

アレイ型ガイガー APD を用いた X 線天文衛星搭載アクティブ  
シールド用 BGO の光読み出しの試み

宇井 崇紘

広島大学理学部物理科学科

B072536

高エネルギー宇宙・可視赤外線天文研究室

主査:深澤泰司 副査:鈴木孝至

2011 年 02 月 10 日

## 概要

2014年打ち上げ予定の、X線天文衛星 ASTRO-H は、硬X線から軟 X線領域において、非熱的なエネルギーの粒子を観測するために、硬X線検出器(HXI)と軟 X線検出器(SGD)の周りに、BGOアクティブシールドを置くことにより、大幅なバックグラウンド除去を目指している。すざくの硬X線検出器(HXD)に用いられている、BGOアクティブシールドの光読み出し素子、PMT(光電子増倍管)に変わり、ASTRO-HではAPD(アヴァランシェフォトダイオード)が用いられる予定である。PMTからAPDに変わることで、小型化、軽量化することができ、さらにはPMTと比べて消費電力が、半分以下に下がるといったメリットがある。しかしながら、APDには、PMTほどの増倍率がなくBGOが発光量が少ないために、いかに効率よくAPDで読みだすことができるかが問題となっている。さらに、APDは暗電流などによるノイズの起因も大きいために、そのノイズとのかね合いで低エネルギー側の、BGOアクティブシールドのアンチコインシデンスのスレッシュホルドが決まる。そこで、今実験では、ASTRO-HでBGOアクティブシールドの読みだし素子の候補に挙げた、MPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter)を用いて、主に低エネルギー側のスレッシュホルドについて、議論していく。MPPCはAPDがマルチピクセル化されているもので、ガイガーモード状態で用いることにより、PMTと同程度のゲインが得られる。それにより、1フォトンや2フォトンといった少ない光量でも読みだすことができる。しかしながら、ピクセルの数までしかフォトンが読みだせないといった点や、暗電流に起因して励起されるフォトンも信号として読みだしてしまい、それがノイズとなってしまうという点もある。そこで電圧や温度を変えながら測定していくことで、低エネルギー側のスレッシュホルドがどれだけ落とせるかを、実験し、PMTやAPDと比較していった。

# 目次

第1章	研究目的	6
第2章	宇宙硬 X 線・軟ガンマ線検出に用いるアクティブシールド	7
2.1	アクティブシールドによるバックグラウンドの除去	7
2.2	アクティブシールドの例:すざく衛星搭載 HXD	7
2.3	結晶シンチレータ BGO	8
2.4	光センサー (PMT,PD,APD,MPPC)	10
2.4.1	光電子増倍管 (PMT)	10
2.4.2	フォトダイオード (PD)	11
2.4.3	アバランシェフォトダイオード (APD)	13
2.4.4	MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)	14
2.4.5	本研究の目的	15
第3章	BGO シンチレータと光センサー PD,APD による測定	16
3.1	実験の目的	16
3.1.1	結晶シンチレータと半導体検出器 PD,APD によるエネルギー分解能とエネルギーレスショルド	18
3.1.2	PD の基礎特性実験	19
3.1.3	PD の容量の測定	19
3.1.4	PD の暗電流の測定	20
3.1.5	プリアンプ MODEL5551 の容量性ノイズの測定	21
3.1.6	PD+BGO による 線の読み出し測定	22
3.1.7	BGO の発光量の測定	24
3.1.8	結論	26
3.2	APD と BGO を用いた測定	26
3.2.1	実験の目的	26
3.2.2	APD の基礎特性	26
3.2.3	APD+BGO の 線測定	28
3.2.4	考察と結論	29
第4章	MPPC(3600pixel) による無機結晶シンチレータ BGO の光読みだしと特性評価	30
4.1	MPPC の基礎特性	30

4.1.1	暗電流測定 . . . . .	31
4.1.2	端子間容量測定 . . . . .	32
4.1.3	ゲイン測定 . . . . .	32
4.2	MPPCによるBGOの光読みだし測定 . . . . .	33
4.2.1	シェーピングアンプ依存性 . . . . .	33
4.2.2	バイアス電圧依存性 . . . . .	35
4.2.3	色々な線源に対する応答 . . . . .	38
4.3	PD,APD,MPPCとの比較 . . . . .	41
4.3.1	MPPC25 $\mu$ m pixel と MPPC100 $\mu$ m pixel . . . . .	44
<b>第5章 まとめと今後</b>		<b>47</b>

# 目 次

2.1	すざく HXD の観測例 [3]	8
2.2	無機シンチレーションの原理 [1]	9
2.3	主なシンチレータの感度波長スペクトル	9
2.4	光電子増倍管 (PMT) の主な仕様	11
2.5	PMT における量子効率とスペクトル感度	11
2.6	PD の動作の原理	12
2.7	PD の波長別受光感度	12
2.8	APD の増倍の原理	13
2.9	APD の波長別受光感度 [2]	13
2.10	MPPC の等価回路	14
2.11	MPPC 増倍率-電圧のグラフ [2] (1mm × 1mm:ピクセルサイズ 50 μ m)	15
2.12	MPPC を用いてフォトンを読み出したスペクトル [2](1mm × 1mm:ピクセルサイ ズ 25 μ m)	15
3.1	PD の等価雑音回路	16
3.2	APD の等価雑音回路	17
3.3	Pin フォトダイオード	19
3.4	容量測定のセットアップ	20
3.5	バイアス電圧 vs 容量	20
3.6	暗電流の測定系	21
3.7	常温 (20 ) の暗電流 vs バイアス電圧	21
3.8	低温 (-30 ) の暗電流 vs バイアス電圧	21
3.9	容量測定のセットアップ	22
3.10	容量によるエネルギー分解能	22
3.11	PD+BGO による 線実験の測定系	23
3.12	常温 (20 ) での PD+BGO による スペクトル $^{137}\text{Cs}$ (黒) と $^{22}\text{Na}$ (赤)	23
3.13	低温 (-30 ) での PD+BGO による スペクトル $^{137}\text{Cs}$ (黒) と $^{22}\text{Na}$ (赤)	23
3.14	PD+BGO の CH-keV の対応	24
3.15	PD+BGO のエネルギー分解能	24

3.16 PD による $^{241}\text{Am}$ 59.5keV のスペクトル . . . . .	25
3.17 PD による $^{56}\text{Ba}$ 81keV のスペクトル . . . . .	25
3.18 PD の CH-keV の対応 . . . . .	25
3.19 APD のバイアス電圧 vs 容量 . . . . .	27
3.20 常温 (20 ) での APD の 暗電流 vs バイアス電圧 . . . . .	27
3.21 低温 (-30 ) での APD の 暗電流 vs バイアス電圧 . . . . .	27
3.22 ゲイン測定のセットアップ図 . . . . .	27
3.23 常温 (20 ) での APD のゲイン . . . . .	28
3.24 低温 (-30 ) での APD のゲイン . . . . .	28
3.25 常温 (20 ) での APD+BGO による線源のスペクトル . . . . .	28
3.26 低温 (-30 ) での APD+BGO による線源のスペクトル . . . . .	28
3.27 常温 (20 ) でのエネルギー分解能 . . . . .	29
3.28 低温 (-30 ) でのエネルギー分解能 . . . . .	29
4.1 常温 (20 ) の暗電流 vs バイアス電圧 . . . . .	31
4.2 低温 (-30 ) の暗電流 vs バイアス電圧 . . . . .	31
4.3 MPPC の端子間容量 . . . . .	32
4.4 常温 (20 ) の暗電流 vs バイアス電圧 . . . . .	32
4.5 低温 (-30 ) の暗電流 vs バイアス電圧 . . . . .	32
4.6 MPPC からプリアンプへの接続回路 . . . . .	33
4.7 Cs によるシェイピングタイム依存性 . . . . .	34
4.8 Cs662keV におけるエネルギー分解能のシェイピングタイム依存性 . . . . .	34
4.9 Cs662keV における温度と電圧の変化。左から-30 、 -20 、 -10 、 0 。上から 67V,67.5V,68V,68.5V,69V,69.5V,70V,70.5V,71V,71.5V,72V . . . . .	36
4.10 温度別による HV の依存性 . . . . .	37
4.11 MPPC と BGO による線源の読み出し。 . . . . .	38
4.12 図 4.11 の拡大図 . . . . .	38
4.13 MPPC のリニアリティ . . . . .	39
4.14 パルサーの電圧と MPPC の出力電圧 . . . . .	40
4.15 MPPC と BGO のエネルギー分解能 . . . . .	40
4.16 1photon,2photon のエネルギー分解能 . . . . .	41
4.17 PD と BGO による Cs662keV のスペクトル (横軸チャンネル) . . . . .	42
4.18 APD と BGO による Cs662keV のスペクトル (横軸チャンネル) . . . . .	42
4.19 APD と BGO による Am59.5keV のスペクトル (ShapingGain500) . . . . .	42
4.20 MPPC と BGO による Am59.5keV のスペクトル (ShapingGain20) . . . . .	42
4.21 APD,MPPC のエネルギー分解能 . . . . .	43

4.22	MPPC( $25\mu\text{m}$ , $50\mu\text{m}$ , $100\mu\text{m}$ のピクセルサイズ) のゲイン . . . . .	44
4.23	MPPC( $25\mu\text{m}$ ピクセル) によるスペクトル . . . . .	45
4.24	MPPC( $100\mu\text{m}$ ピクセル) によるスペクトル . . . . .	45
4.25	MPPC( $25\mu\text{m}$ ピクセル) のリニアリティ . . . . .	46
4.26	MPPC( $100\mu\text{m}$ ピクセル) のリニアリティ . . . . .	46

# 第1章 研究目的

現在、宇宙で起こる現象は高エネルギー粒子が大きく関与するものが多くみられており、その現象は電波、赤外、可視、紫外、X線、 $\gamma$ 線など、いろいろな波長帯域で観測されている。しかしながら、粒子が電荷をもっている場合には、宇宙に存在する磁場の影響により曲げられて、位置情報などを失ってしまう。電荷をもっていない放射であるX線や $\gamma$ 線を観測することができれば、その位置情報などは、宇宙で曲げられることなく、実際の天体からの、高エネルギー現象を観測することができる。しかし、このX線、 $\gamma$ 線の波長帯域は、大気と反応してしまう為に地上で観測することが難しい。そこで、検出器を人工衛星に搭載し、宇宙で観測することで大気の影響を受けずに観測することができる。しかしながら、宇宙に打ち上げるためには、検出器の小型化、軽量化、耐久性など地上と比べて厳しい条件が課せられる。さらに、宇宙では四方八方から様々な天体からの放射や宇宙線などのバックグラウンドも考慮しなければならない。ほしい天体からの高エネルギー現象を観測するためにも、徹底的なバックグラウンドの除去が必要となってくる。次期2013年度に打ち上げ予定のAstro-Hに搭載される軟 $\gamma$ 線検出器(SGD)は10-600keVに優れた感度を持つので、その領域でバックグラウンドをよりよく除去することが要求されている。SGDはすざくのHXDに搭載されていたBGOシンチレータを用いたアクティブシールドで検出器の周りを囲むことで、狭視野にして観たい天体のみの放射を観測できるようにし、さらにBGOアクティブシールドの反同時計数(アンチコインシデンス)をとることでバックグラウンドを落とし、さらに狭視野コンプトンカメラを用いて、今打ち上がっているX線天文衛星”すざく”に搭載されている硬X線検出器(HXD)よりも、1桁も感度の良い観測を目指している。すざくに搭載されているHXD検出器のBGOアクティブシールドの光センサーが光電子増倍管(PMT)であるのに対し、Astro-Hでは光センサーがアバランシェフォトダイオード(APD)へ変更される予定で、軽量化、低電力、が実現される。さらには量子効率がPMTよりも良いことから、エネルギー分解能の向上、アンチコインシデンスのスレッシュホルドの低エネルギー化も期待される。これが達成されることで、今まで十分な観測ができていなかった10 keV ~ MeV領域の非熱的放射が精度よく観測できるようになり、宇宙での高エネルギー現象が今まで以上に詳細に理解できるようになることが期待される。しかしながら、大きなBGOを用いた場合はAPDで読み出したときのスレッシュホルドは40keV程度とPMTと同じくらいとなっている。さらに低エネルギーまでスレッシュホルドを下げられると、より効率よくバックグラウンドを除去できる。今回はMPPCという新しいタイプの光センサーを用いてBGOの光を読みだし、より低エネルギー側までスレッシュホルドが下げられるかどうかを調べた。



## 第2章 宇宙硬 X 線・軟ガンマ線検出に用いるアクティブシールド

Astro-H ではバックグラウンドの除去のために、硬 X 線・軟 γ 線検出器の周りを無機シンチレータである BGO で覆っている。これは BGO の Z が大きく密度も高いので、放射線阻止能力が高く視野外から入ってくる低エネルギーの放射線は、BGO で止めることができる。さらに BGO シンチレータの性質を利用して様々なバックグラウンドを検出し除去できることになる。

### 2.1 アクティブシールドによるバックグラウンドの除去

アクティブシールドとは、バックグラウンドを除去するために、主検出器の周りを覆っている高阻止能シンチレータのことである。高阻止能シンチレータを用いることで、様々なバックグラウンドを除去することができる。

まず 1 つに、宇宙空間を飛び回っている宇宙線を除去することができる。宇宙線とは高エネルギーの陽子、原子核、電子などの荷電粒子のことで、低エネルギーの粒子は BGO で止めることができ、高エネルギー粒子は、BGO を通過し主検出部まで入り込むが、BGO で反応したときのシンチレーション光を読み出すことで、BGO を通過してしまった放射線を観測し、反同時計数により、バックグラウンドとして除去することができる。

2 つ目に視野外からの X 線、γ 線のシールドである。X 線や γ 線は荷電粒子に比べて透過力が強く、高いエネルギーの X 線、γ 線は BGO でも止めることができない。BGO でコンプトン散乱した粒子を反同時計数をして、バックグラウンドを除去することができる。

最後に、検出器材の放射化によるバックグラウンドの除去で、これは検出器材に宇宙線陽子があたることによって、放射性同位体が作られ、その放射性同位体が崩壊する際に放出する放射線がバックグラウンドとなる。これは先の 2 つと違い、検出器自体がバックグラウンドになるもので、内部からの放射である。ただのパッシブシールドであれば、内部で発生するバックグラウンドは除去することができないが、アクティブシールドなら内部で作られた放射線の一部が検出器に信号を落とすと同時に、一部が外部に出る際に BGO シンチレータで反応する。その BGO との反同時計数をとることで内部からのバックグラウンドも除去することができる。

### 2.2 アクティブシールドの例:すざく衛星搭載 HXD

現在打ち上がっている衛星では X 線天文衛星すざくにアクティブシールドが搭載されている。すざくの硬 X 線検出器 HXD は BGO アクティブシールドで囲まれており、井戸型アクティブシールド

ルドとも呼ばれている。これは、シンチレーションの光センサーとして光電子増倍管 (PMT) が用いられている。光電子増倍管は受光面が大きく BGO の光量の損失が少ない、さらにノイズに強いといった長所がある。一方、PMT は光電子に変換する量子効率 $\sim 20\%$ 程度と低く、また受光面からダイノードにたどり着くまでに磁場の影響を受けてしまう。さらにゲインをあげるために 1000V 以上の高圧をかけなければならないといった短所もある。しかしながら、このアクティブシールドのおかげで、硬 X 線検出器の HXD では 10keV から 300keV の領域で、世界最高感度の測定が可能となった。

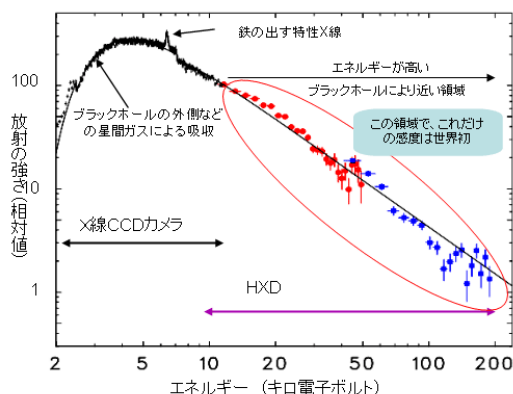


図 2.1: すざく HXD の観測例 [3]

## 2.3 結晶シンチレータ BGO

結晶シンチレータは放射線を吸収した時に、その放射線のエネルギーに比例した蛍光を出す。その結晶シンチレータから放出された光をシンチレーション光とよび、その光量を測定することで、放射線のエネルギーがわかる。結晶シンチレータは様々なものが存在する。今回は、X 線や  $\gamma$  線の検出に用いられる無機シンチレータを記述する。X 線や  $\gamma$  線は非常に透過力が強く、衛星に搭載する検出器としては比較的小型化するために、小さくても阻止能の高いもの、さらに X 線や  $\gamma$  線からシンチレーション光への変換効率の良いもの、また発光したものが光センサーに到達しやすいように、透明であるものなどが求められる。そのため、Z の小さい有機結晶シンチレータは X 線や  $\gamma$  線の検出器であまり用いられることがなく、主に無機結晶シンチレータが用いられる。無機結晶シンチレータのシンチレーション機構は結晶格子で決まるエネルギー状態に依存する。電子は結晶内では決まったエネルギー準位しかとれず、電子が格子に束縛されている価電子帯、さらに電子が結晶内を自由に動き回れる伝導帯さらに、その間の電子が存在することのできないエネルギーを禁制帯といい、その禁制帯を飛び越して、伝導帯から価電子帯へエネルギーが落ちるときに、そのエネルギー分のエネルギーを持った光子が放出される。それがシンチレーション光で、伝導帯と価電子帯とのエネルギー差は大きいために、光子が可視光では放出されずこの遷移の起こる確率も小さい。そのため、実際のシンチレータには結晶中に少量の活性化物質というものを混

入する。活性化物質は、結晶中の禁制帯に活性化物質のエネルギー帯を作り、そのエネルギー状態から、基底状態に落ちる過程はエネルギーが小さく可視領域の光子となり、放出確率も増加する。

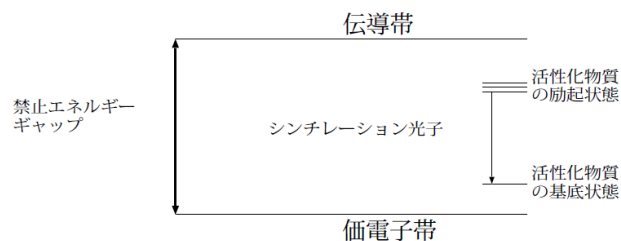


図 2.2: 無機シンチレーションの原理 [1]

ここで、市販されているシンチレータの特性について記す。

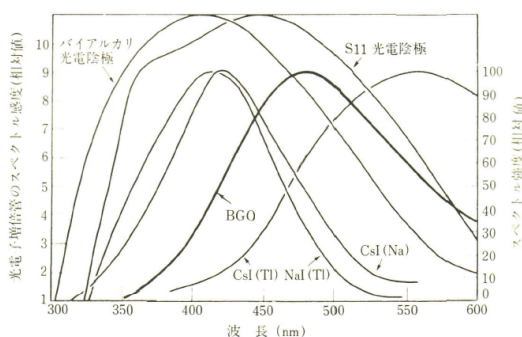


図 2.3: 主なシンチレータの感度波長スペクトル

	比重	最高放出波長 (nm)	屈折率	絶対光収率 (光子/MeV)
NaI(Tl) <sup>a)</sup>	3.67	415	1.85	38000
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	65000
CsI(Na)	4.51	420	1.84	39000
BGO	7.13	480	2.15	8200
GSO	6.71	440	1.80	9000

<sup>a)</sup> 活性化物質

表 2.1: 主な無機シンチレータの特性 [1]

Astro-H では BGO( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) という無機結晶シンチレータがアクティブシールドとして用いられる。BGO は多くの無機結晶シンチレータとは異なり純粋な結晶で、不純物をいれる必要がなく、活性化物質の代わりに結晶の主成分である  $\text{Bi}^{3+}$  イオンの光学的遷移を伴っている。 $\text{Bi}^{3+}$  の光吸収スペクトルと放出スペクトルの間には大きなシフトが存在するため、シンチレーション光の自己吸収は少ししか起こらず、結晶は蛍光に対して透明である。[1] また、原子番号が大きく  $\text{Bi}(83)$ 、

密度が高い ( $7.13\text{g/cm}^3$ ) ので単位体積あたりの線の光電吸収確率は市販されている無機シンチレータの中でもトップレベルの値を示す。さらには NaI(Tl) などの吸湿性をともなったシンチレータよりも頑丈で、宇宙で用いる点で非常に有利である。しかしながら、光量の点では、NaI(Tl) と比較して 10 ~ 20 % 程度と低い。

## 2.4 光センサー (PMT,PD,APD,MPPC)

ここではシンチレーション光の読みだし光センサーについて記述していく。光センサーとは、光信号を我々が認識しやすいように電気信号に変換して読み出すことのできるセンサーである。微弱なシンチレーション光を読み出すためにその原理や特性は様々で、それぞれにメリットやデメリットが存在する。ここで簡単に、これから述べていく PMT,PD,APD,MPPC についての特徴を記述する。

	大きさ	動作電圧	ゲイン	量子効率 (%)
光電子増倍管 (PMT)	10mm ~ 760mm	800V ~ 1800V	$10^5 \sim 10^8$	20 ~ 30
フォトダイオード (PD)	0.1mm ~ 30mm	~ 100V	1	~ 80
アヴァランシェフォトダイオード (APD)	0.04mm ~ 10mm	~ 400V	1 ~ 100	~ 80
MPPC(multi-pixel photon counter)	1mm ~ 3mm	~ 80V	$10^5 \sim 10^6$	~ 80

表 2.2: 各光センサーの主な仕様

### 2.4.1 光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管はまず、入射光が光電陰極で光電効果を起こし電子を発生させる。その発生した電子が、印加されている電圧により加速され、ダイノードと呼ばれる電極表面に衝突する。ダイノードに衝突すると、そこでもさらに光電効果を起こし 2 次電子放出現象を起こす。それをどんどん繰り返していき、最後陽極に入るときには最初の光子の何倍にも増幅された信号が出力される。その増倍率はおよそ  $10^5 \sim 10^8$  程度と非常に高いが、そのゲインを得るために 1000V 程度の電圧を印加しなければならない。また最初に光電効果を起こすのに必要なエネルギーというのが金属表面の電位障壁であり約 3 ~ 4eV なので、PMT の感度のある入射光子の波長は紫外領域から可視領域にかけてとなる。

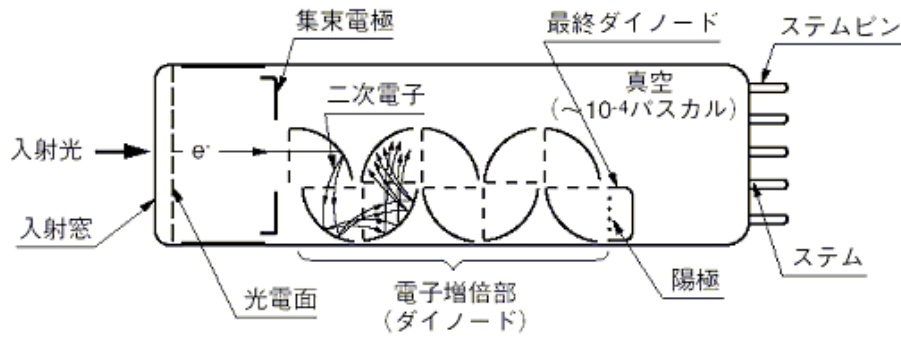


図 2.4: 光電子増倍管 (PMT) の主な仕様

それに付随して、自発的電子放出というものがあり、熱振動により金属表面の電位障壁をこえるエネルギーを持つ光子が存在すると、自発的に表面から離脱しそれが信号として検出されることでノイズとなる。金属表面の電位障壁は半導体などと比べると高く、自発的電子放出が少ないのでノイズに強い光センサーとして知られている。しかしその高い電位障壁のせいで入射光子から電子に変換する確率である量子効率が 20 ~ 30 % と低くなる。また、受光面が大きいのでシンチレーション光のロスが少ないが、電子の走る距離が長いために磁場の影響を受けるといったデメリットもある。

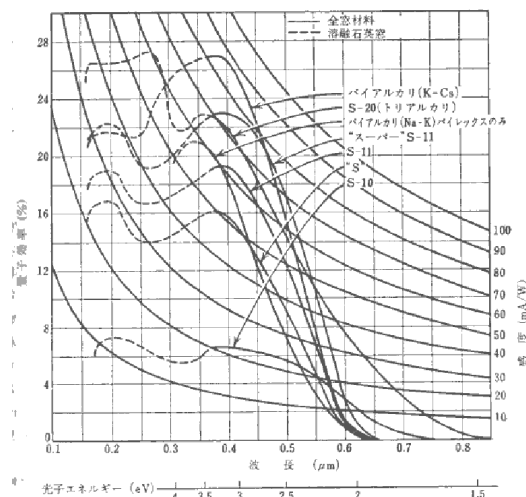


図 2.5: PMT における量子効率とスペクトル感度

量子効率とスペクトル感度の図 [1]

## 2.4.2 フォトダイオード (PD)

フォトダイオードとは半導体光センサーのことで、半導体を用いることでより良い量子効率を得ることができる。ここでは半導体 Si を用いたダイオード、Si フォトダイオードについて述べて

いく。Si フォトダイオードは、p 型半導体と n 型半導体を結合させているもので、受光面の p 型領域と n 型領域があり、入射した光が Si のバンドギャップエネルギーよりも大きいときには価電子帯の電子が伝導帯に励起する。

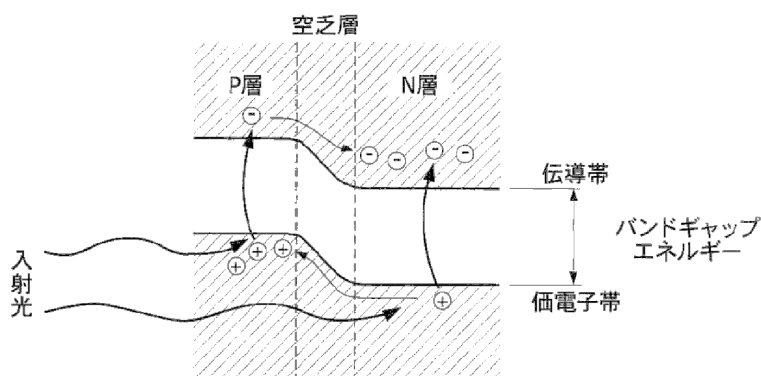


図 2.6: PD の動作の原理

その時に、価電子帯に正孔を作り逆電圧が印加されている場合には、電子 n 層に、正孔は p 層に移動することで電流が流れる。半導体のエネルギーギャップは約 1eV なので、量子効率は 80 % と高くなる。しかしながら自発的電子放出によるノイズが大きくなる。その他に、小型なので PMT と比べて軽量化し、さらに磁場の影響を受けず頑丈な検出器だが、大型化することが難しく、受光面が小さいためにシンチレーション光の検出効率は低くなってしまふ。また電子の増倍機能がないために、光量が少ない場合にはノイズの影響により読み取ることが難しくなる。

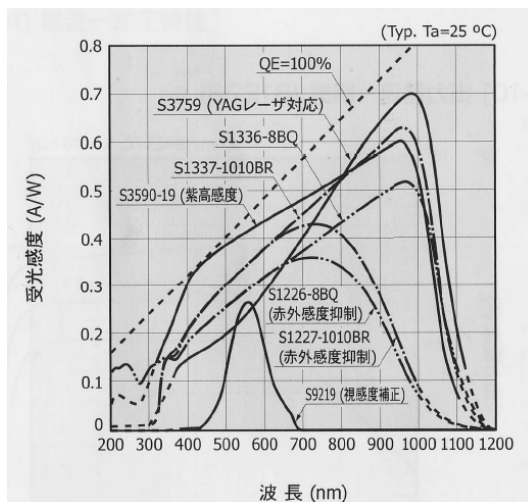


図 2.7: PD の波長別受光感度

### 2.4.3 アバランシェフォトダイオード (APD)

APD の動作原理は Si フォトダイオードと同じであるが、新たにアバランシェ領域というものが付随しており、入射してきた光子を内部増幅することができる。アバランシェ領域による増倍の原理は、PD のとき以上に逆電圧を印加することで電子ホール対生成が起こったときに、電子は n 層、ホールは p 層へ向かって加速していく。結晶内部の空乏層で加速された電子が、アバランシェ領域にある格子にぶつかりさらにホール電子対生成を起こす。その電子ホール対生成が起こったものがまた、格子にぶつかり... というように雪崩増幅を起こして増倍されるというものである。

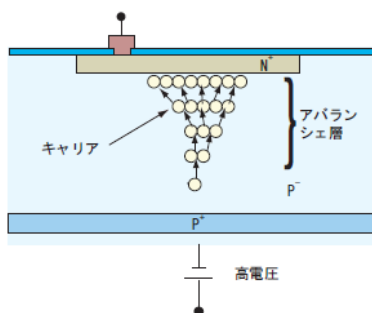


図 2.8: APD の増倍の原理

その増倍率は  $10 \sim 10^2$  で PMT ほどではないものの、低電圧で動作させることができるため (数百 V)、消費電力を落とすことができ、エネルギー分解能も良いので低エネルギーの X 線 線まで測定することができる。しかしながら、自発的電子放出をして反応したのも雪崩増幅を起こしてしまうことでノイズの原因となる。PD もそうであったが、小型であるために、シンチレーション光の検出効率が下がるが、磁場の影響を受けないといったメリットもある。

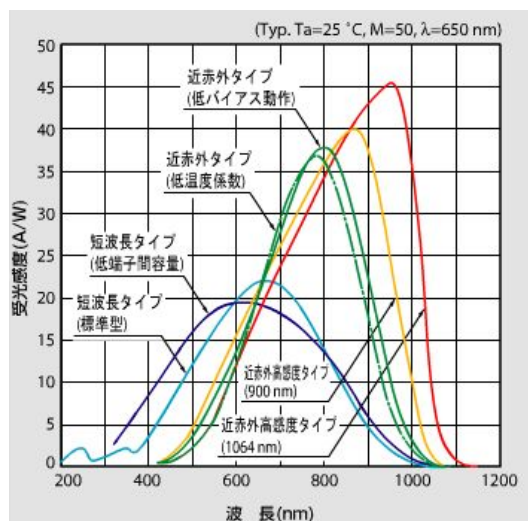


図 2.9: APD の波長別受光感度 [2]

#### 2.4.4 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)

MPPC は本研究でも用いる光センサーであり最近になって出回ようになってきたものである。MPPC は APD をマルチピクセル化したもので、APD に降伏電圧以上の電圧をかけた場合の、ガイガーモードという状態で用いる。APD をマルチピクセル化したときの等価回路を示すと

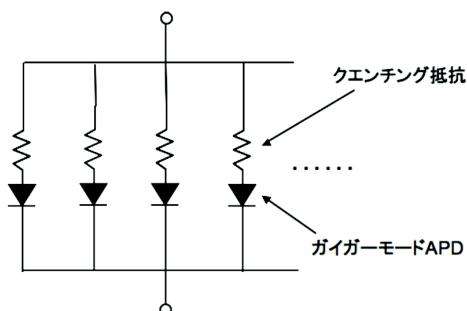


図 2.10: MPPC の等価回路

ガイガーモードの APD がクエンチング抵抗に直列につながれており、その 1 つ 1 つが並列に並べられている。これにより、MPPC からの出力電流は APD の出力電荷の足し合わせとして出てくる。また APD は降伏電圧以上かけると、その内部増幅機能により電流が流れっぱなしの状態となる。しかし、このクエンチング抵抗を直列につなぐことで、電流がクエンチング抵抗を流れて電圧降下がおこり、APD の端子間電圧が降伏電圧以下になるので電流の暴走を防ぐことができる。

APD のガイガーモード状態では、わずかな光の入射に対しても放電現象が発生するようになり、そのときに出力される電荷量は簡単にあらわせ、ガイガーモードとなる降伏電圧を  $V_0$ 、動作させる電圧を  $V$ 、APD の 1 つの端子間容量を  $C$  とすると、降伏電圧に下がるまで電荷が放出されるので、その電荷量  $Q$  は

$$Q = (V - V_0)C$$

となる。1 フォトンの入射でこの量の電荷が放出されるために、その増倍率は  $10^4 \sim 10^6$  と高い値となる。しかし、このガイガーモード状態にした際の APD は、入ってきたフォトン数によらず一定の値を出力してしまうために、単体の APD であれば使うことができない。それをマルチアレイすることで、一つ一つの APD が光の入射に対して一定の電荷量を出力することを利用し、入射光子数がピクセル数に比べて少ない場合には、一つの APD に複数光子が入る確率は無視できるので、出力される電荷量は、入射光子数に比例する電荷量となる。実際測定するときには、電荷量が測定できるので、そこから何フォトン入射してきたかがわかる。その高い増倍率と、量子効率から PMT と APD の利点をあわせたような光センサーとなっている。印加電力も 100V 未満で、APD よりも少なく、1 フォトンや 2 フォトンといった小さな光量でも読み出し可能である。しかしながら、APD のピクセル数が読み取ることのできる限界のフォトン数を決めることになり、測定できるエネルギーの上限値が決まってしまう。これまで BGO の読み出しに用いられた例はない。



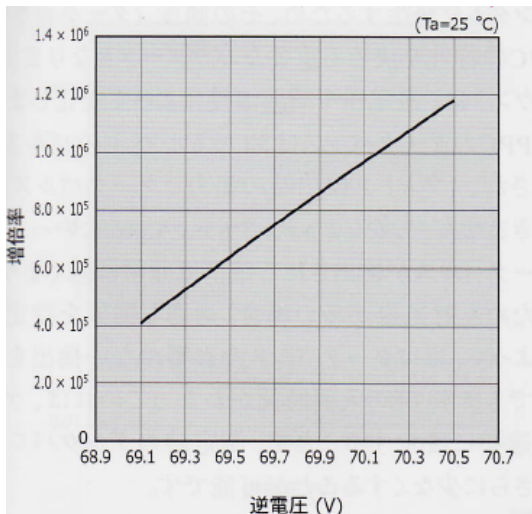


図 2.11: MPPC 増倍率-電圧のグラフ [2]  
(1mm × 1mm:ピクセルサイズ 50 μ m)

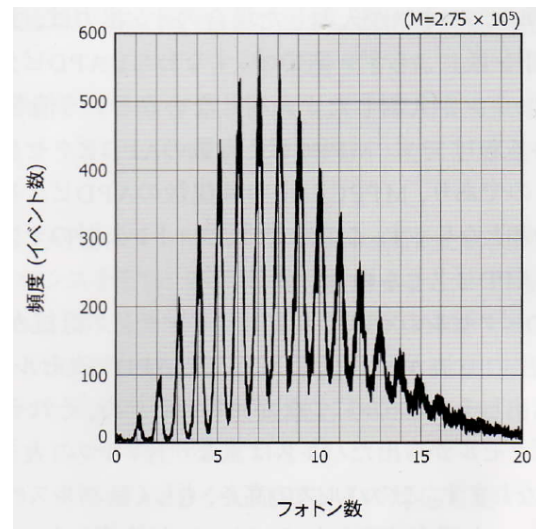


図 2.12: MPPC を用いてフォトンを読み出した  
スペクトル [2](1mm × 1mm:ピクセルサイズ 25  
μ m)

#### 2.4.5 本研究の目的

本研究では X 線天文衛星に搭載される軟 X 線検出器の、バックグラウンド除去に用いられるアクティブシールド用 BGO シンチレータからの光検出をより効率的にすることを旨とし、新しく出てきた MPPC を用いて初めて実験を行う。実験により、エネルギー分解能やリニアリティを求め、ASTRO-H のアクティブシールドの光センサーである APD に比べてどのような違いが生じるか考察し、それにより、MPPC が APD に代わり得るかということの議論をしていくことが目的である。

# 第3章 BGOシンチレータと光センサー

## PD,APDによる測定

### 3.1 実験の目的

現在アクティブシールドとして用いられているBGOシンチレータを従来使われていた光半導体センサーであるPDとAPDを用いて測定し、MPPCによる実験結果との比較を行うためのデータを取得する。PDとAPDは電子ホール対生成による電荷キャリアの信号を出す。これらの光センサーと初段回路系の作り出すノイズがある。初段回路とはPDやAPDから信号を送るまでの回路で、この回路によって、以下の3つのノイズが考えられる。まず一つ目にPDやAPDの中を流れる暗電流に起因するショットノイズ。二つ目に熱励起によって発生するジョンソンノイズ。最後にパワースペクトルが周波数の逆数、 $1/f$ に比例する特徴をもつ $1/f$ ノイズである。これら全てを考慮した等価雑音回路を内部増幅のないPDの回路を図3.1に内部増幅のあるAPDの等価雑音回路を図3.2に示す。

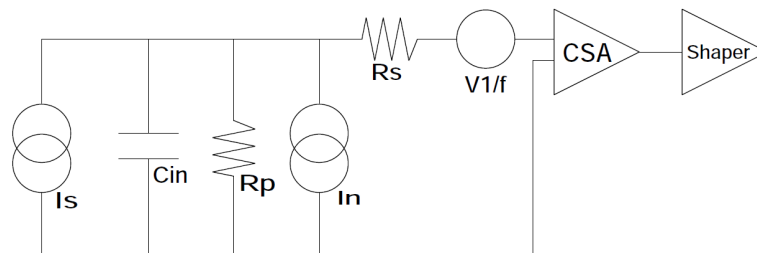


図 3.1: PD の等価雑音回路

ここで  $I_s$  は入射 X 線線による信号電流で、 $C_{in}$  は等価入力容量、 $R_p$  は等価並列抵抗 (帰還抵抗、高圧負荷抵抗)、 $I_n$  は回路全体のリーク電流 (PIN 検出器、CSA の初段 FET (電界効果トランジスタ) のリーク電流)、 $R_s$  等価直列抵抗 ( $\equiv A/g$ ,  $A:0.5 \sim 0.7$  の定数、 $g_m$ :初段 FET の相互コンダクタンス)。

このときの電圧のパワースペクトルは式 (3.1) で表わされる。

$$\frac{\overline{V_{noise}^2}}{df} = \frac{4k_bT}{\omega^2 C_{in}^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2 C_{in}^2} + 4k_B T R_s + \frac{C_{1/f}}{f} \quad [V^2/Hz] \quad (3.1)$$

第一項と三項がジョンソンノイズ、第二項がショットノイズ、第四項が  $1/f_{noise}$  の和を示している。ここで、全項に  $C_{in}^2$  を掛けてやると、等価雑音電荷  $\Delta E_{RMS}^2$  で表わすことができ、その式は

(3.2) であらわせる。

$$\overline{\frac{\Delta E_{RMS}^2}{df}} = \frac{4k_b T}{\omega^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2} + 4k_B T R_s C_{in}^2 + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} \quad [C^2/Hz] \quad (3.2)$$

この式から、ノイズは周波数依存性を持つことがわかる。フィルターを通して処理することで S/N をよくすることができる。例えばガウシアン整形を行った場合は波形整形アンプの時定数  $\tau_s$  を用いて

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} \sim \left( \frac{4k_b T}{R_p} + 2qI_n \right) A_1 \tau_s + 4k_B T R_s C_{in}^2 \frac{A_2}{\tau_s} + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} A_3 \quad [C^2] \quad (3.3)$$

と表せる。 $A_1 \sim A_3$  はフィルター特性で決まる計数であり、理想的なガウス整形の場合  $(A_1, A_2, A_3) = (0.6267, 0.6267, 0)$  である。[5:中本修論] この式において、第二項目の容量性ノイズを使用するプリアンプの容量特性として表すこととし、この単位を等価雑音電荷ではなく半導体検出器のエネルギー分解能 (Si-keV) に換算した場合、 $T=270K$  において第一項は  $R_p$  が [G ] であるので、 $I_n$  が支配的であると考え

$$\text{第一項} \sim (2.355 \times 0.00365)^2 \times 2I_n A_1 \tau_s / e \times 10^{15} \quad [keV^2]$$

と表せる。 $e$  は  $1.6 \times 10^{-19} [C]$  であり、 $I_n [nA]$ ,  $\tau [\mu s]$ ,  $A_1 = 0.63$  とする。さらに第二項はプリアンプの容量特性に置き換えることができるので  $f(C_{in}) [pF]$  とすると、全体としては

$$\overline{\Delta_{FWHM}^2} \sim (\delta_{noise})^2 \sim 0.582 I_n \tau_s + f(C_{in})^2 \quad [keV^2] \quad (3.4)$$

と表せる。次に、APD の場合の等価雑音回路を示す。

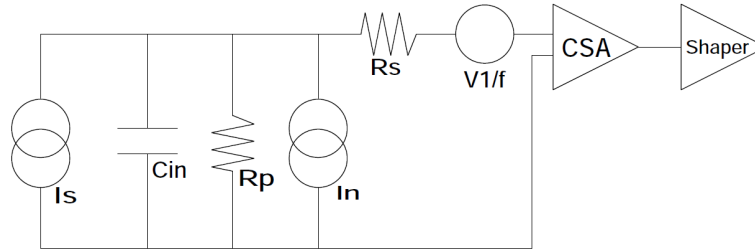


図 3.2: APD の等価雑音回路

内部増幅のために、暗電流を表面で発生し、内部増幅されないものを表面暗電流  $I_{ns}$ 、内部増幅されるバルク暗電流を  $I_{nb}$  とする。 $M$  は内部増幅率で、 $F$  は過剰雑音係数で内部増幅のある場合 2 ~ 3 の値をとる。これらを PD のときの式に応用すると次の式になる。

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} \sim \left( \frac{4k_b T}{R_p} + 2qI_{ns} + I_{nb} F M^2 \right) A_1 \tau_s + 4k_B T R_s C_{in}^2 \frac{A_2}{\tau_s} + \frac{C_{1/f} C_{in}^2}{f} A_3 \quad [C^2] \quad (3.5)$$

この式は先の式と同様に、一項目は  $R_p$  が [G ] であり、さらに  $I_{ns}$  は内部増幅を受けないために、 $I_{nb}$  の項が支配的である。さらに第二項はプリアンプの容量特性に置き換えて、エネルギー分解能に換算した場合には、 $T=270K$  で

$$\overline{\Delta_{FWHM}^2} \sim (\delta_{noise})^2 \sim 0.02339 \times 4\pi^2 I_{nb} F M^2 \tau_s + f(C_{in})^2 \quad [keV^2] \quad (3.6)$$

と書き表わすことができる。この第一項目を電流性ノイズ、第二項を容量性ノイズと呼ぶ。

ノイズを知るためにはPDやAPDの暗電流、そして初段系の容量、さらにAPDにおいてはゲインが必要になってくる。また、この実験に用いるプリアンプの容量特性も重要なパラメータとなる。ここではこれらの測定をまず行う。

### 3.1.1 結晶シンチレータと半導体検出器 PD,APD によるエネルギー分解能とエネルギーレスショルド

半導体検出器は入射放射線のエネルギー分布を測定することで、どのような線源からの放射であるかを観測する。単一のスペクトルをより詳細に観測するためには、エネルギー分解能を良くし、一つ一つのスペクトルをデルタ関数的な分布に近づけることで、その検出器の測定能力は上昇する。このエネルギー分解能はスペクトルのピークエネルギーを  $E_0$ 、そのピークの半分の高さにおける幅(半値幅;full width at half maximum FWHM)を  $\Delta E$  としたとき、 $\Delta E/E_0$  で表わされ無次元量で百分率で用いられる。このエネルギー分解能は、先ほど求めたノイズや、さらには結晶シンチレータ自体の分解能  $\delta_{sc}$ 、さらにシンチレータ光から発生する検出器内での電荷キャリアの揺らぎも含めて次の式で表せる。

$$\left(\frac{\Delta E}{E_0}\right)^2 = (\delta_{sc})^2 + 2.355^2 \cdot \frac{F}{N_{ph}QY} \cdot \frac{1}{E} + \left(\delta_{noise} \cdot \frac{1}{E_g} \cdot \frac{1}{N_{ph}QMY} \cdot \frac{1}{E}\right)^2 \quad (3.7)$$

第一項の結晶シンチレータ自体の分解能は、放射線の結晶へ入る位置によってのシンチレーション効率の不均一性や結晶表面での反射またシンチレーション応答の非直線性などは影響である。第二項目はシンチレーション光から発生する電荷の統計的なゆらぎである。この揺らぎは除去することができないノイズで、限界のエネルギー分解能を決める重要な項となる。ここで  $F$  は過剰雑音計数で、PD のときにはおよそ 0.1、APD の様な内部増幅のある場合には 2~3 の値となる。 $E(\text{keV})$  はガンマ線のエネルギー、 $N_{ph}$  は 1keV 当たりの BGO 結晶シンチレータの光子数、 $Y$  はシンチレーション光の読み出し効率、 $Q$  は光センサーの量子効率、 $M$  は APD の内部増幅である (PD の場合には 1 となる)。第三項は電子回路によるノイズのゆらぎに起因する項で、 $E_g=3.65\text{eV}$  は半導体検出器のエネルギーギャップで分母の  $N_{ph}QYE$  は照射線による光センサーからの出力電荷である。PD や APD の場合  $Q=0.8, Y=1, N_{ph}$  は § 3.1.7 で述べるが、低温で 10.1 個/keV である。

エネルギーレスショルドは低エネルギー側で、ノイズが測定される上限の値である。レスショルドの値は経験的に  $E_{th} \sim t\delta_{noise}[\text{keV}]$  で表わされる。[4][5]

$t$  は 2~3 程度の値で、 $t=3$  のときノイズの式を用いてレスショルドは次の様に表せる。

$$E_{th} = \frac{3\delta_{noise}}{E_g N_{ph} Q M Y} = \frac{3\sqrt{0.02339 \times 4\pi^2 I_{nb} F M^2 \tau_s + f(C_{in})^2}}{E_g N_{ph} Q M Y} \quad [\text{keV}] \quad (3.8)$$

この式からもわかるように、エネルギーレスショルドは入射する放射線のエネルギーによらず、回路系のノイズとシンチレーションの光量に依存している。[1]

### 3.1.2 PDの基礎特性実験

今回フォトダイオード (PD) は、S1723-06 という PIN フォトダイオード (10mm × 10mm) を用いる。基礎特性を測るために、暗電流と、容量の電圧依存性を調べていった。電圧をあげるとリーク電流が増加する。一方、逆バイアスの増加により、容量は pn 結合間の空乏層が広がることで小さくなる。ノイズは主にリーク電流と容量に依存するので、ノイズの値が小さくなるように逆電圧を決定する。リーク電流は低温にすることで非常に小さくすることができる。そこで常温と低温でその値を決定した。

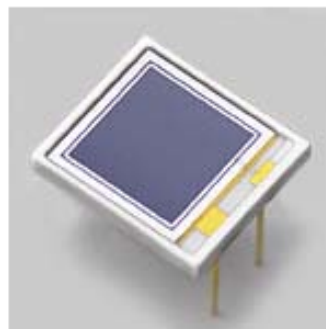


図 3.3: Pin フォトダイオード

	大きさ	最大定格電圧	最大暗電流	端子間容量
S1723-06	10mm × 10mm	50V	5nA	70pF(@30V)

表 3.1: 25 における半導体 S1723-06 のスペック

[6]

### 3.1.3 PDの容量の測定

PDの容量を測るために、容量計である HEWLETT PACKARD の 4284A、半導体検出器の端子接続箱 16065A そして高圧電源であるクリアパルス社の E6665 を用いて測定した。HEWLETT PACKARD の 4284A は LRC 測定計で、外部電圧をかけられるようになっており、電圧をかけながら半導体光センサーである PD の容量を測っていった。そのセットアップを図 3.4 に示す。PD は金属箱に入れて外部からのノイズを極力抑えて測定した。さらに E6665 の電圧を上げながら、容量を測定した結果を図 3.5 に示す。

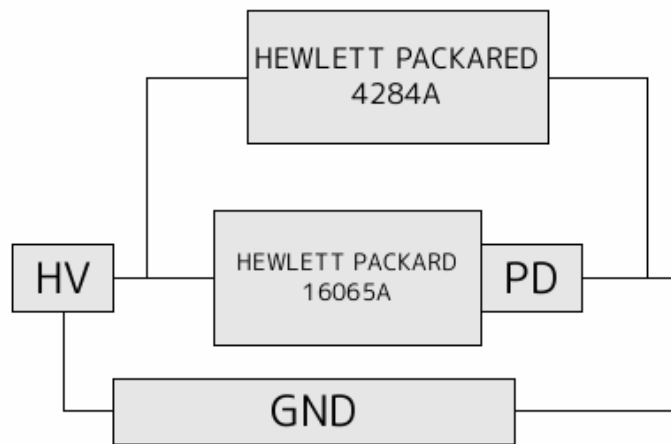


図 3.4: 容量測定の設定アップ

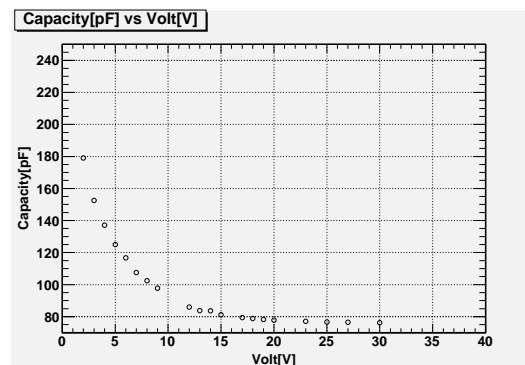


図 3.5: バイアス電圧 vs 容量

この容量は、PDの端子間容量なので、逆電圧を印加していくことで空乏層領域が広がっていき、完全空乏化するまで容量は減少し続ける。この結果から25V~30V付近でPDが完全に空乏化しており端子間容量が76pFとなっている。これは表3.1.2にある端子間容量とほぼ同等の値が得られた。この容量の値から、空乏層の厚さ  $d$  [m] を逆算することができる。コンデンサーの容量は、その面積  $S$  [m<sup>2</sup>] と真空の誘電率  $\epsilon_0$  とシリコンの誘電比率  $\epsilon_s$  を用いて  $C = \epsilon_0 \epsilon_s \frac{S}{d}$  で表わされる。今  $S = 1.0 \times 10^{-4}$  [m<sup>2</sup>] であり  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  [F/m]、 $\epsilon_s = 12$ 、 $C = 76 \times 10^{-12}$  [F] であるので、これらのことから、空乏層の厚さ  $d$  は約0.14[mm]であることがわかる。

### 3.1.4 PDの暗電流の測定

暗電流の測定系を図3.6に示す。今回の測定ではKEITHLEY617を用いた。HVにはクリアバルサのE6665を用いた。

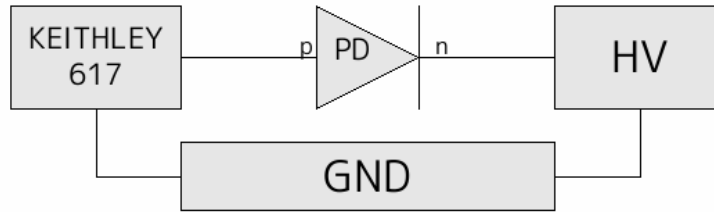


図 3.6: 暗電流の測定系

図 3.6 のセットアップで KEITHLEY617 から 鱈淵クリップを用いて、PD の p 側とグラウンドへつなぎ、高圧電源 E6665 から 鱈淵クリップを用いて高圧を PD の n 側、グラウンドを KEITHLEY617 と同じグラウンドへつないだ。PD に光が入らないように暗幕で覆い、低温にする場合には PD の部分のみを冷凍室に入れて電圧を変えながら、リーク電流の電流値を測定した。その結果を図 3.7、3.8 示す。

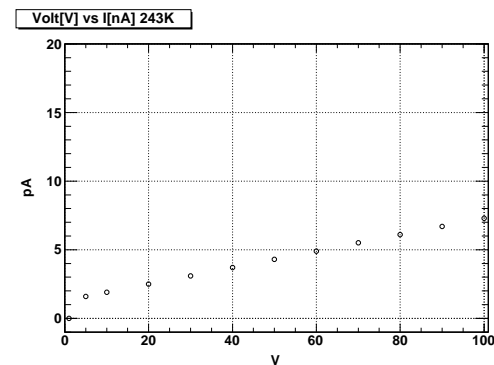
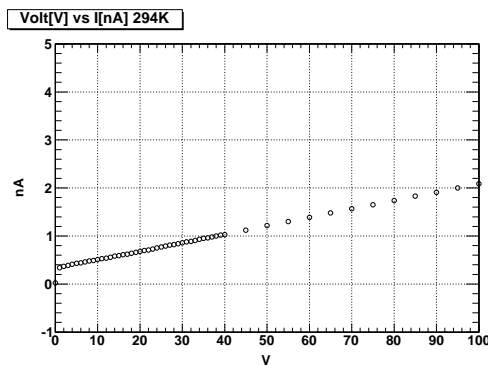


図 3.7: 常温 (294 K) の暗電流 vs バイアス電圧 図 3.8: 低温 (243 K) の暗電流 vs バイアス電圧

電圧を上げていくにつれて熱励起によって電流値が上昇する。しかし低温にすることで熱励起による暗電流値は非常に少なくすることができ、結果から見ると、常温に比べて暗電流が 3 桁程度下がっていることがわかる。この値は表 3.1.2 にある最大暗電流に反しない値である。PD の端子間容量と暗電流の測定から、最適電圧値は 30V と定めた。この最適電圧値のをかけながら線性を測定した。

### 3.1.5 プリアンプ MODEL5551 の容量性ノイズの測定

ここでは、ノイズの計算にも必要となるプリアンプの容量特性を実験で調べていく。まずこの実験で用いた半導体プリアンプ (MODEL5551) の容量性ノイズを測定した。プリアンプ入力部にコンデンサーを付け替えて測定した。セットアップを図 3.9 に示す。パルサーはクリアパルス社の 9028 を、シェーピングアンプは ORTEC の 571 を用いた。

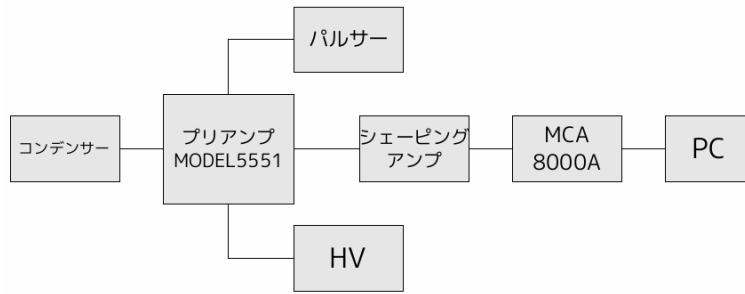


図 3.9: 容量測定の設定アップ

同じ波高値のテストパルスを入力しテストパルスのプリアンプ出力の波高値をヒストグラムとし、テストパルスのピークの最高値の半分の高さにおける分布の幅 (半値幅: Full Width at Half Maximum FWHM) を測定して、ノイズ評価をした。半値幅はスペクトルをガウシアンでフィットしたときの標準偏差 を用いて、2.355 となり、これが 3.1 で述べた  $f(c_{in})$  に相当する。

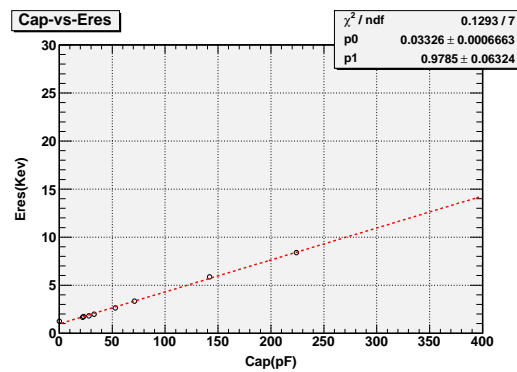


図 3.10: 容量によるエネルギー分解能

図 3.10 のグラフにより、PD や APD の容量から容量性ノイズを求めることができる。容量の大きい方がノイズが大きくなる。

### 3.1.6 PD+BGO による 線の読み出し測定

線測定のセットアップを図 3.11 示す。



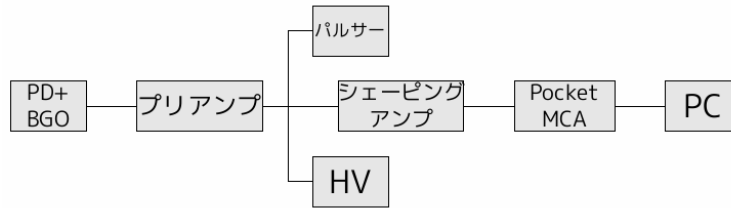


図 3.11: PD+BGO による 線実験の測定系

PDとBGOの取り付けは、光学グリース (OKEN 6262A) を用いて接着する。BGOは5mm × 5mmの大きさで、PDに取り付けたときに光がもれるのを防ぐためにバルカーテープを巻きつけた。さらにBGOとフォトダイオードを外来ノイズから守るために、アルミボックスで覆った。それを半導体用プリアンプ (信号増倍器)MODEL5551に接続しそのプリアンプの信号をシェーピングアンプ (ORTEC 571Amplifier) で波形を整えてさらに倍増も行う。そして、アナログデジタル変換を行うPocket MCA(8000A)を通してパソコンで読み出す。電圧は暗電流、容量から決定した30Vで観測した。低温度と高温度で線源 $^{22}\text{Na}$ , $^{57}\text{Co}$ , $^{137}\text{Cs}$ を当てて測定した。低温に冷やすために冷蔵庫を用いて、アルミボックスに温度計を取り付けることで、温度を観測した。線の測定のスペクトルを図3.12、3.13に示す。縦軸がカウントレートで、横軸が、MCAで読み出したときのCHとなっている。黒色が $^{137}\text{Cs}$ のスペクトルで662keVのラインが見える。赤色が $^{22}\text{Na}$ のスペクトルで511keVと1275keVのラインがある。

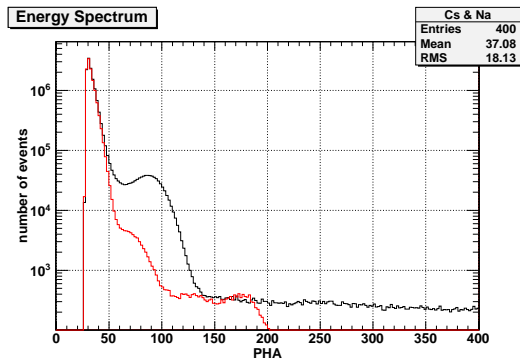


図 3.12: 常温 (20 ) での PD+BGO による スペクトル  $^{137}\text{Cs}$ (黒) と  $^{22}\text{Na}$ (赤)

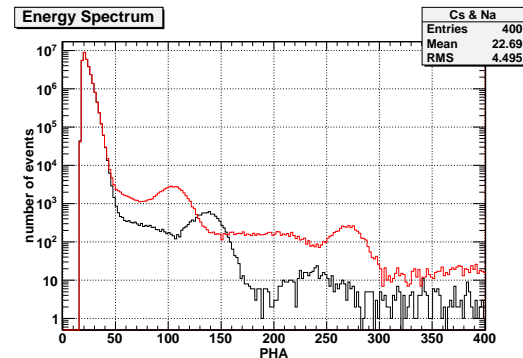


図 3.13: 低温 (-30 ) での PD+BGO による スペクトル  $^{137}\text{Cs}$ (黒) と  $^{22}\text{Na}$ (赤)

この2つの図を見てわかるように、常温ではNa511keVのラインがノイズに埋もれそうになっているが低温では、BGOの発光量の増加、さらには暗電流の減少でエネルギー分解能がよくなるので、より低いエネルギーまでスペクトルを取得することができている。図3.14にラインのピークチャンネル(CH)と線源のエネルギーとの相関図を示す。このグラフからリニアリティが保たれていることがわかる。

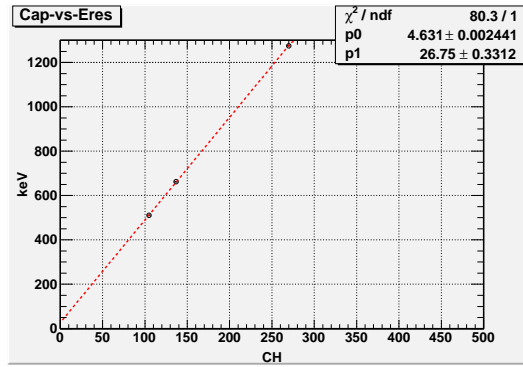


図 3.14: PD+BGO の CH-keV の対応

次に、低温での3つのラインについてエネルギー分解能を図 3.15 に示す。

ここでのエネルギー分解能はピークチャンネルでのエネルギーを  $E$ 、その半値幅を  $\Delta E$  とすると、 $\Delta E/E$  で表す。図 3.15 よりエネルギー分解能はほぼ  $E^{-1}$  に比例している。これは、PD の場合にはノイズの式でもあったように、第三項が支配的である。ということを示している。

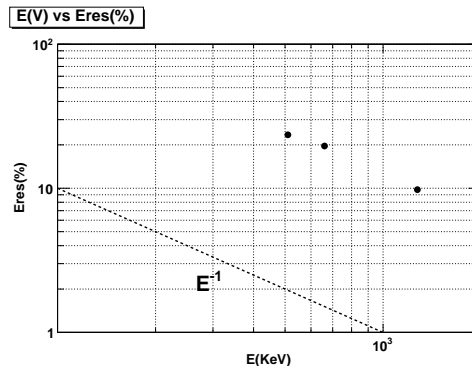


図 3.15: PD+BGO のエネルギー分解能

### 3.1.7 BGO の発光量の測定

常温低温ともに PD に 線源の  $^{241}\text{Am}$  を当ててスペクトルを取り、PD で 線が検出されたときの発生電子数と信号出力との関係を得て、BGO の光量を求めるためのデータを求めた。シンチレータのところでも原理を説明したようにシンチレータ光の全てが PD で読み取れるわけではなく、シンチレータの発光量  $N_{ph}$  とシンチレータ光の読み出し効率で出力される電荷量が決まる。BGO を用いて測定した場合と、PD のみで測定した場合とを比べることで、PD の量子効率  $Q$  と測定された電荷量から、入射エネルギーと BGO の光量の関係を得る。図 3.11 とシェーパーのゲインも同じにして同じセットアップで電圧値も同じ 30V にして BGO をつけずに測定した。 $^{241}\text{Am}$  と  $^{56}\text{Ba}$  のスペクトルを図 3.16 と 3.17 に示す。

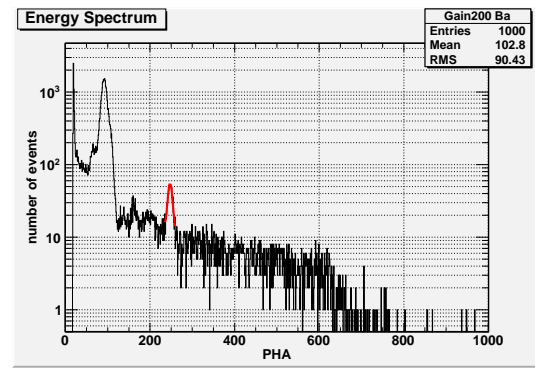
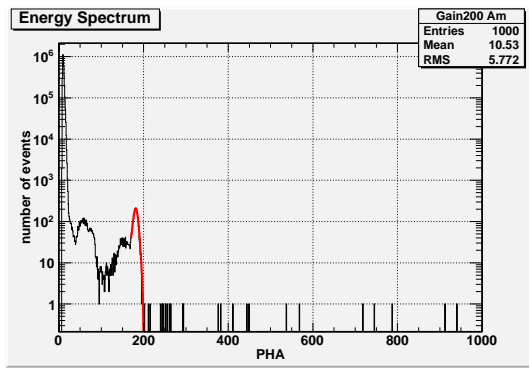


図 3.16: PD による  $^{241}\text{Am}$  59.5keV のスペクトル 図 3.17: PD による  $^{56}\text{Ba}$  81keV のスペクトル

図 3.18 に CH-keV の対応を示す。

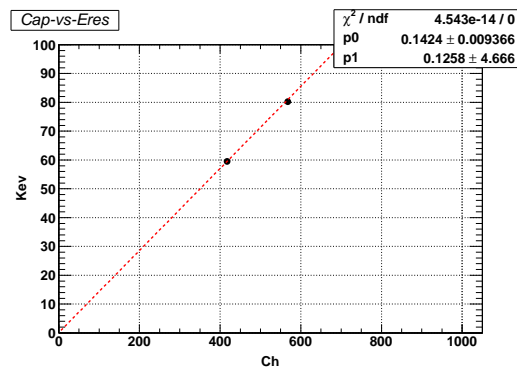


図 3.18: PD の CH-keV の対応

図 3.18 の傾きより、本研究で用いた BGO の発光率を入射エネルギー 1keV あたりには放出される光子数 (個/keV) として求める。PD 内で電子ホール対を 1 組生成するのに必要なエネルギーは約 3.65eV であり、 $^{241}\text{Am}$  の 59.5keV が入ってきたときの電子ホール対の数は

$$\frac{59.5 \times 10^3}{3.654} \approx 16300(\text{個}) \quad (3.9)$$

で表わすことができる。

図 3.18 を見ると、Am の 59.5keV の CH は 417CH であった。このことから入力電子数と出力 CH の関係は、39 電子/CH となる。BGO を PD につけた場合の  $^{137}\text{Cs}$  の 662keV を当てたときのピーク CH を図 3.14 で見てみると、常温では 80.6CH、低温では 136.7CH であった。これを先ほどの PD のみから測定した値に換算すると、電子ホール対の数は、常温では 3143 個、低温では生成され、低温では 5331 個生成されていることになる。1photon で 1 つの電子ホール対生成が量子効率 80 % で生成されるすると考えると、それぞれのフォトン数がわかる。このフォトン数は  $^{137}\text{Cs}$  の 662keV を当てたときの数であるので、個/keV に直すと、この BGO は常温では約 5.9 個/keV、低温では約 10.1 個/keV の光子を放出していることがわかる。

### 3.1.8 結論

PDによるエネルギー分解能は回路系ノイズによる項が主にきいてきている。このために、エネルギー分解能をより良くするには、暗電流の除去や端子間容量を減少させることが必要となる。またエネルギーレスショルドは先にも記述したように、回路系のノイズのみで表わされており、低温にすると暗電流が減少し、BGOの発光量も増加することから、図3.12と3.13をみてもわかるように、少しエネルギーレスショルドが下がっている。 $E_g$ を3.65eV、量子効率を80%、 $M=Y=1$ としてエネルギーレスショルドの式に代入すると、常温では470-700keV低温では280-420keVとなり、図3.12,3.13と合う。

## 3.2 APDとBGOを用いた測定

ここからは、BGOをAPDを用いて読み出した測定を示していく。

### 3.2.1 実験の目的

BGOのシンチレーション光をAPDの内部増幅機能の特性を活かしてPDのときよりも低エネルギー側まで読み出すことを目的としている。APDの増倍率のおかげでPDではノイズに埋もれて見られなかったエネルギーのスペクトルを見ることができた。

### 3.2.2 APDの基礎特性

APDは浜松ホトニクス製のS8664-33SPLを用いる。MPPCとの比較をするために、3mm×3mmのものを使って測定した。

	大きさ	降伏電圧	暗電流
S8664-33SPL	3mm × 3mm	429V	977pA(@380V)

表 3.2: 25 における半導体 S8664-33 のスペック

[7]

まずPDと同様に基礎特性である暗電流と容量を測定した。セットアップはPDのときと同様である。図3.19に容量の結果を、図3.20と図3.21に暗電流の結果を示す。PDのときと同様に空乏層が広がるに連れて容量は減少し、結果から300V辺りで完全空乏層化が起こりはじめることがわかる。暗電流は熱励起された電子によって引き起こされるが、この暗電流も増幅されてしまう。さらに、降伏電圧以上の電圧を印加するとブレークダウンを起こし爆発的に暗電流が上がる。

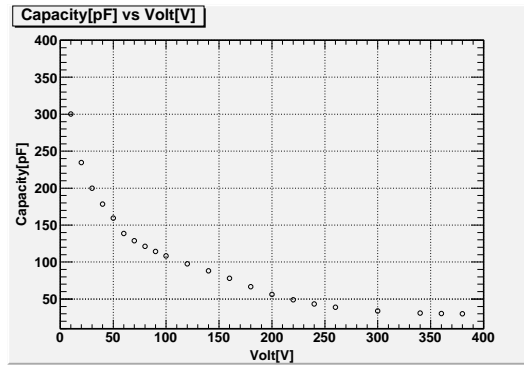


図 3.19: APD のバイアス電圧 vs 容量

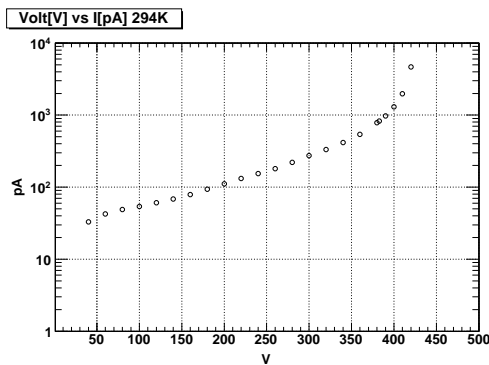


図 3.20: 常温 (20 ) での APD の暗電流 vs バイアス電圧

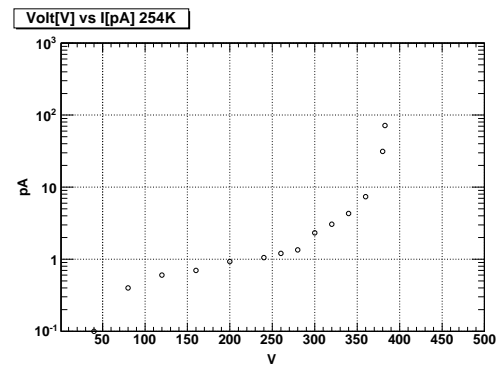


図 3.21: 低温 (-30 ) での APD の暗電流 vs バイアス電圧

次に、APD の内部増幅率 (ゲイン) を測定した。ゲインは、ある一定の明るさで光る LED を照射しながら、出力される電流値を測定することで、内部増幅率を求める。このセットアップを記しておく。

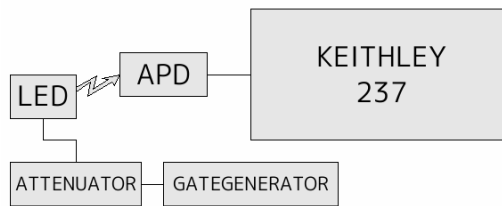


図 3.22: ゲイン測定の設定アップ図

LED の光量が増倍されるために、出力電流は大きな値となる。そのために、KEISLAY237 の測定限界 100mA をこえない程度の照射量にしなければならない。そこで、GATEGENERATOR

からの出力電圧を ATTENUATOR で減衰させて、LED に供給する電荷量を調整して APD に照射した。ATTENUATOR は 4dB に設定し、APD に LED を照射して、その出力電流を電圧を変えながら記録していった。0V のときの出力電流をゲイン 1 として図 3.23 と 3.24 に示す。

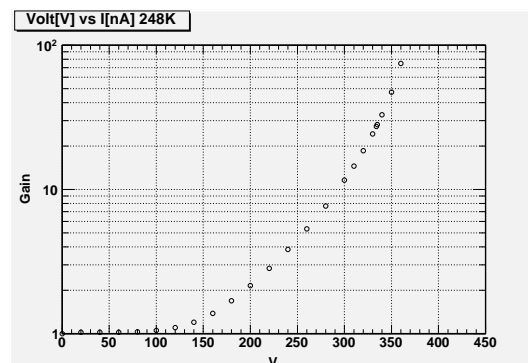
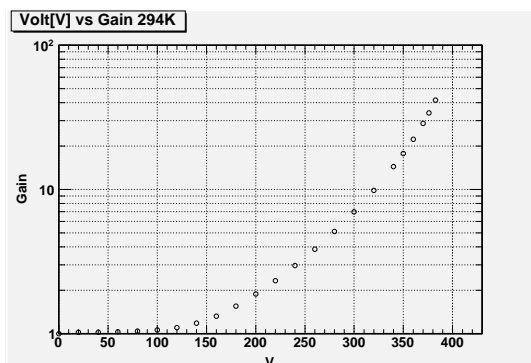


図 3.23: 常温 (20 ) での APD のゲイン

図 3.24: 低温 (-30 ) での APD のゲイン

得られた暗電流と容量、さらにゲインを考慮して、常温では APD に 373V の逆電圧、低温では 335V の逆電圧をかけて BGO の測定を行う。この増幅率は常温で約 34 倍、低温で約 28 倍である。

### 3.2.3 APD+BGO の 線測定

PD の測定で用いた BGO と同じものを APD につけて 線源  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{56}\text{Ba}$ , を用いてスペクトルを測定した。セットアップは PD のときと同様で、同じプリアンプを使っている。取得したスペクトルを図 3.25 と 3.26 に示す。

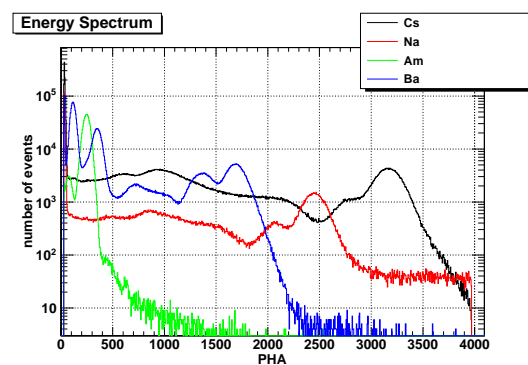
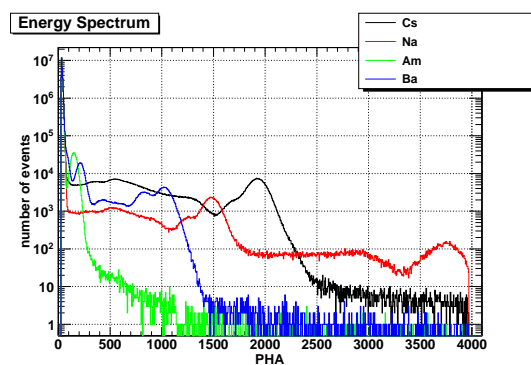


図 3.25: 常温 (20 ) での APD+BGO による線源のスペクトル

図 3.26: 低温 (-30 ) での APD+BGO による線源のスペクトル

黒色が  $^{137}\text{Cs}$  で赤色が  $^{22}\text{Na}$  で緑が  $^{241}\text{Am}$  で青が  $^{56}\text{Ba}$  のスペクトルである。PD のときでは全

く見られなかった (図 3.12,3.13) Am の 59.5keV や Ba の 80keV がはっきりと見ることができる。エネルギーレスショルドが下がったこととエネルギー分解能がよくなったことが原因である。低温にすると PD のときに比べて圧倒的にレスショルドは小さくなる。さらにこのスペクトルで見られるピークのエネルギー分解能を求めたものを図 3.27 と 3.28 に示す。このエネルギー分解能のグラフは、 $E^{-1/2}$  にほぼ比例するようなグラフとなり、PD と比べて緩やかになっている。

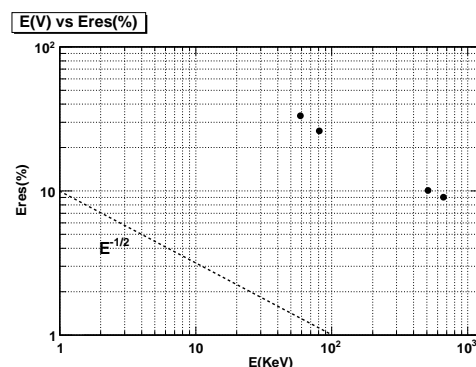
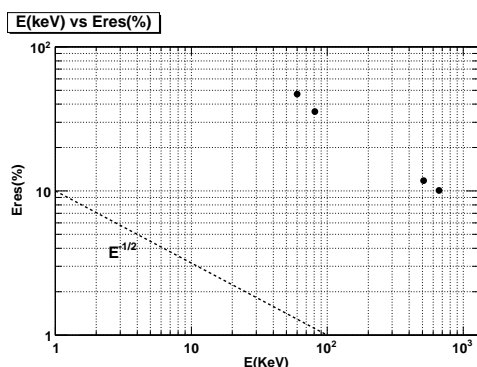


図 3.27: 常温 (20 ) でのエネルギー分解能

図 3.28: 低温 (-30 ) でのエネルギー分解能

### 3.2.4 考察と結論

APD の常温の場合でのエネルギー分解能を理論式から見ていくと、先の結果により  $I_{nb}M=0.83[\text{nA}]$  これは測定した暗電流値は既に内部増幅されて出力されているので、内部暗電流と増倍率の積の形で表わすことができる。さらに  $M=34$ 、 $F=2$ 、 $t_s=1[\mu\text{s}]$ 、 $f(C_{in})=2.64[\text{keV}]$  であるので、式 (3.6) に代入して計算すると、 $(\delta_{noise})^2 \sim 52+7$  となり、ノイズは電流性ノイズが支配的となる (第一項が電流性ノイズ、第二項が容量性ノイズ) これは内部電流が APD の機構により増幅される為で低温にすることで暗電流の寄与を小さくすることができるのでノイズをかなり小さくすることができる。(低温の場合  $(\delta_{noise})^2 \sim 0.2+7$  となり容量性ノイズが支配的になる) この値を用いて式 (3.7) を解く。式 3.7 の第一項はシンチレータに依存するものなので、今回は第二項と第三項を考える。662keV におけるエネルギー分解能を求めると、第二項は  $N_{ph}=10.1[\text{個/keV}]$ 、 $Q=0.8$ 、 $Y=1$ 、 $F=2$ 、 $E=662[\text{keV}]$  として計算すると第二項  $\sim 0.02$  となり、第三項は  $\delta_{noise} \sim 7.7[\text{keV}]$ 、 $E_g=3.65[\text{eV}]$ 、 $E$  や  $N_{ph}$  は同じ値なので、代入すると第三項  $\sim 0.011$  となり、第二項がやや大きくエネルギー分解能は 17 % 程度となる。さらに低温にすると、第二項は変わらず  $\sim 0.02[\text{keV}^2]$  で第三項が  $\sim 0.003[\text{keV}^2]$  となり、第二項が支配的になり、エネルギー分解能は 14 % 程度となる。このためエネルギー分解能は低温に近づくにつれて第二項に依存し、 $E^{-1/2}$  に比例するような値となる (図 3.27、3.28)。エネルギーレスショルドは  $t\delta_{noise}$  である。  $t \sim 3$  として常温でのエネルギーレスショルドは 21keV、低温では 8keV となる。これは図 3.25,3.26 をよく表わしている。

## 第4章 MPPC(3600pixel)による無機結晶シンチレータBGOの光読みだしと特性評価

この章では、MPPCの特性評価を行い、最後にAPDとの比較などを行う。

### 4.1 MPPCの基礎特性

今回用いたMPPCはS10362-33-050Cである。スペックシートを示す。

項目	記号	S10362-33			S10931			単位
		-025C	-050C	-100C	-025P	-050P	-100P	
開口率 *1	-	30.8	61.5	78.5	30.8	61.5	78.5	%
感度波長範囲	$\lambda$	320 ~ 900			320 ~ 900			nm
最大感度波長	$\lambda_p$	440			440			nm
動作電圧範囲	-	$70 \pm 10$ *2			$70 \pm 10$ *2			V
ダークカウント *3	Typ.	4	6	8	4	6	8	Mcps
	Max.	8	10	12	8	10	12	
端子間容量	Ct	320			320			pF
時間分解能 (FWHM) *4	-	500 ~ 600			500 ~ 600			ps
逆電圧の温度係数	-	56			56			mV/°C
増倍率	M	$2.75 \times 10^5$	$7.5 \times 10^5$	$2.4 \times 10^6$	$2.75 \times 10^5$	$7.5 \times 10^5$	$2.4 \times 10^6$	-

\*1: 1ピクセル中で受光部の占める割合

\*2: 個別製品の推奨動作電圧については、製品に添付されたデータを参照してください。

\*3: 0.5 p.e. (閾値レベル)

\*4: シングルフォトンレベル

表 4.1: 半導体 S1723-06 のスペック

[7]

今回は、型番 S10362-33-50C の 3600 ピクセルのものを用いて測定した。MPPC には開口率というものが存在する。これは MPPC が APD がマルチアレイとなっているので、APD ピクセルと APD ピクセルの間に光が入射しても検出することのできない不感領域というスペースが存在する。そのため実際の MPPC の受光面に対して検出面積はその開口率によって決定されてしまう。ピクセル数が多くなるほど高エネルギーまでリニアリティがよく検出することができるが、不感領域は大きくなる。その用途によって、ピクセルサイズを使い分ける必要がある。

基礎特性として、APD と同様のセットアップで、高圧電源を CLEAR-PULSE の E6625 に変えて暗電流を測定した。この高圧電源はテストで 0.1V の精度で変えることができる。容量も同セットアップで測定した。その結果を図 4.1, 4.2 と 4.3 に示す。MPPC は APD を降伏電圧以上を印加したガイガーモード状態で用いるために、常温では暗電流が大きなノイズの原因となる。さらに、容量は APD が並列にマルチピクセル化されているので、APD や PD よりも大きな値が出力される。



その他のノイズとして、自発的電子放出によるノイズやアフターパルス、クロストークといったものが存在する。自発的電子放出は、APD 自体から出力されるもので、1 ピクセルや 2 ピクセルから信号が勝手に出力されてしまう。これは MPPC においては、1photon の信号、2photon の信号として検出されてしまうために、少ないフォトン数の検出には短い処理時間でこの自発的電子放出による信号を減らすことが必要となる。

次にアフターパルスであるがこれは電子やホールが格子欠陥にトラップされて、時間をかけて再放出されるというものである。最後にクロストークというものでこれは MPPC 特有のノイズでノイズの増幅時に発生した紫外光などが他ピクセルに入射することで同時に複数ピクセルが反応してしまう現象である。電圧をかけすぎるとクロストークによって発生した信号がアフターパルスを発生させ、そのアフターパルスから出てくる紫外光からクロストークが起こりさらにそのアフターパルスから、、、といったように、爆発的なノイズとなる。このことから安定に MPPC を動作させるためには閾値電圧から数 V までというような結果となっている。 [8]

#### 4.1.1 暗電流測定

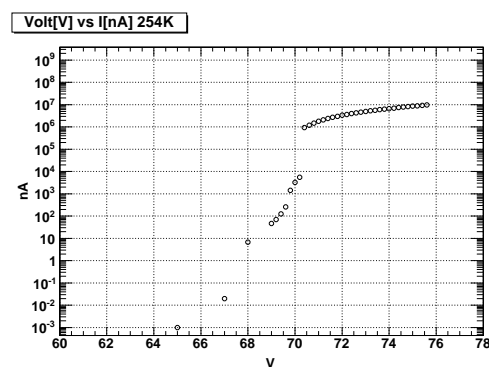
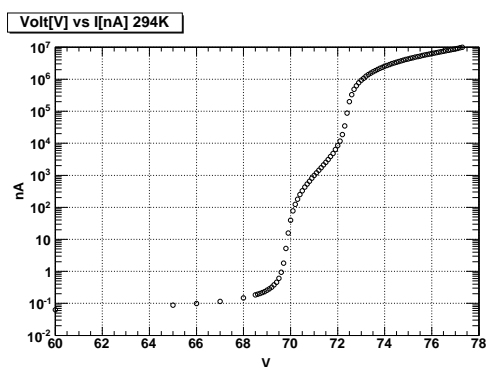


図 4.1: 常温 (294 K) の暗電流 vs バイアス電圧 図 4.2: 低温 (-30 K) の暗電流 vs バイアス電圧

暗電流は上図のように高い電流値を示す。これは APD 1 つ 1 つがガイガーモードによって熱励起された電子を数万倍にも増幅してしまう MPPC 特有の性質の為である。低温にすると常温のときよりも降伏電圧が下がっており、APD 同様の結果を得た。さらに APD と比べると降伏電圧となる値が小さいために、低電圧で動作させることが可能となる。

### 4.1.2 端子間容量測定

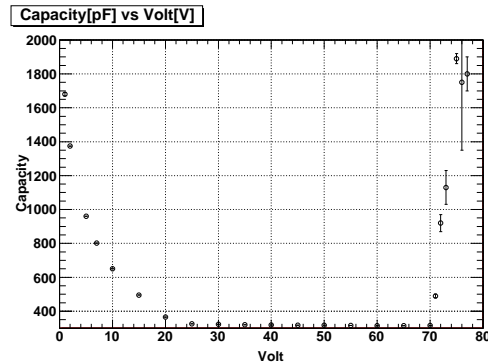


図 4.3: MPPC の端子間容量

これを見てもわかる通りに、30V 辺りから値は落ち着いてきているが、70V 辺りからまた上昇していき、かなりゆらいで不定生の大きな値となる。これは、暗電流などにより、溜まっていた電荷の放出、またクエンチング抵抗を流れた際に電圧降下が起こるために、見かけの容量が変化することによって起こる。

### 4.1.3 ゲイン測定

MPPC の原理のところでも述べているが、MPPC は 1 つ 1 つの APD ピクセルからの信号の和によって出力される。その出力される電荷量  $Q$  は APD の静電容量  $C$  と印加電圧  $V_0$ 、降伏電圧を  $V_{BR}$  とすると  $Q = C(V_0 - V_{BR})[C]$  で表わすことができる。1 フォトンの電荷量  $e$  は  $1.6 \times 10^{-19}$  であるので、その時の MPPC の増倍率は  $Q/e = C(V_0 - V_{BR})/e$  となる。今回は APD と同様に、同じ明るさの LED を発光させながら、その出力される電荷量を電流値としてプロットしていきその増幅率をゲインとした。LED を光らせた時の電流値は暗電流値と比べて 10 倍以上違うので、バイアスをあげていない暗電流値をゲイン 1 として測定を行った。その結果を図 4.4、4.5 に示す。

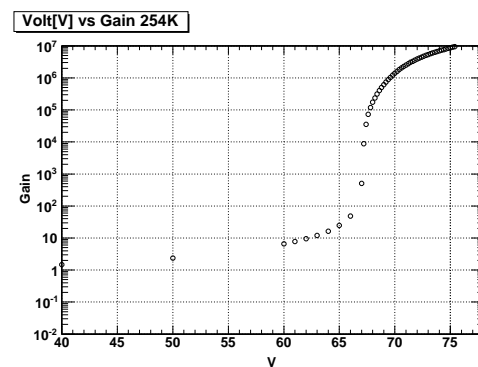
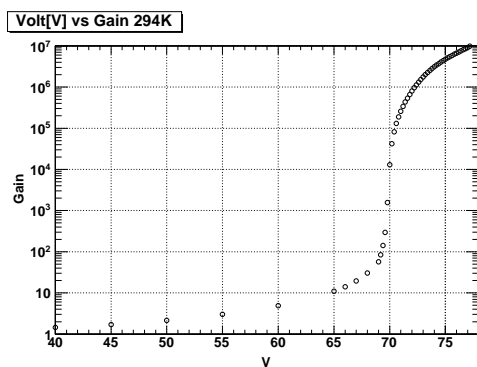


図 4.4: 常温 (294 K) の暗電流 vs バイアス電圧    図 4.5: 低温 (254 K) の暗電流 vs バイアス電圧

この暗電流、容量やゲインを考慮して、低温-30℃では68Vという値を採用した。-30℃、68Vでは、ゲインは約  $5 \times 10^5$  で暗電流値は6.7nA、容量は314pFである。

## 4.2 MPPCによるBGOの光読みだし測定

MPPCによる読み出しはpocket MCA(8000A)を用いて行う。今まで用いていた半導体用プリアンプMODEL5551は内部増幅が大きすぎるために、Csの662keVの信号が飽和してしまう。そのため、PMT用のプリアンプCP2916を用いることにした。CP2916に接続できるように回路を作り、電圧を印加しながら測定していった。その回路は図4.6に示す。他のセットアップはAPDと同じで、同じBGO、同じシェーピングアンプを用いている。

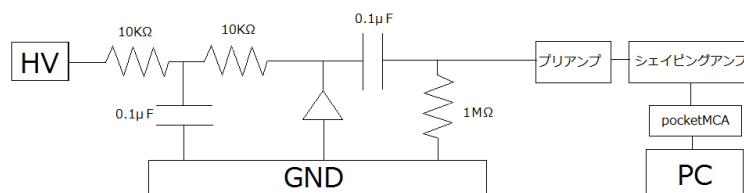


図 4.6: MPPC からプリアンプへの接続回路

この回路とMPPCはアルミ箱に入れて外部からのノイズを減らした。低温にするときには、MPPCと回路部を恒温槽に入れて測定していった。次に測定の結果を示していく。

### 4.2.1 シェーピングアンプ依存性

線源のスペクトルをとる際に、重要となってくるのがノイズやエネルギー分解能の式の項である。先にも書いてあるように、ガウシアンに整形した場合には、シェイピングタイム  $\tau_s$  によりエネルギー分解能が変わってくる。このシェイピングタイムはこのシェイパーによって4段階に定めることができ、その最適なシェイピングタイムで線源をとっていく。このシェイピングタイム依存性は図4.7に示す。さらには、温度に依存して降伏電圧の値やゲインが変化し、1V未満の電圧の変化でさえかなり電圧が変わるので、その変化を調べていった。その2つの変化は図4.9に示す。

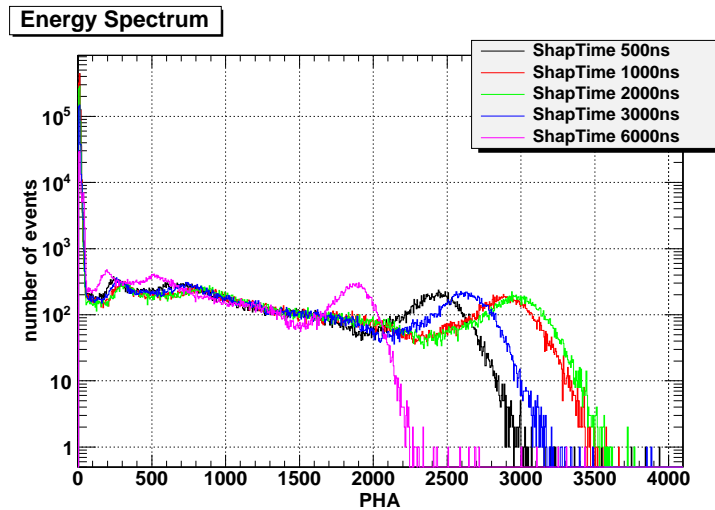


図 4.7: Cs によるシェイピングタイム依存性

このそれぞれのシェイピングタイムによるエネルギー分解能を図 4.8 に示す。

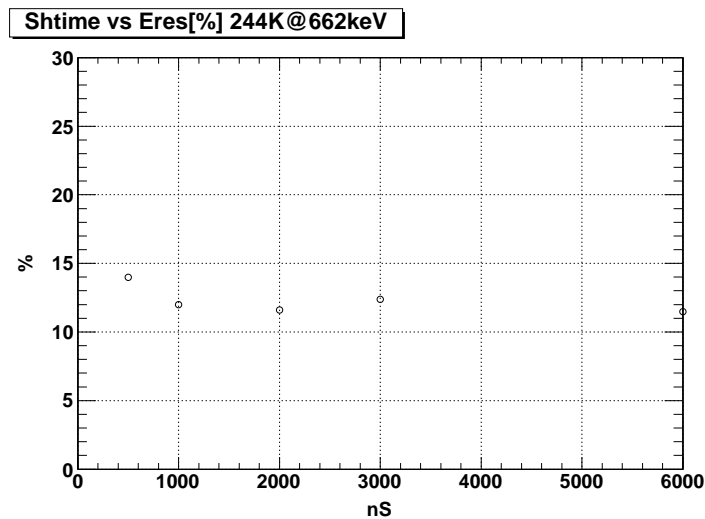


図 4.8: Cs662keV におけるエネルギー分解能のシェイピングタイム依存性

シェイピングタイム  $\tau_s=0.5[\mu\text{s}]$  のときにエネルギー分解能が少し悪くなり、シェイピングタイムが  $1\mu\text{s}$  よりも長い場合にはエネルギー分解能はほとんど変わっていない。これはシェイピングタイムが短いときには、BGO の信号を全て捉え切る前に波形整形が終わってしまうことが原因である。BGO の減衰時間は約  $1\mu\text{s}$  であり、シェイピングタイムが  $0.5\mu\text{s}$  では BGO の光を十分捉えきれないためにエネルギー分解能が悪くなる。よってエネルギー分解能と、ノイズのカウントレートからシェイピングタイムは  $1\mu\text{s}$  に決定した。

#### 4.2.2 バイアス電圧依存性

次に、 $^{137}\text{Cs}$  のスペクトルから温度と電圧の依存性を調べた。温度は、 $-30$ 、 $-20$ 、 $-10$ 、 $0$  の4点でそれぞれの値で  $67\text{V} \sim 72\text{V}$  まで観測した。その結果を図 4.9 に示す。

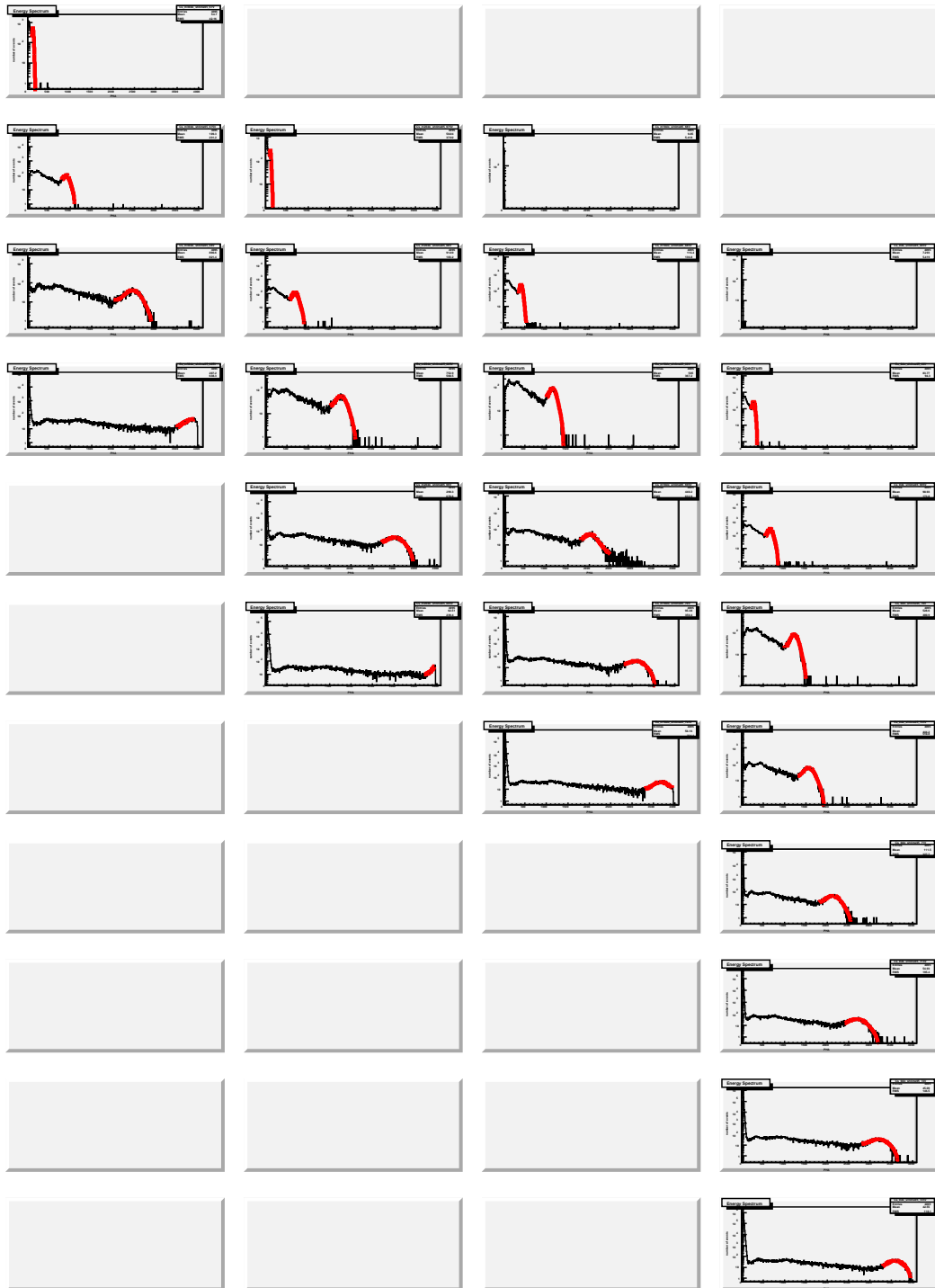


図 4.9: Cs662keV における温度と電圧の変化。左から-30、-20、-10、0。上から 67V,67.5V,68V,68.5V,69V,69.5V,70V,70.5V,71V,71.5V,72V

この結果により、低温ほど電圧によるゲインの変化が大きいことがわかる。図 4.10 参照

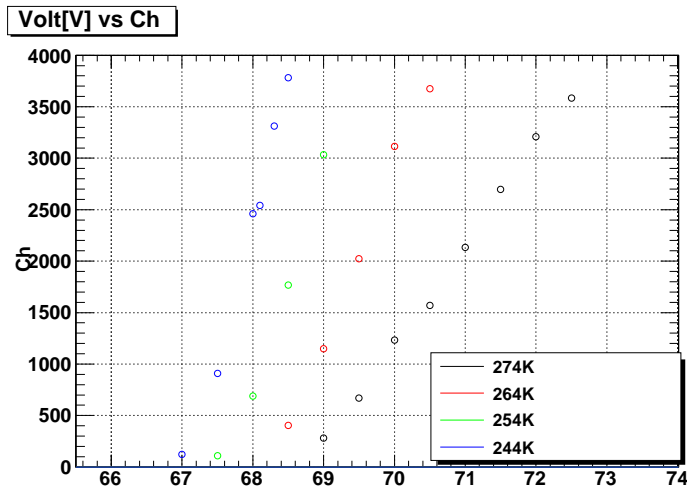


図 4.10: 温度別による HV の依存性

この変化は、ガイガーモードの仕組みを理解する必要がある。まず初めに APD に降伏電圧まで電圧を印加していない状態を考えていく。この状態では APD 内部に侵入した電子が、逆電圧を印加されているために APD 中の電場により加速される。その加速した電子が APD 結晶内部の格子にぶつかり、そこで電子ホール対生成を起こす。その電子がまた加速して格子にぶつかり電子ホール対生成を引き起こす。さらに、、、といった形でどんどん電子を増やしていくことで元の電荷量を増倍して出力する。この電子ホール対生成を引き起こす反応確率はインパクト・イオン化係数と呼ばれており、キャリアの種類 (電子・ホール) によって異なる値となる。このインパクト・イオン化係数は Shockley モデルで、内部電場を  $E$  として、 $(E) \propto e^{-\beta/E}$  で表わされる。この  $\beta$  は物性や温度から決まる係数で、温度や電場、さらには物性により指数関数的に変化することが知られている。ホールのインパクト・イオン化係数は電子に比べて小さく、降伏電圧以下ではホールによる電子ホール対生成は無視することができる。そのため、電子が APD の n 側に到達するまで、増倍され続け、その分の電荷が出力されることでその電子は消滅する。しかしながら、降伏電圧以上の電圧を印加すると、ホールによる電子ホール対生成が無視できなくなる。そうなると、ホールは p 側に向かって進むために、p 側近くで電子ホール対生成を起こした場合には、その場所で生成された電子が、n 側に向かって増幅されながら進み、さらにその増幅される際に生成されるホールはその逆の p 側に向かって増倍されながら進んでいくために、無限に増幅され続け、電流が流れ放しの状態となる。これがガイガーモードの状態で、MPPC の原理のところでも述べているように、MPPC はクエンチング抵抗をつなぐことで電圧降下をさせて、信号の出力を抑えている。であるので、ガイガーモードであるかそうでないかは、ホール由来の電子ホール対生成が無視できるか、無視できないか、によるものである。これらのことを考えると、温度の低下により  $\beta$  が小さくなる。このために、インパクト・イオン化係数が指数関数的に大きくなり、少量の電場をかけただけでも、ホール由来の電子ホール対生成の無視できなくなる。ゆえに、ガイガーモードになる電圧も小さくなり、式を見てもわかるように  $\beta$  が小さいと電圧による変化が大き

なることも理解することができる。[9]

#### 4.2.3 色々な線源に対する応答

次に温度-30、電圧 68V、シェイピングタイム  $1\mu\text{s}$  で固定して色々な線源を測定していった。この時の測定結果を図 4.11 と 4.12 に示す。

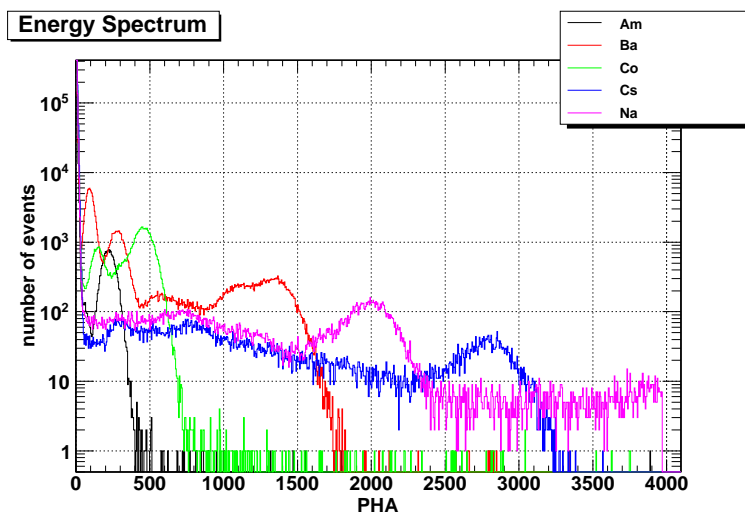


図 4.11: MPPC と BGO による線源の読み出し。

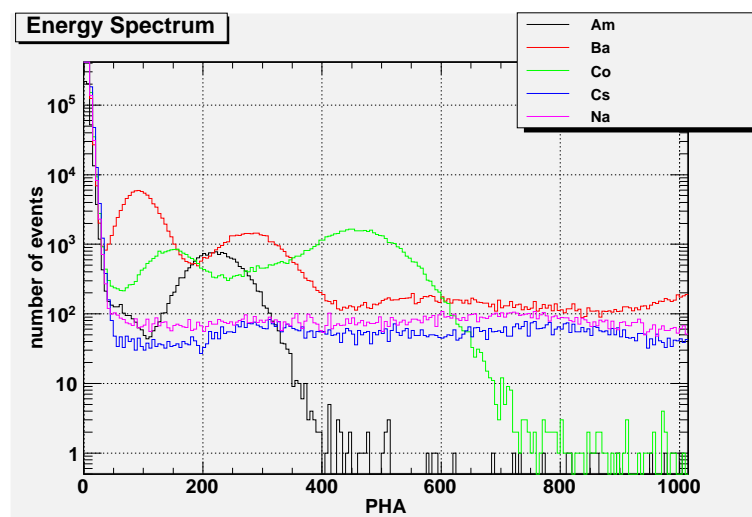


図 4.12: 図 4.11 の拡大図

これらのスペクトルから、リニアリティとエネルギー分解能を調べた。その結果を図 4.13 と 4.15 に示す。



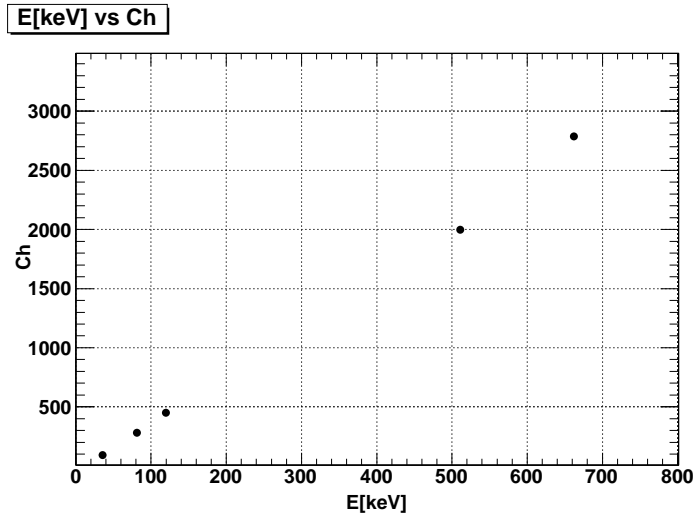


図 4.13: MPPC のリニアリティ

図 4.11 からピークチャンネルとエネルギーとの比較をとり、プロットしていった。左から  $^{241}\text{Am}$  の 59.5keV,  $^{56}\text{Ba}$  の 81keV,  $^{57}\text{Co}$  の 120keV,  $^{22}\text{Na}$  の 511keV,  $^{137}\text{Cs}$  の 662keV のピークチャンネルで、3600 ピクセルの MPPC では、BGO の光に対して Cs の 662keV の信号まではリニアリティは保たれていることがわかる。この信号よりも高いエネルギーを見るために、BGO のシンチレーションの代わりに、LED を照射して実験を行った。常温 20℃ で MPPC に 73V 印加して測定を行った。このときの MPPC のゲインは約  $1.0 \times 10^6$  である。LED は NSPB500AS 663-4448 の青色 LED を使い、その LED への電源として KEITHLEY の 3390 を用いた。3390 はパルス幅や、出力電圧を自由に変えることができるパルサーで、パルス幅を  $10\mu\text{s}$  で 1Hz の速度で LED を光らせ、LED に与える出力電圧を 1.5V ~ 5.0V まで 0.5V ずつ変化させながらオシロスコープで MPPC の出力波高値を記録していった。LED に与える電圧と MPPC の出力信号を 50Ω 受けでオシロスコープで見た電圧をプロットした図を 4.14 に示す。5.0V まで MPPC の信号は崩れることなく出力され信号が飽和することはなかった、5.0V のときのオシロスコープの出力電圧は 50Ω 受けで 1.02V であり、MPPC から電流として 20.4mA 出ていることになる。電子数に換算し、ゲインと量子効率を考慮すると、MPPC に毎秒  $1.2 \times 10^{11}$  個の光子が入っていることになる。暗電流由来パルスの半値幅が 20ns でこの時間内に電荷が MPPC の各ピクセルに溜まると考えられ、この時間間隔以上で信号がきた場合は電荷を出力することができる。それを考慮すると、20ns 内に約 3200 個の光子が入っていることになる。この MPPC のピクセルサイズは 3600 ピクセルであるので、この量の光量でも飽和することがないことになり、実験と合う。この 3600 ピクセルの MPPC がすべて飽和したとすると、MPPC からの出力電圧が約 1.5V となり、図 4.14 から逆算すると、LED に約 7V ~ 8V 程度を印加した場合に相当し、かなり大きな光量まで飽和せずに検出できることがわかる。BGO に  $^{137}\text{Cs}$  の 662keV を当てたときの MPPC の電圧をオシロスコープで見ると、約 4.0mV であったので、BGO に入る線源のエネルギーは約 15GeV まで飽和することなく観測できることがわかる。

この図における、折れ曲がりかダブルカウントによるサーチレーションか、LED の特性なのかは定かではない。

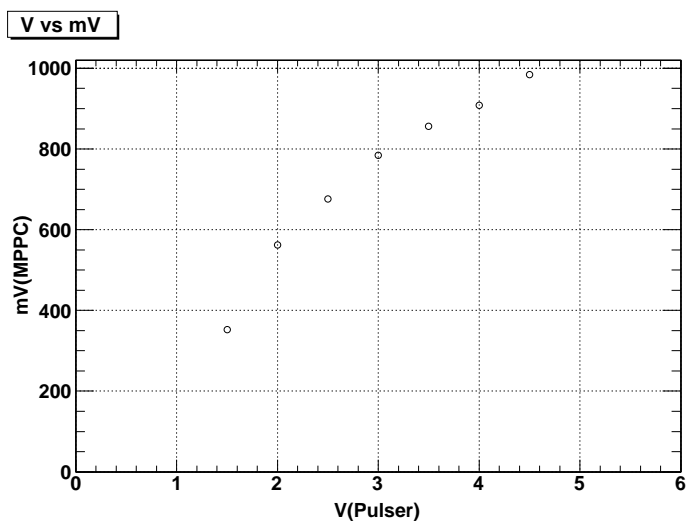


図 4.14: パルサーの電圧と MPPC の出力電圧

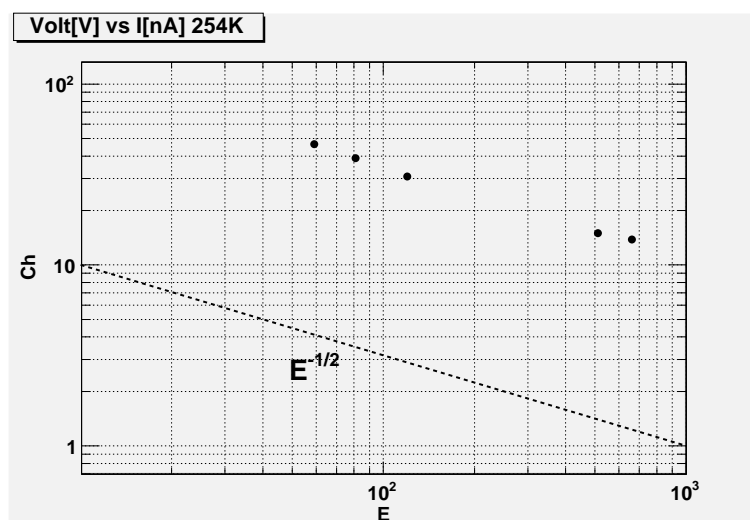


図 4.15: MPPC と BGO のエネルギー分解能

エネルギー分解能の定義は APD や PD のときと同様である。このプロットしたエネルギー分解能と式 (3.7) から考察していく。(3.7) 式の第二項と第三項を考える。第三項はノイズによるエネルギー分解能の寄与を表したもので、 $M=1.7 \times 10^5$  という大きな値が分母に入っており、第二項に比べて非常に小さく無視することができる。このことから、MPPC のエネルギー分解能は第二項目の寄与が大きくなり、 $E^{-1/2}$  に比例するような値になる。これは図 4.15 に点線でプロットしているが、非常によくプロットの関数の形を表わしている。第二項にパラメータを代入してい

くと、 $F=2, N_{ph}, Q=0.8 \times 0.6$ (量子効率×開口率),  $Y=1$  であるので、662keV のエネルギー分解能は 5.9 % となる。実際の観測での値は約 13 % でこれは理論値よりもエネルギー分解能の悪くなっている。このエネルギー分解能の悪さの原因は APD ピクセル毎の増倍率が微小に異なっているために発生するものであると考えられる。これは 1photon や 2photon, 3photon などのピークを見ても明らかで、出力信号は複数の APD ピクセルからの信号の重ね合わせなので、増倍率が異なることにより、より広がった波形となって出力される。図 4.16 参照。

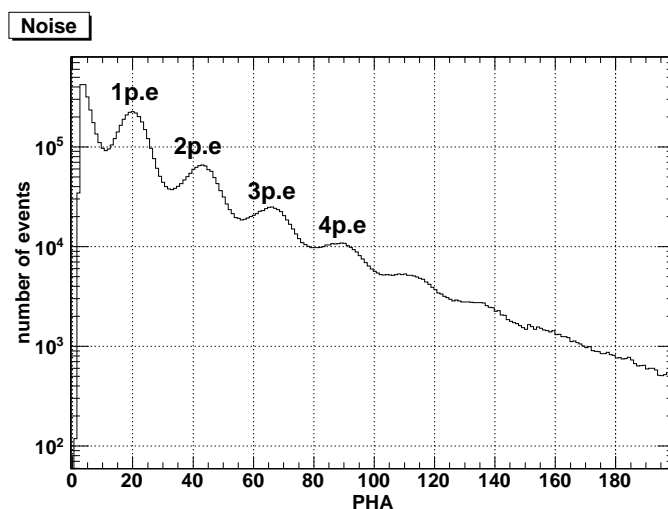


図 4.16: 1photon, 2photon のエネルギー分解能

さらに、MPPC エネルギー閾値を式 (3.8) から導出する。 $N_{ph}$ 、 $Q$ 、 $Y$  は先ほどの値をそのまま用いる。さらに、 $\delta_{noise}$  は電流性ノイズのみを考えて 1450keV で表わされるので、 $t=3$  としてエネルギーレスショルドを計算すると  $E_{th}=1.5[\text{keV}]$  となる。ゲインが高く回路系のノイズがほとんどきいてこないために、非常に小さな値となる。そのため、1photon や 2photon といった小さな信号もスペクトルとして捉えることができるが、その 1photon の信号がノイズとして検出されてしまう。カウントレートが高いために、そのピークがレスショルドを決めてしまう。これは自発的電子放出の頻度に依存するもので、電圧値が低ければ減少するがその代わりゲインも減少し、エネルギーレスショルドが増加する。これらのことから、最適な電圧値や温度を決定することが必要となってくる。

### 4.3 PD, APD, MPPC との比較

PD, APD, MPPC と同セットアップで測定しているので、同じ線源のスペクトルをそれぞれ比較することで、PD からどのくらい増倍されているかを確認する。まず、PD と APD の Cs662keV の線源を比べる。両方シェイピングアンプも同じ 500 である。図 4.17, 4.18

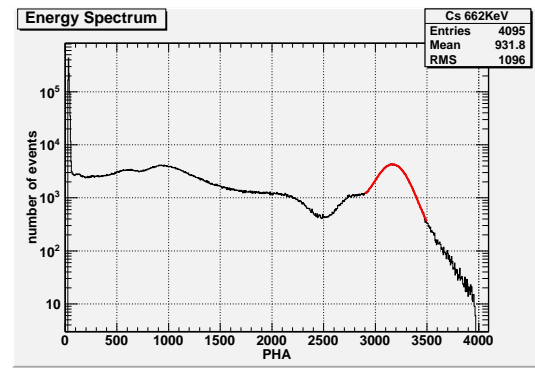
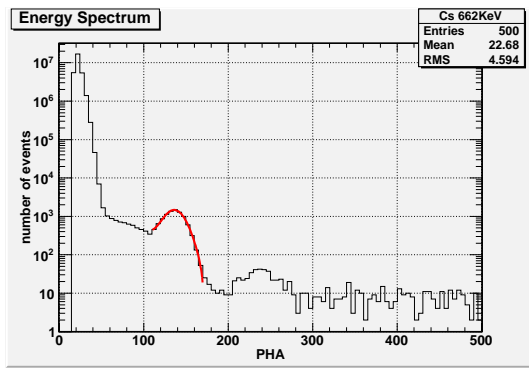


図 4.17: PD と BGO による Cs662keV のスペクトル (横軸チャンネル)      図 4.18: APD と BGO による Cs662keV のスペクトル (横軸チャンネル)

PD のときには Cs のピーク CH は 136CH であり、APD のときは 3170CH である。これから APD は PD のゲインの約 23 倍であることがわかる。次に、この APD の Am のスペクトルと MPPC の Am のスペクトルを比べる。前節までは APD や PD のときとプリアンプは異なっていたが、ここでは APD の時と同じプリアンプを用いて  $^{241}\text{Am}$  のスペクトルを取得し APD と比べた。なお、シェイピングアンプのゲインは MPPC のときには 20 倍となっている。測定結果を図 4.19, 4.20 に示す。

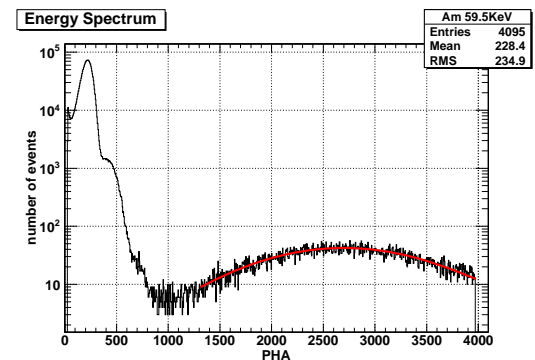
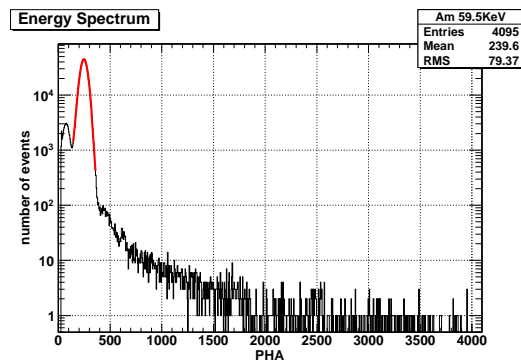


図 4.19: APD と BGO による Am59.5keV のスペクトル (ShapingGain500)      図 4.20: MPPC と BGO による Am59.5keV のスペクトル (ShapingGain20)

このときの APD のピーク CH は 247CH で、MPPC のピーク CH は 2690CH である。さらに、このときのシェイピングゲインが APD500 と MPPC20 であることと、最大波長感度域での量子効率 APD が 80 %、MPPC が 50 % を採用すると、APD と MPPC の相対倍率は 435 倍となり、PD と MPPC のゲイン比は約  $1.0 \times 10^5$  となる。一方 LED を用いたゲイン測定の実験では  $1.7 \times 10^5$  であり、測定結果とよくあっている。

次にエネルギー分解能の比較をする。PD、APD、MPPC の低温 (-30 ) でのそれぞれのエネ

エネルギー分解能を示す。

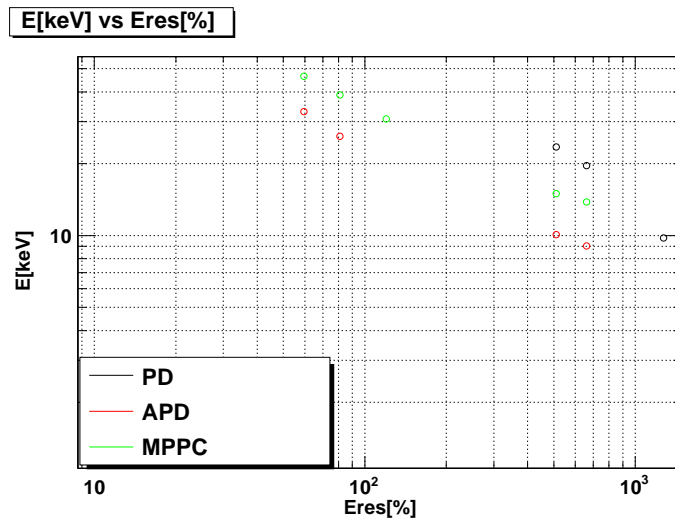


図 4.21: APD, MPPC のエネルギー分解能

先にも書いているように、PD はゲインの増倍がなく、第三項の回路系ノイズによる寄与が大きいためエネルギー分解能は  $E^{-1}$  に比例する様な形になり、APD は PD よりもゲインが高いため、第三項の影響は少なく、第二項の  $E^{-1/2}$  に比例する様な形となる。MPPC では APD よりもさらにゲインが大きいため、APD に比べより  $E^{-1/2}$  に近いエネルギー分解能となっている。

MPPC の分解能が APD よりも悪化しているのは、第二項にあるシンチレータからの光量や検出効率、さらには過剰雑音係数などによるもので、MPPC は開口率というものがあり、APD をアレイさせているために、光を検出することのできない不感領域が存在する。それゆえに APD の時ほどの光量が得られず、光子の検出効率が下がってしまうことで APD よりもエネルギー分解能が悪くなると考えられる。

次にエネルギーしきり目をそれぞれ比較する。-30 における  $E_{th}$  は PD で 280keV ~ 480keV (図 3.13 参照)、APD は 8keV (図 3.26 参照) さらに MPPC では 1.5keV (図 4.12 参照) であった。 $E_{th}$  の式は (3.8) で定義されており、 $E_{th}$  を小さな値にするためには、BGO から検出できる光量が大きく、回路系のノイズが小さいことと光検出器の内部増倍率が大きいことが必要となる。PD, APD, MPPC についてそれぞれ、比較していくと、BGO からの検出光量は PD と APD が同じくらいであり、MPPC では PD, APD の 0.6 倍となる。回路系のノイズは PD、APD、MPPC で同じである。最後に増幅率は PD では 1 倍であるが APD では 30 倍、MPPC では  $10^6$  倍である。このことから、 $E_{th}$  は MPPC で一番良くなり PD で一番高い値となる。しかし MPPC の場合には自発的電子放出のカウントレートが高いため、実際にはそのフォトンピークがしきり目を決めることとなる。図 4.12 と 4.19 を比べてもわかるように、APD では Am の 60keV に対し、12keV 程度、MPPC の場合には 15keV 程度となっている。

### 4.3.1 MPPC25 $\mu\text{m}$ pixel と MPPC100 $\mu\text{m}$ pixel

次に、浜松ホトニクスで、3mm  $\times$  3mm の MPPC で先まで実験で用いていた 50 $\mu\text{m}$  のピクセルサイズのもの他に、25 $\mu\text{m}$  のピクセルサイズのもの と 100 $\mu\text{m}$  のピクセルサイズのもの が開発されている。そこでこの章ではそれらの挙動を示し、どのような変化がみられるかを確認する。

それぞれのゲインの測定

セットアップは 50 $\mu\text{m}$  のピクセルサイズの MPPC と同様に実験を行った。25 $\mu\text{m}$  と 50 $\mu\text{m}$  と 100 $\mu\text{m}$  の各ピクセルサイズの MPPC のゲイン測定結果を図 4.22 に示す。

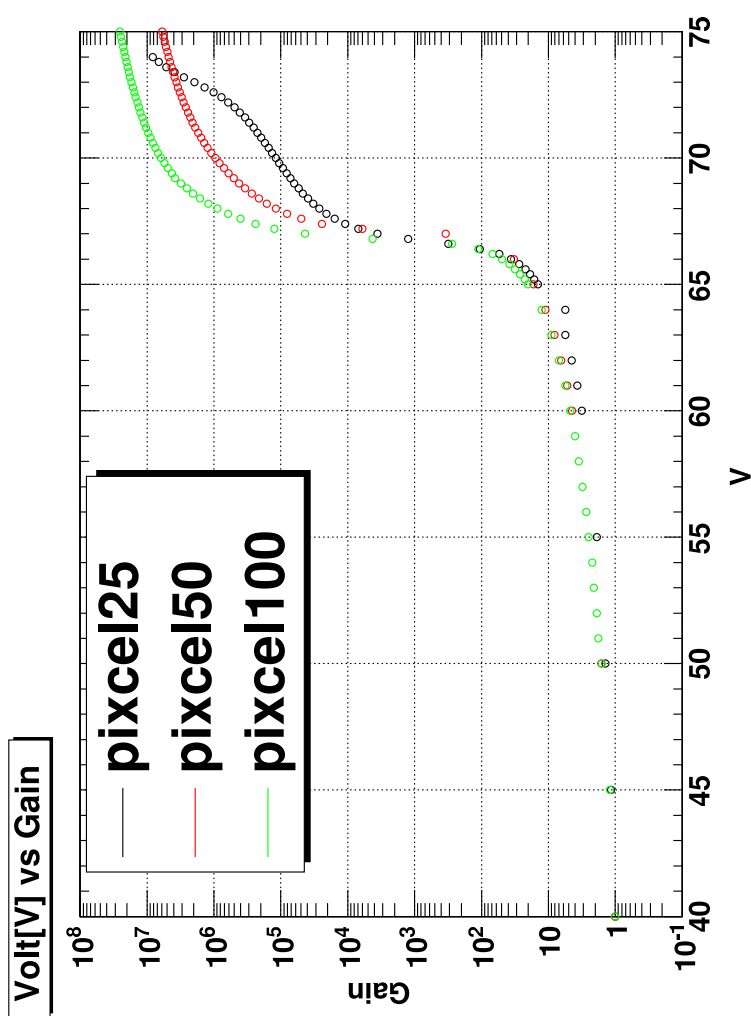


図 4.22: MPPC(25 $\mu\text{m}$ ,50 $\mu\text{m}$ ,100 $\mu\text{m}$  のピクセルサイズ) のゲイン

この結果からもわかるように、ピクセルサイズの大きなものは、APDの端子間容量Cも大きくなるため、自身に貯められる電荷量が大きくなり、増倍率も大きくなるのがわかる。これは浜松ホトニクスデータシートとよく合っている。

### 線源の読みだし

ここで、それぞれのMPPCのゲインがほぼ同じになるように電圧を決め、色々な線源をあててBGOからの光を読みとった。25 $\mu\text{m}$ のピクセルサイズのものでは69Vの逆電圧を印加して測定し、100 $\mu\text{m}$ ピクセルサイズのものでは67Vの逆電圧を印加した。その結果を図4.24に示す。これは先に述べている50 $\mu\text{m}$ と同様のセットアップで行なったもので、この結果と以下に示すリニアリティの結果から低エネルギー側が25 $\mu\text{m}$ ピクセルのものでは23keV、100 $\mu\text{m}$ ピクセルのものでは約13keVまで読み出せていることがわかった。この結果はピクセルサイズが25 $\mu\text{m}$ のものでは、少し悪くなっており、100 $\mu\text{m}$ のピクセルサイズのもの、50 $\mu\text{m}$ ピクセルのものでは優位に変化しなかった。

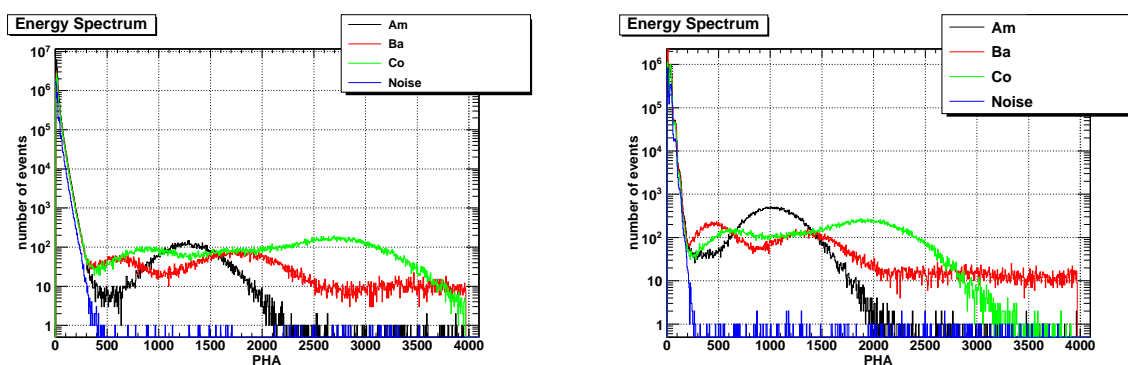


図 4.23: MPPC(25 $\mu\text{m}$  ピクセル) によるスペクトル  
 図 4.24: MPPC(100 $\mu\text{m}$  ピクセル) によるスペクトル

### リニアリティの測定

MPPCはアレイされているピクセル数により、読み出すことのできるエネルギーが決定されるために、ピクセル数が多いほど良いリニアリティが得られる。ピクセルサイズが25 $\mu\text{m}$ のものと100 $\mu\text{m}$ のものの結果を示す。これは $^{241}\text{Am}$ の59.5keVと $^{133}\text{Ba}$ の81keVと31keVさらに $^{57}\text{Co}$ の120keVのデータからリニアリティを計算している。

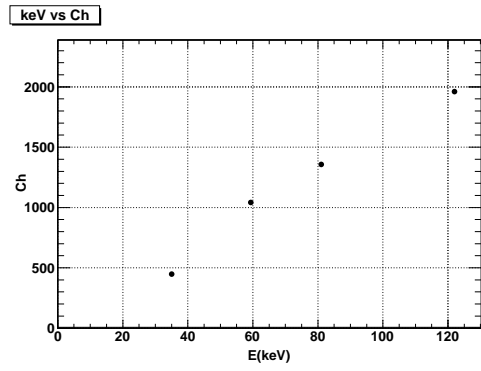
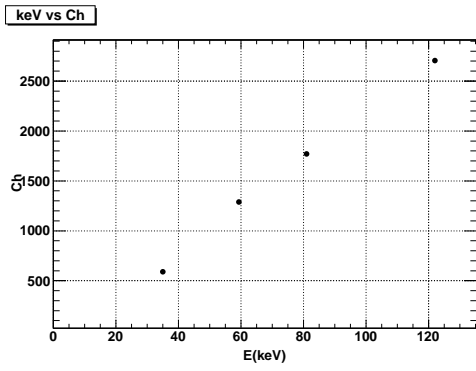


図 4.25: MPPC(25μm ピクセル) のリニアリティ 図 4.26: MPPC(100μm ピクセル) のリニアリティ

これらのことから、一番ピクセル数の少ない100μm の MPPC でも 130keV までのリニアリティは保たれていることが分かった。



## 第5章 まとめと今後

本研究では近年新しく開発された MPPC により BGO の光読み出しの実験を行ってきた。またその得られた結果から APD や PD との比較をし、エネルギー分解能、エネルギースレッシュホールドについて議論してきた。その結果についてまとめる。

MPPC は PMT と同程度に増倍率が大きく、さらに半導体検出器であるので実質量子効率も ~ 50 % (3600 ピクセル) と PMT よりも高く、APD と PMT の良いところを併せ持つ光センサーである。そのエネルギー分解能は MPPC の回路ノイズに起因するものよりも、MPPC の原理にある APD ピクセルの微小な増倍率の違いにより悪くなってしまう。しかしながら、エネルギー分解能は Cs662keV において 10 % で APD の 9 % に近い良い結果が得られている。さらに、エネルギースレッシュホールドにおいても MPPC の自発的電子放出によるフォトンの信号が低エネルギーのスレッシュホールドを決めることとなる、これについても APD は 12keV に対して MPPC が 15keV という結果となり、良い値が得られた。しかしながら、どちらも APD よりも悪い値となり、さらなる MPPC の読み出しの研究が必要である。

今実験では読み出すことを中心とし、エネルギー分解能の改善にはあまり着手できなかった。であるので、今後の課題についてはエネルギー分解能やエネルギースレッシュホールドを下げることに着目し研究を進めることである。具体的に MPPC には APD ピクセルサイズが異なったものがあり、そのピクセルサイズやピクセル数によって異なった振る舞いをすると考えられる。例えば、エネルギースレッシュホールドをよくしたい場合には、APD ピクセルサイズが大きく、ピクセル数が小さいものを選べば、自発的電子放出により反応するピクセル数を減らすことができ、より良い値が得られると考えられる。また高エネルギー側まで観測したい場合にはピクセル数の多いものを選ぶことでよい結果が得られると考えられる。さらに、電圧により自発的電子放出が増加することや、低温にすることで、PD ピクセルの微小なゲインの差が大きくなってしまふことなどから、最適な温度や電圧を決定することが必要となる。

## 謝辞

研究をご指導していただいた深沢先生には非常に感謝しております。右も左もわからない状態から1つ1つ丁寧に教えていただきありがとうございました。水野先生にも実験の精度を上げる方法や、いろいろと根本的な疑問を1から教えていただきました。非常にわかりやすくスムーズに実験をすすめることができました。ありがとうございました。高橋先生は常に近いところで実験を見ていただきありがとうございます。実験の何たるかをひろたかさんには教えていただきました。また片桐先生にも突然実験の指導をお願いしたにもかかわらず、快く教えていただき非常に感謝しております。しかし、あの教わったことはこの論文には書くことがありませんでした。しかし、いつか役に立つと信じています。お世話になった方を年功系列的に書いていきますが、まず小部屋でおなじみD3の山中さん。D論お疲れ様です。D論期間中には夜遅くまでやられている姿に感銘を受けました。その山中さんの背中を見ていたので卒論をがんばりやりきることができました。ありがとうございます。そして安田さん。安田さんにはよくお話に付き合ってくださいました。僕の話面白くなくても笑ってくれる安田さんには非常に感謝しております。ありがとうございました。次にD2の小部屋でおなじみ上原さん。上原さんにはバイトを紹介していただきありがとうございました。卒論中にもかかわらず面接に行く価値のあるバイトです。是非合格したいです。また大部屋の西野さん。非常に色々なことを教えていただきました。その全てが今の僕を縛り付けています。ありがとうございます。そして笹田さん。ありがとうございます。なにがなんでもありがとうございます。そしてD1の林さん。シリコンについて非常に詳しく教えていただきました。ありがとうございます。先本さん。あの時のあれは非常にあれでした。ありがとうございました。そして、なんとんでも大部屋の花畑さん今回の卒論は花畑さんの力なくしあげることができませんでした。非常に実験的にも近い位置で面倒を見ていただき感謝しています。次は花畑さんの実験能力ではなく、運の良さにもあやかりたいものです。そして平木さんには遅刻の大切さを教えていただきました。ありがとうございます。M2の伊藤さん(ここからは、あいうえお順)伊藤さんは常に尊敬の眼差しで見えていました。小松さん今度日本を一緒に探検しに行きましょう。佐田さんには人と触れ合う大切さを教えていただきました。道津さんには実験で詰まったときにアドバイスをいただき非常に円滑に進めることができました。ありがとう御座います。本田さんには心配をかけさせられました。お疲れ様です。松岡さんこの卒論の根本が書けたのは松岡さんの卒論用テンプレートのおかげです。ありがとうございます。M1の(僕の席に近いほうから)米谷さんにはNDフィルターや実験の創作の手伝いなどをしていただき非常に感謝しております。もちおさんには、デスクトップをいいものにしていただきました。パクさんにはあの図のディヴィジョンのやり方を教えていただきました。奥島さんには曲げない心を教えていただきました。山崎さんには本を借りっぱなしですいません。原尾さん、いろいろありがとうございます。ありがとうございます。そして、B4の石田さん(名前の順)苦しい時期にいろいろ助けていただきありがとうございます。終わったらいろいろしに行きましょう。木村くんにはMCA同盟を組んでいただきました。ありがとう御座います。後藤くんにはいろいろ勉強させていただきました。佐藤さんはともにゴミ係として戦ってきた戦友で、忘年会のとき

もありがとうございました。永安さんにはいろいろ教えていただきました。どのようにすれば男女間の交友を円満にすごせるかというのは非常に悩むべきところだとかんがえています。林君は物静かなので、いかに林君を笑わせられるか。それを思い描きながら毎日睡眠していました。ではこの辺で、ありがとうございました。

## 関連図書

- [1] 阪井英次 木村逸郎 訳 「放射線計測ハンドブック」
- [2] 浜松ホトニクス株式会社 「光半導体ハンドブック」
- [3] JAXA HP
- [4] 中本達也, 修士論文, 広島大学 (2003)
- [5] 花畑義隆, 修士論文, 広島大学 (2009)
- [6] Digi-Key 「Datasheet Aexhive」
- [7] 浜松ホトニクス HP 「APD S8664 データシート」
- [8] 浜松ホトニクス HP 「MPPC S10362-33 データシート」
- [9] 生出秀行, 音野瑛俊, 山下了, 日本物理学資 2011 「次世代光検出器」