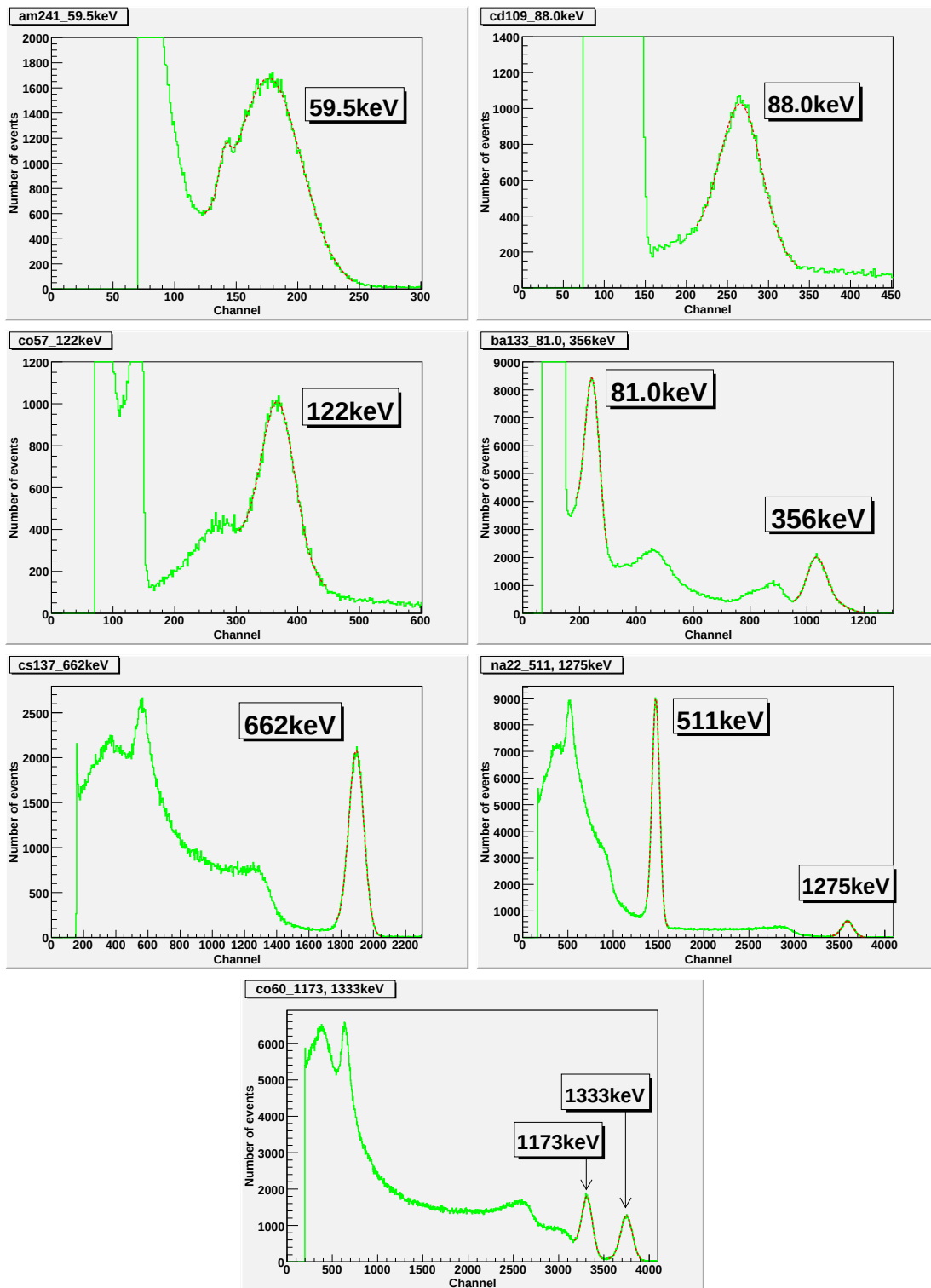


図 7.4: 整形増幅器の時定数を $10\mu\text{s}$ に設定し、CsI(Tl)+PIN で測定した各 γ 線のスペクトル図

7.2.3 考察

エネルギー較正

他の検出器と CsI(Tl) の組み合わせで測定したときと同様、122keV 以上ではエネルギーと光量の線型性が成り立っているが、それ以下では入射エネルギーに対する光量の割合が次第に小さくなっていくことがわかる (図 7.3 左)。

エネルギー分解能

図 7.3 右の直線は整形増幅器の時定数が $2\mu\text{s}$ のときと $10\mu\text{s}$ のときにエネルギーとエネルギー分解能の関係をフィットしたもので、662keV におけるエネルギー分解能に注目すると、それぞれ

$$\text{エネルギー分解能 (\% FWHM)} = \begin{cases} 7.5 \times \left(\frac{E}{662\text{keV}} \right)^{-0.65 \pm 0.003} & (\text{時定数}=2\mu\text{s}) \\ 5.9 \times \left(\frac{E}{662\text{keV}} \right)^{-0.65 \pm 0.004} & (\text{時定数}=10\mu\text{s}) \end{cases} \quad (7.1)$$

となった。フォトダイオードからの信号は微弱なので、回路ノイズの影響が大きくなり $E^{-0.5}$ から外れたと考えられる。

時定数を変えたことによるエネルギー分解能の変化

CsI(Tl)+PIN で γ 線の測定をしたところ、整形増幅器の時定数が $10\mu\text{s}$ のとき最もエネルギー分解能が良くなったが、これは、CsI(Tl) の蛍光減衰時間が約 1000ns と長いことに起因すると思われる。

プリアンプを通した後のパルスをおシロスコープ (テクトロニクス、TDS 2024) で取り込んだところ、下図 7.5 のようになる。このパルスの立ち上がり時間はシンチレータの蛍光減衰時間に比例して長くなるが、図によればそれは約 $10\mu\text{s}$ である。整形増幅器の時定数はパルスの立ち上がり時間をカバーしていることが望ましい。従って、時定数が $10\mu\text{s}$ の場合が最も安定した波形整形が出来て、分解能がよくなったと考えられる。

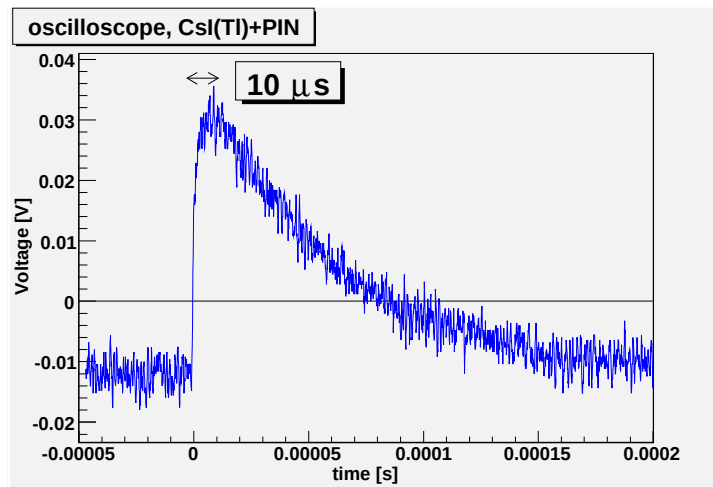


図 7.5: CsI(Tl)+PIN で 662keV の γ 線を測定したときの、プリアンプを通した後の波形。

7.3 APD を用いた γ 線測定 (2 回目)

7.1 節の結果は、CsI(Tl)+PIN による γ 線測定では、整形増幅器の時定数を大きくすればエネルギー分解能が良くなるというものである。しかも、それは 5.3 節で APD を用いたときに得られた結果 (6.4% @662keV) を上回った。時定数が $2\mu\text{s}$ で測定したときには、APD を用いたときの分解能が PIN PD を用いたときのそれを上回っていたので、我々は APD で測定した場合にも整形増幅器の時定数を変えればより良いエネルギー分解能が得られるのではないかと考えた。

蛍光減衰時間が 1000ns と長い CsI(Tl) だけでなく、25ns と短い LaBr₃(Ce) でも同様の実験を行う。

CsI(Tl)+APD と LaBr(Ce)+APD による γ 線測定

測定と結果

CsI(Tl)、LaBr₃(Ce) と APD を組み合わせて γ 線の測定を行う。

時間の都合上、測定できたのは時定数が 2、 $10\mu\text{s}$ のときだけである。APD にかかるバイアス電圧は 400V に設定した。CsI(Tl) を用いたとき、整形増幅器のゲインは時定数が $2\mu\text{s}$ のとき 4.2、 $10\mu\text{s}$ のとき 3.4 に設定して測定した。LaBr₃(Ce) を用いたときは、いずれの時定数の場合も整形増幅器のゲインを 5 に設定して測定した。気温はすべての測定の際 $20.0 \pm 1^\circ\text{C}$ であった。また、122keV (^{57}Co) 以上のエネルギーを扱った。

時定数が $2\mu\text{s}$ の場合の測定は 5.3 節でも行ったが、シンチレータと APD の接着など、前回の実験状況を完全に再現することは不可能である。そこで、今回も比較のため測定することにした。

測定条件が 5.3 節と異なるのは整形増幅器の時定数とゲインのみなので、エネルギー分解能を計算した結果のみを表 7.2、7.3 に示す。

CsI(Tl)+APD の場合には、時定数が $10\mu\text{s}$ のときの方が分解能が良くなる傾向にあることが見て取れるが、CsI(Tl)+PIN のときほど改善されなかった。LaBr₃(Ce)+APD の場合には時定数が $10\mu\text{s}$ の時の方が分解能が悪くなり、¹³³Ba の 276keV と 303keV の分離も出来なくなった。

表 7.2: CsI(Tl)+APD で測定したときのエネルギー分解能

γ 線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)	
		時定数 = $2\mu\text{s}$	時定数 = $10\mu\text{s}$
⁵⁷ Co	122	13.4 (0.25)	16.4 (0.23)
¹³³ Ba	356	8.8 (0.17)	8.2 (0.15)
²² Na	511		7.1 (0.07)
¹³⁷ Cs	662	6.8 (0.07)	6.3 (0.06)
⁶⁰ Co	1173	4.9 (0.08)	4.6 (0.05)
²² Na	1275		4.8 (0.06)
⁶⁰ Co	1333	5.1 (0.06)	4.6 (0.04)

括弧内の数値はフィッティングエラー、気温は $20.0\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

時間の都合で時定数が $2\mu\text{s}$ のばあいには ²²Na の測定は行わなかった

表 7.3: LaBr₃(Ce)+APD で測定したときのエネルギー分解能

γ 線源	エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (% FWHM)	
		時定数 = $2\mu\text{s}$	時定数 = $10\mu\text{s}$
⁵⁷ Co	122	12.1 (1.97)	23.7 (0.57)
¹³³ Ba	276	6.7 (0.21)	
	303	6.6 (0.08)	
	356	5.9 (0.03)	8.2 (0.41)
²² Na	511	4.7 (0.01)	6.8 (0.02)
¹³⁷ Cs	662	4.0 (0.02)	5.4 (0.03)
⁶⁰ Co	1173	2.8 (0.02)	3.4 (0.03)
²² Na	1275	2.9 (0.02)	3.5 (0.02)
⁶⁰ Co	1333	2.7 (0.01)	3.3 (0.02)

括弧内の数値はフィッティングエラー、気温は $20.0\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

考察

CsI(Tl)+APD の測定で、時定数を $10\mu\text{s}$ にしたときの方が $2\mu\text{s}$ にしたときよりも分解能が良くなったのは、7.2 節の考察と同様、CsI(Tl) の蛍光減衰時間が長いからである。

一方、LaBr₃(Ce)+APD の測定では逆の結果が得られた。これは、LaBr₃(Ce) の蛍光減衰時間が 25ns と短いにもかかわらず、時定数を必要以上に長くにとって、パルスの立ち上がり部分よりも不安定な減衰部分の影響が大きくなってしまったためと考えられる。

プリアンプを通した後のパルスをオシロスコープ（テクトロニクス、TDS 2024）で取り込んだ波形を下図 7.6 に示す。LaBr₃(Ce) の場合のパルスの立ち上がり時間が短いことが見て取れる。

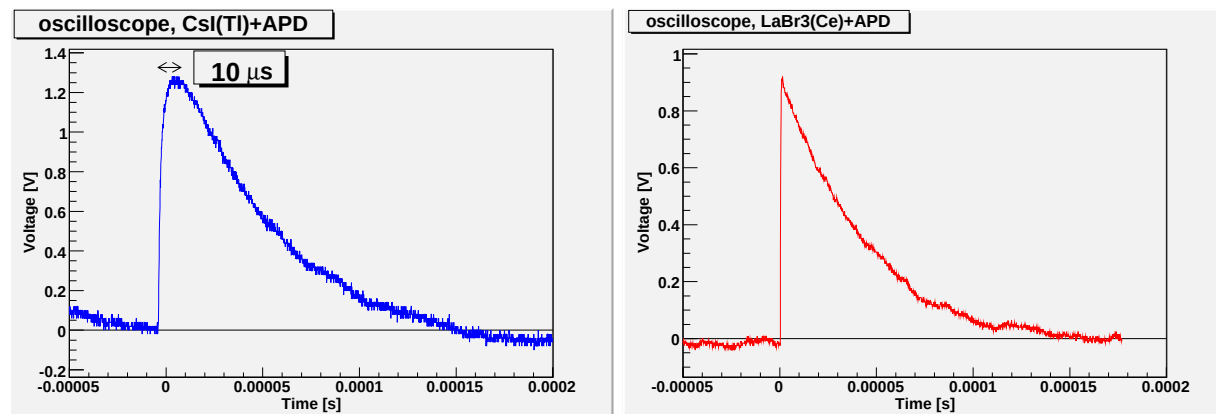


図 7.6: CsI(Tl)+APD（左）及び LaBr₃(Ce)+APD（右）で 662keV の γ 線を測定したときの、プリアンプを通した後の波形

第8章 全体のまとめ

まとめ

我々の主な目的はシンチレータを用いて γ 線の検出を行い、エネルギー分解能を求めることであったので、エネルギー分解能についてまとめておく。

今回使用した無機シンチレータの中で最も優れたエネルギー分解能を得られたのは $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ である。光電面がスーパーバイアルカリである光電子増倍管では2.9% (@662keV、5.2節)、APDでは4.0% (@662keV、5.3節)というエネルギー分解能が得られ、他の無機シンチレータを圧倒した。

さらに、単純に量子効率が大きくなればエネルギー分解能が改善されるわけではないことがわかった。実際、APDの方が量子効率が大きいのに、光電子増倍管の場合よりもエネルギー分解能が良くなったのは $\text{CsI}(\text{Tl})$ のみであった(5.4節)。この原因は、APDを用いたときのほうが回路ノイズの影響が大きくなるためだと思われるが、より詳しい議論は今後の課題である。

また、第7章では、PIN フォトダイオードを含む測定装置に静電遮蔽を施したり、読み出し回路中の整形増幅器の時定数を変えることで大きくエネルギー分解能が変わることを見た。用いるシンチレータの性質によって装置のセットアップを工夫することが重要である。

次に、MPPCであるが、この検出器に関しては多くの課題を残した(5.5節)。我々の実験では、 $\text{GSO}(\text{Ce})$ と組み合わせたときに、一応12.0%(@662keV)というエネルギー分解能が得られたが、光電面がバイアルカリである光電子増倍管を用いたときに得られた8.1%に比べるとかなり悪い。測定装置(特に、高圧電源と自作した読み出し回路)を工夫すれば出力の不安定さもなくなり、エネルギー分解能が改善されるかもしれないが、それは今後の課題である。

反省

我々の測定したエネルギー分解能等の誤差はガウス関数などでのフィッティングエラーだけである。本来ならば、同じシンチレータ、同じ検出器、同じ測定条件で何度か測定してみて系統誤差に関しても考慮すべきであったが、時間がそれを許さず、明らかな失敗と思われる測定以外は、各組み合わせに対して一回のみしか測定出来なかった。このような事態になってしまったのは、こまめに実験結果の解析をせず、問題の発見が遅れてしまったためである。実験の度に結果や問題点をまとめていき、次の実験に活かしていくことの重要性を知った。

実験は主に大家、坂下が二人で行ったがレポートは分担して執筆したので、最後に担当者を挙げておく。3.2、3.3、5.2、5.4、5.5は坂下が担当し、それ以外は大家が担当した。

謝辞

今回の課題研究にあたって、多くの方にお世話になりました。皆さんに感謝します。担当教官である窪助教からはやりがいのある実験テーマををいただき、おかげで充実した日々を過ごせました。内山さんは何度も γ 線源を貸してくれたり、実験環境を整えてくれたりしました。黒澤さんは、ご自分の研究が忙しいにもかかわらず、実験器具の手配から測定方法の指示、発表会の準備など、あらゆることに関して面倒を見てくれました。さらに、実験に対する心構えも学ばせてもらいました。他の宇宙線研究室の方々も快く僕たちの頼みを聞いてくれて、滞りなく実験を進められました。

また、他のP6メンバーである小林君、芝原君、福岡君、劉君にも感謝したいと思います。時には冗談を言い合い、時には物理に関して真剣に話し合いました。皆さんとの思い出を忘れることはないでしょう。

最後に、学生生活を支えてくれた両親に感謝します。

関連図書

- [1] 浜松ホトニクス株式会社のホームページ (<http://jp.hamamatsu.com>) 及び公開資料
- [2] 加藤貞幸 「放射線統計」 新物理学シリーズ 26 (培風館、1994)
- [3] ニコラス、ツルファニディス著 阪井英次訳 「放射線計測の理論と演習」 (現代工学社、1986)
- [4] 西村広典 修士論文「シンチレータを用いた位置敏感方 γ 線スペクトロメータの開発」 (2006)
- [5] 中本達也 「高阻止脳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」 (2002)
- [6] 柳田健之 修士論文「多結晶シンチレータとアバランシェフォトダイオードをもちいた宇宙 γ 線検出器の基礎実験」 (2004)
- [7] 五味慎一 修士論文「半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築」 (2008)