

宇宙軟ガンマ線観測用BGO井戸型アク ティブシールドの光読み出しの研究

広島大学 理学部 物理学科学科
高エネルギー・素粒子実験研究室

1479042H

竹本 健太

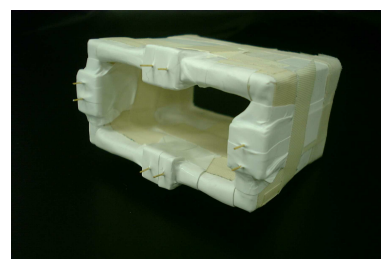
主査：深澤泰司 副査：杉立徹

2006年2月10日

概要

銀河団やブラックホールなどをターゲットとする X 線観測衛星 NeXT の打ち上げが 2011 年頃を目標とされ、搭載予定の高感度軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector: SGD) は半導体多層コンプトンカメラを BGO の井戸型アクティブシールドで覆うことで低バックグラウンドを目指す。BGO は単位体積当たりの阻止能が非常に高い。更に、この井戸型アクティブシールドの BGO 壁の光検出にアバランシェフォトダイオード (APD) を用いることで高い量子効率を得られ、内部増幅機能により threshold の低下、エネルギー分解能の向上が可能となり、更には検出器の小型化・軽量化が実現して検出器設計の自由度が広がる。

アクティブシールドは板状の BGO を組み合わせて作られる。しかし、板状の BGO は一般に光集収効率が悪い。また、それに加えて APD のような小さな受光面素子でシンチレーション光を読み出した実行例がないため、検出器のデザインを決定できない。そこで本研究では板状の BGO で構成したアクティブシールドのシンチレーション光を APD で読み出すための最適方法を、APD を付ける位置や数を変えて調べた。また、複数の APD を同時に読み出す実験システムの立ち上げも行った。図は板状の BGO で構成した簡易 BGO アクティブシールドに APD を装着したものである。



BGO と APD の装着例

目次

第1章	序論	8
第2章	結晶シンチレータを用いたガンマ線検出器	9
2.1	結晶シンチレータ	9
2.2	アバランシェフォトダイオード (APD)	10
2.3	シンチレーション検出器のノイズ	12
2.3.1	シンチレーション検出器の信号処理回路	12
2.3.2	信号処理回路におけるノイズ	12
2.3.3	一般的な半導体検出器のノイズ評価の表式	15
2.4	BGO 結晶シンチレータと APD の組み合わせによるエネルギー分解能	16
2.5	NeXT 衛星における BGO と APD の活用	17
2.6	過去の APD 実験の結果	18
2.7	研究目的	20
第3章	PMT(光電子増倍管) による BGO サンプルの光量測定	22
3.1	実験に用いた BGO サンプル	22
3.1.1	簡易 BGO アクティブシールド	22
3.1.2	HXD 用 BGO-well	23
3.2	実験セットアップ	24
3.2.1	簡易 BGO アクティブシールドとライトガイドのセットアップ	24
3.2.2	HXD 用 BGO-well とライトガイドのセットアップ	25
3.2.3	VME による信号処理回路	26
3.2.4	Pocket MCA(PMCA) を用いたデータ処理回路	28
3.3	ライトガイドの効果	29
3.3.1	5mm 角 BGO におけるライトガイドの有無による光量比較	29
3.3.2	5mm 角 BGO のライトガイド接着位置による光量比較	30
3.3.3	BGO アクティブシールドにおけるライトガイドの有無による光量比較	31
3.4	BGO アクティブシールドの光量比較	33

第 4 章	APD(アバランシェフォトダイオード)による簡易 BGO アクティブシールドの光読み出し	36
4.1	実験目的	36
4.2	5mm、3mm 角 APD の gain 測定	37
4.2.1	実験セットアップ	37
4.2.2	5mm 角 APDgain 測定	38
4.2.3	3mm 角 APDgain 測定	38
4.3	APD を用いた 5mm 角 BGO と簡易 BGO アクティブシールドの光量比較	39
4.4	ガンマ線の照射場所によるスペクトル変化の測定	41
4.5	4つの APD によるガンマ線の 4ch 同時読み出し	43
第 5 章	APD+HXD 用 BGO-well でのガンマ線実験	59
5.1	実験目的	59
5.2	8ch 対応実験装置の製作	59
5.2.1	Discri 回路の製作	60
5.2.2	反転回路	60
5.3	1APD によるアルファ線の照射場所によるスペクトル変化の測定	61
5.4	APD を 5 つにした場合における各 APD のスペクトル変化	65
第 6 章	まとめ	74
付 録 A	§5.3 における理論上のエネルギー分解能の算出	76
付 録 B	§5.4 における理論上のエネルギー分解能の算出	80

表 目 次

2.1	シンチレータの特性比較	10
3.1	VMEによるデータ処理回路で用いたモジュールの詳細	26
3.2	測定に用いたモジュールの詳細	28
3.3	ライトガイドの有無によるピークチャンネルとエネルギー分解能	30
3.4	5mm角 BGO の位置によるピークチャンネルとエネルギー分解能	31
3.5	実験装置の設定	32
3.6	簡易 BGO アクティブシールドにおけるライトガイドの有無による ピークチャンネルとエネルギー分解能	32
3.7	HXD用 BGO-well におけるライトガイドの有無によるピークチャン ネルとエネルギー分解能	33
3.8	BGO アクティブシールドと 5mm 角 BGO のピークチャンネルと分解能	34
4.1	測定に用いたモジュールとセンサーの詳細	37
4.2	5mm 角 APD の各バイアス電圧での gain	38
4.3	3mm 角 APD の各バイアス電圧での gain	39
4.4	VMEによるデータ処理回路でのモジュールの変更点	40
4.5	簡易 BGO アクティブシールドと 5mm 角 BGO のピークチャンネルと エネルギー分解能	40
4.6	照射場所によるエネルギー分解能	42
4.7	一定エネルギーにおけるピークチャンネルのばらつき	43
4.8	簡易 BGO アクティブシールドの各面についての光量比	47
4.9	光量比と光伝達の割合	47
4.10	1APD のエネルギー分解能	48
4.11	4APD のエネルギー分解能	49
4.12	簡易 BGO アクティブシールドの各面に対する Y の値	52
4.13	場合 (1)、(2) の APDgain	53
4.14	場合 (3) の APDgain	53
4.15	各場合での $\delta_{\text{noise,C}}$ の値	54
4.16	各場合での δ_{noise} の値	55

4.17 エネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値	56
4.18 場合 (3) における3つのパルスハイト和でのスペクトルについてのエ ネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値	57
5.1 spot(1-1)、(1-5) のピークチャンネルとエネルギー分解能	63
5.2 spot(2-2) のピークチャンネルとエネルギー分解能	64
5.3 エネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値	65
5.4 VME によるデータ処理回路で追加したモジュール	66
5.5 一定エネルギーにおけるピークチャンネルのばらつき	66
5.6 場所 (2)、場所 (5) と5つ全てのパルスハイトの和におけるスペクト ルのピークチャンネルとエネルギー分解能	68
5.7 それぞれの照射場所での場所 (2)、場所 (5)、5つ全てのパルスハイト の和におけるスペクトルのピークチャンネルとエネルギー分解能	71
5.8 場所 (2) と場所 (5) のパルスハイト和のスペクトルのピークチャンネ ルとエネルギー分解能	72
5.9 エネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値	72
A.1 各 spot での Y の値	77
A.2 バイアス電圧 355V での各 APD のゲイン	77
A.3 各 spot の I_n	78
A.4 各 spot の C_{in}	78
A.5 各 spot での δ_{noise} の値	78
A.6 エネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値	79
B.1 各場所での Y の値	81
B.2 バイアス電圧 355V での各 APD のゲイン	82
B.3 各 case の I_n	82
B.4 各 case の C_{in}	82
B.5 各 case での δ_{noise} の値	83
B.6 エネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値	83

目次

2.1	左 (a) 逆方向に電圧をかけた場合、右 (b)PD の放射線検出の原理 . . .	11
2.2	SGD のユニットの概念図	18
2.3	BGO と APD のセットアップ	20
2.4	BGO を 2 枚組み合わせるのセットアップと入射位置と名称	20
2.5	BGO プレートと APD の装着	20
3.1	ゴアテックス反射剤が巻かれた簡易 BGO アクティブシールド	23
3.2	ゴアテックス反射剤で巻かれた HXD 用 BGO-well	23
3.3	簡易 BGO アクティブシールドとライトガイド、PMT の装着図	24
3.4	ライトガイド	25
3.5	HXD 用 BGO-well とライトガイド、PMT の装着図	25
3.6	VME による信号処理回路のブロック図	27
3.7	Discri 回路 HU4715 の回路図	27
3.8	タイミングチャート	28
3.9	オシロスコープで見た出力波形	28
3.10	PMCA によるデータ処理回路のブロック図	29
3.11	ライトガイドあり	29
3.12	ライトガイドなし	29
3.13	ライトガイドを上から見た図	30
3.14	slide1	31
3.15	slide2	31
3.16	簡易 BGO アクティブシールドにおけるライトガイドありでのスペク トル	32
3.17	簡易 BGO アクティブシールドにおけるライトガイドなしでのスペク トル	32
3.18	HXD 用 BGO-well におけるライトガイドありでのスペクトル	33
3.19	HXD 用 BGO-well におけるライトガイドなしでのスペクトル	33
3.20	簡易 BGO アクティブシールドと比較した 5mm 角 BGO のスペクトル	34
3.21	HXD 用 BGO-well と比較した 5mm 角 BGO のスペクトル	34

4.1	PMCA によるデータ処理回路のブロック図	38
4.2	5mm 角 BGO、簡易 BGO アクティブシールドと APD の装着図	40
4.3	簡易 BGO アクティブシールド	40
4.4	5mm 角 BGO	40
4.5	ガンマ線の照射場所ごとのスペクトル (左上 : under、右上 : top、左 下 : left、右下 : right)	42
4.6	ガンマ線の照射場所ごとのスペクトル (赤 : under、緑 : top、青 : left、 黄 : right)	42
4.7	バックグラウンドスペクトル	42
4.8	ガンマ線の照射場所	42
4.9	4つの 5mm 角 APD と簡易 BGO アクティブシールドの装着図	44
4.10	照射場所別の ^{133}Ba のスペクトル	44
4.11	Shaper Gain を MAX/2 にした時の簡易 BGO アクティブシールドの 右側に装着した APD によるスペクトル	44
4.12	補正後の場所別の ^{133}Ba のスペクトル	45
4.13	照射した場所 : under	46
4.14	照射した場所 : top	46
4.15	照射した場所 : left	46
4.16	4つの APD のパルス高の和のスペクトル	48
4.17	容量勾配	55
4.18	3つのパルス高を足し合わせた場合 (3) のスペクトル	57
5.1	Discri 回路	60
5.2	1ch 分の反転回路図	61
5.3	反転回路	61
5.4	APD を HXD 用 BGO-well の上側の面に装着した場合のアルファ線の 照射場所	62
5.5	左上から右へ spot(1-1)、(1-2)、(1-3)、左下から右へ spot(1-4)、(1-5)、 (1-6) のスペクトル	62
5.6	シンチレーション光の BGO 内での動作	63
5.7	APD を HXD 用 BGO-well の中央に装着した場合のアルファ線の照射 場所	64
5.8	spot(2-1) でのスペクトル	64
5.9	spot(2-2) でのスペクトル	64
5.10	5ch 用の VME による信号処理回路のブロック図	66
5.11	5つの APD の装着図	67

5.12	左上から右へ場所 (1)、(2)、(3)、左下から右へ場所 (4)、(5)、5つ全てのパルス高さを足し合わせたスペクトル	67
5.13	左上の右から場所 (1)、(2)、(3)、左下の右から場所 (4)、(5) のスペクトル (範囲は 450~1200ch)	69
5.14	左上の右から場所 (1)、(2)、(3)、左下の右から場所 (4)、(5) のスペクトル (範囲は 1400~2400ch)	69
5.15	アルファ線の照射場所	70
5.16	spot(3-2) : 左上から右へ場所 (1)、(2)、(3)、左下から右へ場所 (4)、(5)、5つ全てのパルス高さを足し合わせたスペクトル	70
5.17	spot(3-3) : 左上から右へ場所 (1)、(2)、(3)、左下から右へ場所 (4)、(5)、5つ全てのパルス高さを足し合わせたスペクトル	71
5.18	spot(3-1) での場所 (2) と場所 (5) のパルス高さの和のスペクトル	72
A.1	5mm 角 BGO	77
A.2	HXD 用 BGO-well	77

第1章 序論

宇宙で起こる現象には、高エネルギーの粒子や光子が大きく関与するものが多く見られ、一般にそれらの現象には特有な波長領域の電磁波(電波、赤外線、X線、ガンマ線)の放射が伴っている。その高エネルギー現象を解明するために放射線観測を行う。放射線中の粒子の正体は電荷を持つ陽子や原子核である。この粒子は宇宙に存在している磁場の影響により曲げられ、その起源の位置情報を失ってしまう。これに反して、X線やガンマ線は電磁波なので電荷を持たない。よって宇宙を進行している間に、その進路が干渉されて曲げられることはほぼない。よって、X線やガンマ線の観測はその放射線の到来方向が特定されて特定の天体の高エネルギー現象の観測が可能となる。

しかし、地上では大気の影響によりX線・ガンマ線の直接観測は困難である。そこで大気上層部や大気圏外で観測を行うために検出器を人工衛星に搭載して観測する。搭載される検出器には、小型化、低重量、耐久性などの地上に比べて厳しい条件が付随して、なおかつ優れた感度を備えていなければならない。

天体現象の電磁波放射から観測される指標は放射のスペクトル(連続スペクトル、輝線・吸収スペクトル)、時間変動、イメージ、偏光である。連続スペクトルからは温度、磁場、電離度などの物理量を得ることができ、輝線・吸収スペクトルからは温度、化学成分、活動性の高さを得ることができる。更に、時間変動からは活動の周期を得ることができ、イメージからは空間的な情報を得ることが可能である。これらの総合的な解析により様々な天体現象を解明できる。

近年の技術進歩により新しいタイプの検出器が開発され、ガンマ線天体物理学は急速に発展している。ガンマ線観測における重要な相互作用は、シンクロトン放射、非熱的放射、高エネルギー電子と光子の相互作用による逆コンプトン散乱などである。銀河団、ブラックホール、超新星残骸、ガンマ線バーストなどの様々な環境によって加速された粒子が放射していると考えられているこれらの相互作用を観測することで宇宙の高エネルギー現象を解明できる。

第2章 結晶シンチレータを用いたガンマ線検出器

2.1 結晶シンチレータ

結晶シンチレータとは放射線を吸収した時に、そのエネルギーにほぼ比例した数のシンチレーション光が発生することを利用したエネルギー計測装置である。シンチレーション光とは放射線が蛍光体に当たると、多数の励起分子を生じて励起分子が基底状態に戻る時に放出する光である。ガンマ線検出器はこの結晶シンチレータと、そのシンチレーション光を検出して電気信号に変換する光検出部で構成される。

ガンマ線計測に使用される結晶シンチレータには、検出媒体が固体であり阻止能が大きいこと、放射エネルギーの蛍光への変換効率(蛍光効率)が高いこと、蛍光に対する透明度が高いこと、蛍光の減衰時間が短いこと、蛍光の波長分布が検出器の分光度特性に適合していることが要求される。固体の密度は気体の密度と比較すると、約1000倍大きいので、ガスを用いた比例計数管に比べて小さな体積で放射線を止めることが可能である。蛍光効率が高いとシンチレータの発光強度(光量)が高くなる。また、透明度が高いと検出器への蛍光到達量が増えるために集光効率が高くなる。更に、蛍光の減衰時間が短いと時間分解能が高くなるので高線量率の放射線が計算できる。そして、蛍光の波長分布が検出器の分光度特性に適合していると、高い量子効率を得ることができる。これとは別に衛星搭載の検出器にはコンパクト性も求められ、無機シンチレータが一般に使用されている。

無機物質中のシンチレーション機構は材料の結晶格子で決定されるエネルギー状態に依存する。電子が格子上の位置に束縛されている価電子帯、結晶内を自由に移動するのに十分なエネルギーを持つ伝導帯、それらの間に禁制帯というエネルギーギャップが存在し、純粋な結晶において電子は禁制帯には存在できない。よって、結晶シンチレータ内で電子は離散的なエネルギー帯しか持つことはできない。ガンマ線の照射により電子がエネルギーを吸収すると、価電子帯中の定常位置から禁制帯を越えて伝導帯へ励起する。純結晶中で電子が光子を放出して価電子帯に戻る場合、純結晶のギャップ幅では光子のエネルギーが大きくなり過ぎてしまい可視光にならない。この問題を解決し、可視光の放出率を高めるために通常は無機シンチレータのに少量の不純物を添加する。これらの不純物を活性化物質(activator)といい、結

表 2.1: シンチレータの特性比較

特性	NaI:Tl	CaI:Tl	BGO	GSO
実効原子番号	50	54	74	59
密度 (g/cm ³)	3.67	4.51	7.13	6.71
最大発光波長 (nm)	410	565	480	430
蛍光出力 (相対値)	100	45	12	20
エネルギー分解能 (¹³⁷ Cs662keV : %)	9	7.5	11	10
蛍光減衰時間 (ns)	230	1000	300	60
吸収係数 (511keV : cm ⁻¹)	0.34	0.41	0.955	0.674

晶格子内に特別な位置を作り純結晶の正常なエネルギー帯構造を変形させる。その結果として、禁止帯内に価電子帯への遷移が可能となる中間準位を作り、可視光の発生を高める。

今回の実験で使用したのは無機シンチレータの Bi₄Ge₃O₁₂(BGO) である。BGO の特徴としてはビスマスの大きな原子番号 (83) と大きな比重 (7.3g/cm³) である。この特徴により、市販のシンチレータ材料のどれよりも単位体積当たりのガンマ線の光電吸収率は大きい。また、機械的、化学的性質により取り扱いが容易であり検出器は頑丈に作ることが可能である。これは衛星搭載の検出器としては十分な利点となり得る。さらに、BGO はシンチレーション過程を促進するための活性化物質を添加する必要のない純粋な無機シンチレータである。これは蛍光は不純物の代わりに結晶の主成分である Bi³⁺ イオンの光学的遷移を伴うためである。また、Bi³⁺ の光吸収スペクトルと放出スペクトルの間にストークスシフトと呼ばれる大きなシフトが存在するのでシンチレーション光の自己吸収は少ししか起こらない。よって、大きな結晶でも透明度を保持できる。これも検出器としての利点である。主なシンチレータの特性を表 2.1 にまとめた。表 2.1 から BGO は他のシンチレータと比較して阻止能が大きいことが分かる。また、光量はヨウ化ナトリウム (NaI) と比較して 10 ~ 20% と低いが、低温にすることで光量を増加させることが可能である。

2.2 アバランシェフォトダイオード (APD)

以前の数百 keV ~ 数 MeV のエネルギー領域においての一般的な検出器としては結晶シンチレータを光電子増倍管 (PMT) に取り付けられたものであった。PMT は入射した光子を電子に変換し、更に増幅部分で大幅に電子を増幅して検出するのに十分な信号にする。しかし、PMT は体積がかさばるうえに動作させるためには 1000V 以

上の高い電圧が必要となってしまいます。また磁場の影響を受けやすく、量子効率が約20%と低いのでエネルギー分解能への寄与がシンチレーション光のポアソン揺らぎの成分となってしまいます。

また一方、GeV 領域の高エネルギーガンマ線のエネルギー測定では結晶シンチレータである CsI をフォトダイオード (PD) に取り付けたものが検出器として用いられてきた。PD とは p 型半導体と n 型半導体を接合したもので、図 2.1(a) に示すように pn 接合の両端に逆方向の電圧 (逆バイアス電圧) をかけると正孔と電子は互いに離れる方向へ引きよせられるため、pn 接合面にはキャリアの存在しない領域ができる。この領域を空乏層と呼ぶ。空乏層は高抵抗の絶縁層であり、電流をほとんど流さない。しかし、図 2.1(b) に示すように空乏層に可視光または放射線が入射すると、相互作用を起こして価電子帯に存在している電子が伝導体に励起されて価電子帯に正孔を作る。この電子正孔対を逆バイアス電圧による電界により電極に集めることによりキャリアの動きをさせる。PD では電流パルス大きさ (空乏層中のキャリア対の数) と放射線の失われたエネルギーが比例する関係にある。よって、出力パルスの電荷量から入射した放射線のエネルギーが算出できる。PD は PMT と比較して、100V 以下の電圧で動作するので消費電力が少なく、体積が小さいうえに磁場の影響を受けにくいという衛星搭載の検出器としての長所を持つ。更に、量子効率も 80% 以上という高い値を示すという長所を持っている。しかし、素子の内部に増幅機能を持たないために微弱な信号を読み出すことは難しい。

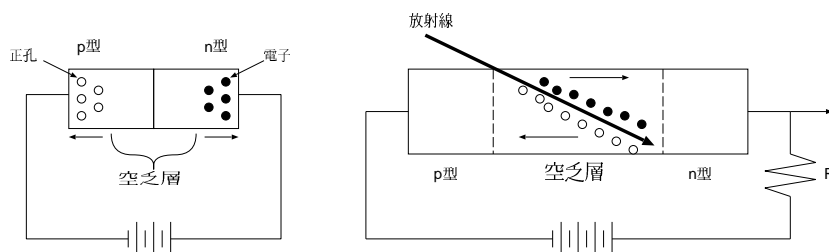


図 2.1: 左 (a) 逆方向に電圧をかけた場合、右 (b) PD の放射線検出の原理

アバランシェフォトダイオード (APD) は PD と同様に磁場への耐性に優れ、構造がシンプルで体積が小さい。そして、量子効率が $\sim 80\%$ に近いという長所を持つ。更に、検出器内で作り出される少量の光電子を半導体に高い電圧を印加することにより、加速させて衝突させて電荷収集方向に沿って新しい電子、正孔を作り出す。この現象をアバランシェ現象と呼ぶ。この現象により内部増幅を可能にするので、信号を雑音のレベルから増幅して読み出し、回路系ノイズの寄与を増幅率分の 1 にできる。APD は PMT と PD の両方の長所を持ち合わせ、原理的には PMT や PD よりも threshold とエネルギー分解能の向上が見込まれる。

2.3 シンチレーション検出器のノイズ

2.3.1 シンチレーション検出器の信号処理回路

シンチレータを用いた検出器ではガンマ線がシンチレータに入射した時に発生する光子を光センサーで受信し、電気信号に変換する。そして、増幅と整形を行ってデジタル処理を施されて利用される。以下にこの流れの詳細を記述する。

I. シンチレータ

入射したガンマ線とシンチレータとの相互作用により発生した自由電子がシンチレータ内の電子を励起して、エネルギー量に比例した量の光子を発生させる。

II. 光センサーでのシンチレーション光の読み出し

光センサーとはPMT、PD、APDのことである。シンチレータで発生した光子を読み出すために用いる。

III. PreAmp、ShapingAmpによる波形処理

PreAmpでは光センサーからの非常に微弱な電流信号を電荷積分と増幅して後の回路のためにインピーダンス変換を行う。

ShapingAmpではノイズの除去や波形の整形をする。この作業はShapingと呼ばれ、正しいスペクトル情報を得るためには必要不可欠である。

IV. ADC(Analog to Digital Converters)によるデジタル処理

ADCではこれまでのアナログ信号として処理されてきた信号をデジタル処理をする。この作業により、ヒストグラムが作成可能となる。

2.3.2 信号処理回路におけるノイズ

以下に2つのノイズについて記述する。

I. ジョンソンノイズ

ジョンソンノイズとはブラウン運動によって素子の両端に現れる不規則な電位差のことである。ブラウン運動とは電子回路内のキャリアが熱的に揺らぐことをいう。よって、このノイズは抵抗の実数部のような外部と熱的な相互作用を

起こす場所に発生し、揺らぎに相当する電位差を生じる。よって、理想的なコンデンサーやコイルでジョンソンノイズは発生しない。

ジョンソンノイズのパワースペクトル $N_v(f)$ (f は周波数) を求めるために LCR 共鳴回路を考察する。抵抗内のキャリアの熱的揺らぎは L 、 C で静電ポテンシャルとして蓄積され、そのエネルギー E は電流揺らぎを i 、電圧揺らぎを v と仮定すると、

$$E = \frac{Li^2}{2} + \frac{Cv^2}{2} \quad (2.1)$$

で与えられる。これは一次元調和振動子の場合と等価なので、第一項と第二項の平均エネルギーは、

$$\frac{1}{2}L\overline{i^2} = \frac{1}{2}C\overline{v^2} = \frac{1}{2}kT \quad (2.2)$$

となる。これはエネルギー等分配則であり k はボルツマン定数 ($1.380662 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$)、 T は温度である。これとは別に、抵抗に発生する熱雑音電圧と、雑音の結果としてコンデンサーの両端に現れる電圧との関係は、

$$\begin{aligned} \overline{v^2} &= \int_0^\infty \frac{N_v(f)df}{1 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2 R^2} \quad (\omega \equiv 2\pi f) \\ &\simeq \frac{N_v(f_0)}{4CR} \end{aligned} \quad (2.3)$$

となる。この式では共鳴周波数を f_0 ($\equiv \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$) と仮定して、回路は f_0 で同調されているものとする。 L と C の値により f_0 は任意の値となり得るので、 $N_v(f)$ は式 (2.1)、式 (2.2)、式 (2.3) を用いると、

$$N_v(f) = 4kTR \quad [\text{V}^2/\text{Hz}] \quad (2.4)$$

と算出でき、周波数に依存しないことが分かる。

ただし、キャリアの衝突時間 (緩和時間) を τ_c と仮定してキャリア速度の相関関係が $\exp\left(-\frac{|t|}{\tau_c}\right)$ のように有限時間の減衰を示す場合、 $\frac{1}{1+\omega^2\tau_c^2}$ で示される周波数依存性が影響してくる。しかし、大抵の場合で τ_c は無視できるほど短いので

(典型的な金属の場合で $\sim 10^{-14}$)、ジョンソンノイズは白色雑音であると考えられる。ちなみに、式(2.4)は抵抗に直列に存在する電圧ノイズパワーだが、これを抵抗に並列に存在する電流パワーノイズとして示すと、

$$N_I(f) = \frac{N_V(f)}{R^2} = \frac{4kT}{R} \quad (2.5)$$

となる。

II. ショットノイズ

ショットノイズとは真空管や半導体素子で問題となる電流性ノイズである。ジョンソンノイズがキャリアの速度の揺らぎによるものに対し、ショットノイズはキャリアの数の揺らぎによるものである。以下の記述では両者に相関関係はないものとする。この揺らぎはキャリアの全体の流れが存在しなければノイズとして出てこない。ということは外部電界、キャリア密度勾配、温度勾配の一つでも存在する場合にショットノイズは発生する。これは熱平衡状態であれば必ず発生するジョンソンノイズとは異なる事実である。ここで、半導体の両端に電極を付けて電圧をかけた場合に発生するショットノイズを考察する。流れる電流 $I(t)$ は半導体中のキャリア数 $N(t)$ に比例するので、電流揺らぎ $i(t) = I(t) - I$ の自己相関関数を計算すると、

$$\overline{i(t) \cdot i(t + \tau)} = \frac{I^2}{N^2} \cdot \overline{N(t) \cdot N(t + \tau)} \quad (2.6)$$

となる。ここで相関 $R_N(\tau) \equiv \overline{N(t) \cdot N(t + \tau)}$ を考察すると、この相関は時刻 t に存在したキャリアが時刻 $t + \tau$ における電流揺らぎに与える影響を示すものとなっている。 R_N はキャリアの平均寿命 τ_l により指数関数的に減少し、電極間の平均ドリフト時間 τ_d により直線的に減少すると考えられるので、

$$\begin{aligned} R_N(\tau) &= \overline{N^2(t)} \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_d}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|\tau|}{\tau_l}\right) \quad (|\tau| \leq \tau_d) \\ &= 0 \quad (|\tau| > \tau_d) \end{aligned} \quad (2.7)$$

と仮定することが可能である。ここでWiener-Khintchineの公式を用いると $i(t)$ のパワースペクトル $N_I(f)$ は、

$$\begin{aligned}
N_I(f) &= 2 \cdot \frac{I^2}{N^2} \int_{-\infty}^{\infty} R_N(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad [A^2/Hz] \\
&= 2eI \cdot \frac{\alpha}{\tau_d} \cdot \int_{-\tau_d}^{\tau_d} \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_d}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|\tau|}{\tau_l}\right) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (2.8)
\end{aligned}$$

となる。ここで $I = \frac{eN}{\tau_d}$ と表せることを用いて、更に $\overline{N^2(t)} = \alpha N$ と仮定した。次に二通りを考察すると、

- $\tau_l \ll \tau_d$ の場合

$$N_I(f) \simeq 2\alpha eI \cdot \frac{2\tau_l/\tau_d}{1 + \omega^2\tau_l^2} \quad (2.9)$$

- $\tau_l \gg \tau_d$ の場合

$$N_I(f) \simeq 2\alpha eI \cdot \frac{\sin^2(\omega\tau_d/2)}{(\omega\tau_d/2)^2} \quad (2.10)$$

例をあげると、典型的な p-n 接合において逆バイアスのかけた場合は式 (2.10) が適用できる。高周波領域にならない限り、ノイズパワースペクトルは $N_I(f) \simeq 2\alpha eI$ と示すことができる。よって、ショットノイズは白色雑音として近似できる。

2.3.3 一般的な半導体検出器のノイズ評価の表式

信号処理回路のノイズ評価は §2.3.2 で記述したジョンソンノイズとショットノイズを考慮した場合の電荷揺らぎを電子数の揺らぎに対応させて $\overline{\delta_e}$ とする。これを等価ノイズ電荷 (ENC) と呼ぶ。例えば、Si 半導体で直接 X 線を検出した場合を考察する。この時、平均して $E_g = 0.00365(\text{keV})$ の入力エネルギーで 1 個の電子が出るので、ノイズによる信号電子揺らぎは $\overline{\delta_e}$ 個の揺らぎのエネルギー $E_g\overline{\delta_e}$ として計測される。よってノイズは、

$$\delta_{noise}^2 = (E_g\overline{\delta_e})^2 = (3.0 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{R_p} + 0.65 \cdot I_n) \cdot \tau_s + (2.1 \times 10^{-2} \cdot \frac{C_{in}^2}{g_m}) / \tau_s + \delta_{\text{電}}^2 [\text{keV}]^2 \quad (2.11)$$

のように示される。この場合において、 $R_p(\text{G}\Omega)$ はバイアス抵抗、 $I_n(\text{nA})$ は半導体検出器の暗電流、 $\tau_s(\mu\text{s})$ はシェーピングタイム、 $g_m(\text{mS})$ はプリアンプ内の初段 FET の特性を示す量、 $C_{in}(\text{pF})$ はプリアンプへの入力容量とする。また、 $\delta_{\text{電}}^2$ はジョ

ンソンノイズとショットノイズ以外のノイズである。この式 (2.11) の第一項を電流性ノイズ、第二項を容量性ノイズと呼ぶ。 I_n 以外の量はプリアンプの性能でほぼ決定され、 C_{in} を変化させることで測定される容量曲線に対応する。

2.4 BGO 結晶シンチレータと APD の組み合わせによるエネルギー分解能

結晶シンチレータの発光を APD で読み出した場合、検出器で作られるシンチレーション光子の数のポアソン揺らぎと電気的に扱う信号レベルが低いために生じる電気回路系のノイズがエネルギー分解能に影響を及ぼす。よって、エネルギー分解能はポアソン揺らぎに起因する成分と電気回路系ノイズに起因する成分との競合となる。エネルギー分解能の表式は、

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = (\delta_{sc})^2 + 2.355^2 \frac{F}{N_{ph} Q Y} \cdot \frac{1}{E} + \left(\delta_{noise} \cdot \frac{1}{E_g} \cdot \frac{1}{N_{ph} Q Y} \cdot \frac{1}{E}\right)^2 \quad (2.12)$$

となる。この場合において $E(\text{keV})$ はガンマ線のエネルギー、 $\delta_{sc}(\%)$ は結晶シンチレータの結晶自体の特性によるエネルギー分解能、 F はポアソン揺らぎからの補正因子でファノ因子と呼ばれ、APD の場合は 2~3 となる。また、 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 APD の量子効率、 $\delta_{noise}(\text{keV})$ は電気雑音であり §2.3.3 に記述している。ただし APD の場合、式 (2.11) の I_n に B (アバランシェ現象に伴う超過揺らぎ) が加わる。また、 G は APD のゲインである。

第 1 項において、結晶の位置によるシンチレーション効率や結晶表面での反射条件の不均一性、シンチレーション応答の非直線性などによりエネルギー分解能が劣化する。第 2 項は統計的なエネルギー分解能の劣化である。エネルギー分解能はピークの半値幅 (full width at half maximum:FWHM) で定義される。ガウス分布を仮定すると $\text{FWHM} = 2.355\sigma$ となる。ここで σ は統計的変動の標準偏差である。よって、ピークの半値幅がガンマ線光子エネルギーの平方根に比例するので、平均パルス波高はガンマ線エネルギーに直接的に比例する。これに F を入れると統計的なエネルギー分解能の劣化を示す項となる。第 3 項は電気回路系ノイズである。第 3 項の $N_{ph} Q Y$ は入力エネルギー 1keV 当たりの APD からの出力電子数を表す。更に、 $\frac{\delta_{noise}}{E_g} = \overline{\delta_e}$ となる。よって、第 3 項は $\frac{\text{ノイズによる信号電子揺らぎの数}}{\text{出力した電子数}}$ となる。これがエネルギー分解能に寄与している。

更に、threshold はノイズがエネルギースペクトルに現れる上限であり、

$$E_{th} \sim 3\delta_{noise} \cdot \frac{1}{E_g N_{ph} QGY} \quad (2.13)$$

と示される。

2.5 NeXT衛星におけるBGOとAPDの活用

今現在までに多数の国々がX線観測衛星を打ち上げ、X線天文学の発展に貢献してきた。日本においては1979年に打ち上げられた「はくちょう」以来、「てんま」、「ぎんが」、「あすか」とX線観測衛星を運用してX線観測において重要な役割を担ってきた。そして、2005年7月10日に「すざく」(Astro-E2)の打ち上げに成功した。これに続く日本で6番目のX線天文衛星としてNeXTの打ち上げが2010年代初頭に計画されている。

NeXT衛星の第一の目標は知られざる非熱的宇宙に迫ることである。具体的には、

- I. 宇宙における非熱的放射天体を多数発見し、非熱的宇宙の確立を行う。
- II. 静的で平衡状態の熱的宇宙からどのような自発的プロセスを経て非平衡の非熱的宇宙が創り出されるのかを解明する。

である。非熱的な放射が熱的な放射を凌駕するのは硬X線領域であり、この領域で熱的放射の影響が次第に薄れていくと考えられている。若い超新星残骸などでは1~10keV、活発な成長をしている大型の銀河団などでは20~80keV付近にその領域境界がある。しかし、従来の衛星では10keVを超える硬X線の観測は困難で、精度の良い観測は十分に行われていない。NeXT衛星は特に10~80keVへとつながる検出感度においてこれまでの衛星の数十倍も優れており、世界で初めて撮像観測を行うとともに数100keVの γ 線領域を過去最高の精度で観測することを計画している。

NeXTには軟ガンマ線検出器(SGD:Soft Gamma-ray Detector)を搭載予定である。これはNeXTの主な目的である高感度広帯域観測を実現するための検出器である(図2.2)。SGDは半導体多層コンプトンカメラと「すざく」のHXDで実現した狭い視野を持っているBGOの井戸型アクティブシールドとを組み合わせることで「視野の狭いコンプトンカメラ」を実現する検出器である。また、80keV以上のエネルギー領域で主要な反応となるコンプトン散乱を利用することで、これまでの軟ガンマ線検出器の感度向上の最後の障壁となっていた検出器の放射化によるバックグラウンドを大幅に低減可能である。

SGD 検出器の基礎となる半導体多層コンプトンカメラは高い分解能を持つシリコンストリップ検出器とテルル化カドミウムピクセル半導体の撮像検出器を多層に積み重ねて構成されている。散乱体にシリコンストリップを使用するのは、シンチレータと比較して位置決定の精度が高く、エネルギー分解能が良く、低エネルギー側でのコンプトン散乱の頻度が大きいためである。また、コンプトンカメラを使用することで今までの検出器と比較して性能が向上し、更に BGO のアクティブシールドの中にカメラを入れることで、よりいっそう感度を高めている。

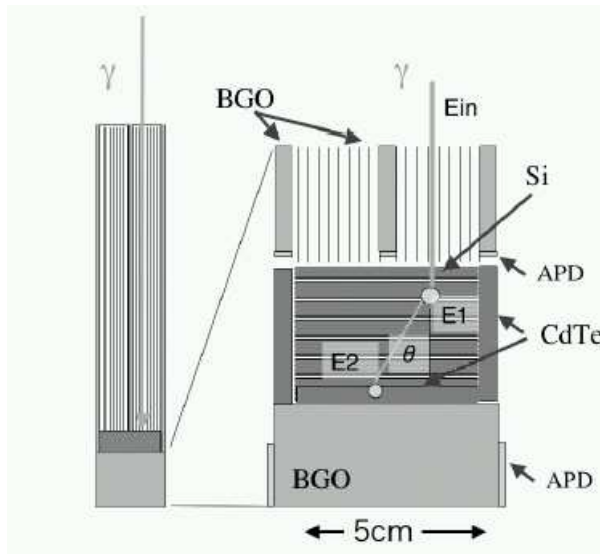


図 2.2: SGD のユニットの概念図

アクティブシールドに使用されている BGO は単位体積当たりのガンマ線の阻止能が非常に高く、更に従来使用されてきた光電子増倍管 (PMT) の代わりにアバランシェフォトダイオード (APD) を使用することで検出器の小型化、軽量化が実現する。更に、量子効率が上がるために threshold を下げることが可能となり、アクティブシールドの性能向上にもつながる。

2.6 過去の APD 実験の結果

BGO と APD をアクティブシールドに用いるための基礎実験は本研究室において毎年進められてきており、ここでは 2003 年度の松浦氏の卒業論文と 2004 年度の浅野氏の卒業論文について簡単に紹介する。

● APD の受光面の位置によるゲイン揺らぎ

以前までの APD には受光面の位置による増幅率の非均一性という問題点があった。これは、APD 全面に光が照射された際にエネルギー分解能の低下の原因の一つとなっていた。しかし、近年中性子核転換注入 (neutron transmutation doping : NTD) を施すことにより非常に均一性のよいドーピングしたシリコンを使用することによって問題点は改善されてきた。実際に改善されているのかを青色 LED を 5mm 角 APD の各部分に照射することで確かめたところ、全体として 3.09% のばらつきがあった。この値は考慮していた値よりも大きいですが、エネルギー分解能を大きく劣化させるほどではないことが判明した

- **APD+BGO プレートを2つの APD ではさんで読んだ場合**

図 2.3 のように BGO プレート (10cm × 4cm × 3mm) の両側から APD を用いてシンチレーション光を読み出し、片側にしか APD を装着しない場合との光量比較を試みたところ、両側に APD を付けた場合の1つの APD の光量は片側に付けた場合と比較して約 0.56 倍になり、光が両側の APD に単に分割されるだけで光量が増加するわけではないことが判明した。

- **BGO プレートを2枚にした場合の測定**

図 2.4 のように2枚の BGO プレートを接着して APD を付けて測定を行った結果、BGO プレートの繋ぎ目での光量の減少は約 1 割であった。BGO の光透過率が 400mm と十分に長いことを反映しており、BGO を長くしても光量はあまり下がらないと言える。

- **APD の大きさを変えることでの光量比較**

図 2.5 のように BGO プレートの片側に APD を1つ付けた時と3つ付けた時を比較した。APD の受光面積はそれぞれ 3mm 角、5mm 角、10mm 角であり、厚さ 3mm の BGO プレートの読み出しを行うので読み出し面積は APD の1辺の長さに比例する。よって、面積比が光量比となるなら光量比は 3:5:10 となると考えられる。しかし、実験結果から得た相対比は 3.94:5:6.29 となった。よって、APD の面積を増やしても比例して増えないことが判明した。

- **1APD と 3APD での読み出しの比較**

図 2.5 のように BGO プレートに1つの APD を付けた時と3つの APD を付けた時の光量を比べたところ、光量は3つの場合では3倍にはならず1.5 倍ほどにしかならなかった。光量は APD の面積に比例して増加しないことが判明した。

結果、APD の面積を大きくしたり、数を増やすとノイズはほぼ比例して増えるが光量は増えない。よって、BGO プレートを読むための APD は 3~5mm 角ほどで適切である。

- **APD の放射線耐性**

宇宙線による放射線劣化が APD の性能のどのような影響を及ぼすのかを実際にガンマ線、proton を照射して調べた。測定結果から放射線劣化による暗電流の増加が確認されたが、エネルギー分解能はほぼ変化しなかった。また、暗電流の増加もそれほど問題ではないレベルであった。

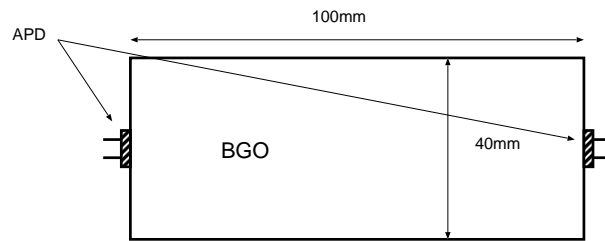


図 2.3: BGO と APD のセットアップ

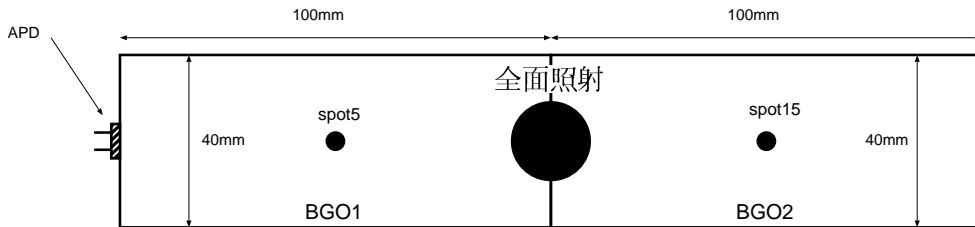


図 2.4: BGO を 2 枚組み合わせたのセットアップと入射位置と名称

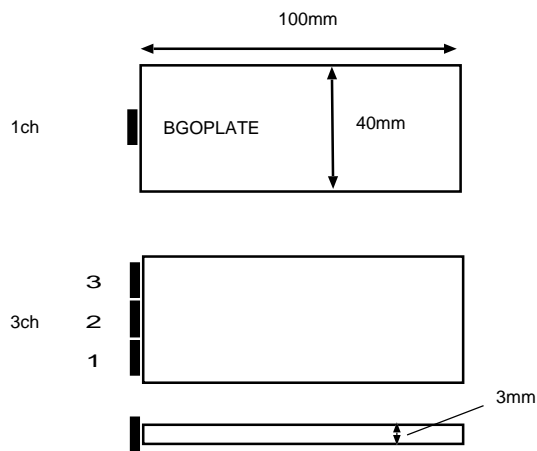


図 2.5: BGO プレートと APD の装着

2.7 研究目的

以前は APD は受光面の位置による増幅率の揺らぎなどが問題となっていたがその問題点は改善されて、近年ガンマ線検出において従来の PMT や PD と比較して優れた成果をあげている。そして、NeXT ではコンプトンカメラなどの検出器を開

むアクティブシールドとしてBGOとAPDの利用を検討している。BGOのシールドは開口角を狭めてDiffuse X-ray Background(またはCosmic X-ray Background)の入射を最低限に抑えると同時に軌道上で地球大気起源のバックグラウンドやアクティベーションなどのバックグラウンドを抑えることが必要である。80keVまでのエネルギー範囲で、CXBの入射を制限して 1×10^{-4} photon/s/cm²/keVのレベルにするためには、その開口角を3度四方ほど狭める必要がある。この開口角はBGOシンチレータによるアクティブシールドで実現可能であると考えられている。

本研究の目的はシールドの素材として使用されるBGOの井戸型アクティブシールドのシンチレーション光をAPDで読み出す実験を行う。§2.6から、1つのBGOプレートに対しては3mmまたは5mmのAPDを1つ装着して読み出すことが最適であると言える。しかし、BGOプレートを組み合わせた状態でのAPDで読み出した例は世界中で皆無である。そこで、本論文ではBGOプレートを組み合わせてコリメータを構成したとき、APDをどのようにつけて読み出すのが最適かを調べた。この実験結果により、アクティブシールドの設計、すなわちどのようにBGOプレートを組み合わせてAPDをどのように、いくつ付けるかということを決める指針が得られることが期待される。これは検出器のデザインを決定するために必須な要因である。

第3章 PMT(光電子増倍管)による BGOサンプルの光量測定

BGO プレートの光収集効率は過去の実験により、低いことが分かっている。また、今回の実験に使用した BGO の光量が不明であった。そこで、受光面の大きな光電子増倍管 (PMT) を用いて、今回使用する BGO アクティブシールドの光量を測定した。PMT を用いたのは、APD の小さな受光面では BGO の光をどれほど集められるか不明であるためであり、更に APD の光読み出し実験の結果を考察する上での比較対象とするためである。なお用いた BGO の方が PMT 受光面よりも大きいため、ライトガイドによって受光面との光接合を合わせた実験も同時に行った。

3.1 実験に用いた BGO サンプル

3.1.1 簡易 BGO アクティブシールド

作成目的

アクティブシールドの構造はまだ決まっていないが、ここでは BGO プレートを組み合わせたときにそれぞれのプレートで反応した後にシンチレーション光がどのように分布するのかを調べるためにまず、BGO プレート 4 枚で口の字型を構成した簡易 BGO アクティブシールドを作成して調べた。

作成方法

5cm×6cm×3mm と 5cm×2.5cm×3mm の BGO プレートを 2 枚ずつ用意して口の字型の簡易 BGO アクティブシールドを作成する。BGO プレートの接着には CAT-108 と KE-108 を 1:20 の割合で混合し、真空にすることで空気抜いたものを用いる。これにより、接合面での光損失は大幅に抑えられる。この接着剤を BGO プレートの接合面に均一に塗布し、12 時間ほど形状を維持する。この作業により作成された簡易 BGO アクティブシールドを図 3.1 に示す。作成した簡易 BGO アクティブシールドの寸法は 6cm×3.1cm×5cm、厚さ 3mm である。また、図で分かるように簡易

BGO アクティブシールドの周囲には反射剤としてゴアテックス反射剤を巻いてある。これは発生したシンチレーション光が逃げないようにするためである。



図 3.1: ゴアテックス反射剤が巻かれた簡易 BGO アクティブシールド

3.1.2 HXD 用 BGO-well

使用目的

簡易 BGO アクティブシールドとは別に、より複雑で実際に NeXT 衛星に使用される可能性のある構造に近いものを調べた。ここでは、HXD 用に開発されたものを用いた。簡易 BGO アクティブシールドの実験結果を参考にして BGO-well と複数の APD を用いて、APD の装着位置と数の最適化をはかる。また、その形状を図 3.2 に示す。寸法は $6\text{cm} \times 6\text{cm} \times 32\text{cm}$ 、厚さ 3mm である。また、図の前面以外はゴアテックス反射剤を巻いてある。



図 3.2: ゴアテックス反射剤で巻かれた HXD 用 BGO-well

3.2 実験セットアップ

3.2.1 簡易BGOアクティブシールドとライトガイドのセットアップ

簡易BGOアクティブシールドの1つの面にアクリル製のライトガイドを装着してライトガイドからPMTを用いてシンチレーション光を読み出す場合とライトガイドを使用しないで簡易BGOアクティブシールドから直接PMTを用いて読み出す場合を考える(図3.3)。BGO、ライトガイド、およびPMT同士の接着する面以外の面はゴアテックス反射剤で覆った。また、簡易BGOアクティブシールド、ライトガイド、PMTそれぞれを装着する際、KE-108を光学カップリングとして用いた。この材料は大きな面積の物質同士を光学カップルさせる場合、光学グリースよりも光量の損失が少ないという点で有用である。さらに、BGO箱とライトガイドの接着部分にはシンチレーション光の洩れを防ぐため、反射剤としてバルカーテープで覆った。同時にこの実験の比較材料として同様の実験を光量の基準となる5mm角BGOも測定した。

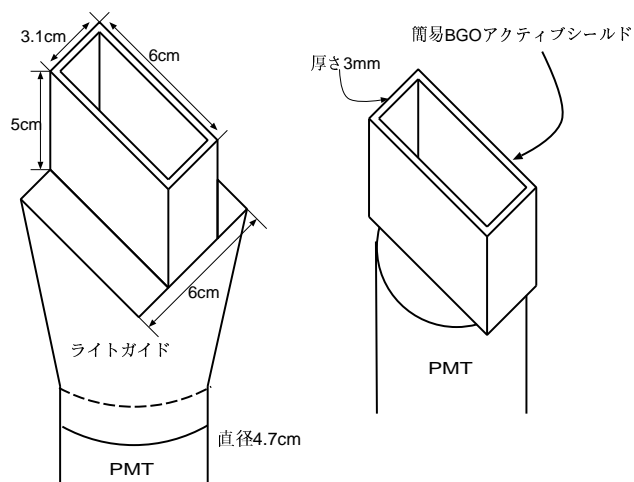


図 3.3: 簡易 BGO アクティブシールドとライトガイド、PMT の装着図

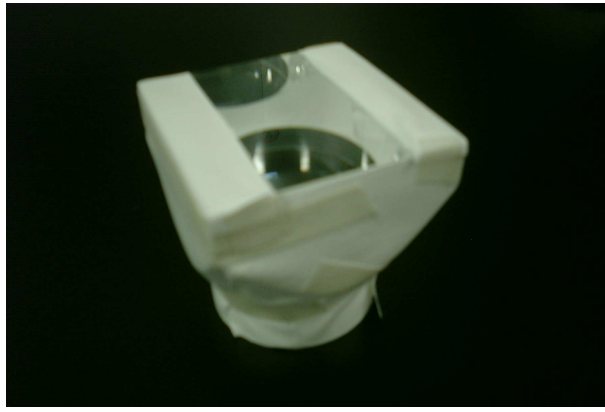


図 3.4: ライトガイド

3.2.2 HXD用BGO-wellとライトガイドのセットアップ

このセットアップも簡易 BGO アクティブシールドと同様にライトガイドを使用する場合と使用しない場合を考える (図 3.18)。また、同様に接合面以外にゴアテックス反射剤で覆った。また、接着剤としては光学グリースを用いた。

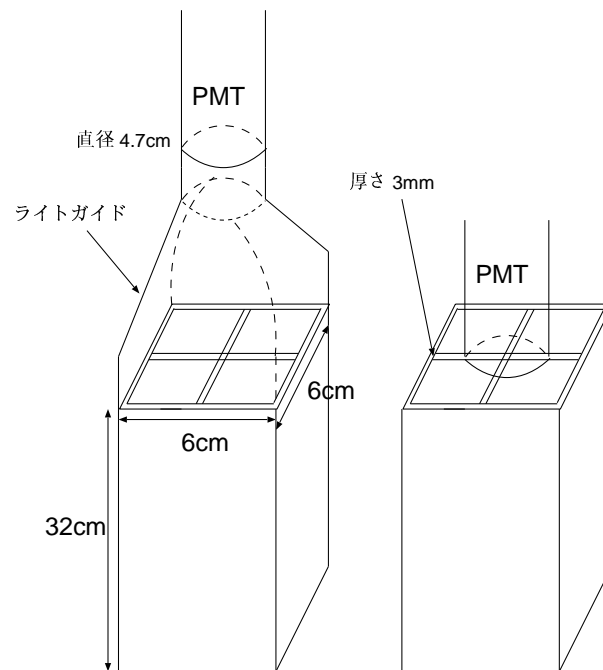


図 3.5: HXD用BGO-wellとライトガイド、PMTの装着図

3.2.3 VMEによる信号処理回路

信号処理回路のブロック図を図 3.6 に示す。更にモジュールの詳細を表 3.1 に示す。図 3.6 で示すように、この回路は同時に 4ch を処理して AD 変換する。しかし、本実験では 1ch のみを使用する。

検出器から出力された信号は Pre Amp に入力され、電荷電圧変換される。そして、Shaping Amp が負入力のため Pre Amp 出力を反転回路に通し、Shaping Amp(Shaping time:2 μ s) で整形されて Discrri 回路へ入力する。この Discrri 回路は Discriminator と軽度の Shaping Amp の両方の役割を担う。Discrri 回路の中の Shaper 出力はそのまま ADC へ入力され、Peak Hold されて AD 変換される。データ処理の際に必要な Gate、Start、DIO の 3 つの信号を作成するための Triger 信号は、Discrri 回路から出力されて Level Adapter へ入力し、VME_ADC に入力する。ここまでの過程で 4ch は独立して処理される。Discrri 回路 HU4715 の回路図を図 3.7 に示す。

データ処理信号である Gate、Start、DIO の生成は、Discrri 回路から出力されたそれぞれの Triger の OR 信号を Gate Genetator に入力し、幅調整や delay を行って 3 つの信号を作成する。3 つの信号は ADC_Gate 信号と ADC_Start 信号、DIO 信号である。DIO 信号は NIM のままで DIO モジュールに入力され、Gate、Start 信号は Level Adapter を用いて NIM から TTL に変換されて VME_ADC モジュールに入力される。ここで、NIM と TTL は電圧の規格による分類である。

この 3 つの信号による信号読み出しのタイミングチャートを図 3.8 に示す。まず、Discrri 回路からのアナログ信号は Gate 信号が発生してピークがホールドされている間に、AD 変換の Start 信号が発生してデジタル変換する。変換されたデータは DIO 信号発生とともにパソコンに読み出され、DIO モジュールによりリセット信号が発生してモジュールは初期状態に戻る。実際のオシロスコープで見たタイミングチャートを図 3.9 に示す。

高圧電源	ORTEC MODEL 556
PMT	浜松ホトニクス株式会社 R6231
Pre Amp	クリアパルス株式会社 MODEL 5005H S/N 051045
Shaping Amp	ORTEC MODEL 571
OR	LOGIC FAN_IN FAN_OUT
Gate Genetator	KEK_N1113-51 DEGITEX , N-TM 207
VME_ADC	クリアパルス株式会社 1113A 型
DIO	クリアパルス株式会社 CP-2610

表 3.1: VME によるデータ処理回路で用いたモジュールの詳細

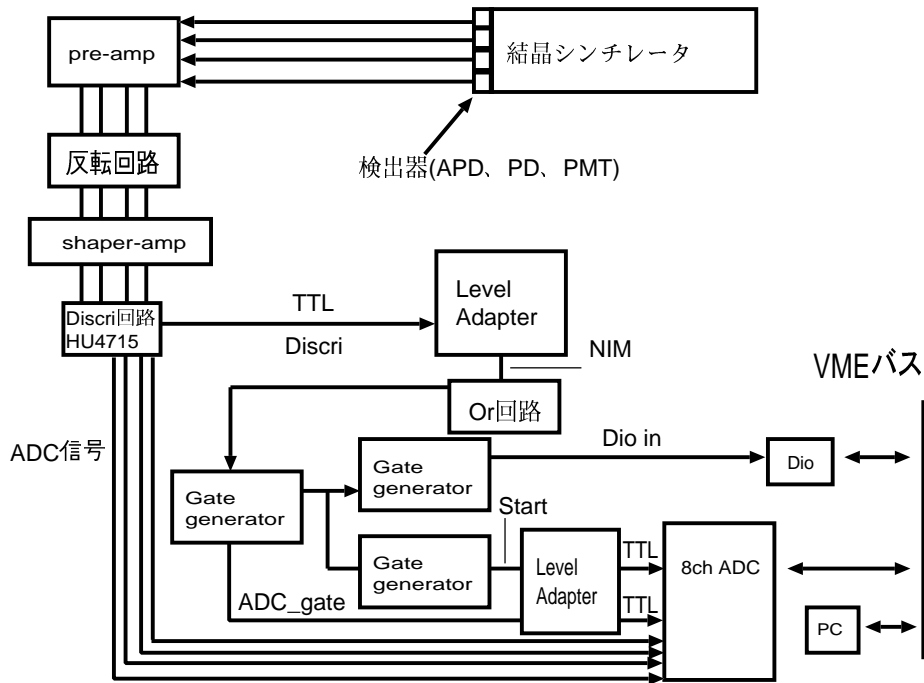


図 3.6: VME による信号処理回路のブロック図

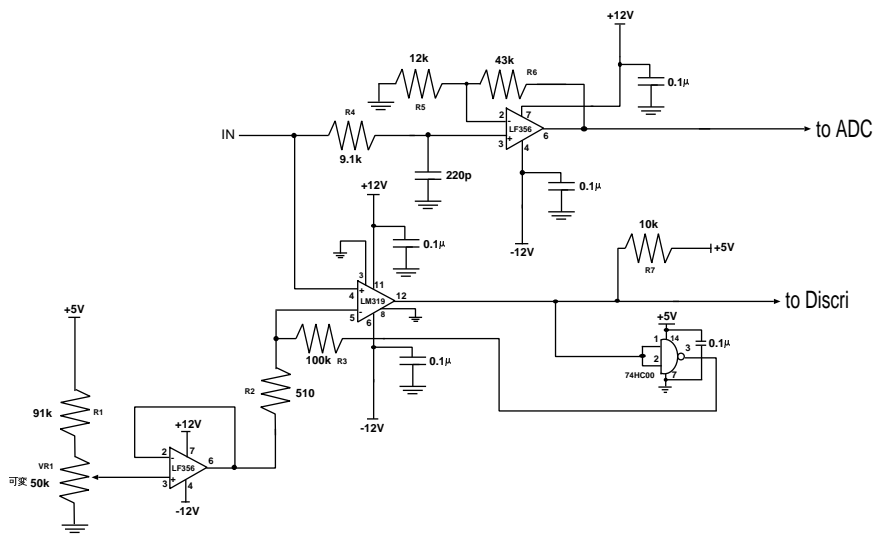


図 3.7: Discr 回路 HU4715 の回路図

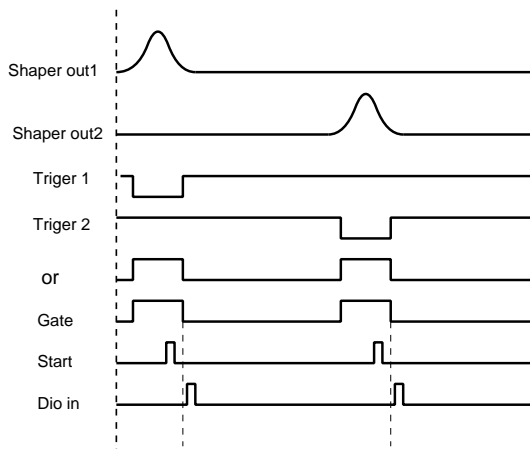


図 3.8: タイミングチャート

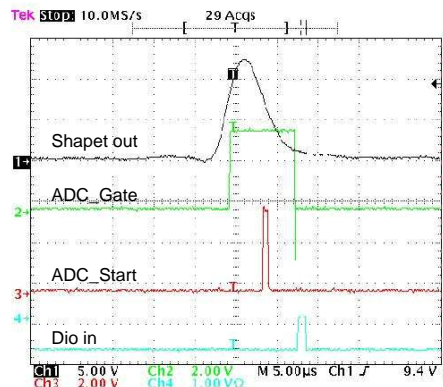


図 3.9: オシロスコープで見た出力波形

3.2.4 Pocket MCA(PMCA) を用いたデータ処理回路

この実験では PMCA を用いてのデータ処理も行う。測定に用いた回路系のブロック図を図 3.10 に示す。検出器からの信号は Pre Amp、Shaper Amp を通った後に PMCA に取り込まれる。モジュールの詳細を表 3.2 に示す。なお、この回路は 1ch に対応している。しかし、PreAmp は 4ch 対応のうちの 1ch のみを使用する。

PMCA の利点はノイズ対策をとりやすく、かつ迅速に実験を進行できるところにある。

高圧電源	ORTEC MODEL 556
PMT	浜松ホトニクス株式会社 R6231
Pre Amp	クリアバルス株式会社 MODEL 5005H
Shaping Amp	ORTEC MODEL 571
PMCA	AMPTEC 社 MCA-8000A

表 3.2: 測定に用いたモジュールの詳細

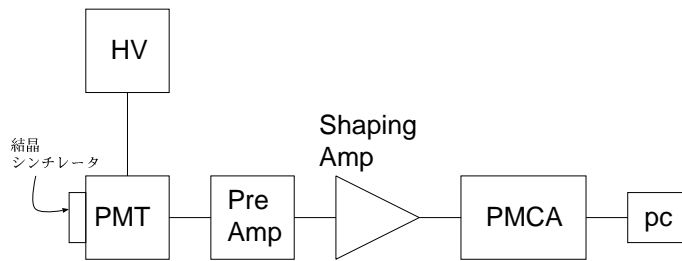


図 3.10: PMCA によるデータ処理回路のブロック図

3.3 ライトガイドの効果

ライトガイドはシンチレーション光を PMT に誘導すると同時に内部で光を吸収してしまうので、それらを予め測定する必要がある。

3.3.1 5mm 角 BGO におけるライトガイドの有無による光量比較

まず、小さな 5mm 角 BGO を用いて実験を行った。5mm 角 BGO はライトガイド、もしくは PMT の中央に接着した。設定を、常温 (20.2℃)、バイアス電圧 450V、Shaper Gain を 10 倍で測定し、VME のセットアップで行った。線源は ^{137}Cs の 662keV を用いた。また、ライトガイドの付け外し以外での装置、設定の変更は行わずに同条件にした。測定結果としてスペクトルを図 3.11、図 3.12 に示す。また、ピークチャンネルとエネルギー分解能の値を表 3.3 に示す。

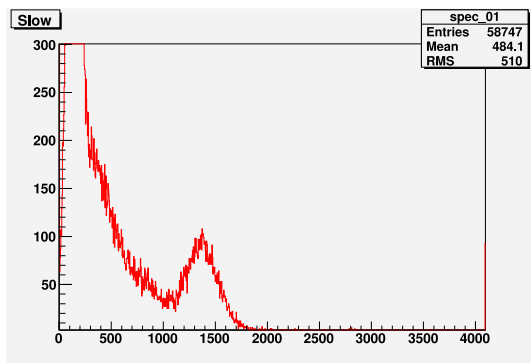


図 3.11: ライトガイドあり

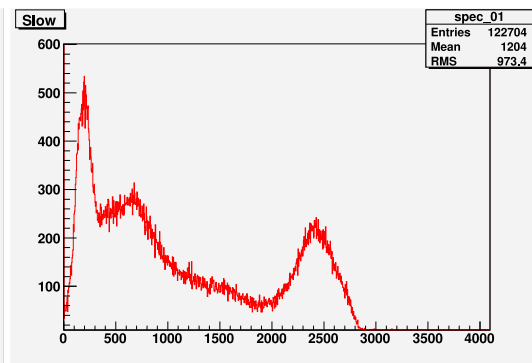


図 3.12: ライトガイドなし

	$\sigma(\text{ch})$	Peak	分解能 (%)
ライトガイドあり	161.0	1361	27.86
ライトガイドなし	180.9	2435	17.50

表 3.3: ライトガイドの有無によるピークチャンネルとエネルギー分解能

よって、透過率を算出すると 55.89% となる。ライトガイドを通して測定すると、同条件下では約半分の光量が失われてしまい、エネルギー分解能も約 1.6 倍増加してしまう。

3.3.2 5mm角 BGO のライトガイド接着位置による光量比較

ライトガイドの中央に接着していた 5mm 角 BGO をずらして光量の変化を検証した。ずらす位置は図 3.13 に示す。なお、slide2 はライトガイドの端、slide1 はライトガイドを 4 分割した位置である。また、設定は §3.3.1 と全て同じにした。測定結果としてスペクトルを図 3.14、図 3.15 に示す。また、ピークチャンネルとエネルギー分解能の値を表 3.4 に示す。

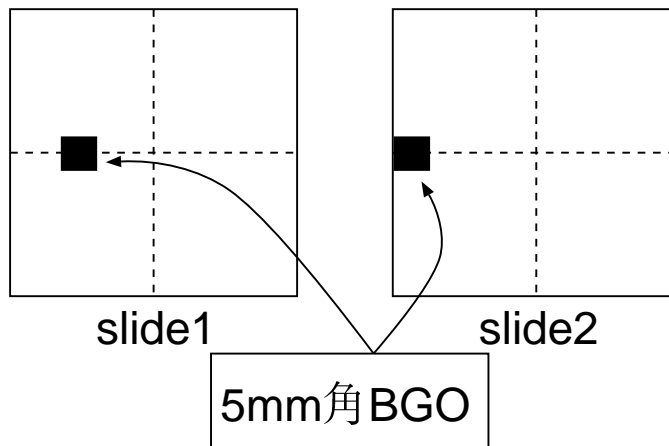


図 3.13: ライトガイドを上から見た図

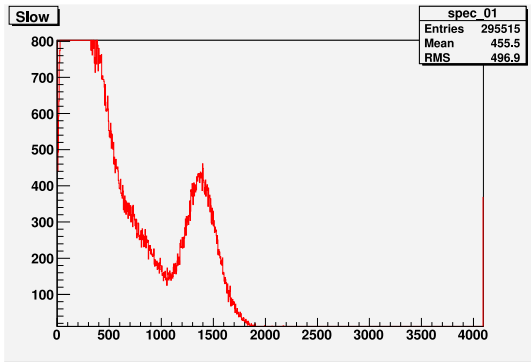


図 3.14: slide1

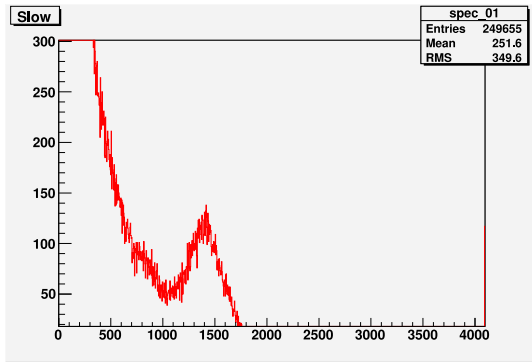


図 3.15: slide2

	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
slide1	147.8	1382	25.19
slide2	146.8	1414	24.45

表 3.4: 5mm 角 BGO の位置によるピークチャンネルとエネルギー分解能

この測定結果と §3.3.1 で得られたライトガイドなしのピークチャンネルを用いて、slide1 と slide2 におけるライトガイドの透過率を算出したところ、slide1 では 56.76%、slide2 では 58.07% となった。この結果は、§3.3.1 の 55.89% と非常に類似している。更にエネルギー分解能について §3.3.1 のライトガイドがある場合と比較しても非常に類似していることが分かる。よって、BGO の接着位置によるライトガイドの透過率に違いはない。この結果により、§3.3.1 の結果が信頼できるものとなる。

3.3.3 BGO アクティブシールドにおけるライトガイドの有無による 光量比較

簡易 BGO アクティブシールドと HXD 用 BGO-well の設定を表 3.5 に示す。両方とも常温で PMCA のセットアップで行い、他の測定条件は §3.3.1 と同様にした。HXD 用 BGO-well を用いての実験でのモジュールについて Pre Amp は 4ch 対応の cp-5005H ではなく、都合により 1ch 対応の cp-2869 を用いた。簡易 BGO アクティブシールドについて測定されたスペクトルを図 3.16、図 3.17 に示す。また、ピークチャンネルの値とライトガイドありのピークチャンネルについてはライトガイドの

光透過率を補正した値、エネルギー分解能を表 3.6 に示す。次に HXD 用 BGO-well について同様の作業をしたものを図 3.18、図 3.19、表 3.7 に示す。

	バイアス電圧 (V)	Shaper Gain(倍)
簡易 BGO アクティブシールド	430	25
HXD 用 BGO-well	600	250

表 3.5: 実験装置の設定

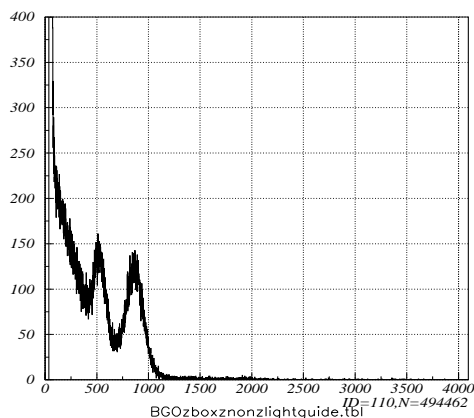
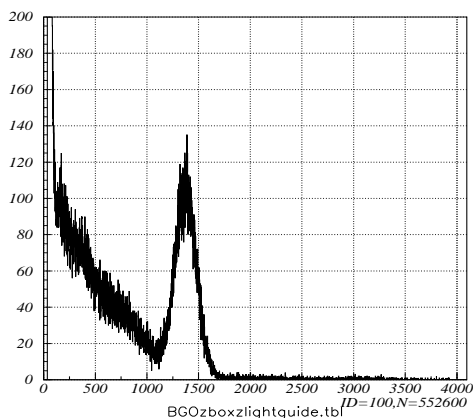


図 3.16: 簡易 BGO アクティブシールドにおけるライトガイドありでのスペクトル
 図 3.17: 簡易 BGO アクティブシールドにおけるライトガイドなしでのスペクトル

	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
ライトガイドあり	104.9	1371	18.02
		$1371 \times \frac{1}{0.5589} = 2453$	
ライトガイドなし	80.03	865.9	21.77

表 3.6: 簡易 BGO アクティブシールドにおけるライトガイドの有無によるピークチャンネルとエネルギー分解能

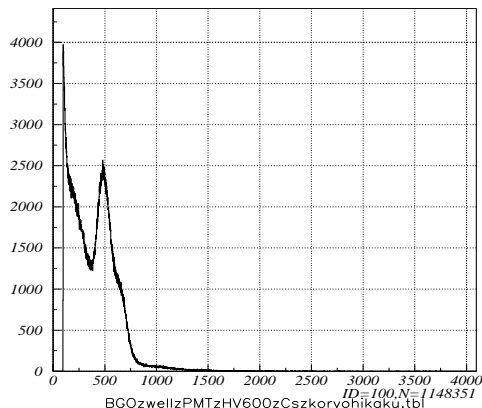
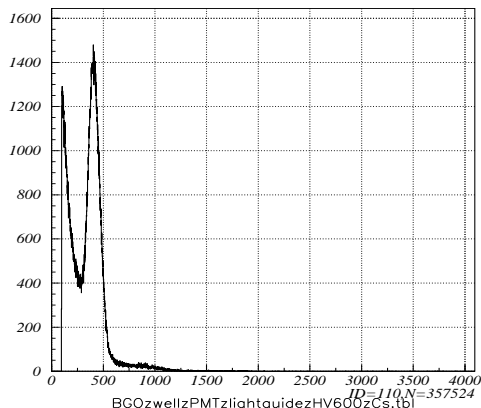


図 3.18: HXD 用 BGO-well におけるライトガイドありでのスペクトル
 図 3.19: HXD 用 BGO-well におけるライトガイドなしでのスペクトル

	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
ライトガイドあり	55.49	408.9	31.96
		$408.9 \times \frac{1}{0.5589} = 731.6$	
ライトガイドなし	52.95	485.8	25.67

表 3.7: HXD 用 BGO-well におけるライトガイドの有無によるピークチャンネルとエネルギー分解能

簡易 BGO アクティブシールドの光量比を算出すると (ライトガイドあり) : (ライトガイドなし) = $2.833 : 1$ となる。更に、HXD 用 BGO-well についても (ライトガイドあり) : (ライトガイドなし) = $1.506 : 1$ となる。これらの結果から、ライトガイドを装着したほうが効率良く光を集められることが分かる。これは図 3.3 や、図 3.5 を見れば分かるように BGO アクティブシールドが PMT の受光面積よりも大きいため、ライトガイドなしの場合において光の損失が大きいと考えられる。

3.4 BGO アクティブシールドの光量比較

§3.3.3 より得られた結果を用いて BGO アクティブシールドと 5mm 角 BGO の光量を比較するためにそれぞれの BGO アクティブシールドと同様の条件で 5mm 角 BGO を測定した。ただし、簡易 BGO アクティブシールドの場合は、比較する 2 つの実験で用いた処理回路が都合により異なったので、ここでは 5mm 角 BGO を PMCA

による信号処理回路で測定した。なお、両方の測定においてライトガイドを使用しない場合と比較を行い、BGO アクティブシールドは §3.3.3 で得られた値を用いた。BGO アクティブシールドにおける 5mm 角 BGO のスペクトルを図 3.20、図 3.21 に示す。また、得られたピークチャンネルとエネルギー分解能を簡易 BGO アクティブシールドと比較したものを表 3.8 に示す。

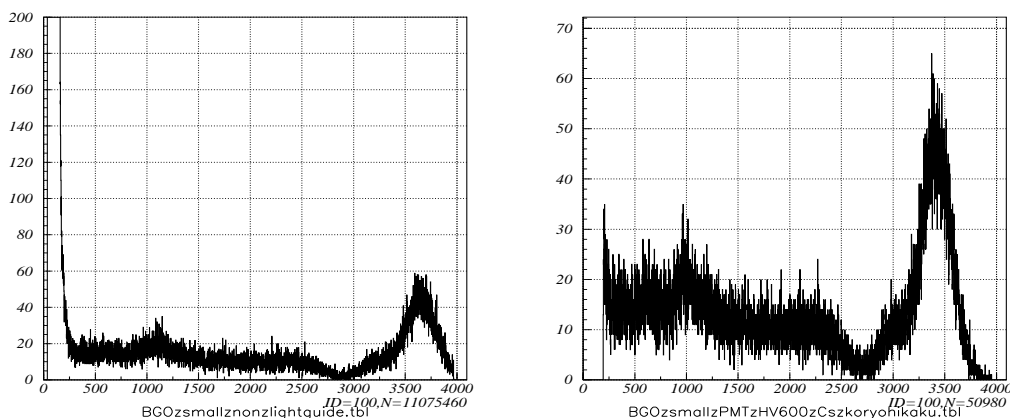


図 3.20: 簡易 BGO アクティブシールド 図 3.21: HXD 用 BGO-well と比較したと 比較した 5mm 角 BGO のスペクトル 5mm 角 BGO のスペクトル

	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
簡易 BGO アクティブシールド	80.03	865.9	21.77
5mm 角 BGO	141.3	3657	9.099
HXD 用 BGO-well	52.95	485.8	25.67
5mm 角 BGO	141.8	3418	9.770

表 3.8: BGO アクティブシールドと 5mm 角 BGO のピークチャンネルと分解能

測定結果から光量比を算出すると (簡易 BGO アクティブシールド) : (HXD 用 BGO-well) : (5mm 角 BGO) = $\underline{0.6708 : 0.2140 : 1}$ となる。この結果から、BGO アクティブシールドの光収集率が悪いことが分かる。更に、HXD 用 BGO-well のほうが簡易 BGO アクティブシールドよりも光量の収集率が悪い。また、エネルギー分解能を比較しても光量と同様に BGO アクティブシールドのほうが悪くなっている。これは、BGO が板状であるためである。また、BGO が大きいほど光収集率が悪くなっており、光が BGO 中を伝搬する際にある程度失われるためである。よって、より小さな受光面を持つ APD での読み出しではいかに効率良く読み出すかが重要であ

る。APDによる簡易BGOアクティブシールド、またはHXD用BGO-wellの光読み出しにおいてPMTによる光収集率が当面の目標となる。

まとめ

各BGOアクティブシールドの光量を比較してみると、BGOの大きさが大きくなるほど光収集率が低くなることが分かった。HXD用BGO-wellが5mm角BGOの約2割しか光を集められないということから、今後のAPDによる読みだし実験での光収集率が課題となる。

第4章 APD(アバランシェフォトダイオード)による簡易BGOアクティブシールドの光読み出し

4.1 実験目的

軟ガンマ線領域での観測における主なバックグラウンド源は、

1. 検出器の視野内から入射した目的以外の光子
2. 視野外から入射してシールドを抜けてきた光子
3. 宇宙線などの荷電粒子と衛星との反応により生じた2次粒子
4. 検出器に含まれる放射性同位体
5. 高エネルギー粒子と検出器との原子核反応による放射化バックグラウンド

が原因となっている。これらのバックグラウンド源を効率的に除去するため、検出器の周囲に設置するアクティブシールドを用いる。アクティブシールドと反応したイベントの除去により1、2の成分を効果的に落とすことが可能となり、更にコンプトンカメラの場合では検出対象となるイベントを多層の半導体において2層で同時検出されたイベントのみとし、コンプトン再合成からHXDでは困難であった3、4、5のノイズの除去も可能となる。

アクティブシールドを用いた効果的なバックグラウンドの除去(1、2)ではシンチレータの光検出部分にAPDを使用することにより、thresholdやエネルギー分解能の向上が期待でき、より効果的にバックグラウンドを除去できる可能性がある。更に、APDのコンパクト性を活かしての検出器の設計自由度も広がる。

この章では、簡易BGOアクティブシールド(6cm×5cm×3.1cm：厚さ3mm)でのシンチレーション光のAPDを用いた読み出しを行う。この実験はHXD用BGO-wellのシンチレーション光をAPDを用いて読み出す指針となる。ここでは以下に記述する実験を行った。

- 使用する 5mm、3mm 角 APD の gain 測定
- APD を用いた 5mm 角 BGO と簡易 BGO アクティブシールドの光量比較
- APD と簡易 BGO アクティブシールドを用いたガンマ線の照射場所によるスペクトル変化の測定
- 簡易 BGO アクティブシールドの 4 つの APD による同時読み出し

4.2 5mm、3mm 角 APD の gain 測定

4.2.1 実験セットアップ

APD と 5mm 角 BGO のセットアップ

この実験では測定に用いる APD のゲインを予め測定する。測定するそれぞれの 5mm、3mm 角 APD に 5mm 角 BGO を装着し、シンチレーション光を読み出した。5mm、3mm 角 APD と 5mm 角 BGO の接着には光学グリースを用いた。以下の実験では接着する際、光学グリースを用いている。

PMCA を用いたデータ処理回路

この実験では PMCA を用いてデータ処理を行う。測定に用いた回路系のブロック図を図 4.1 に示す。基本的には §3.2.4 の PMCA を用いたデータ処理回路と類似しているが、PMT に変わって APD を使用している。それに関係して高圧電源を変えている。PMT は比較的高い電圧を負荷しなければならないが、APD は比較的低い電圧で作動するためである。変わった部分を含めてモジュールの詳細を表 4.1 に示す。

高圧電源	菊水電子工業株式会社	47020628
Pre Amp	クリアパルス株式会社	MODEL 5005H
Shaping Amp	ORTEC MODEL 571	
PMCA	AMPTEC 社	MCA-8000A
5mm 角 APD	浜松ホトニクス株式会社	S8664-55
	Serial No 230,141,140,231,212	
3mm 角 APD	浜松ホトニクス株式会社	S8664-33SPL 4974 No.1~10
	浜松ホトニクス株式会社	S8664-33SPL 3958
	Serial No KA2404,KA2402,KA2403,KA2407,KA2408	

表 4.1: 測定に用いたモジュールとセンサーの詳細

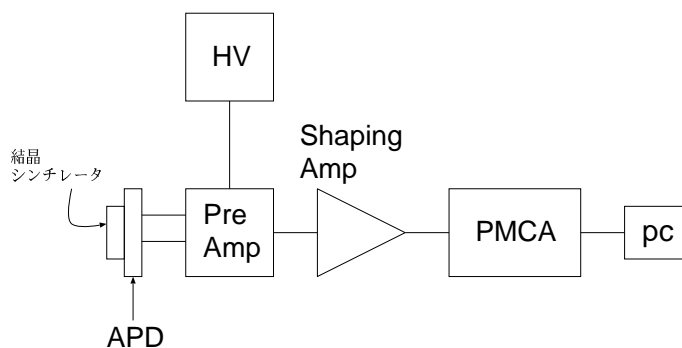


図 4.1: PMCA によるデータ処理回路のブロック図

4.2.2 5mm 角 APDgain 測定

設定を低温、線源は ^{137}Cs の 662keV を用いて実験を行った。方法としては、バイアス電圧 100V の時のピークチャンネルと 300V、350V、355V の時のピークチャンネルを測定する。100V の時の APDgain を 1 と仮定して、ピークチャンネル比から 300V、350V、355V の APDgain をそれぞれの APD において測定する。測定の結果を表 4.2 に示す。

Serial No	バイアス電圧		
	300	350	355
230	12.62	42.79	52.19
141	45.32	1340	測定不能
140	12.12	42.79	52.38
231	15.11	65.24	74.20
212	23.88	168.1	252.9

表 4.2: 5mm 角 APD の各バイアス電圧での gain

4.2.3 3mm 角 APDgain 測定

設定を低温、線源を ^{22}Na の 1275keV を用いて実験を行った。 ^{137}Cs の 662keV ではバイアス電圧 100V の場合に検出面積が 5mm 角 APD よりも小さいために 5mm 角 APD よりも光量は少なくなってしまう。その結果、低チャンネルでノイズに埋もれてしまう。そのために ^{22}Na の 1275keV を用いる。方法は §4.2.2 と同様に行う。測定結果を表 4.3 に示す。なお、No3 はバイアス電圧が 340V よりも大きくなると挙動が異常になったので測定を中止した。No9 は Shaper Gain を最低にしてもピークが見

えず、KA2404はバイアス電圧100Vでノイズに埋もれてピークチャンネルを測定できなかった。

Serial No	バイアス電圧		
	300	350	355
No1	15.50	133.6	227.8
No2	27.73	248.1	481.7
No3	33.29	340V で 211.9	
No4	23.69	146.6	204.1
No5	16.67	62.27	81.77
No6	19.03	83.76	107.3
No7	18.27	80.88	101.0
No8	31.54	395.1	910.1
No9	31.87	546.4	
No10	29.65	392.2	982.6
KA2404	100V で測定不可能		
KA2402	20.58	98.15	129.0
KA2403	18.67	100.1	127.1
KA2407	21.34	113.2	155.2
KA2408	19.97	104.8	134.8

表 4.3: 3mm 角 APD の各バイアス電圧での gain

4.3 APD を用いた 5mm 角 BGO と簡易 BGO アクティブシールドの光量比較

5mm 角 BGO と簡易 BGO アクティブシールドの光量比を 5mm 角 APD (Serial No140) を用いて測定した。設定は低温、バイアス電圧 310V、Shaper Gain を MAX で測定して VME のセットアップで行った。ここで、§3.2.3 で用いたモジュールと異なる部分があるので、変更したモジュールを表 4.4 に示す。以下での VME のセットアップはこのモジュールで行う。なお、線源は ^{133}Ba の 356keV を使用し、本実験に用いる APD は同一のものを使用した。ここで、簡易 BGO アクティブシールドと 5mm 角 BGO に APD を装着した図を図 4.2 に示す。加えて、5mm 角 BGO、簡易 BGO アクティブシールドにおいてガンマ線は図で示すように上から照射した。測定されたスペクトルを図 4.3、図 4.4 に示す。ちなみに、図 4.4 の 356keV のスペクトルは最も右にある。また、ピークチャンネルとエネルギー分解能の値を表 4.5 に示す。

高压電源	菊水工業株式会社	47020628
Shaping Amp	自作	

表 4.4: VME によるデータ処理回路でのモジュールの変更点

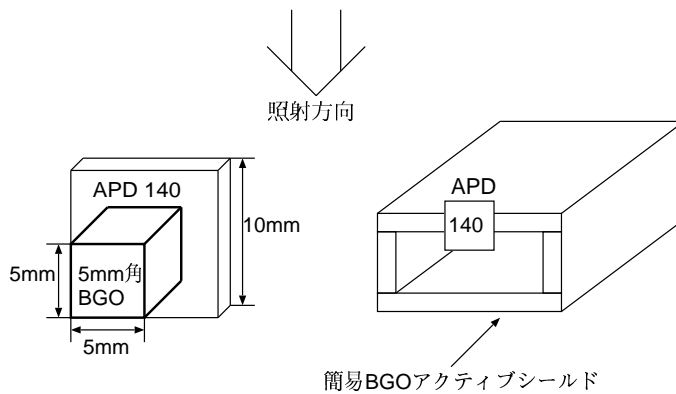


図 4.2: 5mm 角 BGO、簡易 BGO アクティブシールドと APD の装着図

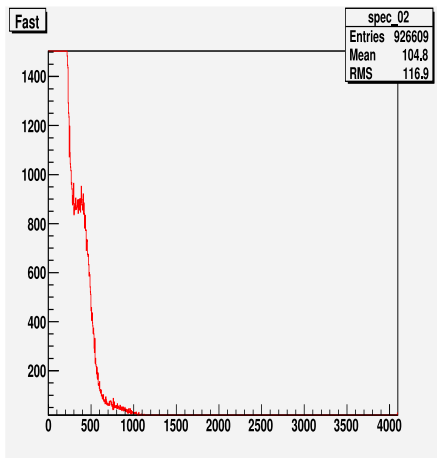


図 4.3: 簡易 BGO アクティブシールド

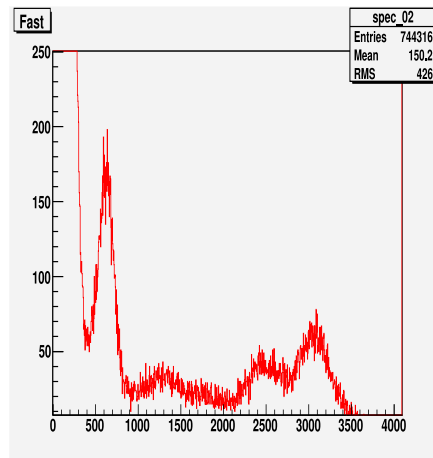


図 4.4: 5mm 角 BGO

	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
簡易 BGO アクティブシールド	137.7	343.6	94.38
5mm 角 BGO	153.2	3093	11.66

表 4.5: 簡易 BGO アクティブシールドと 5mm 角 BGO のピークチャンネルとエネルギー分解能

この測定結果より、簡易 BGO アクティブシールドと 5mm 角 BGO を APD で読み出した場合の光量比を算出すると、(簡易 BGO アクティブシールド) : (5mm 角 BGO) = 0.1111:1 となる。この値と §3.4 の結果から、PMT で読み出した場合と比較して APD で読み出した場合の光量が大幅に減少していることが分かる。よって、APD を複数個付ける必要があると考えられる。ただし、§2.6 から分かるように大量に付けてもノイズとの兼ね合いで有効ではない。

4.4 ガンマ線の照射場所によるスペクトル変化の測定

本実験では 3mm 角 APD1 つ (No5) と簡易 BGO アクティブシールドを用いて、ガンマ線の照射場所の違いによるスペクトル変化を調べた。ちなみに、ここでは 3mm 角 APD を使用しているが光量比較実験なので 5mm 角 APD との相違による影響はない。本実験により、BGO プレート間でのシンチレーション光分布を検証する。設定は低温、バイアス電圧 350V、Shaper Gain を MAX で測定して VME のセットアップで行った。線源は ^{133}Ba の 356keV を用いた。これはエネルギーにおける BGO の透過率によるためである。

透過率の計算

$$(\text{透過率}) = e^{-\rho\kappa d} \quad (\rho: \text{密度}, \kappa: \text{質量吸収係数}, d: \text{厚さ})$$

まず、 $\rho = 7.1(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、 $d = 0.3(\text{cm})$ は BGO の固有の値である。 ^{137}Cs の 662keV では $\kappa = 3.07 \times 10^{-2}(\text{cm}^2/\text{g})$ となるので BGO の透過率は 93.67% となり、 ^{133}Ba の 356keV では $\kappa = 1.34 \times 10^{-1}(\text{cm}^2/\text{g})$ となるので BGO の透過率は 75.17% となる。

よって、透過率の少ない ^{133}Ba を用いることでシンチレーション光の透過を防ぎ、プレート間の光分布の影響を顕著にする。また、本実験では図 4.2 の簡易 BGO アクティブシールドと APD のセットアップと同様に行った。照射方法は厚さ 5cm の鉛ブロックに微小な穴を開けて、確実に照射面だけに照射されるようにコリメートし、測定時間と照射距離はそれぞれの照射場所で一定とした。測定されたスペクトルを図 4.5、バックグラウンドを図 4.7 に示し、縮尺は全て同じにする。更に、全部の場所をまとめたものを図 4.6 に示す。また、簡易 BGO アクティブシールドに対するガンマ線の照射場所を図 4.8 に示す。更に簡易 BGO アクティブシールドの下側と上側の面に照射した場合のピークチャンネルとエネルギー分解能を表 4.6 に示す。

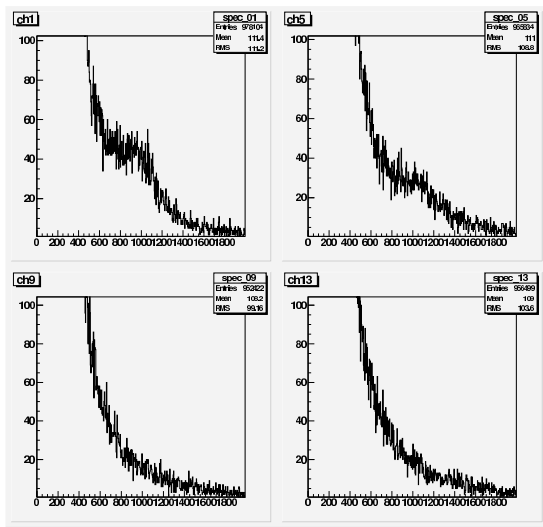


図 4.5: ガンマ線の照射場所ごとのスペクトル (左上: under、右上: top、左下: left、右下: right)

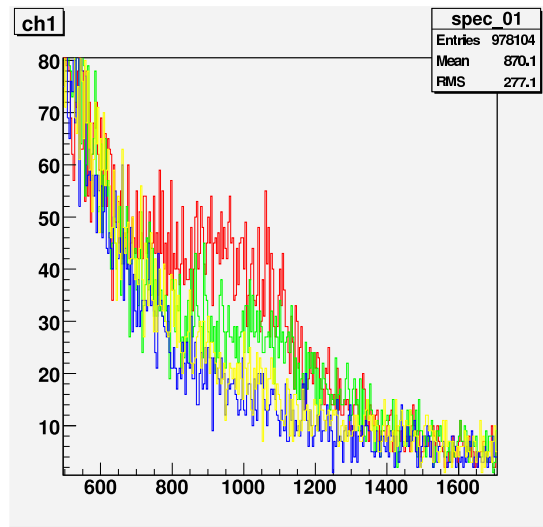


図 4.6: ガンマ線の照射場所ごとのスペクトル (赤: under、緑: top、青: left、黄: right)

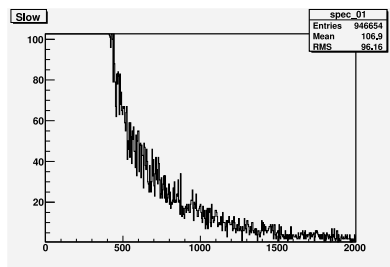


図 4.7: バックグラウンドスペクトル

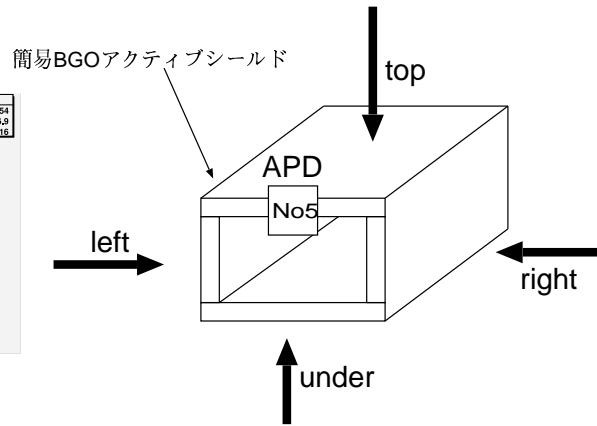


図 4.8: ガンマ線の照射場所

照射場所に対応する簡易 BGO アクティブシールドの面	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
上側	179.5	1005	42.06
下側	143.8	946.9	35.76

表 4.6: 照射場所によるエネルギー分解能

両側面 (left、right) からのガンマ線照射のスペクトルはバックグラウンドにほぼ

重なっているためにエネルギー分解能を算出できない。これから BGO プレート間でのシンチレーション光の伝達はほとんどないことが分かる。下側 (under) に照射した場合に現れているスペクトルはガンマ線が BGO プレートを透過して APD の装着面で検出されたものが見えていると考えられる。更に、上側 (top) と下側のピークチャンネルの違いについては照射場所を変更する際に生じた微妙な温度差によるものであり、カウント数の違いは VME のデッドタイムや、線源の置く位置の違いによるものであると言える。

4.5 4つの APD によるガンマ線の 4ch 同時読み出し

本実験では 5mm 角 APD4 つ (Serial No230,140,231,212) を簡易 BGO アクティブシールドの各面に 1 つずつ装着し、APD を 1 つ装着した場合との光量の違いとガンマ線の照射場所の違いによるスペクトルの変化を調べた。装着した様子を図 4.9 に示す。設定は低温、バイアス電圧 350V、Shaper Gain を MAX で測定し、VME のセットアップで行った。線源は ^{133}Ba の 356keV を用いた。これは §4.4 で ^{133}Ba を用いたのと同様に、BGO の透過率によるためである。他の設定は §4.4 と同様にした。測定されたスペクトルを図 4.10 に示す。

加えて、図 4.10 を見て分かるように、簡易 BGO アクティブシールドの右側 (緑) のスペクトルのピークがガンマ線のあらゆる場所からの照射に対して見えていない。そこで Shaper Gain を MAX/2 にし、その他の設定を変えずに測定を行った。測定されたスペクトルを図 4.11 に示す。なお、それぞれの APD に接続している回路によってピークが出る位置が異なるため、予めパルサーを用いて一定のエネルギーでの各回路が出力するピークチャンネルについて測定した。その結果を表 4.7 に示す。

簡易 BGO アクティブシールドの面	APD Serial No	ピークチャンネル
上側	140	1453
右側	212	1621
下側	231	1557
左側	230	1485

表 4.7: 一定エネルギーにおけるピークチャンネルのばらつき

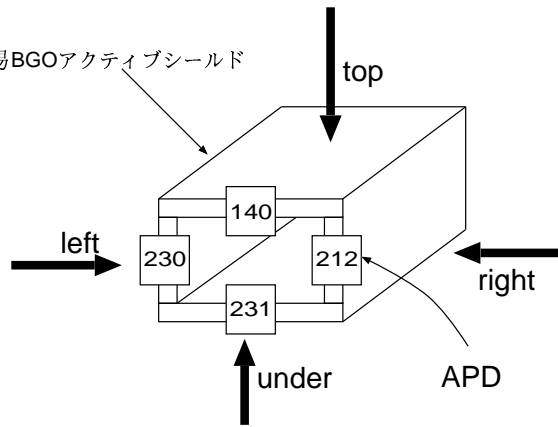


図 4.9: 4つの5mm角 APD と簡易 BGO アクティブシールドの装着図
APD の中に記述してあるのは Serial No

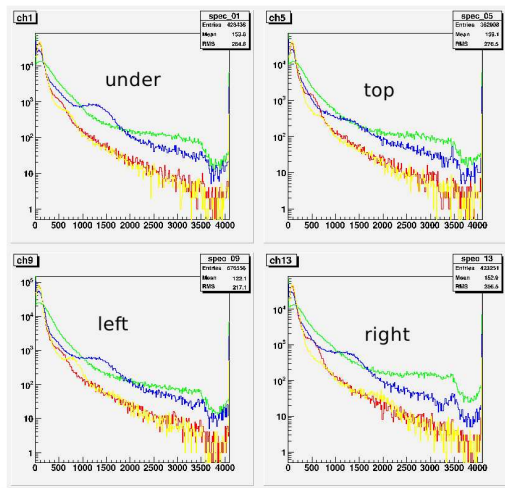


図 4.10: 照射場所別の ^{133}Ba のスペクトル

照射場所 (左上: under、右上: top、左下: left、右下: right)
APD の装着場所とスペクトルの色の対応
(赤: 簡易 BGO アクティブシールドの上側 (Serial No140)、緑: 右側 (212)、青: 下側 (231)、黄: 左側 (230))

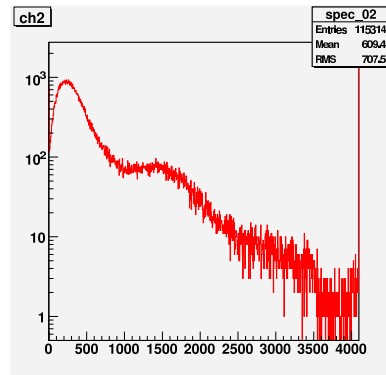


図 4.11: Shaper Gain を MAX/2 にした時の簡易 BGO アクティブシールドの右側に装着した APD によるスペクトル

図4.11から図4.10の場合の簡易BGOアクティブシールドの右側に装着したAPDによるスペクトルのピークは横軸の上限を超えていたことになる。

ここで、低エネルギー側に見えているノイズの幅がばらついていることについて記述する。この原因はそれぞれの辺に装着しているAPDのgainが一定でないことと、表4.7で示すように出力チャンネルのばらつきである。よって、これらの値のばらつきを補正する必要がある。補正したものを図4.12に示す。本実験では、簡易BGOアクティブシールドの上側のAPDgainと表4.7の値を基準として他の値との比により他のスペクトルを補正した。

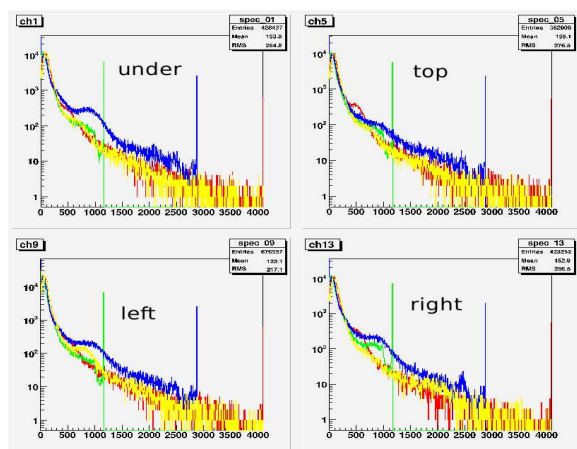


図 4.12: 補正後の場所別の ^{133}Ba のスペクトル
 スペクトルの表示位置と色は図 4.10 と同様

照射場所 (左上 : under、右上 : top、左下 : left、右下 : right)

APD の装着場所とスペクトルの色の対応 (赤 : 簡易 BGO アクティブシールドの上側 (Serial No140)、緑 : 右側 (212)、青 : 下側 (231)、黄 : 左側 (230))

補正の結果、ガンマ線の照射場所のBGOプレートに装着したAPDによるスペクトルのピークが図4.10と比較して顕著に出ていることが分かる。図4.12を見ると、照射場所に対応したBGOプレートの面に装着したAPD以外のスペクトルにおいてもピークが見えている。これは、BGOプレート間でのシンチレーション光の伝搬を示唆している。

そこで、バックグラウンドを除去し、ガンマ線を照射したBGOプレートの各面でガンマ線が検出されたイベントだけを抜き出すために、照射した面に装着したAPDのパルスハイトでのガンマ線ピークの辺りの値を持つイベントだけを用いて作成し

たスペクトルを図 4.13、4.14、4.15 に示す。なお、簡易 BGO アクティブシールドの右側についてはガンマ線の照射場所に対応したスペクトルのピークが見えていないので解析はできなかった。

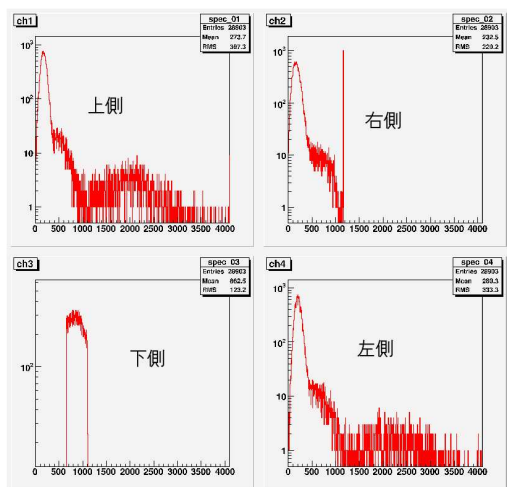


図 4.13: 照射した場所 : under

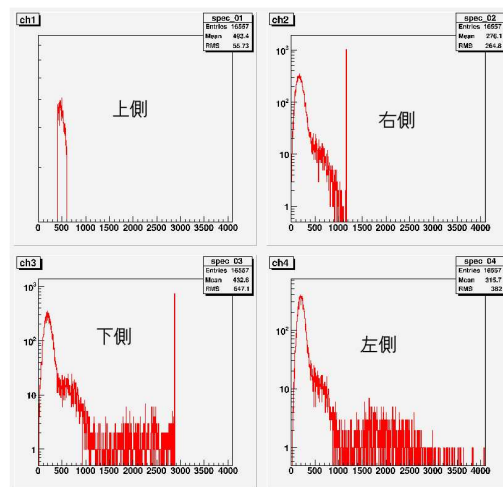


図 4.14: 照射した場所 : top

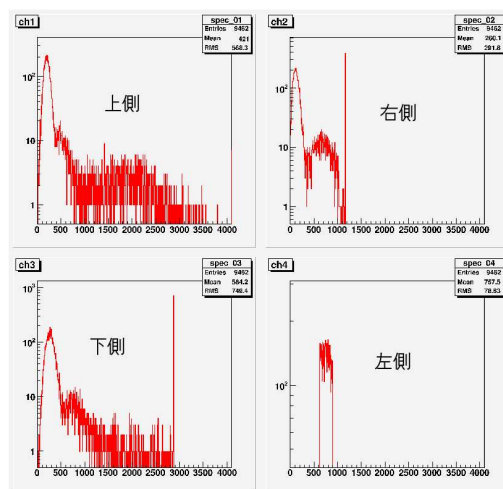


図 4.15: 照射した場所 : left

図に示してある面はガンマ線照射に対応した APD を装着した BGO プレートの面である。

測定結果から、ガンマ線の照射場所に対応した APD を装着した BGO プレートの面以外の面においてもピークが見えていた。ガンマ線を照射した面を 1 とした場合

の他の面の光量を表 4.8 に示す。なお、それぞれの BGO プレートで発生する光量が異なるので、簡易 BGO アクティブシールドの面の上側を基準として、他の面の光量を補正した。

照射場所に対応する簡易 BGO アクティブシールドの面	比較する面	光量比
上側 (APD Serial No140)	下側 (231)	0.6676
	左側 (230)	0.5746
下側 (231)	上側 (140)	1.057
	左側 (230)	0.7750
左側 (230)	上側 (140)	0.9947
	下側 (231)	0.9985

表 4.8: 簡易 BGO アクティブシールドの各面についての光量比

ガンマ線の照射場所に対応した BGO プレートの面以外の面のピークの平均をとった値がガンマ線を照射した面のピーク値に対する光量比とする。ここでもガンマ線を照射した面のピーク値を 1 とした。更に、これを用いてガンマ線が吸収された面から別の面へ伝搬していると考えられるシンチレーション光の割合を算出したものを表 4.9 に示す。

照射場所に対応する面	平均した光量比	ガンマ線が吸収された面から別の面への伝達の割合 (%)
上側	0.6211	66.70
下側	0.9160	73.32
左側	0.9966	74.94

表 4.9: 光量比と光伝達の割合

この結果により、ガンマ線の照射面で発生した約 7 割の光量が他の面へ伝搬していることが分かった。更に、検証するためには接合面でのシンチレーション光の伝達を防ぐために接着剤に反射材を練り込む方法を用いる。しかし、この実証の前例がなくムラなく厚く塗らないと効果がないために非常に困難で実証できない可能性が高い。

次に APD の個数増加による光量変化について記述する。まず、ガンマ線の照射場所に対応した簡易 BGO アクティブシールドの面に装着した APD によって測定されたスペクトルのピークチャンネル、エネルギー分解能を表 4.10 に示す。なお、簡易 BGO アクティブシールド右側のエネルギー分解能は Shaper Gain を MAX/2 に

したスペクトルから求め、それぞれのエネルギー分解能は以下の式から求めた。表 4.10 のピークチャンネルの値は出力チャンネルのばらつきと APDgain を補正した値を用いる。

$$\frac{\Delta E}{E} [\%] = \frac{2.355 \times \sigma(\text{ch})}{\text{PeakChannel}(\text{ch})} \times 100$$

照射場所に対応する簡易 BGO アクティブシールドの面	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
上側 (APD Serial No140)	135.7	454.6	70.30
右側 (212)		395.2	61.68
下側 (231)	184.9	850.2	51.22
左側 (230)	176.1	740.1	56.04

表 4.10: 1APD のエネルギー分解能

更に、各場所のガンマ線照射に対して 4 つの APD のパルスハイトの和により作成されるスペクトルを図 4.16 に示す。更にエネルギー分解能を表 4.11 に示す。

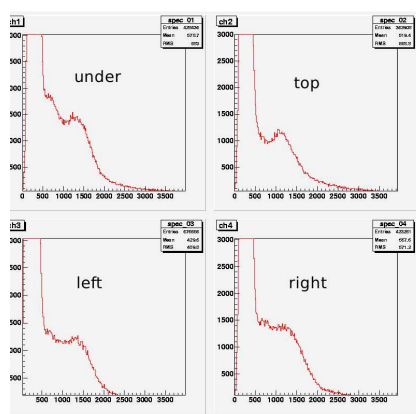


図 4.16: 4 つの APD のパルスハイトの和のスペクトル

図中の場所は簡易 BGO アクティブシールドにおけるガンマ線の照射場所を示す。

照射場所に対応する簡易 BGO アクティブシールドの面	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
上側 (APD Serial No140)	291.4	1120	61.27
右側 (212)	258.9	1335	45.67
下側 (231)	228.7	1369	39.34
左側 (230)	218.4	1421	36.20

表 4.11: 4APD のエネルギー分解能

この測定結果より、1つの APD を簡易 BGO アクティブシールドの1つの面に装着してシンチレーション光を読み出す場合よりも4つの APD を各面に装着したほうが光量とエネルギー分解能が向上することが分かった。簡易 BGO アクティブシールドの4つの面にそれぞれ APD を装着したうえで上側の面の APD が検出した光量 (4APD-1) は、上側の面に1つ APD を装着した場合 (1APD) と比較して0.4951 倍と減少するが、4つの APD のパルス高さを足し合わせた場合の光量 (4APD-4) は1.220 倍と増加する。簡単のため以下にそれぞれの場合で (1APD) を基準の1とした場合のそれぞれの光量比を示す。

$$(1\text{APD}) : (4\text{APD-1}) : (4\text{APD-4}) = 1 : 0.4951 : 1.220$$

更に (4APD-1) を基準の1とした場合の (4APD-4) の光量比、5mm角 BGO に APD を装着した場合 (5mmBGO) を基準の1とした場合のそれぞれの光量比を分かりやすく示す。

$$(5\text{mmBGO}) : (1\text{APD}) : (4\text{APD-1}) : (4\text{APD-4}) = 1 : 0.1111 : 0.05501 : 0.1355$$

$$(4\text{APD-1}) : (4\text{APD-4}) = 1 : 2.464$$

よって、APD を増やすと1つの APD 当たりの光量は減少してしまうが増やした APD のパルス高さを足し合わせると装着する APD が1つの場合よりも光量が増える。ただし、APD を1つから4つに増やした割には光量の上がり方やエネルギー分解能の下がり方は緩やかであった。これは §2.6 の結果と同様となり信憑性は高い。

更に、光集収率における目標である PMT を用いた場合での簡易 BGO アクティブシールドの光量と (4APD-4) の光量比較をする。なお、PMT を用いた場合は §3.4 で測定された値を用いる。ここで量子効率が PMT は2割、APD は8割なので (4APD-4) の値を4倍する必要がある。

$$(PMT) : (4\text{APD-4}) = 0.64 : 0.14 \times 4 = 1 : 0.84$$

この値より、APD を4つ装着することにより、PMT の場合の84%の光を収集できる。

理論上のエネルギー分解能の算出

理論上のエネルギー分解能は下の式で与えられる。なお、この式は §2.4 で説明している。

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

また、 δ_{noise} の表式を下に示す。

$$\delta_{noise} = \sqrt{\delta_{noise,I}^2 + \delta_{noise,C}^2}$$

理論値の計算は以下の場合において行う。なお、以降の記述では単に場合 (1)、(2)、(3) として扱う。

- 簡易 BGO アクティブシールドの上側の面に 1 つだけ APD を装着して上側にガンマ線を照射した場合のスペクトル …場合 (1)
- 簡易 BGO アクティブシールドの各面に 4 つの APD をそれぞれ装着してガンマ線を上側に照射したスペクトル …場合 (2)
- 簡易 BGO アクティブシールドの各面に 4 つの APD をそれぞれ装着して、上側の面にガンマ線を照射して、その 4 つのパルスハイトを足し合わせたスペクトル …場合 (3)

なお、この理論上のエネルギー分解能の式は APD を 1 つだけ装着した場合に対応しているので、場合 (3) では以下に記述するように部分的に変換して理論上のエネルギー分解能を算出する。

$$\delta_{noise} = \sqrt{\delta_{noise,I}^2 + \delta_{noise,C}^2} \implies \delta_{noise} = \sqrt{4(\delta_{noise,I}^2 + \delta_{noise,C}^2)}$$
$$Y \text{ と } G \implies \frac{1}{4} \sum Y_i G_i$$

この変換で i は装着している APD の個数で、場合 (3) は $i = 4$ となる。

式の記号で各場合に共通した定義を持つものを下に記述する。

$$\delta_{sc} = 4.7 \pm 0.5(\%)$$

$$F = 2$$

$$Q = 0.8$$

$$E_g = 0.00365(\text{keV})$$

$$E = 356(\text{keV})(^{133}\text{Ba のエネルギー})$$

N_{ph} :

N_{ph} は 1keV 当たりの BGO の光子数である。予め測定して、 ^{137}Cs の 662keV で
の 5mm 角 BGO の光子数が 4.89×10^3 個であることが分かっている。更に、こ
の値を 662keV で割ると $N_{\text{ph}} = \underline{7.387}$ 個/keV となる。

次に、3つの場合で異なる値について記述する。なお、場合 (3) については理論式
の変換を考慮に入れる。

Y:

Yは同条件での5mm角BGOに対する簡易BGOアクティブシールドの光量比である。ここで各場合についてのYの値を下に記述する。

1. 場合(1)

§4.3より、(簡易BGOアクティブシールド):(5mm角BGO) = 0.1111:1となるので $Y = 0.1111$ となる。

2. 場合(2)

表4.10の上側のピークチャンネルと予め§4.5と同条件で5mm角BGOを用いて測定しておいたピークチャンネルを用いると、(簡易BGOアクティブシールド):(5mm角BGO) = 454.6(ch):8264(ch) = 0.05501:1となるので $Y = 0.05501$ となる。

3. 場合(3)

表4.11の各面のピークチャンネルと場合(2)で用いた5mm各BGOのピークチャンネルを用いて、Yを算出する。結果を表4.12に示す。

照射場所に対応する簡易BGOアクティブシールドの面	Peak(ch)	Y
上側 (APD Serial No140)	1120	0.1355
右側 (212)	1335	0.1615
下側 (231)	1369	0.1657
左側 (230)	1421	0.1720

表 4.12: 簡易BGOアクティブシールドの各面に対するYの値

G :

Gはバイアス電圧350Vの各APDのゲインである。各場合に用いたAPDの種類とゲインを表4.13、4.14に示す。なお、APDのゲインは§4.2で測定した値である。

場合	APDの種類	ゲイン
(1)	3mm角、No5	62.27
(2)	5mm角、Serial No140	42.79

表 4.13: 場合 (1)、(2) の APDgain

場合 (3)		
照射場所に対応する面	APDの種類	ゲイン
上側	Serial No140	42.79
右側	Serial No212	168.1
下側	Serial No231	65.24
左側	Serial No230	42.79

表 4.14: 場合 (3) の APDgain

δ_{noise} :

δ_{noise} を算出する式は APD を 1 つ装着した場合には

$$\delta_{\text{noise}} = \sqrt{\delta_{\text{noise},I}^2 + \delta_{\text{noise},C}^2}$$

である。また、APD を 4 つ装着した場合には

$$\delta_{\text{noise}} = \sqrt{4(\delta_{\text{noise},I}^2 + \delta_{\text{noise},C}^2)}$$

となる。ここで、 $\delta_{\text{noise},I}$ は電流性ノイズであり $\delta_{\text{noise},C}$ は容量性ノイズである。詳しくは §2.3.3 で記述してある。また、 $\delta_{\text{noise},I}$ と $\delta_{\text{noise},C}$ は以下に記述する方法で求めることが可能である。

- $\delta_{\text{noise,I}}$ について

$$\delta_{\text{noise,I(keV)}} = 0.65 \times I_n \times \tau_s \times B$$

上記の式で算出できる。本実験では τ_s は $2(\mu\text{s})$ に固定している。 I_n は 5mm 角 APD の値については 2004 年度の浅野氏の卒論の研究結果、 3mm 角 APD の値については同研究室の白井氏の実験結果を用いる。値は次のようになる。

$$I_n = 0.05064(\text{nA}) \quad \text{※ 5mm 角 APD(場合 (2)、(3))}$$

バイアス電圧 360V(350V に最も近い値)

$$I_n = 0.084119(\text{nA}) \quad \text{※ 3mm 角 APD(場合 (1))、バイアス電圧 350V}$$

$$B = 1.70 \times 10^2 \quad \text{※定数}$$

- $\delta_{\text{noise,C}}$ について

C_{in} の値と横軸を容量、縦軸をエネルギーで表示した容量勾配の近似曲線の式を用いる。 C_{in} の値は同研究室の白井氏の実験結果から、 3mm 角 BGO を用いた場合 (1) では

$$C_{\text{in}} = 29.4842(\text{pF}) \quad \text{※バイアス電圧 350V}$$

2004 年度の浅野氏の卒論の研究結果から、 5mm 角 APD を用いた場合 (2) と場合 (3) では

$$C_{\text{in}} = 80.23(\text{pF}) \quad \text{※バイアス電圧 350V}$$

となる。また、下記の容量勾配の近似曲線の式は予め測定しておいたものであり、これを用いる。各場合の C_{in} の値と $\delta_{\text{noise,C}}$ の値を表 4.15 に示す。

$$\delta_{\text{noise,C}} = 0.021352 \times C_{\text{in}} + 1.04251$$

場合	$\delta_{\text{noise,C}}(\text{keV})$
(1)	1.672
(2)	2.756
(3)	2.756

表 4.15: 各場合での $\delta_{\text{noise,C}}$ の値

加えて、この式のグラフを図 4.17 に示す。更に、実際に各場合のノイズの値を表 4.16 に示す。

場合	$\delta_{\text{noise,I}}(\text{keV})$	$\delta_{\text{noise,C}}(\text{keV})$	$\delta_{\text{noise}}(\text{keV})$
(1)	18.59	1.672	18.67
(2)	11.19	2.756	11.52
(3)	11.19	2.756	23.05

表 4.16: 各場合での δ_{noise} の値

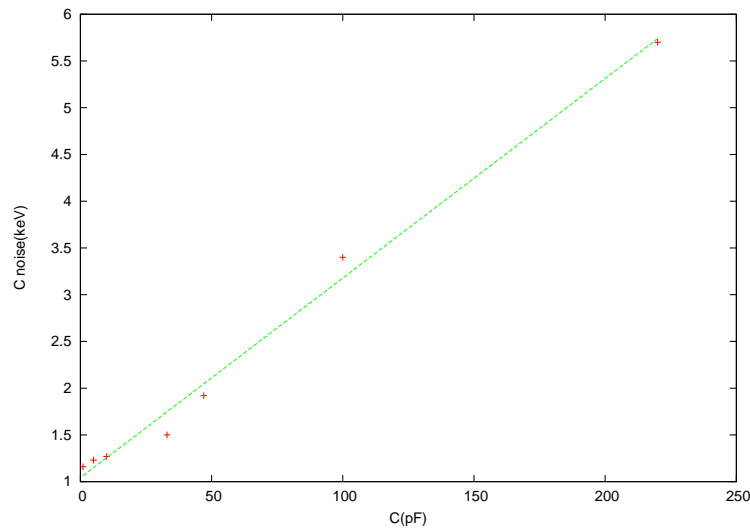


図 4.17: 容量勾配

以上に記述した値を用いて、それぞれの場合での理論上のエネルギー分解能を算出する。その結果に加えて、対応した実験値も示し、更に §2.4 の式 (2.3) より、 E_{th} の値を算出したものを表 4.17 に示す。

場合	エネルギー分解能 (%)		E_{th} (keV)
	理論値	実験値	理論値
(1)	41.61	42.06	388.9
(2)	71.01	70.30	546.5
(3)	25.63	61.27	79.72

表 4.17: エネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値

場合 (1) :

簡易 BGO アクティブシールドの上側の面に 1 つだけ APD を装着して上側にガンマ線を照射した場合

場合 (2) :

簡易 BGO アクティブシールドの各面に 4 つの APD をそれぞれ装着してガンマ線を上側に照射した場合

場合 (3) :

簡易 BGO アクティブシールドの各面に 4 つの APD をそれぞれ装着して、上側の面にガンマ線を照射して、その 4 つのパルスハイトを足し合わせた場合

この結果から、場合 (1) と場合 (2) はエネルギー分解能の実験値と理論値がほぼ等しい。しかし、場合 (3) での実験値と理論値に差がある。これは、使用している APD に問題があったと考えられる。装着していた APD の内、Serial No212 のゲインが異常に高かったため、 I_n の値が大幅に増加した結果が実験値と理論値の誤差だと考えられる。

理論上は場合 (3) が他の場合と比較してエネルギー分解能について優れていることが言える。ただし、理論上の場合 (1) と比較して場合 (3) のエネルギー分解能は 4 分の 1 にはならず、約半分にとどまった。これは APD の数が増えるほどノイズが増加する割合が多くなっていることが原因であると考えられる。

E_{th} については、場合 (1) と場合 (2) の結果から APD を増やすことによりノイズが増加することが分かる。しかし、場合 (3) の結果により増やした APD のパルスハイトをまとめることによりノイズの影響は少なくなる。しかし、 E_{th} においても図 4.16 で分かるように値が小さ過ぎる。

そこで、原因であると考えられる 5mm 角 APD (Serial No212) を除外して 3 つのパルスハイトの和からエネルギー分解能の実験値と理論値、加えて E_{th} の値を再度算出する。ただし、エネルギー分解能の理論式を以下に記述するように変換する。

$$\delta_{\text{noise}} = \sqrt{\delta_{\text{noise,I}}^2 + \delta_{\text{noise,C}}^2} \implies \delta_{\text{noise}} = \sqrt{3(\delta_{\text{noise,I}}^2 + \delta_{\text{noise,C}}^2)}$$

$$Y \text{ と } G \implies \frac{1}{3}\Sigma Y_i G_i$$

この変換を行ったうえで算出した値を表 4.18 に示す。更に、3つのパルスハイトを足し合わせたスペクトルを図 4.18 に示す。

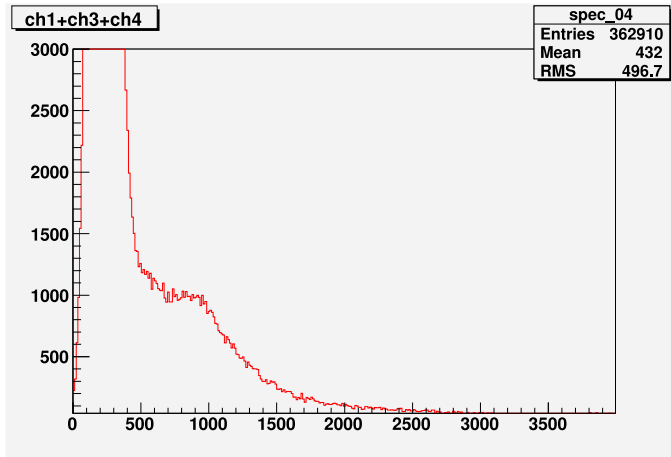


図 4.18: 3つのパルスハイトを足し合わせた場合 (3) のスペクトル

エネルギー分解能 (%)		E_{th} (keV)
理論値	実験値	理論値
34.53	30.02	110.46

表 4.18: 場合 (3) における 3つのパルスハイト和でのスペクトルについてのエネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値

この結果より、表 4.17 における場合 (3) の理論値と実験値の大幅な違いの原因は 5mm 角 APD (Serial No212) であることが分かった。 E_{th} について、値は図 4.18 で見られる実験値に近付いたが、それでも差がある。これは図 4.18 で分かるように E_{th} とピークがほぼ同じ位置に出ていることから E_{th} の判別が困難であることが理由に挙げられる。検出器の性能向上により、高チャンネル側にピークを出すことが可能ならば、実験における E_{th} の値が理論値に近付くことが期待される。

まとめ

簡易 BGO アクティブシールドと APD を用いて様々な実験を行った結果、ガンマ線の透過や、BGO プレート間でのシンチレーション光伝搬があることが実証できた。この結果を踏まえて、エネルギー分解能を算出すると実験値、理論値ともに簡易 BGO アクティブシールドに 1 つの APD を装着してシンチレーション光を読み出すよりもそれぞれの面に APD を 1 つずつ装着して、4 つの APD で読み出すほうが光に検出効率が良い。しかし、エネルギー分解能の下がり方は緩やかで APD の数をむやみに多くしても期待できる値は出ない。これは、APD の個数に比例してノイズが増えるためであると考えられる。しかし、簡易 BGO アクティブシールドに 4 つの APD を装着して 4 つ全ての光量を足し合わせた場合、PMT を用いた簡易 BGO アクティブシールドで測定された光量と比較すると、84% の光量が得られた。この結果により、装着する APD の数や位置を変えることで PMT 以上の光量を得ることが期待できる。

第5章 APD+HXD用BGO-wellでのガンマ線実験

5.1 実験目的

HXD用BGO-well(6cm × 6cm × 32cm、厚さ3mm)の構造は実際にNeXT衛星に使用される可能性がある。そこで、§4での実験結果を考慮に入れてHXD用BGO-wellを用いて同様の実験を行う。本実験により、NeXT衛星におけるHXD用BGO-wellの構造をしたBGOアクティブシールドとAPDの実用性を検証するとともに、SGD開発の躍進を果たすことを目指す。実際に行った実験を下に示す。

- 8ch対応実験装置
- 1つのAPDとHXD用BGO-wellを用いたアルファ線の照射方向によるスペクトル変化の測定
- APDを5つにした場合における各APDのスペクトル変化

5.2 8ch対応実験装置の製作

今まで使用してきたVMEによる信号処理回路は最大4chまでしか対応できない。すなわち、APDを同時に読み出すのは4つまでが限界であった。しかし、HXD用BGO-wellを用いた実験ではその構造が複雑なため多数のAPDを付ける必要が予想されるので倍の8ch同時読み出しを行うことが必須である。そこで、既存の処理回路を基礎として8ch対応の信号処理回路を製作する。回路は§3.2.3の図3.6にブロック図を示してある。このブロック図の中で、8chに対応していない箇所はDiscri回路と反転回路である。ちなみに、4ch対応Pre Ampは市販品であり、自体を8ch対応にすることは不可能なので、別の4ch対応Pre Ampを用いる。

5.2.1 Discri 回路の製作

Discri 回路は Discriminator によりノイズを落とし、波形を整形する役割りを担う。1ch 分の回路図は §3.2.3 の図 3.7 に示してある。この回路図を基にして 4ch 分の回路を NIM モジュールのケースにおいて作成した。作成した回路を図 5.1 に示す。

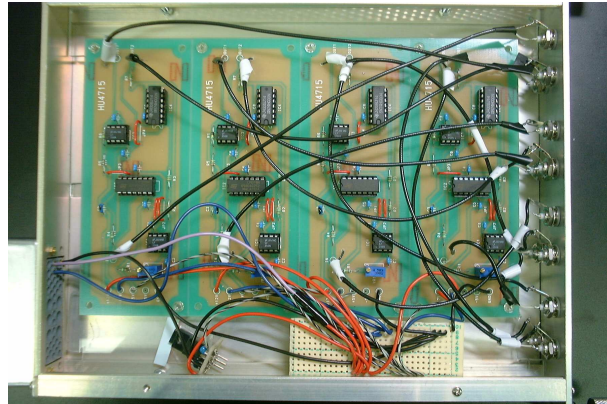


図 5.1: Discri 回路

5.2.2 反転回路

反転回路は Shaping Amp が負入力のために Pre Amp から出力された正波形を負の波形にするための回路である。1ch 分の回路図を図 5.2 に示す。この回路は Discri 回路の 1 部分を利用して製作している。これを基に 4ch 分の回路を NIM モジュールのケースにおいて作成した。作成した回路を図 5.3 に示す。

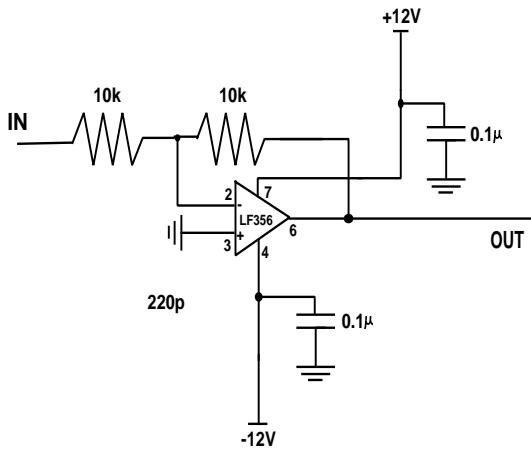


図 5.2: 1ch 分の反転回路図

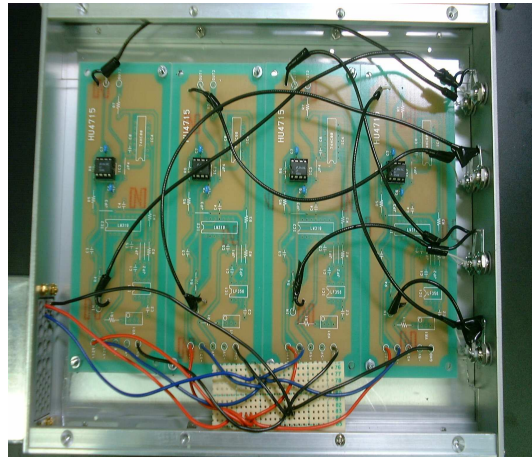


図 5.3: 反転回路

5.3 1APDによるアルファ線の照射場所によるスペクトル変化の測定

本実験では 3mm 角 APD1つ (No5、No7) と HXD 用 BGO-well を用いて様々な場所に照射して放射線のスペクトルの違いを調べる。この結果により、APD の装着個数や位置を推測することができる。設定は同じ測定時間、低温、バイアス電圧 355V、Shaper Gain を MAX で測定して VME のセットアップで行った。なお、本実験ではガンマ線ではなくアルファ線である ^{241}Am を用いた。これは、ガンマ線では吸収された場所を特定しにくいからである。 ^{241}Am のアルファ線はシンチレーターに 1200keV 相当の信号を落とすのでノイズにも強いという性質を持つ。しかし、アルファ線は紙 1 枚でも遮蔽されてしまう。そのため、照射する場所にアルファ線源を直接装着して BGO と線源の間には何も入れないようにする。そのため、照射部分に巻いているゴアテックス反射材に穴を開けた。ここで、APD の装着位置とアルファ線を照射した場所を図 5.4、5.7 に示す。以降では図中の spot の番号を用いる。

ここで都合により図 5.4 と図 5.7 で用いた APD が異なり、図 5.4 では No5、図 5.7 では No7 を用いる。なお、スペクトルとピークチャンネルの値は No7 を基準の 1 として、§4.2 の 3mm 角 APD のバイアス電圧 355V のゲインを用いて No5 の値を補正する。

まず、APD を HXD 用 BGO-well の上面に装着した図 5.4 において spot(1-1) から spot(1-5) で測定されたスペクトルを図 5.5 に示す。また、アルファ線のスペクトルが見えている spot(1-1)、spot(1-5) についてはピークチャンネルとエネルギー分解能を表 5.1 に示す。

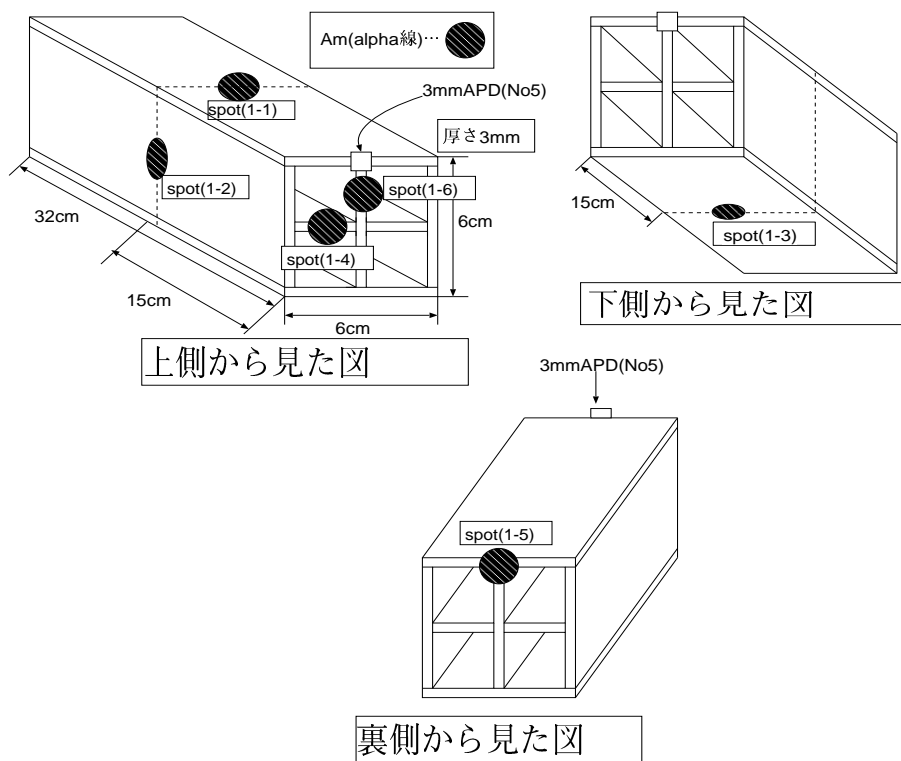


図 5.4: APD を HXD 用 BGO-well の上側の面に装着した場合のアルファ線の照射場所

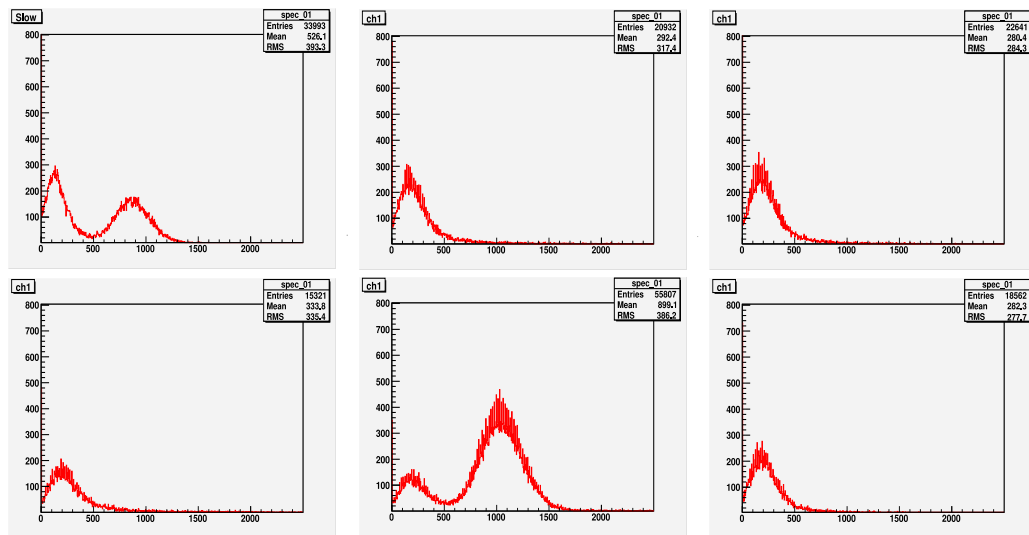


図 5.5: 左上から右へ spot(1-1)、(1-2)、(1-3)、左下から右へ spot(1-4)、(1-5)、(1-6) のスペクトル

spot	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
(1-1)	198.2	1077	43.34
(1-5)	201.1	1044	45.36

表 5.1: spot(1-1)、(1-5) のピークチャンネルとエネルギー分解能

この測定結果によりアルファ線のスペクトルが見えたのは、spot(1-1)、spot (1-5) の場合であった。この2つのspotはAPDを装着した面上にある。よって、HXD用BGO-wellにおいてはAPDの装着面以外にアルファ線を照射した場合にはBGOのシンチレーション光がAPDに入っていない、あるいは光損失が無視できないほど大きく、低チャンネルにスペクトルが埋もれていることが考えられる。シンチレーション光がアルファ線の照射面以外の面に伝搬しない理由としては、BGOの屈折率によるものであると考えられる。BGOの屈折率は2であり、図5.6を見れば分かるように面に対して30°未満で全反射をしてしまう。全反射をすると照射面以外の面に光が入ることはほぼない。更に、30°以上の場合は屈折した先にゴアテックス反射剤があり、散乱してしまう。そこで面に対して30°未満の角度を持つ光と30°以上の角度を持つ光に分かれる。前者は全反射を繰り返して照射面以外の面に入らない。よって、後者の一部だけが垂直な別のBGOプレートの面に入り、照射面以外の面にシンチレーション光が伝搬しない、あるいは伝搬しても極僅かになる。

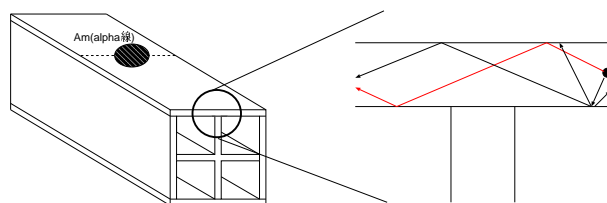


図 5.6: シンチレーション光のBGO内での動作

また表5.1より、APDからの距離が15cmであるspot(1-1)と32cmであるspot(1-5)のピークチャンネル、エネルギー分解能共にほぼ等しかった。この結果より、HXD用BGO-wellにおいてはアルファ線の照射場所とAPDの距離と光量は関係があったとしても極僅かであると考えられる。

次に、APDをHXD用BGO-wellの中央に装着した図5.7においてspot(2-1)で測定されたスペクトルを図5.8に、spot(2-2)で測定されたスペクトルを図5.9に示す。また、アルファ線のスペクトルが見えている図5.9についてはピークチャンネルとエネルギー分解能を表5.2に示す。

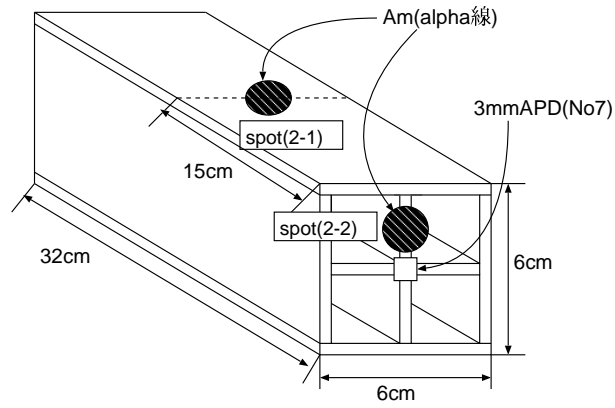


図 5.7: APD を HXD 用 BGO-well の中央に装着した場合のアルファ線の照射場所

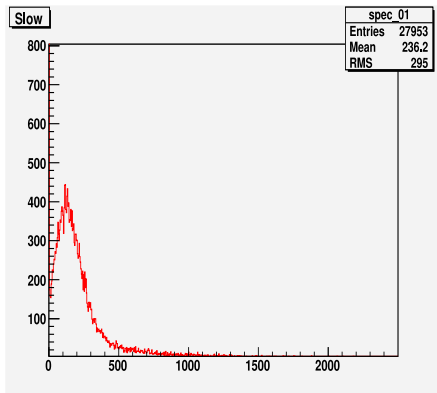


図 5.8: spot(2-1) でのスペクトル

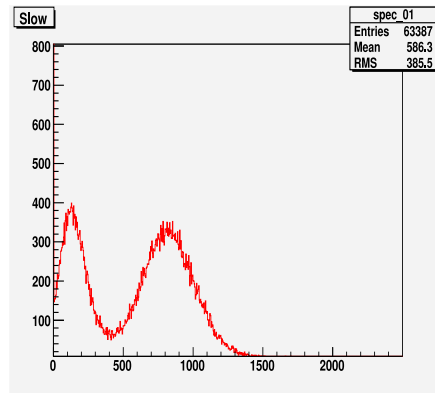


図 5.9: spot(2-2) でのスペクトル

spot	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
(2-2)	170.3	817.6	49.05

表 5.2: spot(2-2) のピークチャンネルとエネルギー分解能

測定結果から spot(1-1)、(1-5)と比較して spot(2-2) の光量が減少し、エネルギー分解能が増加している。この値は spot(1-1) と spot(1-5) の結果と異なっている。これは図 5.7 を見れば分かるが、spot(1-1)、spot(1-5) に対して spot(2-2) での BGO の受光面積が小さいためである。また、spot(2-1) に照射した場合にピークが見られないのは APD を装着している面と異なるためである。そこで、各場所についてのエ

エネルギー分解能と E_{th} の理論値を算出した。なお、§4.5 の理論上のエネルギー分解能の算出と同様の方法で行った。なお、実際の計算は付録 A で行う。算出した理論上のエネルギー分解能と E_{th} を表 5.3 に示す。

spot	エネルギー分解能 (%)		E_{th} (keV)
	理論値	実験値	理論値
1-1	38.03	43.34	1526
1-5	38.03	45.36	1526
2-2	22.10	49.05	456.6

表 5.3: エネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値

この計算結果により spot(2-2) の実験値と理論値が大きく異なっていた。よって、測定時の APD と BGO の接合が適切ではなかったと考えられる。理論値の値から、APD との距離が非常に近い場所にアルファ線を照射した場合は光量が増えて、エネルギー分解能と E_{th} が向上することが分かった。

5.4 APD を 5 つにした場合における各 APD のスペクトル変化

§5.3 から APD を 1 つ装着した場合、照射面以外の面ではシンチレーション光が伝搬しない、あるいは極微量しか伝搬しないという結果が出た。よって、図 5.11 に示すように 5 個の APD を装着してシンチレーション光を読み出す方法が最も効率が良いと考えられる。以下の記述では APD の装着場所の番号を用いる。設定は低温、バイアス電圧 355V、Shaper Gain を MAX で測定し、VME のセットアップで行った。また、回路を 8ch 対応にすることで追加したモジュールを表 5.4 に示す。更に、5ch での信号処理回路のブロック図を図 5.10 に示す。場所 (1) から場所 (4) では Serial No 03Y341 の Pre Amp のそれぞれ場所の番号に対応したチャンネルを用い、場所 (5) は Serial No 051045 の Pre Amp のチャンネル 1 を用いた。ここで、ピークチャンネル補正に必要な一定エネルギーに対する各ピークチャンネルのばらつきについて、パルサーを用いて測定した。その結果を表 5.5 に示す。線源はアルファ線である ^{241}Am の 1200keV を用いた。理由は §5.3 と同様である。

高圧電源	菊水工業株式会社	13072576
Pre Amp	クリアパルス株式会社	MODEL 5005H S/N 03Y341

表 5.4: VME によるデータ処理回路で追加したモジュール

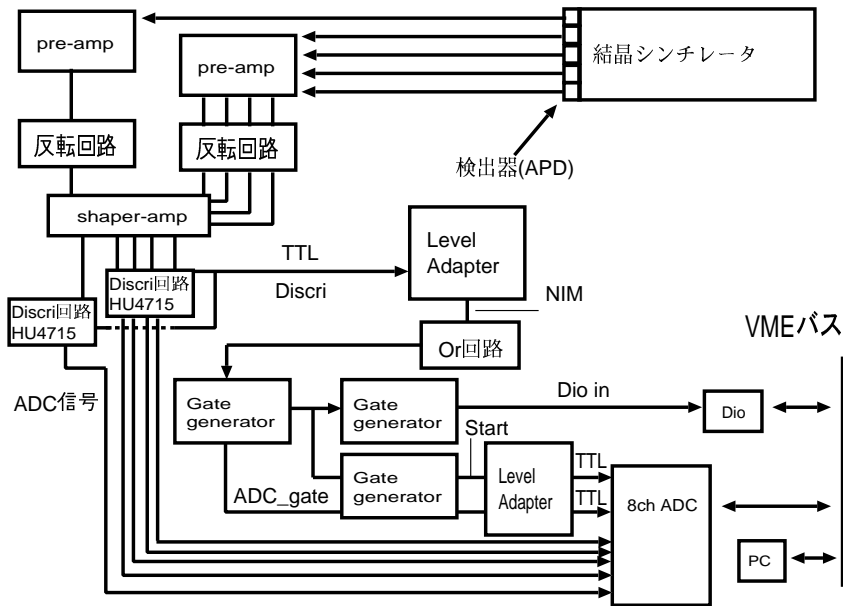


図 5.10: 5ch 用の VME による信号処理回路のブロック図

PreAmp の Serial No	チャンネル	場所	APD Serial No	ピークチャンネル
03Y341	ch1	(1)	No7	653
	ch2	(2)	KA2403	650
	ch3	(3)	No6	622
	ch4	(4)	KA2402	605
051045	ch5	(5)	KA2408	645

表 5.5: 一定エネルギーにおけるピークチャンネルのばらつき

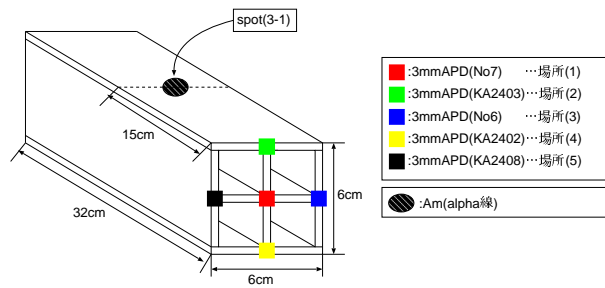


図 5.11: 5つの APD の装着図

図 5.11 に示すように spot(3-1) にアルファ線を照射した場合の各 APD のスペクトルを図 5.12 に示す。この照射位置は §5.3 の spot(1-1) と同じ場所である。なお、このスペクトルは場所 (1) に装着している 3mm 角 (No7) のゲインとそれに対応する回路のピークチャンネルを基準の 1 として、他のスペクトルを補正している。更に、5 つ全てのパルス高さを足し合わせたスペクトルを示す。ピークが見えている場所 (2)、場所 (5)、5 つ全てのパルス高さを足し合わせたスペクトルについてピークチャンネルとエネルギー分解能を表 5.6 に示す。

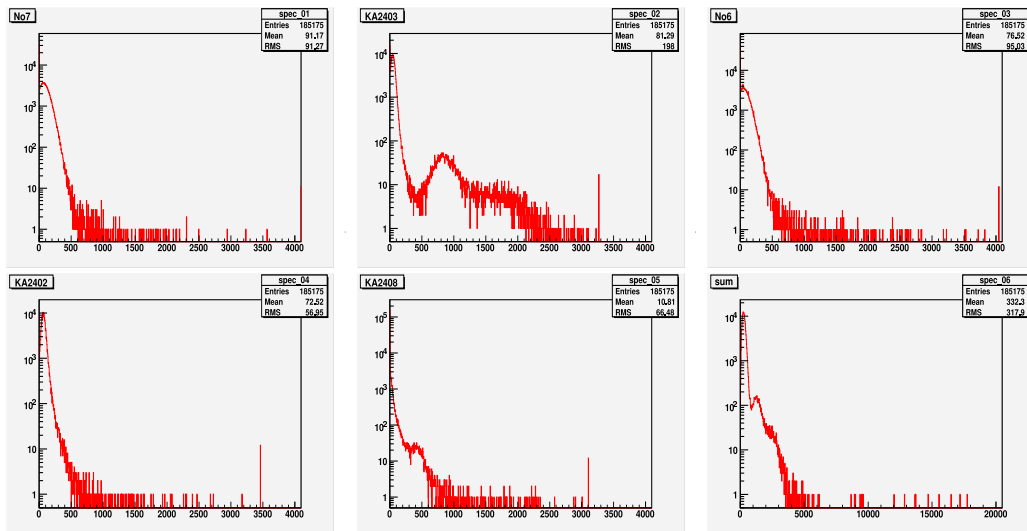


図 5.12: 左上から右へ場所 (1)、(2)、(3)、左下から右へ場所 (4)、(5)、5 つ全てのパルス高さを足し合わせたスペクトル

場所	APD Serial No	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
(2)	KA2403	141.0	835.6	39.74
(5)	KA2408	128.1	373.2	80.83
5つ全てのパルスハイトの和		260.6	1263	48.59

表 5.6: 場所 (2)、場所 (5) と 5 つ全てのパルスハイトの和におけるスペクトルのピークチャンネルとエネルギー分解能

この測定結果と §5.3 の結果より、1 つの APD 同士を比較すると 5 つ装着した場合のほうが光量が減少している。しかし、5 つの APD のパルスハイトを足し合わせてみると、§5.3 の結果よりも光量が増加している。しかし、5 倍に増加するというわけではなく、約 1.2 倍しか増加しない。これは §4.5 での 1 つの APD での光量と 4 つのパルスハイトを足し合わせた光量の倍率とほぼ一致しており、5 つ以上装着しても意味がないことを示している。ここで簡単のため上の面に APD を 1 つだけ装着した場合の光量 (1APD)、APD を 5 つ装着した上で上の面の APD が検出した光量 (5APD-1)、5 つの APD のパルスハイトを足し合わせた場合の光量 (5APD-5) として (1APD) を基準の 1 とした場合のそれぞれの光量比を示す。

$$(1\text{APD}) : (5\text{APD-1}) : (5\text{APD-5}) = 1 : 0.7759 : 1.173$$

更に、(5APD-1) を基準の 1 とした場合の (5APD-5) の光量比、5mm 角 BGO に APD を装着した場合の光量 (5mmBGO) を基準の 1 とした場合のそれぞれの光量比を分かりやすく示す。

$$(5\text{mmBGO}) : (1\text{APD}) : (5\text{APD-1}) : (5\text{APD-5}) = 1 : 0.03231 : 0.02507 : 0.03789$$

$$(5\text{APD-1}) : (5\text{APD-5}) = 1 : 1.511$$

更に、ここでも光収集率における目標である PMT を用いた場合での HXD 用 BGO-well の光量と (5APD-5) の光量比較をする。なお、PMT を用いた場合は §3.4 で測定された値を用いる。なお、この場合においても量子効率の関係上、(5APD-5) の値を 4 倍する。

$$(PMT) : (5\text{APD-5}) = 0.21 : 0.038 \times 4 = 1 : 0.72$$

この値より、APD を 5 つ装着することにより、PMT の場合の 72% の光を収集することが可能となった。

また、図 5.11 を見ることにより場所 (2) と場所 (5) から BGO プレート間で光が伝搬していることが分かる。ピークチャンネル比から約 31% が伝搬している。§4.5 の結果よりも伝搬している光が少ないのは照射場所と APD との距離が遠くなったために伝搬する光量が少なくなったと考えられる。しかし、場所 (2) でスペクトル

が出ているにも関わらずに場所 (3) においてスペクトルが出ていない。BGO プレート間の光伝搬について等方性がないと APD を装着する位置を定めることができない。そこで、より詳しく検証するために、場所 (2) に装着した APD(KA2403) のパルスハイトでのピーク (450~1200ch) の辺りの値を持つイベントだけを用いて作成したスペクトルを図 5.13 に示す。更に、1400~2400ch の辺りでもピークが見えているので同様に作成したスペクトルを図 5.14 に示す。なお、アルファ線の ^{241}Am は 1 つしかピークを持たないので、どちらかのピークは散乱したものである。

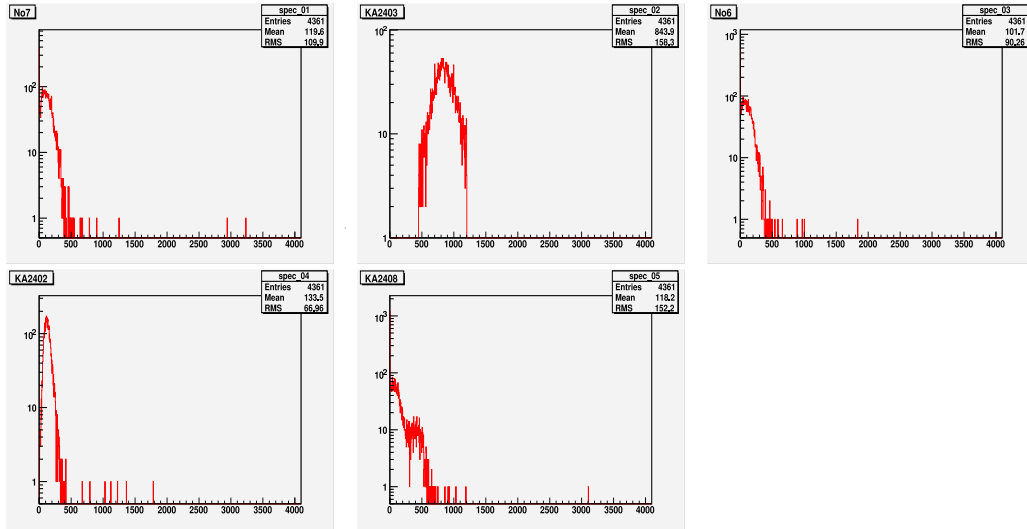


図 5.13: 左上の右から場所 (1)、(2)、(3)、左下の右から場所 (4)、(5) のスペクトル (範囲は 450~1200ch)

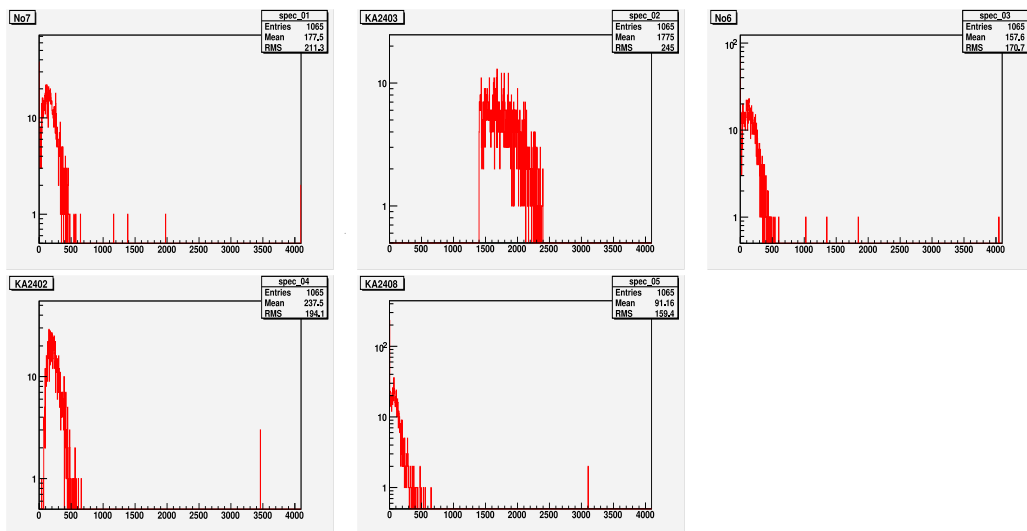


図 5.14: 左上の右から場所 (1)、(2)、(3)、左下の右から場所 (4)、(5) のスペクトル (範囲は 1400~2400ch)

よって、低チャンネル側のピークが議論すべきスペクトルである。この図より光は片方の側面にしか伝搬していないことが分かった。この論点をより理解するためにアルファ線の照射位置を変えて測定を行った。なお、照射場所を変える以外は同じ設定で行う。照射場所を図 5.15 に示し、測定されたスペクトルを spot(3-2) については図 5.16 に、spot(3-3) については図 5.17 に示す。この場合も、spot(3-1) の時と同様に値を補正した。更に5つ全てのパルス高さを足し合わせたそれぞれのスペクトルを示す。なお、以下の記述では照射場所は図中に示した番号を用いる。また、ピークが見えている spot(3-2) での場所 (2)、(5)、spot(3-3) での場所 (2)、加えてそれぞれの spot での5つ全てのパルス高さを足し合わせたスペクトルについてはピークチャンネルとエネルギー分解能を表 5.7 に示す。なお、spot(3-3) での場所 (5) についてはエネルギー分解能が算出できない程、低チャンネル側に出ていることが分かる。

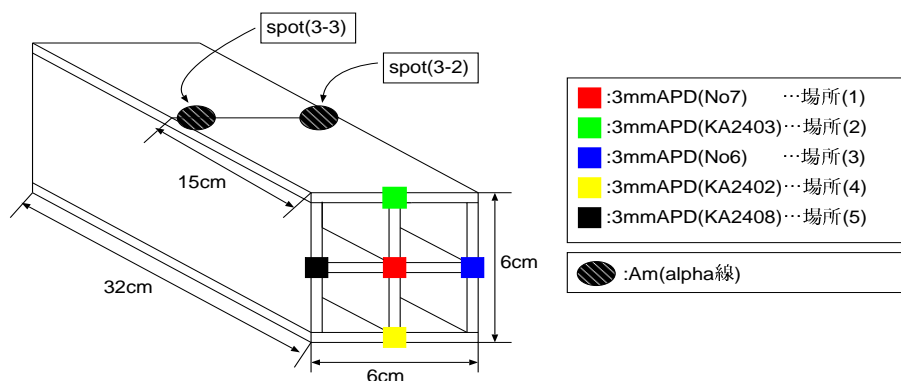


図 5.15: アルファ線の照射場所

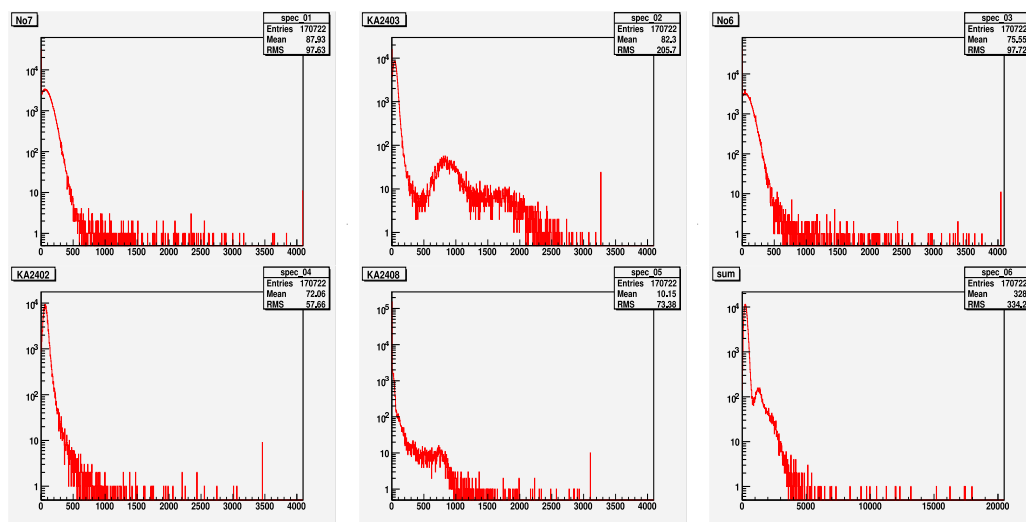


図 5.16: spot(3-2) : 左上から右へ場所 (1)、(2)、(3)、左下から右へ場所 (4)、(5)、5つ全てのパルス高さを足し合わせたスペクトル

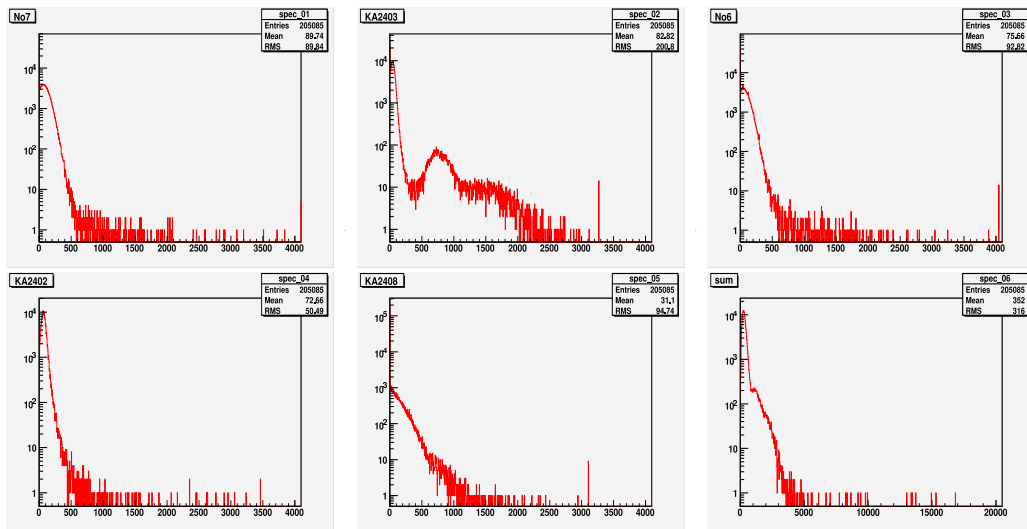


図 5.17: spot(3-3) : 左上から右へ場所 (1)、(2)、(3)、左下から右へ場所 (4)、(5)、5つ全てのパルス高さを足し合わせたスペクトル

照射場所	APD の装着場所	APD Serial No	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
spot(3-2)	(2)	KA2403	143.8	846.9	39.74
	(5)	KA4208	78.42	740.1	24.95
	全てのパルス高次の和			204.7	1268
spot(3-3)	(2)	KA2403	159.4	741.1	50.95
	全てのパルス高次の和			161.2	1209

表 5.7: それぞれの照射場所での場所 (2)、場所 (5)、5つ全てのパルス高次の和におけるスペクトルのピークチャンネルとエネルギー分解能

この測定結果から、HXD 用 BGO-well の上面に照射されたアルファ線は場所 (5) には伝搬しないことが分かった。原因としては BGO プレート間における光の損失や APD 接着の不備が挙げられる。よって、再現性の実験が必要となる。また、照射位置とは反対側の面にもアルファ線のピークは見られなかった。これはアルファ線の性質である非透過が影響しているものと考えられる。

ここで、HXD 用 BGO-well に 5 つの APD を装着して spot(3-1) にアルファ線を照射した際、場所 (2) に装着した APD(KA2403) が出力したスペクトルと、ピークが出ているパルス高次の和を足し合わせたスペクトルの理論上のエネルギー分解能と E_{th} の値を算出した。ここで、ピークが出ているパルス高次の和を足し合わせたスペクトルを図 5.18 に示す。更に、測定したスペクトルから算出したピークチャンネル

とエネルギー分解能を表 5.8 に示す。なお、足し合わせたスペクトルは場所 (2) と場所 (5) である。

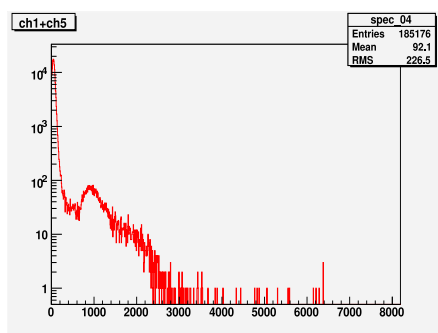


図 5.18: spot(3-1) での場所 (2) と場所 (5) のパルスハイト和のスペクトル

	$\sigma(\text{ch})$	Peak(ch)	分解能 (%)
場所 (2) と場所 (5) のパルスハイト和のスペクトル	198.2	860.6	54.24

表 5.8: 場所 (2) と場所 (5) のパルスハイト和のスペクトルのピークチャンネルとエネルギー分解能

ここでエネルギー分解能の理論値の計算は付録 B で行う。以下の記述では、場所 (2) に装着した APD(KA2403) が出力したスペクトルを case1、ピークが出ているパルスハイトを足し合わせたスペクトルを case2 とする。算出した理論上のエネルギー分解能と E_{th} を表 5.9 に示す。

case	エネルギー分解能 (%)		$E_{\text{th}}(\text{keV})$
	理論値	実験値	理論値
1	23.42	39.74	963.3
2	19.20	54.24	1113

表 5.9: エネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値

算出したエネルギー分解能はいずれも実験値よりも低い値であった。これは APD の接着に不備があったためであると考えられる。これより、場所 (3) に装着した APD によるスペクトルでアルファ線のピークが見られなかったのは APD の接着不備によるものであると分かる。

また、表 5.3 と表 5.9 を見比べるとパルス高さを足し合わせた case2 のエネルギー分解能が他の場合よりも良い結果となっている。これはこれまでの実験における結果と一致する。

まとめ

HXD 用 BGO-well と 3mm 角 APD を用いて様々な実験を行った結果、APD を 1 つ装着する場合の光量にたいして 5 つ装着する場合と 4 つ装着する場合の光量はほぼ等しくなった。これにより、APD を 6 つ以上付けるとノイズが増加して光量は APD 1 つの場合よりも少なくなると考えられる。現状では、HXD 用 BGO-well に 5 つの APD を装着して 5 つ全ての光量を足し合わせた場合、PMT を用いた HXD 用 BGO-well で測定された光量と比較すると、72%の光量が得られた。この結果より、装着する APD の位置を変えることで PMT 以上の光量を得ることが期待できる。

また BGO プレート間の光伝搬は照射面に対して、それぞれの側面で伝搬した面としなかった面に分かれた。伝搬しなかった面に対してはエネルギー分解能の理論値を算出することにより、APD の接着不備の可能性があることが分かった。よって、側面には照射面で発生した光の約 31%が伝搬すると考えられる。

第6章 まとめ

本研究では、光電子増倍管 (PMT) を用いて BGO サンプルである 5mm 角 BGO、簡易 BGO アクティブシールド、HXD 用 BGO-well の特性を調べた上で、アバランシェフォトダイオード (APD) を用いてそれぞれの BGO サンプルの光量比較を調べた。加えて、簡易 BGO アクティブシールドと HXD 用 BGO-well に関しては BGO プレートの間と面との間のシンチレーション光伝搬の有無を調べた。

本研究の結果として、第 3 章ではライトガイドをシンチレータである簡易 BGO アクティブシールドや HXD 用 BGO-well と PMT の間に挟むことで光量増加に成功した。しかし、APD で読み出す場合にはライトガイドは使用不可能である。よってライトガイドを用いずに測定した所、5mm 角 BGO と比較して簡易 BGO アクティブシールドは約 7 割、HXD 用 BGO-well に至っては約 2 割しか光を集められないことが分かった。

第 4 章では、検出器として APD を用いて 5mm 角 BGO と比較して簡易 BGO アクティブシールドの光量比較を行った結果、光を約 1 割しか集められないことが分かった。そこで、簡易 BGO アクティブシールドに装着する APD の数を増やすことでこのデメリットを補う。簡易 BGO アクティブシールドに APD を 1 つ装着した場合と比較して 4 つ装着した場合は全体として光量が約 1.2 倍になる。よって、APD の個数を 4 倍にしてもノイズの増加により期待されるほど光量は増加しない。しかし、同条件における PMT との比較により PMT の 84% の光量を得ることができ、今後の実験により PMT の場合において得られる光量以上を得ることが期待できる。BGO プレート間の光伝搬については照射面で発生したシンチレーション光の約 7 割が他の面に伝搬していることが分かった。

第 5 章では、簡易 BGO アクティブシールドに換えて HXD 用 BGO-well を用いて 5mm 角 BGO との光量比較を行った結果、約 0.3 割しか光を集めることができない。そこで、第 4 章と同様に APD の数を 5 つに増やした所、APD を 1 つ装着した場合と比較して約 1.2 倍と APD が 4 つの場合と等しくなり、APD を 5 つの増やしても効果がない。しかし、同条件における PMT との比較により PMT の 72% の光量を得ることができ、簡易 BGO アクティブシールドの場合と同様に今後の実験により PMT の場合において得られる光量以上を得ることが期待できる。BGO プレート間の光伝搬については APD の接着不備により正確な光量は判断できないが照射面以

外の面に伝搬していることが分かった。

今後の課題としては、HXD 用 BGO-well と 5 つの APD を用いて照射面で発生する光の何割が他の面へ伝搬しているのかを調べ、更に APD に入る光量を増加させるために照射位置と APD の接着位置を変化させてスペクトル測定を行い、PMT 以上の光量取得を目指す。

付録A §5.3における理論上のエネルギー分解能の算出

ここでは §5.3 における spot(1-1)、spot(1-5)、spot(2-2) のエネルギー分解能の理論値を算出する。まず、エネルギー分解能の理論式を下に記述する。

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = (\delta_{sc})^2 + 2.355^2 \frac{F}{N_{ph} Q Y} \cdot \frac{1}{E} + \left(\delta_{noise} \cdot \frac{1}{E_g} \cdot \frac{1}{N_{ph} Q G Y} \cdot \frac{1}{E}\right)^2$$
$$\delta_{noise} = \sqrt{\delta_{noise,I}^2 + \delta_{noise,C}^2}$$

次に、理論式中の場合に依らない定数記号について記述する。

$$\delta_{sc} = 4.7 \pm 0.5(\%)$$

$$F = 2$$

$$Q = 0.8$$

$$E_g = 0.00365(\text{keV})$$

$$E = 1200(\text{keV})(\text{アルファ線}^{241}\text{Am のエネルギー})$$

$$N_{ph} = 7.387(\text{個/keV})$$

更に、場合によって値が異なる記号について記述する。

Y:

ここで、Yを算出するためにHXD用BGO-wellと5mm角BGOを同条件で測定したスペクトルを図A.1、A.2に示す。更に、5mm角BGOに対するHXD用BGO-wellの光量比を示す。ここでの設定は低温、バイアス電圧355V、Shaper GainをMAXで測定してVMEのセットアップで行った。線源は ^{137}Cs の662keVで、APDは3mm角APD(No5)を用いた。ただし、5mm角BGOの場合ではShaper GainをMAXで測定を行うとピークが測定範囲外に出てしまうので、Shaper Gainを $\frac{1}{8}$ にして測定した。Yの算出には測定値を8倍した値を用いる。加えて、HXD用BGO-wellのスペクトルである図A.2はバックグラウンドを除去してエラーバーを付けたものである。

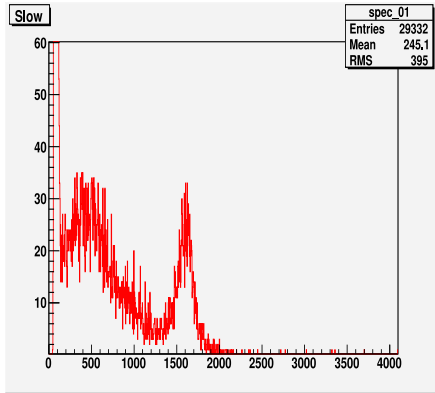


図 A.1: 5mm 角 BGO

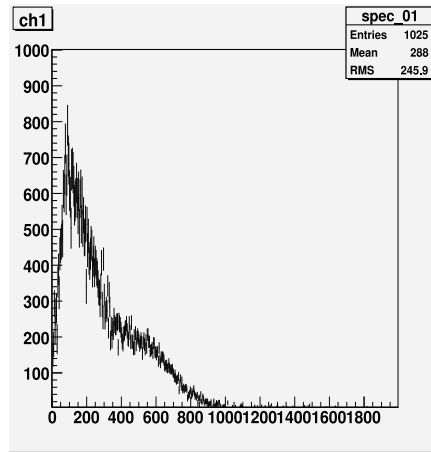


図 A.2: HXD 用 BGO-well

$$(5\text{mm 角 BGO}) : (\text{HXD 用 BGO - well}) = 12864 : 415.7 = 1 : 0.03231$$

これは spot(1-1) と spot(1-5) の場合である。この値と §4.2 での 3mm 角 APD のバイアス電圧 355V の APD Gain より 3mm 角 APD(No7) を用いた spot(2-2) についても算出できる。算出したものを下に記述する。

$$(5\text{mm 角 BGO}) : (\text{HXD 用 BGO - well}) = 12864 : 415.7 \times \frac{101}{81.77} = 1 : 0.03992$$

これらの結果を表 A.1 に示す。

spot	APD No	Y
1-1	5	0.03231
1-5	5	0.03231
2-2	7	0.03992

表 A.1: 各 spot での Y の値

G:

spot	APD No	ゲイン
1-1	5	81.77
1-5	5	81.77
2-2	7	101.0

表 A.2: バイアス電圧 355V での各 APD のゲイン

δ_{noise} :

- $\delta_{\text{noise,I}}$ について $\delta_{\text{noise,I}}$ の表式を下に記述する。

$$\delta_{\text{noise,I(keV)}} = 0.65 \times I_n \times \tau_s \times B$$

ここで τ_s は $2(\mu\text{s})$ に固定して、 I_n の値を表 A.3 に示す。なお、値は同研究室の白井氏の実験結果を用いる。

spot	APD No	$I_n(\text{nA})$
1-1	5	0.094553
1-5	5	0.094553
2-2	7	0.040085

表 A.3: 各 spot の I_n

B については下に記述する。

$$B = 1.70 \times 10^2 \quad \text{※定数}$$

- $\delta_{\text{noise,C}}$ について C_{in} の値と横軸を容量、縦軸をエネルギーで表示した容量勾配の近似曲線の式を用いる。この式は下に示してある。

$$\delta_{\text{noise,C}} = 0.021352 \times C_{\text{in}} + 1.04251$$

C_{in} の値は同研究室の白井氏の実験結果を用いる。その値を表 A.4 に示す。

spot	APD No	$C_{\text{in}}(\text{pF})$
1-1	5	29.4474
1-5	5	29.4474
2-2	7	29.8878

表 A.4: 各 spot の C_{in}

よって、各 spot の $\delta_{\text{noise,I}}$ 、 $\delta_{\text{noise,C}}$ 、 δ_{noise} の値を表 A.5 に示す。

spot	$\delta_{\text{noise,I}}(\text{keV})$	$\delta_{\text{noise,C}}(\text{keV})$	$\delta_{\text{noise}}(\text{keV})$
1-1	20.90	1.671	20.97
1-5	20.90	1.671	20.97
2-2	8.859	1.681	9.017

表 A.5: 各 spot での δ_{noise} の値

この定義により理論上のエネルギー分解能と E_{th} を算出できる。実際に算出した値を表 A.6 に示す。

spot	エネルギー分解能 (%)		E_{th} (keV)
	理論値	実験値	理論値
1-1	38.03	43.34	1526
1-5	38.03	45.36	1526
2-2	22.10	49.05	456.6

表 A.6: エネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値

付録B §5.4における理論上のエネルギー分解能の算出

ここでは§5.4における case1、case2 のエネルギー分解能の理論値を算出する。まず、エネルギー分解能の理論式を下に記述する。

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = (\delta_{sc})^2 + 2.355^2 \frac{F}{N_{ph} Q Y} \cdot \frac{1}{E} + \left(\delta_{noise} \cdot \frac{1}{E_g} \cdot \frac{1}{N_{ph} Q G Y} \cdot \frac{1}{E}\right)^2$$
$$\delta_{noise} = \sqrt{\delta_{noise,I}^2 + \delta_{noise,C}^2}$$

ただし、パルスハイトを足し合わせたスペクトルについては部分的に変換が必要である。下にエネルギー分解能の理論式と変換の必要な部分を示す。

$$\delta_{noise} = \sqrt{\delta_{noise,I}^2 + \delta_{noise,C}^2} \implies \delta_{noise} = \sqrt{2(\delta_{noise,I}^2 + \delta_{noise,C}^2)}$$
$$Y \text{ と } G \implies \frac{1}{2} \sum Y_i G_i$$

ここで*i*は足し合わせるパルスハイトの数なので、*i*=2となる。

次に、理論式中の場合に依らない定数記号について記述する。

$$\delta_{sc} = 4.7 \pm 0.5(\%)$$

$$F = 2$$

$$Q = 0.8$$

$$E_g = 0.00365(\text{keV})$$

$$E = 1200(\text{keV})(\text{アルファ線}^{241}\text{Amのエネルギー})$$

$$N_{ph} = 7.387(\text{個/keV})$$

更に、場合によって値が異なる記号について記述する。

Y :

- (case1)

§A においての 5mm 角 BGO と HXD 用 BGO-well の光量比と、§4.2 での 3mm 角 APD(KA2403) のバイアス電圧 355V の APDgain より APD(KA2403) を 1 つ装着した場合での 5mm 角 BGO との光量比が分かる。更に、表 5.1 と表 5.6 を用いて、同条件での 1 つの APD を装着した場合の光量 (1APD) に対する 5 つ装着した上での同じ場所に同じ APD を装着した場合での光量 (5APD - 1) の比が分かる。以下に算出する。

$$415.7 \times \frac{127.1}{81.77} : 12864 \implies 646.1 : 12864 (\text{APD を 1 つ装着した場合})$$

$$(1\text{APD}) : (5\text{APD} - 1) = 1077 : 835.6$$

$$(5\text{mm 角 BGO}) : (5\text{APD} - 1) = 12864 : 646.1 \times \frac{835.6}{1077} = 1 : 0.03897$$

よって、Y = 0.03897 である。

- (case2)

case1 と同様に算出する。ただし、(1APD) に対するピークが出ているパルスハイトを足し合わせた場合の光量 (5APD - 2) の比が case1 と異なるので下に記述する。

$$(1\text{APD}) : (5\text{APD} - 2) = 1077 : 860.6$$

よって、場所 (2) に装着した APD(KA2403) では

$$(5\text{mm 角 BGO}) : (5\text{APD} - 2) = 12864 : 646.1 \times \frac{860.6}{1077} = 1 : 0.04014$$

また、場所 (5) に装着した APD(KA2408) では

$$415.7 \times \frac{134.8}{81.77} : 12864 \implies 685.3 : 12864 (\text{APD を 1 つ装着した場合})$$

$$(5\text{mm 角 BGO}) : (5\text{APD} - 2) = 12864 : 685.3 \times \frac{860.6}{1077} = 1 : 0.05034$$

これらの結果を表 B.1 に示す。

場所	APD No	Y
(2)	KA2403	0.04014
(5)	KA2408	0.05043

表 B.1: 各場所での Y の値

G :

	場所	APD No	ゲイン
case1	(2)	KA2403	127.1
case2	(2)	KA2403	127.1
	(5)	KA2408	134.8

表 B.2: バイアス電圧 355V での各 APD のゲイン

δ_{noise} :

- $\delta_{\text{noise,I}}$ について $\delta_{\text{noise,I}}$ の表式を下に記述する。

$$\delta_{\text{noise,I(keV)}} = 0.65 \times I_n \times \tau_s \times B$$

ここで τ_s は $2(\mu\text{s})$ に固定して、 I_n の値を表 B.3 に示す。なお、同研究室の白井氏の実験結果から最もゲインに近い 3mm 角 APD(No6) の値を用いる。

	$I_n(\text{nA})$
case1	0.0644
case2	0.0644

表 B.3: 各 case の I_n

- $\delta_{\text{noise,C}}$ について C_{in} の値と横軸を容量、縦軸をエネルギーで表示した容量勾配の近似曲線の式を用いる。この式は下に示してある。

$$\delta_{\text{noise,C}} = 0.021352 \times C_{\text{in}} + 1.04251$$

C_{in} の値は同研究室の白井氏の実験結果から最もゲインに近い 3mm 角 APD(No6) の値を用いる。その値を表 B.4 に示す。

	$C_{\text{in}}(\text{pF})$
case1	29.5648
case2	29.5648

表 B.4: 各 case の C_{in}

よって、各 case の δ_{noise} 、 $\delta_{\text{noise,I}}$ 、 $\delta_{\text{noise,C}}$ の値を表 B.5 に示す。

case	$\delta_{\text{noise,I}}$ (keV)	$\delta_{\text{noise,C}}$ (keV)	δ_{noise} (keV)
1	14.23	1.674	14.33
2	14.23	1.674	20.26

表 B.5: 各 case での δ_{noise} の値

この定義により理論上のエネルギー分解能と E_{th} を算出できる。実際に算出した値を表 B.6 に示す。

case	エネルギー分解能 (%)		E_{th} (keV)
	理論値	実験値	理論値
1	23.42	39.74	963.3
2	19.20	54.24	1113

表 B.6: エネルギー分解能の理論値と実験値と E_{th} の理論値

謝辞

本研究を行うにあたり、お忙しい中御指導頂きました大杉先生、深沢先生には心から深く感謝しております。深沢先生には半導体検出器の基礎から数多くの事を教えて頂きました。また、セミナーやコロキウムで自分の分野以外の先端研究を学ぶ機会を作って下さってありがとうございました。

研究室の浅野さんにはアバランシェフォトダイオードについて様々なアドバイスを頂き、また高橋さんには回路のことで詳しく教えて頂き深く感謝いたします。同じ大部屋のみなさんには時に励まし、時に注意をして下さって研究以外の面においても御世話になり感謝しています。特に4年生の田中くんには研究においての問題点の解決に際して様々な疑問に答えて頂き感謝しています。研究も含めて様々な楽しいイベントに参加でき、高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 中本 達也、高阻止能結晶シンチレータとフォトダイオードを用いたガンマ線検出器の開発、広島大学 卒業論文、2001
- [2] 中本 達也、多層シリコンストリップとBGO・フォトダイオードを用いた宇宙 γ 線コンプトンカメラの開発、広島大学 修士論文、2003
- [3] 松浦 大介、APD+BGO プレートを用いた Anti 検出器の検証、広島大学 卒業論文、2003
- [4] 浅野 哲也、BGO と APD を用いた宇宙 γ 線検出器アクティブシールドの研究、広島大学 卒業論文、2004
- [5] 次期 X 線天文衛星計画ワーキンググループ、NeXT 計画提案書