# BGO井戸型アクティブシールドとAPD による宇宙軟ガンマ線検出器の研究

広島大学 理学研究科 物理科学専攻

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

M066529

竹本 健太

主查:大杉節 副查:小嶌康史

2008年2月8日

10keV以上の硬X線・軟ガンマ線領域における非熱的放射はその観測が未だに不十 分であり、この領域を観測することは今後の宇宙物理学・天文学の発展において非 常に重要な課題である。そこで今現在、非熱的放射を観測ターゲットとした次期X 線天文衛星 NeXT 計画が進められ、2013年に打ち上げ、運用予定である。我々のグ ループでは NeXT 計画の一環として硬X線・軟ガンマ線観測を目的とした軟ガンマ 線検出器 SGD の開発を行っている。SGD は半導体多層コンプトンカメラを BGO 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の実現を目指す。BGO シールドの光検出としてはアバランシェフォトダイオード (APD)を使用する予定で ある。しかし、BGO と APD を組み合わせた検出器の性能を正確に見積もることが 未だにできていない。更に、すでにアンチコインシデンスシールドとして十分に役 割を果たしている HXD と異なる点として、HXD で採用されている PMT と比較し て小面積である APD への代用、および現在検討されている SGD 構造で採用されて いる BGO 形状の複雑化が挙げられる。SGD のシールド部において HXD 以上の検 出能力を達成するためにはこれらの変更による検出能力への影響を考察する必要が ある。これらの課題をうけて、本研究は以下に示す2つの内容で構成されている。

その一つは検出器性能を決定する重要な要因であるエネルギー threshold とエネ ルギー分解能の評価式を導出することである。これらの値は BGO の形状や APD の 電気回路系ノイズ、測定温度などの複数の要因に依存し、評価式から見積もる理論 値と実際の実験値が合致するかどうか検証する必要がある。そこで、様々な形状の BGO と APD を組み合わせた検出器において、これら複数の要因を導出することで 評価式から実験値を見積もることを本研究により可能とした。これらの評価式は宇 宙環境における検出器性能を打ち上げ以前に予測する手段として有用である。

次に、現在検討されている SGD で採用されている BGO アクティブシールドを簡 易、縮小化したものと APD を用いて取得光量の評価を行い、更に現在最も広く使わ れている PMT の取得光量と比較することで APD の有用性を検証した。この結果よ り、BGO の形状や規模が APD の取得光量にどのような影響を及ぼすかを示すこと ができた。更に現時点における SGD の構造上、APD の取得光量またはエネルギー threshold を改善する必要性がある BGO の規模、および形状を選定する基準となる BGO 形状-検出器性能の関係式を導出することができた。これらの結果より、SGD のより詳細な構造デザイン決定の指針を得た。

# 目 次

第1章	序論	8
第2章	硬 X 線・軟ガンマ線検出に用いる光検出器と結晶シンチレータ	12
2.1	シンチレータ	12
2.2	光検出器...................................	15
	2.2.1 光電子増倍管 (PMT)	15
	2.2.2 半導体検出器	16
	2.2.3 アバランシェフォトダイオード (APD)	17
2.3	APD の性能を決定するパラメータ	19
	2.3.1 暗電流	19
	2.3.2 端子間容量	20
	2.3.3 増幅率 (ゲイン)	21
	2.3.4 増幅率の揺らぎ (過剰雑音係数)	23
2.4	APD のノイズ特性	24
2.5	結晶シンチレータと半導体検出器のエネルギー分解能とエネルギー	
	threshold	27
2.6	本研究で使用した APD と BGO	30
第3章	エネルギー threshold、分解能の評価式の検証	<b>34</b>
3.1	光読み出し効率Yの導出.............................	34
	3.1.1 Y <sub>1</sub> の導出	35
	3.1.2 Y <sub>2</sub> の導出	36
3.2	APD と PMT の一次電子数比率 YQ の比較	45
	3.2.1 実験セットアップ	45
	3.2.2 PMT+BGO ブロック	47
	3.2.3 PMT+井戸型 BGO アクティブシールド	49
	3.2.4 PMT+大 BGO プレート	51
3.3	APD ノイズの評価	53
	3.3.1 5×5mm <sup>2</sup> APD における検証	55
	3.3.2 10×10mm <sup>2</sup> PD における検証	60

第4章	NeXT 衛星搭載予定 BGO アクティブシールドの形状を想定した光量 測定	62
4.1	BGOの大きさ、形状に依る取得光量、およびエネルギー threshold、	
	分解能の検証	63
4.2	APDとPMTの一次電子数比率、およびエネルギー threshold、エネ	
	ルギー分解能の比較	69
第5章	結論	75

# 表目次

1.1	SGD への要求性能][3,17]	10
2.1	主な無機、有機シンチレータの特性................	14
3.1	実験セットアップと測定条件	35
3.2	実験セットアップ.................................	37
3.3	VME によるデータ処理回路で用いたモジュールの詳細	39
3.4	5mm 立方 BGO と BGO ブロックの光量比較における測定条件	41
3.5	BGO <b>ブロックに対する各</b> APD <b>の光集収率</b> Y <sub>2</sub>	42
3.6	5mm 立方 BGO と2 種類の BGO プレート間での光量比較における測	
	定条件	42
3.7	5mm 立方 BGO と井戸型 BGO アクティブシールドの光量比較におけ	
	る測定条件	44
3.8	PMT と APD の特性比較	45
3.9	実験セットアップ...............................	46
3.10	5mm 立方 BGO と BGO ブロックの光量比較における測定条件	47
3.11	BGO ブロックを用いた場合の PMT と各 APD の一次電子数比 (YQ)、	
	エネルギー threshold(Eth)、エネルギー分解能 ( $\Delta E$ )の比較	49
3.12	5mm 立方 BGO と井戸型 BGO アクティブシールドの光量比較におけ	
	る測定条件	49
3.13	井戸型 BGO アクティブシールドを用いた場合の PMT と 3×3mm <sup>2</sup> APD×	
	$5$ の一次電子数比 (YQ)、エネルギー分解能 ( $\Delta E$ )の比較 $\ldots$	51
3.14	5mm 立方 BGO と大 BGO プレートの光量比較における測定条件	51
3.15	大 BGO プレートを用いた場合の PMT と 3 × 3mm <sup>2</sup> APD の一次電子	
	数比 (YQ)、エネルギー分解能 (ΔE) の比較	52
3.16	実験セットアップと測定条件	55
3.17	実験セットアップと測定条件	58
3.18	実験セットアップと測定条件	61
4.1	実験セットアップと測定条件	64

4.2	5mm 立方 BGO、BGONo.1 ~ 7+3×3mm <sup>2</sup> APD の組合せでの 5mm 立	
	方 BGO との光量比 (Y <sub>2</sub> )	66
4.3	$BGONo.1 \sim 7+3 \times 3 mm^2 APD$ の組合せにおける各パラメータのズレ.	69
4.4	実験セットアップと測定条件	70
4.5	10×10mm <sup>2</sup> APD <b>の各パラメータ</b>	71
4.6	$10  imes 10 \mathrm{mm^2APD}$ を使用した際に想定されるエネルギー $\mathrm{threshold}(\mathrm{E_{th}})$	
	とエネルギー分解能 $(\Delta E)$	71
4.7	BGONo.1~7を用いた場合のPMTとの一次電子数比(YQ比)、エネ	
	ルギー $threshold(E_{th})$ 、エネルギー分解能 ( $\Delta E$ ) の比較 $\ldots$	73



1.1	SGD1 <b>ユニットの概念図</b> [1]	9
1.2	SGD25 <b>ユニットの概念図</b> [2]	9
2.1	活性化された無機結晶シンチレータのエネルギー帯構造[4]	13
2.2	各シンチレータの光出力の温度依存性 (PMT を用いた測定) [5]	14
2.3	光電子増倍管の基本構造	15
2.4	半導体検出器による放射線検出の概略図	17
2.5	検出した放射線の波長における APD の量子効率 (本研究では S8664-	
	55/-1010 を使用)[7]	19
2.6	reverse APD の内部構造と電場勾配 [8]	19
2.7	ゲインピーキング現象 (上トレースが異常時)[11]	20
2.8	リンギング現象の例[11]	20
2.9	印加電圧に対する APD の端子間容量 (本研究では S8664-55/-1010 を	
	使用)[7])	21
2.10	APD <b>構造の概略図</b>	22
2.11	APD の内部増幅に対する過剰雑音係数 F(APD タイプ:S8664-55(受光	
	面積が 5mm 平方) の場合)[12]	24
2.12	(a)+20 と-20 での APD の内部増幅に対する過剰雑音係数 F、(b)	
	測定温度に対する過剰雑音係数 F( :印加電圧を 150V に固定、 :内	
	部増幅率を 20 に固定、APD タイプ:SPL 2407)[13]	24
2.13	半導体検出器を用いた放射線計測回路の概念図	25
2.14	内部増幅のない半導体検出器の場合の等価雑音回路	25
2.15	内部増幅がある半導体検出器 (APD) の場合の等価雑音回路	26
2.16	異なる分解能を持つ検出器の応答関数の例	28
2.17	<sup>137</sup> Cs を照射した場合のスペクトル	28
2.18	エネルギー threshold(400 チャンネル付近) の確認例	30
2.19	本研究で用いた $46  ext{mm} \phi$ の受光面を持つ $ ext{PMT}$	31
2.20	本研究で用いた $10 \times 10 \text{mm}^2$ の受光面を持つ PD	31
2.21	左から $3 \times 3$ mm <sup>2</sup> 、 $5 \times 5$ mm <sup>2</sup> 、 $10 \times 10$ mm <sup>2</sup> 、 $18 \times 18$ mm <sup>2</sup> APD	32
2.22	ゴアテックス反射材で巻かれた BGO ブロック	32

2.23	ゴアテックス反射材で巻かれた井戸型 BGO アクティブシールド ...	32
2.24	ゴアテックス反射材で巻かれた大 BGO プレートと 3mm 角 APD	32
2.25	現在検討されている ${ m SGD}$ の構造 (外側の茶色部分: ${ m CFRP}$ 構造体、中	
	心の赤茶色部分:ファインコリメータ、青部分:BGO 結晶パッケージ、	
	グレー部分:Si-Pad stack、緑部分:CdTe-Pad)	33
2.26	本研究で用いた 7 種類の SGD 評価用 BGO	33
2.27	上段:SGDを構成する BGO の形状、下段:上段の形状を簡易化したも	
	の (スケールは mm)	33
0.1		20
3.1	$Y_1$ の基準となる $10 \times 10$ mm <sup>2</sup> PD+5mm 立方 BGO のスペットル	36
3.2	$3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD} + 5 \text{mm} \overline{\Box} \overline{D} BGO \mathcal{O} \overline{A}^{\wedge} \mathcal{O} F \mathcal{V}$	36
3.3	$5 \times 5 \text{mm}^2 \text{APD} + 5 \text{mm} \overline{\boldsymbol{\Box}} \overline{\boldsymbol{D}} B G O \boldsymbol{O} \boldsymbol{\mathcal{A}} \boldsymbol{\mathcal{A}} \boldsymbol{\mathcal{P}} \boldsymbol{\mathcal{P}} \boldsymbol{\mathcal{P}} \dots $	36
3.4		APD
	の 装着図、 大 BGO フレートと3×3mm <sup>2</sup> APD の 装着図、 开 P型 BGO	~ -
	アクティフシールドと5つの3×3mm <sup>2</sup> APDの装着図	37
3.5	5ch 用の VME による信号処理回路のフロック図	39
3.6		39
3.7		39
3.8	PMCA によるデータ処理回路のブロック図 (APD 使用時)	40
3.9	$10 \times 10 \text{mm}^2 \text{APD} + 5 \text{mm}  \hat{\mathbf{D}} \hat{\mathbf{D}}  BGO(\text{BGO}  \mathcal{I} \mathbf{D}  \mathbf{v}  \mathbf{D}  \mathbf{E}  \mathbf{O}  E  \mathsf$	
	$1)[16] \ldots \ldots$	41
3.10	$10 \times 10 \text{mm}^2 \text{APD} + \text{BGO}  \mathcal{D}  \mathcal{D}  \mathcal{D}  \mathcal{D}  \mathcal{D}  [16]  \ldots  \ldots  \ldots  \ldots  \ldots  \ldots  \ldots  \ldots  \ldots  $	41
3.11	$3 \times 3$ mm <sup>2</sup> APD+5mm 立方 BGO(BGO ブレートとの比較用:Y <sub>2</sub> =1)	43
3.12	$3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD} + \text{小} BGO  プレート$	43
3.13	$3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD} + \textbf{BGO}  \textbf{J} \boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{F}$	43
3.14		
	3 × 3mm <sup>2</sup> APD+5mm 立方 BGO(井戸型 BGO アクティブシールドと	
	の比較用: $Y_2=1$ )	44
3.15	3 × 3mm <sup>2</sup> APD5 個+井戸型 BGO アクティブシールド	44
3.16	PMCA によるデータ処理回路のブロック図 (PMT 使用時)	46
3.17	VME によるデータ処理回路のブロック図 (PMT 使用時)	47
3.18	PMT+5mm 立方 BGO(BGO ブロックとの比較用:Y=1)[16]	48
3.19	PMT+BGO ブロック [16]	48
3.20	PMT+5mm 立方 BGO(井戸型 BGO アクティブシールドとの比較用:Y=1)	50
3.21	PMT+井戸型 BGO アクティブシールド	50
3.22	PMT+5mm 立方 BGO(大 BGO プレートとの比較用:Y=1)	52
3.23	PMT+ <b>大</b> BGO <b>プレート</b>	52

3.2	24	井戸型 BGO アクティブシールド、ライトガイド、PMT の装着図	53
3.2	25	大 BGO <b>プレート、ライトガイド、</b> PMT <b>の装着図</b>	53
3.2	26	パルサーからの信号を示したスペクトル図 (横軸:チャンネル、縦軸:	
		カウント数)	54
3.2	27	$5 \times 5 mm^2 APD$ における各温度での $I_n(nA)$ 、 $APD$ ゲイン	56
3.2	28	$5 imes 5 \mathrm{mm}^2\mathrm{APD}$ における $\mathrm{APD}$ ノイズの実験値と理論値の比較 (横軸:	
		暗電流値 $I_n(\propto$ 測定温度)、縦軸:APD ノイズ値 $)$	56
3.2	29	$5 imes 5 \mathrm{mm}^2\mathrm{APD}$ における $\mathrm{APD}$ ノイズの実験値と理論値の比較 (横軸:	
		暗電流値 $I_n(\propto$ 測定温度)、縦軸:APD ノイズ値 $)$	57
3.3	30	$5  imes 5  ext{mm}^2  ext{APD}$ における各バイアス電圧での $I_n(nA)$ 、APD ゲイン	58
3.3	31	$5  imes 5  ext{mm}^2  ext{APD}$ における各バイアス電圧での端子間容量 $\dots \dots \dots$	59
3.3	32	$5 imes 5 \mathrm{mm}^2\mathrm{APD}$ における $\mathrm{APD}$ ノイズの実験値と理論値の比較 (横軸:	
		暗電流値 $I_n(\propto$ バイアス電圧)、縦軸:APD ノイズ値 $)$	59
3.3	33	$5 imes 5 \mathrm{mm}^2\mathrm{APD}$ における $\mathrm{APD}$ ノイズの実験値と理論値の比較 (横軸:	
		暗電流値 $I_n(\propto$ バイアス電圧)、縦軸:APD ノイズ値)	60
4.	1	今回の検証で使用した BGO の形状、APD の装着位置、放射線の照	
	Ł		63
4.:	2	$5\text{mm}$ 立方 BGO、 BGONo.1 ~ 7+3 × $3\text{mm}^2$ APD の組合せで $^{137}$ Cs の	00
		662keVを照射した際のスペクトル(横軸:チャンネル、縦軸:カウント数)	65
4.:	3	各光量比に対するエネルギー threshold[keV](左軸)、エネルギー分解	
		能 [keV](右軸)	66
4.4	4	APD の受光面積に対する BGO の接着面積の割合と APD の取得光量	
		の比較	66
4.5	5	<sup>137</sup> Cs の 662keV ピークを比較したスペクトル (横軸:チャンネル、縦	
		<b>軸</b> :カウント数)	68
4.6	6	$BGONo.1 \sim 7+3 \times 3 mm^2 APD$ の組合せでのピークチャンネル比較	69
4.'	7	BGONo.1 ~ 7+3 × 3mm <sup>2</sup> APD <b>の組合せでのエネルギー</b> threshold、分	
		解能比較	69
4.8	8	5mm 立方 BGO、BGONo.1 ~ 7+PMT の組合せで <sup>137</sup> Cs の 662keV を	
		照射した際のスペクトル(横軸:チャンネル、縦軸:カウント数)	72
4.9	9	、BGO No.1~7をPMT、および APD と組み合わせた場合の Y 値 (左	
		上図)、YQ 比値 (右上図)、エネルギー threshold 値 (左下図)、エネル	
		<b>ギー分解能値</b> (keV)(横軸:BGO の種類)	74

## 第1章 序論

宇宙空間では電波からガンマ線まで様々な波長領域での観測が可能である。その 中でもX線・ガンマ線は電磁スペクトル中、最もエネルギーの高い部分に存在する ため宇宙における最もエネルギーの高い現象の情報を得る事ができる。更に、X線・ ガンマ線は電磁波であるため電荷を持たず、宇宙を進行している際にその進路が磁 場に干渉されて曲げられることはほぼない。よって、X線・ガンマ線観測によりそ の放射線の到来方向を特定することが可能となる。X線・ガンマ線の広い波長域に 信号を出していると考えられる高エネルギー天体として、銀河団、ブラックホール、 超新星爆発・残骸、クェーサーやガンマ線バーストなどが挙げられ、それらの多くは 未だ詳細な事が分かっていない。これらの未知天体を解明するために硬X線・軟ガ ンマ線の観測を目的とした検出器の開発、及びその性能の向上が必要不可欠である。

しかし、地上では大気の影響によりガンマ線を直接観測することは困難である。 そこで、今現在、大気の影響を受けない大気上層部や大気圏外で観測を行うために ガンマ線検出器を人工衛星に搭載して観測するという手段を用いている。ガンマ線 を宇宙で観測するためには、物質に対して透過力が強いというガンマ線の特性を考 慮しなければならない。このため、高い阻止能を持った検出器が必要となりその結 果、機器が重くなり深刻なバックグラウンドの問題も出てくる。更に検出器の小型 化、低重量、耐久性の向上などの地上の場合と比較して厳しい条件が付随してくる。

アインシュタイン衛星から続く、あすか、Chandra、NewtonといったX線観測衛 星により、主に10keV以下の軟X線を集光結合するX線望遠鏡によって観測されて きた。しかし、この10keV以下のエネルギー領域では熱的放射が支配的なために非 熱的放射は観測されない。よって、宇宙の高エネルギー現象が現れる硬X線領域に おける観測はまだ少ない。この硬X線領域で非熱的エネルギー源を観測することは 今後の宇宙物理学、天文学において重大な課題である。そこで今現在、宇宙航空研究 開発機構・宇宙科学研究所 (Japan Aerospace eXploration Agency/Institute of Space and Astronautical Science:JAXA/ISAS) を中心とした次期X線天文衛星計画ワーキ ンググループにより、次期X線天文衛星 NeXT(New X-ray Telescope) 計画が進めら れている。NeXT 衛星の第一の目的は (1) 宇宙における非熱的放射天体を数多く発見 し、非熱的宇宙の確立を行い、(2) 静的で平衡状態の熱的宇宙から如何なる自発的プ ロセスを経て非平衡の非熱的宇宙が創られるのか、その物理過程を明らかにするこ とである。我々のグループでは、このNeXT計画の一環として、硬X線・軟ガンマ 線の観測を目的とした軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector:SGD)の開発を 行っている。SGDはBGOシンチレータを用いた井戸型のアクティブシールドの底に 高いエネルギー分解能を持つ両面シリコンストリップ検出器 (Double-sided Silicon. Strip Detector:DSSD) とガンマ線の高い感度を持つテルル化カドミウム (CdTe)半導 体ピクセル検出器から構成される半導体多層コンプトンカメラを置いた構造になっ ている (図 1.1、1.2)。





図 1.1: SGD1 ユニットの概念図 [1]

図 1.2: SGD25 ユニットの概念図 [2]

ここで、SGD の要求性能を表1.1 に示す。SGD の構成要素であるコンプトンカメ ラは一般に広い視野をカバーすることが可能で、数回にわたって反応した位置とエ ネルギーを取得し、コンプトン運動学を用いることにより入射方向を天空上で円環 として定めることができる。さらに、複数のイベントから定義されたそれぞれの円 環の交点を重ね合わせることにより天体の位置を割り出す方法が取られてきた。し かし、この方法では多くの円環が混じり合い、大量のバックグラウンドが混入して しまう。そこで、SGD ではバックグラウンド除去のために、図1.1 で示されるよう に視野をあらかじめアクティブシールドで狭く絞った上で、円環がこの狭い視野と 交点を持たない場合は全てバックグラウンドとして除去するという方法が取られて いる。これにより、すざく衛星に搭載された硬X 線検出器 (HXD) の場合に最後まで 残った放射化バックグラウンドを優れた効率で落とすことが可能で、これまでにな い低バックグラウンドを実現できる。ここで、SGDの要求性能を表 1.1 に示す。そ のため BGO アクティブシールド部において、Cosmic X-ray Background(CXB)の 入射を制限するためにその開口角を 500keV のエネルギーにおいて 4 度四方に狭め る必要がある [17]。また、NeXT の軌道上では低エネルギーの陽子が多いことから 1cm 程度の厚みを持つ BGO シンチレータを用いて、飛程が厚みに満たない粒子を全 て止めることができる。更に高バックグラウンド領域である南太平洋異常帯 (South Atlantic Anomaly:SAA) 中の高エネルギー陽子に起因して素子内で生成された放射 性同位体からのガンマ線を効率良く除去するためには、特に $\beta^+$ 崩壊において必ず放 出される 511keV のガンマ線を阻止するための厚みが必要である。BGO において、 2cm の厚みであれば 511keV のガンマ線を 90%程度検出でき、必要十分な効果を持 つを期待される。

更に BGO アクティブシールド部には Anti Coincidence Detector(ACD) としての 役割も合わせ持つ。ACD は莫大な量の荷電粒子やコンプトン散乱した X 線、ガン マ線バックグラウンドを除去するためにある。SGD は 10-300keV に優れた感度を持 つことが要求されており、その領域では天体からの信号と比較してバックグラウン ドが膨大なため、これらをいかに効率良く除去するかが課題となってくる。簡単な 仕組みとしては主検出部でトリガーが発生した時刻に ACD でもヒットしていれば、 バックグラウンドとみなして除去する方法をとっている。この役割を担う BGO ア クティブシールドの要求性能として、数 10keV 程度の低エネルギーの信号に対して Anti Coincidence 信号を出す必要があり、エネルギー threshold 値の低減が求められ ている。本研究ではこれらの要求性能の中でも検出性能を決定する重要な要因であ るシールド部のエネルギー threshold、およびエネルギー分解能を考察していく(詳 細は §2.5 に記述)。

	Requirement
エネルギー帯域	10-300keV
エネルギー分解能	2-3keV (FWHM,40keV)
有効面積	100cm <sup>2</sup> <b>以上</b> (光電吸収,10-100keV)
検出器視野	0.6×0.6 度以下 (<100keV)
検出器 BGD	$5 \times 10^{-7} cts s^{-1} keV^{-1} 以下 (~100 keV)$
	$2 \times 10^{-7} cts s^{-1} keV^{-1}$ 以下 (~500keV)

表 1.1: SGD への要求性能][3,17]

今現在、BGO シンチレータを用いたアクティブシールドの光検出部としてアバ ランシェフォトダイオード (Avalanche PhotoDiode:APD) を使用する予定である。 しかし、いまだ BGO と APD を組み合わせた系での検出器性能を正確に見積もる ことができていない。更に、すでにアンチコインシデンスシールドとして十分に役 割を果たしている HXD と異なる点として、HXD で採用されている光電子増倍管 (Photomultiplier:PMT)と比較して小面積である APD への代用、BGO 形状の複雑 化が挙げられる。これらの変更をした上で、HXD と同等、あるいはそれ以上の検出 性能を持たせることが SGD に求められている。(エネルギー threshold~50keV)

そこで、本研究では様々な使用状況における BGO+APD の性能を示す値である エネルギー threshold とエネルギー分解能についての評価式を導出する。更に、現在 検討されている SGD の概念図における BGO アクティブシールドと類似した形状の BGO に対して、APD の取得光量の評価を検証する。この研究結果によって、検出 器を宇宙に打ち上げた際の性能を推定することができると期待され、検出器性能を より向上させるための検出器デザイン決定に必要不可欠な成果となる。

## 第2章 硬X線・軟ガンマ線検出に用い る光検出器と結晶シンチレータ

表1.1の要求性能を達成するためのSGDアクティブシールド部の役割として、前 章で述べたアクティブシールドとしての機能である視野を絞ることや、SAA中のプ ロトン削減が挙げられる。そのため、高い阻止能を持つシンチレータが必要となり、 更に宇宙で使用するため、SGD 自体をコンパクトかつ頑丈にしなければならない。

それらの点を考慮した上で、今回採用した吸収体のシンチレータであるBGOと そのシンチレーション光を読み出す半導体検出器であるAPDについて記述する。

### 2.1 シンチレータ

シンチレータ中で発生するシンチレーション光を検出し、電気信号に変換するこ とによって電離性放射線を検出する手段は古くから行われてきた放射線測定法の一 つである。今日でも、シンチレーション過程は各種放射線の検出とスペクトル測定 を行うためのもっとも有用な方法として広く利用されている。本研究における用途 であるガンマ線検出に適したシンチレータの特徴として、(1)阻止能が高いこと、(2) 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、(3)蛍光に対する透明 度が高いこと、(4)蛍光の減衰時間が高いこと、(5)蛍光の波長分布が光検出器の分 光度特性に適合していることが挙げられる。これに加えて、人工衛星搭載用検出器 という点から、コンパクト性や頑丈なシンチレータが要求される。

現在、主に用いられているシンチレータとして、有機と無機のシンチレータがあ る。有機シンチレータにはアントラセン、スチルベンなどの芳香族分子結晶体、そ れらを適当な溶媒中に溶解した「有機液体シンチレータ」や、溶媒に溶かした後に 高分子化して個溶体とした「プラスチックシンチレータ」などがある。減衰時間は 数 ns と短く、蛍光効率は40~50%であるが、プラスチックシンチレータは極めて加 工性に富んでいるので、任意の形状のものが得られる。いずれも主に炭素や水素か ら構成されているため、平均原子番号が低いのでベータ線スペクトル測定や中性子 測定に有用である。そのため、X線・ガンマ線との相互作用はコンプトン散乱が支 配的となり、X線・ガンマ線測定には用いられることが少ない。 これに対して、無機シンチレータはアルカリ金属の結晶であり、密度、原子番号 ともに有機シンチレータに比べて大きい。よって、高エネルギーのガンマ線が原子 番号の大きい物質中で電磁シャワーを起こしやすいことを利用し、電子・陽電子対 の対生成を連続して起こすことができ、シンチレータ内で大量の光を発生すること が可能なため、ガンマ線スペクトル測定用として非常に優れている。また、光出力 と入射エネルギーの比例性が良いという優れた特徴を持つ。

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まるエネルギー状態に 依存する。図2.1で示しているように、下方に電子が格子上の位置に束縛されてい る価電子帯、上方に電子が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呼ばれるエネルギーギャップが存在し、純粋な結晶に おいて電子はこの中には存在しえない。ガンマ線の照射により、電子は価電子帯中 の定常位置から禁制帯を越えて伝導帯へと励起する。純結晶中で電子が光子を放出 して価電子帯へ戻る過程は能率が悪く、純結晶のギャップ幅では光子のエネルギー が大きすぎて可視光にならない場合が多い。この過程での可視光の放出確率を高め るために、多くの場合無機シンチレータに少量の不純物を添加する。この不純物は 活性化物質 (activator) と呼ばれ、結晶格子内に特別な位置を作り、純結晶のエネル ギー帯構造を変形させる。その結果、禁制帯中に価電子帯への電子の遷移が可能な 中間準位を形成し、可視光の発生確率を高めている。



図 2.1: 活性化された無機結晶シンチレータのエネルギー帯構造 [4]

これらのシンチレータの中から、SGDではシンチレータは無機結晶シンチレータ であるビスマスジャーマネイト(Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>:BGO)が使用される予定である。ここで 主な無機シンチレータとプラスチックシンチレータの特性を表2.1に示す。BGOは その特徴として、大きな比重(7.3g/cm<sup>3</sup>)とビスマスの大きな原子番号(83)を持ち、 市販のシンチレーション材料のどれよりも単位体積当たりガンマ線の光電吸収率が 大きくなっている。更に、その機械的性質と化学的性質は取扱いと使用を容易にし、 BGOを用いた検出器は広く使用されてきた NaI(Tl)を用いた検出器よりも頑丈にで きる。また、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 必要がない純粋な無機シンチレータである。この場合、蛍光は活性化物質の代わり

シンチレータ	比重	屈折率	最高放出波長	減衰時定数	絶対発光量
			(nm)	(ns)	(光子 $/MeV)$
NaI(Tl)	3.67	1.85	415	230	38000
CsI(Tl)	4.51	1.80	540	$680(64\%), 3340(36\%)^1$	65000
BGO	7.13	2.15	480	300	8200
GSO	6.71	1.85	440	$56(90\%), 400(\%)^1$	9000
YAP	5.37	1.95	370	27	18000
$NE102A^2$	1.03	1.58	423	2	10000

表 2.1: 主な無機、有機シンチレータの特性

<sup>a</sup>括弧内は相対強度

<sup>b</sup>プラスチックシンチレータ

に結晶の主成分である Bi<sup>+3</sup> イオンの光学遷移を伴っている。また、Bi<sup>+3</sup> の光吸収ス ペクトルと放出スペクトルの間にはストークスシフトと呼ばれる大きなシフトが存 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、大きな寸法の結晶 でもその発光に対して透明度を保っている。これらの特徴は人工衛星搭載用検出器 として、十分な利点となりうる。

しかし、他の無機シンチレータと比較して劣る特性もある。その一つに発光量の 低さがあり、NaI(Tl)の30%である。これはBGOの測定温度を下げることによって 光出力を増加させ、更に光検出器のタイプや装着位置、個数の工夫により克服して いく。参考に温度の関数としたBGOおよび他の無機シンチレータの相対的な光出 力を図2.2 に示す。



図 2.2: 各シンチレータの光出力の温度依存性 (PMT を用いた測定) [5]

### 2.2 光検出器

ここでは極めて微弱なシンチレーションパルスの光信号を対応する電気信号に変換 する装置を光検出器と呼び、光電子増倍管 (PhotoMulTiplier:PMT)、半導体検出器と してフォトダイオード (PhotoDiode:PD) とアバランシェフォトダイオード (Avalanche PhotoDiode:APD) について記述する。

#### 2.2.1 光電子増倍管 (PMT)

現在、最も広く用いられているシンチレーション検出器である。各種の PMT は 電磁波スペクトル中、紫外、可視および赤外に近い放射エネルギーに感度を持って いる。このことから、光スペクトル測定、レーザー測定、天文学など応用例は多岐 にわたる。PMT の構造の概要を図 2.3 に示す。PMT は最初に入射光子を電子に変



図 2.3: 光電子増倍管の基本構造

換する。この過程は(1)入射光子の吸収と光電子放出性物質中の電子へのエネルギー 移行、(2)表面への電子の移動、(3)光電面から PMT の真空内への電子放出となる。 その後、電子は加速されて図 2.3 中のダイノード表面に衝突する。この結果、入射 電子が付与したエネルギーによって同じ表面から1個以上の電子を再放出させるこ とが可能となる。この反応を繰り返すことで検出されるシンチレーションパルスは 10<sup>7</sup>~10<sup>10</sup> 個となり、当初の微弱なシンチレーション事象を検知するために十分な電 気信号となる。しかし、PMT は使用する際にデメリットとなりうる特徴も持ち合わ せている。それは、(1)前述で示した高ゲインを実現するために容積が大きい、(2) 加えて構造が複雑なために検出器毎の性能差が大きい、(3)電子エネルギー 100eV 程度という低い値であるため、浮遊磁界の影響を受けやすい。更に、(4)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、(5)電子を加速させるた めの印加電圧が1000Vと高い。

#### 2.2.2 半導体検出器

最近、半導体ダイオード開発の進歩によってPMT に代わり、半導体検出器が検 出器の光検出部として採用されてきている。半導体の材料としては、単体のIV 族半 導体である Si、Ge などがあり更に化合物半導体としては CdTe、GaAs などがある。 半導体の結晶物質には格子に周期性があり、その固体内の電子に許容されるエネル ギーは帯状になる。半導体の大きな特徴として、その小さな禁止エネルギーギャッ プ(以下、ギャップ)がある。このギャップは結晶中の特定の格子位置に束縛されて いる外殻電子に対応する価電子帯と結晶中を自由に移動する電子に対応する伝導帯 を分離し、この大きさによって導体、半導体、絶縁体にいずれにその物質を分類す るかが決められる。導体はギャップがないためにわずかなエネルギーの付与により 自由電子が発生する。このため、導体は非常に高い電気伝導度を示す。これに反し、 絶縁体や半導体では電子が自由電子になるためにはギャップを越える必要があり電 気伝導度は低くなる。絶縁体のギャップは大抵 5eV かそれ以上であるのに対し、半 導体のギャップは約 1eV と小さいため、電子を伝導帯に到達させるために必要なエ ネルギーが少なくてすむ。

半導体には真性半導体の他に、それに不純物をドーピングした不純物半導体があ る。真性半導体は不純物を添加していない純粋な半導体であり、材質そのものから キャリア密度が決定されるため、不純物半導体のキャリア密度よりも非常に低い値 となる。Siの場合、室温で2×10<sup>10</sup>cm<sup>-3</sup>対10<sup>17</sup>cm<sup>-3</sup>となる[4]。よって、通常は不 純物半導体が用いられ、その中にはp型半導体(半導体に価電子が1つ少ない元素を 添加したもの)やn型半導体(価電子が1つ多い元素を添加したもの)がある。p型、 n型半導体にドーピングされた不純物をそれぞれアクセプタ不純物、ドナー不純物 と呼び、ギャップ内にそれぞれアクセプタ準位、ドナー準位と呼ばれる新たな準位 を形成する。その結果、それぞれの半導体で正孔(ホール)、自由電子が多数の電荷 キャリアとなる。

放射線検出器に用いる半導体検出器はp型半導体とn型半導体を接合したもので ある場合が多い。p型領域とn型領域を熱力学的に接触している場合、接合部での 伝導電子密度の急激な変化によって、n型量領域からp型領域へ伝導電子が拡散運 動する。その結果、接合のp側には負の空間電荷、n側には正の空間電荷が形成さ れる。この空間電荷が電界を作り、それ以上の拡散を防ぐ。これにより、空乏層と 呼ばれる電荷キャリアが存在しない領域が形成される(図2.4の2番目)。しかし、こ の状態では空乏層が薄く入射光子を検知し難く、内部電場も生成されたキャリアを 収集するためには弱い。そのため、通常使用する場合では半導体ダイオードの逆バ イアスする方向に外部電圧を印加して接合間の電位差を増大させることで空乏層を 広く、また高電場になるようにする(図2.4の3番目)。この広がった空乏層に可視光 または放射線が入射すると電離作用(光電効果)によって価電子帯に存在している電 子が励起し、価電子帯にホールを作る。この電子-ホール対の数は入射粒子のエネル ギーに比例し、それぞれを逆バイアス電圧が起こす電位差によって両端に導くこと でキャリアとしての働きをさせる。よって、出力パルスの電荷量から入射した放射 線のエネルギーを算出でき、これが半導体検出器の原理となる。半導体は平均電離 エネルギー(1組の電子-ホール対を生成するために必要なエネルギー)がSiあるいは Geにおいて約3eVと非常に小さいため、放射線や可視光が入射した際に生成する一 次キャリア数が多く、約30eVが必要なガス検出器や100eV あるいはそれ以上のエ ネルギーが必要なシンチレータ検出器と比較してキャリアの統計的な揺らぎを相対 的に小さくすることが可能である。理想的な半導体検出器はこのキャリアの統計揺 らぎとファノ因子と呼ばれる係数だけで決まり、5.9keV で120eV 程度のエネルギー 分解能となる。検出器中の生成キャリア数の統計揺らぎの観測値はキャリアの生成 がポアソン分布であると仮定した場合に予想値よりも小さくなる。そのため、ファ ノ因子は揺らぎの観測値をポアソン分布から予測した値に関係づけるための調整係 数とされていて、内部増幅のないシリコン検出器における値は約0.1となる。しか し、実際の PD においてはこれに検出器の暗電流、容量などの回路雑音が加わるた め、低エネルギーX線による電気信号はノイズの影響を受ける可能性がある。



図 2.4: 半導体検出器による放射線検出の概略図

### 2.2.3 アバランシェフォトダイオード (APD)

エネルギー分解能を向上させるための有効な手段として、電気信号を検出器自体 が増幅することである。これは検出器内部で信号が増幅されると、回路雑音を相対 的に減らすことができるためである。この手段を用いている検出器はガス比例計数 管や前述で示した PMT であるが、半導体検出器に劣る特性も持ち合わせている。そ こで、半導体検出器でこれらと同様の増幅過程を持つ検出器が開発され、それはア バランシェフォトダイオード (APD) と呼ばれている。

APD は Si を材料とした半導体検出器である。セクション 2.2.2 で説明した半導体 検出器との大きな違いはなだれ過程(avalanche process)による電気信号の増倍であ る。このなだれ現象が生じる過程は(1)印加電圧をPDよりも高く設定し、検出器 内部に高い電場勾配を持たせ、(2)放射線の入射で生じた電子が空乏層中を加速しな がら移動し、(3)その電子が原子と衝突して二次キャリアを生成する過程が次々起こ り、なだれ状にキャリア増倍が誘起される。この内部利得は測定温度と印加電圧に 影響を受けるが、もとの数 10 倍~数 100 倍の大きさの信号を得ることができ、PD を用いた場合のエネルギー分解能、エネルギー閾値を共に改善できることが分かっ ている[6]。また、その量子効率は電子を結晶から飛び出させる必要がないため、PD と同様に80%以上まで改善できる。図2.5を見て分かるように、BGOの最大放出波 長に対しても~80%と感度が良く、BGOと相性が良いことが分かる。更に内部電場 が数10V/100µm~10<sup>6</sup>V/mと非常に強いため、磁場の影響をほとんど受けない。加 えて、その構造はPDとほとんど変わらないため単純でコンパクト、頑丈であると いった利点も持ち合わせている。これら APD の利点は PD、PMT と比較して特筆 すべきであり、宇宙における利用に適している検出器であると言える。本研究では この APD を光検出部として用いる。

APD にはその構造の異なりから数種類が存在し、特徴も異なる。その中でも、本 研究では reverse APD と呼ばれる APD を用いた。reverse APD とは従来の APD の 増幅領域を受光面側に移動させることによって、シンチレーション光の検出に特化 させた APD であり、その増幅領域は受光面から ~数  $\mu$ m 内部にある。通常、シンチ レーション光は受光表面から 1 ~ 3 $\mu$ m で電子-ホール対になるため、ほぼ全ての入射 光を増幅できる。また、他の APD と比較して暗電流値を低く抑えることができ、空 乏層の厚さが ~ 40 $\mu$ m と比較的薄いために 300 ~ 350V 程度の低印加電圧で十分な増 幅率が得られる。更に広島大学大学院工学研究科放射線総合実験室において実際の 観測時の約 4 倍の量である約 10krad のガンマ線と陽子を照射したところ、その性能 の大きな悪化は見られなかった [9]。





図 2.6: reverse APD の内部構造と電場 勾配 [8]

図 2.5: 検出した放射線の波長におけ る APD の量子効率 (本研究では S8664-55/-1010 を使用)[7]

## 2.3 APDの性能を決定するパラメータ

APD の性能を決定するパラメータとして、(1)暗電流、(2)容量、(3)増幅率、(4) 増幅率の揺らぎがある。APD を用いた検出器の場合にはこれらのパラメータを考察 することでその性能を評価できる。

#### 2.3.1 暗電流

暗電流とは半導体接合型検出器に逆電圧をかけた場合に観測される数nA/cm<sup>2</sup>程 度の低い直流漏れ電流のことである。暗電流の増加により、放射線の信号に対して 電流の比率が大きくなり、その結果、電流キャリアのポアソンゆらぎによりエネル ギー分解能や閾値が悪くなる。主な発生原因としては空乏領域内の電子-ホール対の 熱励起によるものと電極近くにある不純物、あるいは格子欠陥などで生じる電場集 中によるものがあり、空乏領域の体積とともに増加する。これらの原因で生じる暗 電流をそれぞれ表面暗電流、バルク暗電流と呼ぶ。その発生率検出器を冷却するこ とによってのみ減少させることが可能である。その確率の式は、

$$p(T) = CT^{\frac{3}{2}} exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$
(2.1)

となり、この式からも低温にすることで暗電流値を劇的に小さくできることが分かる [8]。ここで、C は比例定数、T は絶対温度、 $E_g$  はバンドギャップエネルギー、k はボルツマン定数である。

バルク暗電流はAPD内部で生成されるため、増幅領域を通過するとAPDの増幅 率に比例して増加してしまう。また、表面暗電流は増幅領域を通過しないため増幅 されることはないが、印加電圧に依存して高電圧になるほど増加する。

#### 2.3.2 端子間容量

APD の端子間容量はその測定温度には依存しないが、印加電圧が高いほど小さく なる。端子間容量が大きい場合、ゲインピーキング現象が起こることがあり、高周 波数領域で出力電圧が異常に大きくなってしまう(図2.7)。更に、入射放射線からの パルス光に対する出力電圧波形に著しいリンギングが発生する(図2.8)。これらの現 象は光検出のノイズ源となる。よって、端子間容量に起因するノイズの低減、さら に有感体積の増大という観点から印加電圧を高くすることが望まれる。ちなみに、 本研究で使用した APD の端子間容量は印加電圧300V 時で 100~300pF まで抑える ことができている(図2.9)。



図 2.7: ゲインピーキング現象 (上トレー スが異常時)[11]

図 2.8: リンギング現象の例 [11]



図 2.9:印加電圧に対する APD の端子間容量 (本研究では S8664-55/-1010 を使用)[7])

#### 2.3.3 増幅率(ゲイン)

外部からの印加電圧によって APD 内部に電場を作り出すことができ、入射放射線 によって生成した電子が加速されるとともに、ホールもまた加速を受ける。そのた め、電子とホールの両方が引き起こす反応によって増幅された電子の重ね合わせが 検出される信号となる。ここで、電子キャリア、またはホールキャリアが空乏層を 単位距離ドリフトする間に電離衝突して新たな電子-ホール対を生成する確率を $\alpha$ 、 または $\beta$ とし、これらを衝突電離係数と呼ぶ。

理想的な Si 製 APD では電子キャリアのほうが増幅されやすいため、電子キャリア の増幅過程を考えていく。電子キャリアが増幅領域をドリフトする際、電子電流 J<sub>n</sub> は APD の受光面からの深さ x に依存する。その微分方程式は以下で示される [15]。 ここで、増幅領域の範囲を  $x_1 \sim x_2$  とし、n 側に近い増幅領域境界を  $x_2$ 、p 側に近い 増幅領域境界を  $x_1$  とする。その概略図を図 2.10 に示す。

$$-\frac{\mathrm{d}\mathbf{J}_{n}}{\mathrm{d}\mathbf{x}} = \alpha \mathbf{J}_{n} \tag{2.2}$$

この式を解くと、

$$J_{n}(x) = J_{n}(x_{2}) \exp\left[\int_{x}^{x_{2}} \alpha dx\right]$$
(2.3)

となる。増幅領域  $(x_1 \sim x_2)$  を通過する際の電子による電子増幅率  $M_e$  は  $x_1$  における 電子電流  $J_n(x_1)$  と  $x_2$  における電子電流  $J_n(x_2)$  の比率であることから、式 2.4 が成 立する。

$$M_{e} = e^{\delta(x_{1})} \qquad (\beta \ll \alpha) \tag{2.4}$$



図 2.10: APD 構造の概略図

ここでるは

$$\delta\left(\mathbf{x}\right) = \int_{\mathbf{x}}^{\mathbf{x}_2} \alpha \mathrm{d}\mathbf{x} \tag{2.5}$$

で定義され、 $x \sim x_2$ 間で電離衝突を起こす平均回数であり、 $\delta(x_1)$ は電子によって生成 されたキャリアが増幅領域をドリフトする間に起こす電離衝突の平均回数を示してい る。仮りに理想的な単ーキャリアのみが増幅されるならば、 $(APD 全体の増幅率 = M_e)$ となる。この結果、理論上はブレークダウンをしない。

しかし、大抵の半導体検出器において、ホールの増幅を考慮しない場合では実際 のアバランシェ現象を描写できない。実際は $\beta > 0$ となるため、ホールの衝突よっ て生成される電子が増幅されて信号として検出されてしまう。そこで実際の増幅過 程において、電子とホールの両方のキャリアが増幅されると考えなければならない。 よって、式 2.2 は電子電流 J<sub>n</sub> とホール電流 J<sub>p</sub> を用いて以下のように示される [15]。

$$\frac{\mathrm{d}J_{\mathrm{n}}}{\mathrm{d}x} = -\alpha J_{\mathrm{n}} - \beta J_{\mathrm{p}} - g\left(x\right) = -\frac{\mathrm{d}J_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}x}$$
(2.6)

ここで、g (x) は深さ x で新たに生成した電子-ホール対が電流となったものである。 増幅率を考察する場合、単一のキャリア対が x で励起し、それが増幅される過程を 考えれば良いため、g (x) = 0、 $-J_n(x) = J_p(x) = M(x) J_0$ となり式 2.6 から、深さ x での増幅率 M (x) は以下のように示される [18]。ここで、 $J_0$  は増幅される前の電流 値である。

$$\frac{\mathrm{dM}\left(\mathbf{x}\right)}{\mathrm{dx}} = -\alpha \mathrm{M}\left(\mathbf{x}\right) + \beta \mathrm{M}\left(\mathbf{x}\right) \tag{2.7}$$

更に、M(x)の積分方程式による表記を以下に示す[18]。

$$M(\mathbf{x}) = 1 + \int_{\mathbf{x}}^{\mathbf{x}_2} \alpha M(\mathbf{x}) \, \mathrm{d}\mathbf{x} + \int_{\mathbf{x}_1}^{\mathbf{x}} \beta M(\mathbf{x}) \, \mathrm{d}\mathbf{x}$$
(2.8)

ここで、第2項は生成された電子キャリアが $x \sim x_2$ 間で電離衝突を起こす過程を示し、第3項はホールキャリアが $x \sim x_1$ 間で電離衝突を起こす過程を示している。ま

た積分定数として、増幅過程がない場合において M=1 となるため、第1項に定数1 が入っている。ここで、式 2.7 を解くと、M(x) は

$$M(\mathbf{x}) = M(\mathbf{x}_1) \exp\left[-\int_{\mathbf{x}_1}^{\mathbf{x}} (\alpha - \beta) \, \mathrm{d}\mathbf{x}'\right]$$
(2.9)

$$M(x) = M(x_2) \exp\left[\int_{x}^{x_2} (\alpha - \beta) dx'\right]$$
(2.10)

と表すことができる。式  $2.8 \mathbf{e} \mathbf{x} = \mathbf{x}_1 \mathbf{b} \mathbf{b} \mathbf{c}$ 、それに式  $2.9 \mathbf{e} \mathbf{f} \mathbf{\lambda}$ すると、

$$\frac{1}{M(\mathbf{x}_1)} = 1 - \int_{\mathbf{x}_1}^{\mathbf{x}_2} \alpha \cdot \exp\left[-\int_{\mathbf{x}_1}^{\mathbf{x}} (\alpha - \beta) \, \mathrm{d}\mathbf{x}'\right] \mathrm{d}\mathbf{x}$$
(2.11)

となる。この式と式 2.9 より、

$$M(\mathbf{x}) = \frac{G(\mathbf{x})}{1 - \int_{\mathbf{x}_1}^{\mathbf{x}_2} \alpha G(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}'}$$
(2.12)  
$$G(\mathbf{x}) = \exp\left[-\int_{\mathbf{x}_1}^{\mathbf{x}} (\alpha - \beta) \, d\mathbf{x}'\right]$$

となる。

電子とホールの電離確率は印加電圧の上昇とともに増加する。更に測定温度にも 敏感であり、低温であるほど電離されやすいという性質がある。これは半導体中の 原子の熱運動が抑制され、電子が加速途中で散乱されにくくなり、効率的に加速さ れるためである。よって、低温では低印加電圧での信号読み出しが可能であるとい うメリットがあるが、その分ブレークダウンが起きやすくなるというデメリットも 出てくる。

#### **2.3.4** 増幅率の揺らぎ(過剰雑音係数)

式2.13 は距離xで発生した電子-ホール対の平均増加率を示している。APDのな だれ増幅は確率過程であるため、xで発生した全てのペアが同じ増幅率であること はなく、実際にはある程度の揺らぎを伴ってしまう。そこで、過剰雑音係数F(excess noise factor)という概念を用いて揺らぎの補正を行う。その表式を以下に示す。

$$F = \frac{\langle m^2 \rangle}{\langle m \rangle^2} = \frac{\langle m^2 \rangle}{M^2}$$

ここで、m は各電子の増幅率であり、M は出力される電気信号の増幅率である。増 幅のないフォトダイオードなどの検出器ではファノ因子の影響でF < 1、光電子増 倍管では $F \simeq 1.2$ となる。また、APD の過剰雑音係数に関しては過去の五十川やや つ(漢字??)ら[12,13]によって詳しく述べられており、APD の内部増幅、入射光の 波長、更には測定温度に依存する。その詳細を図 2.11、2.12 に示す。これらの条件 から、本研究での APD の過剰雑音係数 F は F  $\simeq 2$  と定義する。



図 2.11: APD の内部増幅に対する過剰 雑音係数 F(APD タイプ:S8664-55(受光 面積が 5mm 平方) の場合)[12]



図 2.12: (a)+20 と-20 での APD の 内部増幅に対する過剰雑音係数 F、(b) 測定温度に対する過剰雑音係数 F(:印 加電圧を 150V に固定、:内部増幅率を 20 に固定、APD タイプ:SPL 2407)[13]

### 2.4 APDのノイズ特性

半導体検出器のキャリアは電子、またはホールであり、それらは電気信号として 信号処理回路に入力される。本研究において、その電気信号は電荷有感型前置増幅 器 (Charge Sensitive Amplifier:CSA)、波形整形アンプ (Shaper) を通り、アナログデ ジタル変換器 (Analogue Digital Convertor:ADC) に入力される。(図 2.13)



図 2.13: 半導体検出器を用いた放射線計測回路の概念図

半導体検出器のエネルギー分解能は、発生する電子-ホール対の統計ゆらぎによる 雑音ではなく、初段電気回路系の雑音に大きく影響を受ける。ここで、初段電気回 路系とは半導体検出器から CSA までを指している。一般に、その雑音は抵抗部にお けるキャリアの熱運動によって発生する熱雑音(ジョンソンノイズ)、電子の熱ゆら ぎが原因である暗電流の変動によって発生するショットノイズ、半導体に固有に存 在し、不純物原子のランダム運動や構造に由来し、パワースペクトルが周波数に反 比例する特徴を持つ 1/f ノイズの和になる [10]。

増幅のない場合、半導体検出器の等価雑音回路は図 2.14 で示されるようになる。



図 2.14: 内部増幅のない半導体検出器の場合の等価雑音回路

ここで、I<sub>s</sub>は入射放射線による信号電流、C<sub>in</sub>は等価入力容量 (PIN 検出器の接合 容量、ケーブル、初段 FET の入力容量)、R<sub>p</sub>は等価並列抵抗 (帰還抵抗、高圧負荷 抵抗)、 $R_s$  は等価直列抵抗 ( $\equiv A/g_m$ 、A:0.5 ~ 0.7 の定数、 $g_m$ : 初段 FET の相互コン ダクタンス)、 $I_n$  は暗電流、 $V_{1/f}$  は 1/f ノイズである [10]。

全雑音電圧のパワースペクトルは

$$\frac{V_{\text{noise}}^2}{df} = \frac{4k_BT}{\omega^2 C_{\text{in}}^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2 C_{\text{in}}^2} + 4k_BTR_s + V_{1/f} \qquad [V^2/\text{Hz}]$$
(2.13)

となる。第1項と第3項はそれぞれ  $R_p$ 、 $R_s$  によるジョンソンノイズであり、第2項 は  $I_n$  によるショットノイズとなる。この式を等価雑音電荷 $\Delta E_{RMS}^2$  (Equivalent Noise Charge:ENC) で示すと、

$$\frac{\overline{\Delta E_{RMS}^2}}{df} = \frac{4k_BT}{\omega^2 R_p} + \frac{2qI_n}{\omega^2} + 4k_BTR_sC_{in}^2 + \frac{C_{1/f}C_{in}^2}{f} \qquad [C^2/Hz]$$
(2.14)

となる。ここで、 $V_{1/f}$ は周波数に反比例するため、1/f 雑音の大きさを表す比例係数  $C_{1/f}$  によって置き換えている。ここで、簡単のために  $\omega/2\pi \sim f \sim \Delta f \sim 1/\tau (\tau \text{ ls})$  Shaping time) とすると、

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} \sim \frac{k_B T \tau}{\pi^2 R_p} + \frac{q I_n \tau}{2\pi^2} + 4k_B T R_s C_{in}^2 \frac{1}{\tau} + C_{1/f} C_{in}^2 \qquad [C^2]$$
(2.15)

となる。

この式 2.15 に対して、APD を用いた場合では放射線信号とバルク暗電流による ノイズが内部増幅領域を通過するため増加する。このため、等価雑音回路は図 2.15 で示されるようになる。



図 2.15: 内部増幅がある半導体検出器 (APD)の場合の等価雑音回路

ここで、 $I_{nb}$ はバルク暗電流、 $I_{ns}$ は表面暗電流、Mは内部増幅率である。APDの 等価雑音電荷では式 2.15 の  $I_n$  と  $I_s$  がそれぞれ  $I_{ns} + I_{nb}FM^2$ 、 $I_sM^2$  と変換される。こ こで、信号電流の増幅は相対的に雑音電荷減少を可能にするため、等価雑音電荷に  $1/M^2$ をかけることで考慮に入れる。よって、内部増幅を考慮に入れると式 2.16 となる。ここで、F は過剰雑音係数である。

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} \sim \frac{1}{M^2} \left[ \frac{k_B T \tau}{\pi^2 R_p} + \frac{q \left( I_{ns} + I_{nb} F M^2 \right) \tau}{2\pi^2} + 4k_B T R_s C_{in}^2 \frac{1}{\tau} + C_{1/f} C_{in}^2 \right]$$
(2.16)

この式において、第3項は測定に使用するプリアンプの容量特性とAPDの端子間 容量に関係し、更に雑音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 分解能に換算した場合、T=270[K]において

$$\overline{\Delta E_{\rm FWHM}^2} \sim \frac{2.355^2}{M^2} \left[ \frac{1.965 \times 10^{-4}}{R_p} + 4.218 \times 10^{-3} \left( I_{\rm ns} + I_{\rm nb} F M^2 \right) \right] \tau + \left\{ f\left( C_{\rm in} \right) \right\}^2 [\rm keV^2]$$
(2.17)

となる。本研究では原因の分かり難い1/f 雑音を考慮せずにノイズ計算を行う。それぞれのパラメータの単位は  $R_p$  (G $\Omega$ )、 $I_{ns}$  (nA)、 $I_{nb}$  (nA)、 $C_{in}$  (pF)、 $\tau$  ( $\mu$ s) である。また、今回用いた CSA の  $R_p$  は ~ 1G $\Omega$  であり、 $I_{ns}$  は内部増幅の影響を受けないため、[]内において  $I_{nb}$  の項が支配的であると考えられる。その考慮を入れた場合、APD のノイズは

$$\overline{\Delta E_{\rm FWHM}^2} \sim \frac{(\delta_{\rm noise})^2}{M^2} \sim \frac{(\delta_{\rm noise,I})^2 + (\delta_{\rm noise,C})^2}{M^2} \sim \frac{1}{M^2} \left[ 0.02339 I_{\rm nb} F M^2 \tau + \{f(C_{\rm in})\}^2 \right] [keV^2]$$

$$(2.18)$$

$$k = t = k t = k t = 0$$

と表すことができる。この式の第1項を電流性ノイズ、第2項を容量性ノイズと呼ぶ。

## 2.5 結晶シンチレータと半導体検出器のエネルギー分解 能とエネルギー threshold

放射線検出器を使用する場合、大抵の目的は入射放射線のエネルギー分布の測定 である。放射線スペクトル測定用検出器の重要な特性の1つに、その放射線の単一 エネルギー線源に対する応答が挙げられる。図 2.16 は同一エネルギー放射線に対し て各検出器から得られた微分波高分布である。両分布とも、あるパルス波高 $H_0$ を中 心としているが、分解能の悪い検出器の幅のほうが広くなってしまっている。これ は、付与エネルギーが同等であってもパルス波高値に大きなばらつきがあることを 示唆している。このようなばらつきを小さくすることができれば、分布幅は狭くな り、入射放射線のエネルギーを詳細に解析するための測定能力を向上させることが 可能となる。検出器のエネルギー分解能の定義を図 2.17 に示す。半値幅 (full width at half maximum:FWHM) は波高分布のピークの最高値の半分の高さにおける分布 の幅で定義される。エネルギー分解能  $\Delta E/E$  はこの半値幅の値をピーク中心の値で



図 2.16: 異なる分解能を持つ検出器の応答関数の例

割ることで導出する。なお、半値幅はその標準偏差 $\sigma$ を用いて (2.355 $\sigma$ ) で置換可能 である。 $\Delta E/E$  は無次元の値であり、通常では百分率で表され、APD や BGO の特 性を用いて式 2.19 のように示されると考えられている [6,14]。



図 2.17: <sup>137</sup>Cs を照射した場合のスペクトル

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = (\delta_{sc})^2 + 2.355^2 \frac{F}{N_{ph}QY} \cdot \frac{1}{E} + \left(\delta_{noise} \cdot \frac{1}{E_g} \cdot \frac{1}{N_{ph}QMY} \cdot \frac{1}{E}\right)^2 [\%^2] \quad (2.19)$$

ここで、E(keV)はガンマ線のエネルギー、Fはファノ因子、特に APD の場合では 過剰雑音係数と呼ばれ、APD の場合は2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、 $\delta_{noise}(keV)$ は電気雑音であり §2.4 に記述している。M は APD の増幅率 である。 エネルギー分解能の評価式 2.19 の第 1 項は結晶シンチレータ固有の特性による成 分であり、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値が悪くなる。本研究の場合、そ の値は  $4.7 \pm 0.5\%$  となる [6]。第 2 項はシンチレーション光から発生する電荷が離散 的な電荷キャリア数となる現象から発生する統計的雑音に帰因する成分である。こ の雑音は検出器信号中に常に存在して除去できない最少量の雑音となるため、検出 器性能にとって非常に重要なファクターの1つである。それぞれの電荷キャリア形成 がポアソン過程であると仮定すれば、固有の変動量を見積もることが可能となる。平 均として総数 N 個の一次電子の電荷キャリアが生成されたとすると、ポアソン分布 より電荷キャリア数の統計的変動にのみ帰因する分解能の限界値 ( $\Delta E/E$ )<sub>ポアソン限界</sub> は式 2.20 のようになる [4]。

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\pi \mathcal{P} \mathcal{V} \mathcal{V} \mathbb{R} \mathbb{R}} = \frac{2.355}{\sqrt{N}}$$
 (2.20)

しかし、§2.2.2 で説明したように式 2.20 で予測される最小値よりもある定数分だけ 小さくなることが判明している。このズレを定量化するために前述のファノ因子が 導入され、式 2.21 のように定義される [4]。

$$F \equiv { 観測された N の分散 \over ポアソン統計で予測された分散 (= N) }$$
 (2.21)

そこで、式 2.20 は式 2.22 となる。

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{khirk},F} = 2.355 \sqrt{\frac{F}{N}} = 2.355 \sqrt{\frac{F}{N_{ph}QYE}}$$
(2.22)

最後に、第3項は電気回路系ノイズに帰因する成分である。分母に存在する $N_{ph}QYE$ は照射放射線エネルギーによる APD の一次出力電子数であり、更に式 2.18 からの 増幅率の因子を考慮すると出力した全電子数となる。また、 $\delta_{noise}/E_{g}$ は(ノイズによ る信号電子ゆらぎの数)となる。よって、第3項は(ノイズによる信号電子揺らぎの 数)/(出力した電子数)となる。

また、エネルギー threshold は低エネルギーノイズが測定スペクトルに現れる上限であり、図 2.18 に示す。横軸はエネルギーに対応したチャンネルであり、通常ではエネルギー (keV) に変換して式 2.23 のように示されると考えられている [9]。

$$E_{\rm th} \sim t \cdot \delta_{\rm noise} \cdot \frac{1}{E_{\rm g} N_{\rm ph} Q M Y} [keV]$$
 (2.23)

ここで式 2.23 において、経験則から t~2 とする。このエネルギー threshold の評価 式については、電気回路系のノイズにのみ依存しており、入射放射線エネルギーに は依らない。よって、エネルギー分解能よりも評価式の決定が容易である。



図 2.18: エネルギー threshold(400 チャンネル付近)の確認例

## 2.6 本研究で使用した APD とBGO

ここでは本研究で使用した光検出器 PMT、PD、APD について、更にシンチレー タとして用いた BGO の形状を記述する。

光検出器については全て浜松ホトニクス株式会社製で、PMT については型番が R6231(図 2.19)を用いた。その受光面サイズは 46mmφ であり、感度波長範囲は 300 ~ 650nm で 420nm で最大感度を持つ。PD については型番が S3590-08(図 2.20)を用 いた。その受光面積は 10 × 10mm<sup>2</sup> であり、感度波長範囲は 320 ~ 1100nm で 960nm で最大感度を持つ。また APD について、その型番は受光面積順に 3 × 3mm<sup>2</sup>APD は S8664-33SPL、5 × 5mm<sup>2</sup>APD はS8664-55、10 × 10mm<sup>2</sup>APD はSPL4650、18 × 18mm<sup>2</sup>APD は SPL4653 である (図 2.21)。今回は 5 × 5mm<sup>2</sup>APD のみを使用した。その感度波長 範囲は 320 ~ 1100nm で 600nm に最大感度を持つ。

本研究で用いた BGO の形状について記述する。まずは 2005 年 7 月 10 日に JAXA 内之浦宇宙空間観測所から打上げられた X 線天文衛星である「すざく」で採用さ れた形状である BGO ブロックを図 2.22 に示す。この大きさは上部が 60 × 60mm<sup>2</sup> の正方形であり、高さは 60mm である。更に底面は 46mm $\phi$  の円形である。次に、 BGO ブロックと同様に「すざく」で採用された形状である井戸型 BGO アクティブ シールドを図 2.23 に示す。この大きさは 60 × 60 × 320mm<sup>3</sup> であり、BGO の厚さ は 3mm である。その他、2 種類の BGO プレートを用いた。その大きさはそれぞれ 40 × 100 × 3mm<sup>3</sup>、54 × 320 × 3mm<sup>3</sup> である。この論文では前者を「小 BGO プレー ト」、後者を「大 BGO プレート」とする。大 BGO プレートを図 2.24 に示す。

また、現在検討されている SGD 構造 (図 2.25) で採用されている BGO についても

評価する。BGOアクティブシールド部では製造の簡略化を考慮して、図 2.25 のよう に多数の BGO を組み合わせて SGD を構成する予定である。そのため、現行の HXD と比較して BGO の形状が複雑になっている (2.27 の上段)。また、これら BGO から のシンチレーション光を  $10 \times 10$  mm<sup>2</sup> 以上の大面積 APD によって検出する予定であ る。本研究では SGD に採用された BGO の形状を簡易化し (図 2.27 下段)、更に大 きさを等分に 10:3 で縮小し、似通った規模の BGO を同一のものとすることで、図 2.26 で示すような 7 個の BGO を実際に用いて評価を行う。ここで、使用する APD の受光面積も BGO と同様に縮小し、3 × 3 mm<sup>2</sup> APD を用いる。

これらの BGO において、光検出器との接合部以外の表面に全てゴアテックス社 製の反射材を巻いてシンチレーション光を反射させている。更に、光検出部との接 合部においても光学グリースを用い、その隙間をバルカーテープ(反射材)で覆うこ とにより接合部での光損失を極力無くした。



図 2.19: 本研究で用いた 46mm *φ* の受光 面を持つ PMT



図 2.20:本研究で用いた 10×10mm<sup>2</sup>の 受光面を持つ PD



図 2.21: 左から  $3 \times 3$ mm<sup>2</sup>、  $5 \times 5$ mm<sup>2</sup>、  $10 \times 10$ mm<sup>2</sup>、  $18 \times 18$ mm<sup>2</sup>APD





図 2.22: ゴアテックス反射材で巻かれ た BGO ブロック

図 2.23: ゴアテックス反射材で巻かれ た井戸型 BGO アクティブシールド



図 2.24: ゴアテックス反射材で巻かれた大 BGO プレートと 3mm 角 APD





図 2.25: 現在検討されている SGD の構 造 (外側の茶色部分:CFRP 構造体、中心 の赤茶色部分:ファインコリメータ、青 部分:BGO 結晶パッケージ、グレー部 分:Si-Pad stack、緑部分:CdTe-Pad)

図 2.26: 本研究で用いた 7 種類の SGD 評価用 BGO



図 2.27: 上段:SGD を構成する BGO の形状、下段:上段の形状を簡易化したもの(ス ケールは mm)

## 第3章 エネルギーthreshold、分解能 の評価式の検証

APD は近年に開発され、その性能の良さから PMT や PD に代わって衛星の光検 出部に用いられる予定である。しかし、今現在の実状ではその性能の定式化が未だ にできていない。そこで、この章では APD の性能を定式化する。

APD 性能を表しているエネルギー threshold とエネルギー分解能の評価式は §2.5 の式 2.23、2.19 で示した。これらの式中で不確定であるパラメータはシンチレーショ ン光の読み出し効率である Y と電気雑音である  $\delta_{noise}$  (keV) である。以降の §3.1 で Y を導出し、§3.3 で  $\delta_{noise}$  を含めたエネルギー threshold とエネルギー分解能の評価 式の検証を行う。

### 3.1 光読み出し効率Yの導出

BGO からのシンチレーション光の読み出し効率 Y は使用する APD の受光面積と BGO の形状に依存する。そのため、式 2.19、2.23 中の Y は APD の受光面積による 成分  $(Y_1)$  と BGO の形状による成分  $(Y_2)$  に分けられ、以下の関係で示される。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_1 \times \mathbf{Y}_2$$

まず Y<sub>1</sub> については、5mm 立方 BGO を用いて測定する。この 5mm 立方 BGO を  $10 \times 10 \text{mm}^2 \text{PD}$  で読み出した時の光量 Y<sub>1</sub> を 1 とする。これは 5mm 立方 BGO の接着面積が  $10 \times 10 \text{mm}^2$  よりも十分小さいため、APD の受光面積によるシンチ レーション光損失が無いと考えられるためである。この考えから、 $18 \times 18 \text{mm}^2$ 、  $10 \times 10 \text{mm}^2 \text{APD}$ に対しても Y<sub>1</sub> = 1 と決定できる。そして、 $3 \times 3 \text{mm}^2$ 、 $5 \times 5 \text{mm}^2 \text{APD}$ において光量を測定し、 $10 \times 10 \text{mm}^2 \text{PD}$ の場合との比 (Y<sub>1</sub>)を導出する。

次に Y<sub>2</sub> について、各大きさの APD と 5mm 立方 BGO を組み合わせた場合の光 量を 1 と定義して、各形状の BGO から同一の APD に入射した光量を測定し、5mm 立方 BGO の場合の光量との比 (Y<sub>2</sub>)を導出する。

ここでの光量とはそれぞれの場合で測定されるスペクトルの波高値のことであり、 これらを導出することで Y を算出する。
#### 3.1.1 Y<sub>1</sub>の導出

 $Y_1$ を導出した APD の受光面積は  $3 \times 3$ mm<sup>2</sup>、  $5 \times 5$ mm<sup>2</sup> である。

Y<sub>1</sub>を導出するための実験セットアップと測定条件を表 3.1 に記述する。ちなみ にセットアップは全ての場合において同一である。ここで PMCA を用いた場合の 信号処理回路については以降の §3.1.2 に詳細を説明している。更に、測定条件につ いて PD と APD で異なる点は Shapergain とバイアス電圧の値であり、 $3 \times 3 \text{mm}^2$ 、  $5 \times 5 \text{mm}^2 \text{APD}$  については内部増幅してしまうと PD と比較できなくなるためバイ アス電圧を 100V とする。これは HV100V よりも小さいバイアス電圧では、顕著な 増幅はしないため HV100V で APD ゲインが1 であると考えられるためである。よっ て、比較する際には Shapergain のみの補正を行う。

この補正を行った上で、 $3 \times 3$ mm<sup>2</sup>、 $5 \times 5$ mm<sup>2</sup>APD での Y<sub>1</sub> はそれぞれ 0.3645、 0.6966 となった。得られたスペクトルをそれぞれ図 3.1、3.2、3.3 に示す。

実験セットアップ				
PreAmp	CLEAR-PULSE MODEL 5005H			
Shaper	ORTEC MODEL	571		
高圧電源	菊水株式会社製 ]	<b>直流電源</b>		
ADC	PMCA			
測定条件	測定条件			
	$10 \times 10 \text{mm}^2 \text{PD}$ $3 \times 3 \text{mm}^2$ , $5 \times 5 \text{mm}^2 \text{APD}$			
線源	$^{137}Cs (662 \text{keV})$			
Shapingtime	$2\mu s$			
測定温度	-30			
Shapergain	8000倍 3000倍			
バイアス電圧値	40V 100V			

表 3.1: 実験セットアップと測定条件



図 3.1: Y<sub>1</sub>の基準となる 10 × 10mm<sup>2</sup>PD+5mm 立方 BGO のスペクトル



図 3.2: 3×3mm<sup>2</sup>APD+5mm 立方 BGO のスペクトル



4097

Entries

図 3.3: 5×5mm<sup>2</sup>APD+5mm 立方 BGOのスペクトル

#### **3.1.2** Y<sub>2</sub>の導出

今回、導出した Y<sub>2</sub>の組合せは  $3 \times 3$ 、 $5 \times 5$ 、 $10 \times 10$ 、 $18 \times 18 \text{mm}^2 \text{APD} + \text{BGO}$  ブロック、 $3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD} + 2$ 種類の BGO プレート、 $3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD} 5$  個+井戸型 BGO アクティブシールドである。各 APD と BGO を組み合わせた様子と放射線の照射位置を図 3.4 に示す。ちなみに、各 APD+BGO ブロックにおける導出は私と同研究室に所属している白井氏の 2006 年度卒業論文のデータを用いて行い、 $3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD} 5$ 個+BGO アクティブシールドにおいては私の 2006 年度卒業論文のデータを用いて



図 3.4: 左から、BGO ブロックと各 APD の装着図、小 BGO プレートと 3×3mm<sup>2</sup>APDの装着図、大BGO プレートと3×3mm<sup>2</sup>APDの装着図、井戸型BGO アクティブシールドと5つの3×3mm<sup>2</sup>APDの装着図

Y<sub>2</sub>を測定するための実験セットアップを表 3.2 に記述する。井戸型 BGO アク ティブシールドの場合で用いる 2 つの PreAmp はほぼ同じ性能を持っている。更に、 PMCA、および VME を用いて APD からの電気信号を処理するための回路に関し ては以下に詳細を記述する。なお、測定条件はそれぞれのセクションで説明する。

	各 APD+BGO ブロック	$3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD} + 2$ 種類のBGO プレート
PreAmp	CLEAR-PULSE MODEL 580K	CLEAR-PULSE MODEL 5005H(1ch を使用)
Shaper	ORTEC MODEL 571	CLEAR-PULSE MODEL CP2914
高圧電源	菊水树	法式会社製 直流電源
ADC	PMCA	VME
	$3 \times 3 \text{mm}^2$ APD5 個+井戸型 BG	O アクティブシールド
PreAmp	3×3mm <sup>2</sup> APD5個+井戸型BG CLEAR-PULSE MODEL 5005H	O アクティブシールド と CLEAR-PULSE MODEL CP-5102
PreAmp Shaper	3×3mm <sup>2</sup> APD5個+井戸型BG CLEAR-PULSE MODEL 5005H CLEAR-PULSE MODEL CP291	<b>0 アクティブシールド</b> と CLEAR-PULSE MODEL CP-5102 4
PreAmp Shaper 高圧電源	3×3mm <sup>2</sup> APD5個+井戸型BG CLEAR-PULSE MODEL 5005H CLEAR-PULSE MODEL CP291 菊水株式会社製 直流電源	Oアクティブシールド と CLEAR-PULSE MODEL CP-5102 4

表 3.2: 実験セットアップ

• VME による信号処理回路

VME 信号処理回路のブロック図を図 3.5 に示す。更にモジュールの詳細を表 3.3 に示す。図 3.5 で示すように、この回路は同時に 5ch を処理して AD 変換す る。各 BGO プレートの場合はこの中の 1ch を、井戸型 BGO アクティブシー ルドの場合は 5ch 全てを用いる。

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、Shaper Amp が負入力のため Pre Amp 出力を反転回路に通し、Shaper Amp(Shaping time:2µs) で整形されて Discri 回路へ入力する。この Discri 回 路は Discriminator と軽度の Shaper Amp の両方の役割を担う。Discri 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となる Gate、Start、DIO の 3 つの信号を作成す るための Triger 信号は、Discri 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。

データ処理信号である Gate、Start、DIO の生成は、Discri 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3.6 に示す。まず、Discri 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3.7 に示す。



図 3.5: 5ch 用の VME による信号処理回路のブロック図

OR	LOGIC FAN_IN FAN_OUT	
Gate Generetor	KEK_N1113-51 DEGITEX ,	N-TM 207
VME_ADC	CLEAR-PULSE MODEL	1113A <u>型</u>
DIO	CLEAR-PULSE MODEL	CP-2610

表 3.3: VME によるデータ処理回路で用いたモジュールの詳細



Pockect MCA(PMCA)を用いたデータ処理回路

ここで用いる PMCA は AMPTEC 社製 MCA-8000A である。測定に用いた回 路系のブロック図を図 3.8 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。なお、この回路は 1ch に対応している。 PMCA の利点はノイズ対策をとりやすく、かつ VME よりも迅速に実験を進 行できるところにある。



図 3.8: PMCA によるデータ処理回路のブロック図 (APD 使用時)

各 APD+BGO ブロック

以上のセットアップで BGO ブロック (上面  $60 \times 60 \text{mm}^2$ 、底面  $46 \text{mm}\phi$ 、高さ 60 mm: 図 2.22) と受光面積が異なる各 APD を組み合わせた場合の Y<sub>2</sub> を導出した。測定手順としては、(1) $10 \times 10 \text{mm}^2$ APD を用いて 5 mm 立方 BGO と BGO ブロックの光量を比較し、 $10 \times 10 \text{mm}^2$ APD の場合の Y<sub>2</sub> を導出する。(2)BGO ブロックに各 APD を装着し、それらの光量を測定し、 $10 \times 10 \text{mm}^2$ APD との光量比から各 APD+BGO ブロックにおける Y<sub>2</sub> を導出する。ここでの光量比は各 APD ゲインを考慮に入れて補正した値とする。

ゲイン測定ではまず、5mm 立方 BGO を各 APD に装着し、APD ゲインが1の時の パルスハイトとバイアス電圧 300V でのパルスハイトを比較し、バイアス電圧 300V 時の APD ゲインを求めた。

測定手順 (1) の測定条件として表 3.4 に示す。ここでの 5mm 立方 BGO と BGO ブ ロックの測定時で異なる点は Shapergain の値である。

	$10 \times 10$ mm <sup>2</sup> APD+5mm 立方 BGO	$10 \times 10 \text{mm}^2 \text{APD} + \text{BGO ブロック}$		
線源	$^{137}Cs$ (662keV)			
Shapingtime	$2\mu s$			
測定温度	-30			
バイアス電圧値	300V			
Shapergain	300 倍	1500 <b>倍</b>		

表 3.4: 5mm 立方 BGO と BGO ブロックの光量比較における測定条件

Shapegain の補正をした上で、 $10 \times 10 \text{mm}^2$ APD を用いた場合での 5mm 立方 BGO に対して BGO ブロックで検出された光量の比は Y<sub>2</sub>=0.15 となった。得られたスペ クトルをそれぞれ図 3.9、3.10 に示す。更に各 APD の測定結果に基づいて、ゲイン を考慮に入れた光量比により各 APD の Y<sub>2</sub> も導出できた。結果を表 3.5 に示す。こ の結果から、APD の受光面積が大きくなれば (受光面積比/2) 程度の割合で取得光 量が増加する。しかし、BGO ブロックの規模や複雑な形状によって、大面積である  $18 \times 18 \text{mm}^2$ APD の取得光量においても BGO での全発光量の半分程度に留まって いる。





図 3.9: 10×10mm<sup>2</sup>APD+5mm 立方 BGO(BGO ブロックとの比較用:Y<sub>2</sub> = 1)[16]

図 3.10: 10×10mm<sup>2</sup>APD+BGO ブロ ック [16]

APD <b>のサイズ</b>	10×10mm <sup>2</sup> APD との光量比	$Y_2$
$3 \times 3 \mathrm{mm}^2$	0.18	0.027
$5 \times 5 \mathrm{mm}^2$	0.50	0.075
$10 \times 10 \mathrm{mm}^2$	1	0.15
$18 \times 18 \mathrm{mm}^2$	3.0	0.45

表 3.5: BGO ブロックに対する各 APD の光集収率 Y<sub>2</sub>

 $3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD} + 2$ 種類の BGO プレート

2種類の BGO プレートについて BGO ブロックの場合と同様に Y<sub>2</sub>を導出する。こ こでは小 BGO プレート ( $40 \times 100 \times 3$ mm<sup>3</sup>) と大 BGO プレート ( $54 \times 320 \times 3$ mm<sup>3</sup>) の前面中央に  $3 \times 3$ mm<sup>2</sup>APD を 1 つ装着してスペクトルを測定し、その状態を図 3.4 に示す。

その測定手順として、表 3.6 に示す。この際、全ての場合において同条件で測定した。

線源	$^{137}Cs$ (662keV)
Shapingtime	$2\mu s$
測定温度	-30
バイアス電圧値	$350\mathrm{V}$
Shapergain	35 <b>倍</b>

表 3.6: 5mm 立方 BGO と 2 種類の BGO プレート間での光量比較における測定条件

ここで、 $3 \times 3$ mm<sup>2</sup>APD と 2 種類の BGO プレートについて測定したスペクトル を図 3.11、3.12、3.13 に示す。検出した光量の比から小 BGO プレート、大 BGO プ レートのシンチレーション光の収集効率 Y<sub>2</sub> を導出でき、それぞれ 0.3522、0.09471 となった。この結果より、BGO のサイズが大きくなるほど収集効率 Y の値が小さ くなる事が分かる。





図 3.11: 3×3mm<sup>2</sup>APD+5mm 立方 BGO(BGO プレートとの比較用:Y<sub>2</sub>=1)

図 3.12: 3×3mm<sup>2</sup>APD+小 BGO プ レート



図 3.13:  $3 \times 3$ mm<sup>2</sup>APD+大 BGO プレート

3×3mm<sup>2</sup>APD5 個+井戸型 BGO アクティブシールド

井戸型 BGO アクティブシールド ( $60 \times 60 \times 320$ mm<sup>3</sup>:図 2.23) に  $3 \times 3$ mm<sup>2</sup>APD を 5 個装着した状態 (図 3.4) での Y<sub>2</sub> を測定する。これは、井戸型 BGO アクティブシー ルドの厚さが 3mm しかないために APD の受光面を  $3 \times 3$ mm<sup>2</sup> 以上にしても意味が ないためであり、この状態が APD を用いて井戸型 BGO アクティブシールドを読み 出すための最適な配置であると考えられる。

測定条件について、表 3.7 に示す。ここでの 5mm 立方 BGO と井戸型 BGO アク ティブシールドの測定時で異なる点は照射したエネルギーと Shapergain である。ち なみに、井戸型 BGO アクティブシールドの場合、1200keV のピークが見えた APD は図 3.4 の向かって上部と左部の2つであった。よって、この2つのスペクトルのパ

ルスハイトを足し合わせたスペクトルを解析し、5mm 立方 BGO との光量比較に用いた。

	5mm 立方 BGO	井戸型 BGO アクティブシールド	
Shapingtime	$2\mu s$		
測定温度	-30		
バイアス電圧値	355V		
線源	$^{137}Cs$ (662keV)	$^{241}Am \mathcal{O}$ 線 (1200keV)	
Shapergain	31 <b>倍</b>	355 <b>倍</b>	

表 3.7: 5mm 立方 BGO と井戸型 BGO アクティブシールドの光量比較における測定 条件

測定条件の異なる部分の補正を行った上で、得られた光量の比から井戸型 BGO アクティブシールドと $3 \times 3$ mm<sup>2</sup>APD を図 3.4 で示すように組み合わせた場合の  $Y_2$ を導出する事ができ、その値は 0.02580 となった。この結果より、井戸型 BGO アク ティブシールドからのシンチレーション光を APD で読み出す事が困難である事が 分かる。

よって BGO ブロック、井戸型 BGO アクティブシールド両方において、APD でのシンチレーション光読み出し効率を向上させる必要がある。



 
 ch1+ch5
 Entries
 185176 Mean
 92.1 RMS
 226.5

 80
 60
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1
 90.1

**2** 3.14:

3×3mm<sup>2</sup>APD+5mm 立方 BGO(井戸 型 BGO アクティブシールドとの比較 用:Y<sub>2</sub>=1)



# 3.2 APDとPMTの一次電子数比率YQの比較

セクション 3.1 において すざく衛星に搭載された HXD におけるアクティブシー ルドの形状として採用された BGO ブロックと井戸型 BGO アクティブシールドの Yを導出した。この結果を用いて、APD との組合せでの有用性を検証するために PMT と組み合わせた場合との一次電子数の比較をする。一次電子数とは APD、ま たは PMT がシンチレーション光を電子に変換した数のことである。ここで PMT と APD の簡単な特性比較を表 3.8 に示す。

	内部増幅	ノイズの影響	受光面積	量子効率	磁場の影響	検出器サイズ
PMT	$10^7 \sim 10^{10}$ 倍	受けにくい	大	<u> </u> 」	受けやすい	大
APD	数 10 倍	受けやすい	<u>۱</u> ۱	大	受けにくい	/]/

表 3.8: PMT と APD の特性比較

PMTと比較して、PMTにはないメリットを持ち合わせている APD であるが、その小受光面積によって、APD と比較して大きな BGO からのシンチレーション光を 読み出すことが PMT 以上に困難であることが分かっている。この問題を受けて、こ のセクションでは PMT と APD の一次電子数を比較し、当面の目標である PMT に 匹敵する一次電子数を APD で変換可能にするための考察を行う。

実際の比較方法としては、PMTと5mm 立方BGO、更に各BGOを組み合わせた 場合の光量をスペクトル測定し、PMT+各BGOのYを導出する。ちなみにPMT を用いた場合、PMTの受光面積が5mm 立方BGOの接着面より大きいためY<sub>1</sub>の値 は全ての場合で1と考える。これを一次電子数で比較するためには、APDの量子効 率QがPMTのそれの4倍であることを考慮する必要がある。ここではAPDを用 いた場合のY値を4倍にすることで、この効果を取り入れて比較した。加えて、得 られたスペクトルから実際にエネルギーthresholdとエネルギー分解能を算出して、 APDとPMTの性能比較を行う。

この検証は BGO ブロック、井戸型 BGO アクティブシールド、大 BGO プレートに おいて行う。ちなみに、§3.1.2 の時と同様に PMT+BGO ブロックにおけるデータは 私と同研究室に所属している白井氏の 2006 年度卒業論文のデータを用い、PMT+井 戸型 BGO アクティブシールドにおいては私の 2006 年度卒業論文のデータを用いる。

#### 3.2.1 実験セットアップ

PMT を用いた場合の実験セットアップを表 3.9 に示す。また、PMCA、および VME を用いた場合の信号処理回路をて図 3.16、3.17 に示す。なお、測定条件に関し てはそれぞれのセクションで記述する。

	PMT+BGO ブロック	PMT+大BGO プレート	
PreAmp	CLEAR-PULSE MODEL 580K	CLEAR-PULSE MODEL 2869	
Shaper	ORTEC MODEL 571	CLEAR-PULSE MODEL CP2914	
高圧電源	ORTEC I	MODEL 556	
ADC	PMCA	VME	
	PMT+井戸型 BGO アクティブ	゚シールド	
PreAmp	CLEAR-PULSE MODEL 2869		
Shaper	ORTEC MODEL 571		
高圧電源	ORTEC MODEL 556		
ADC	PMCA		

表 3.9: 実験セットアップ



図 3.16: PMCA によるデータ処理回路のブロック図 (PMT 使用時)



図 3.17: VME によるデータ処理回路のブロック図 (PMT 使用時)

#### 3.2.2 PMT+BGO ブロック

BGO ブロックと組み合わせた場合の APD と PMT との性能比較を行う。まずは PMT を用いた場合における Y を測定する。

測定条件について、表 3.10 に示す。この際、全ての場合において同条件で測定 した。

線源	$^{137}Cs$ (662keV)
測定温度	-30
バイアス電圧値	710V

表 3.10: 5mm 立方 BGO と BGO ブロックの光量比較における測定条件

実際に PMT を使用して 5mm 立方 BGO、BGO ブロックについて測定したスペク トルを図 3.18、3.19 に示す。測定した光量より、PMT を用いた場合での BGO ブロッ クについての光集収率 Y が導出でき、その値は 0.64 となった。各 APD と PMT の 一次電子数比較を表 3.11 に示す。ここで、PMT の一次電子数を1 として比較した。  $10 \times 10 \text{mm}^2 \text{APD}$ を用いる事によりPMTと同等の一次電子数が得られ、更に18× 18mm<sup>2</sup> APD を用いる事でPMT の約3倍もの一次電子数を獲得できる事が分かる。 しかし、APD は受光面積が増えるほどにノイズが増大するというデメリットを持つ。 そこで、測定されたスペクトルから APD と PMT のエネルギー threshold とエネル ギー分解能を導出して、それぞれのノイズ効果を調べた。PMT と各大きさの APD に ついて表3.11 に示す。エネルギー分解能について考察すると、PMT の 63.6(keV) に 対して受光面積に関わらず APD の値が悪い事が分かる。さらにエネルギー threshold について考察すると、 $3 \times 3 \text{mm}^2$  APD を除いて、APD の受光面積が大きくなると ノイズが効いてくる事が分かる。よって APD のサイズを大きくすればそれに応じ て一次電子数は増加するが、ノイズが大きくなるというデメリットな特性も出てく る。このデメリットを克服するために現在、大面積 ( $20 \times 20 \text{mm}^2$ 以上) で低ノイズ な APD を開発中である。



図 3.18: PMT+5mm 立方 BGO(BGO ブロックとの比較用:Y=1)[16]



図 3.19: PMT+BGO ブロック [16]

	$Y_1$	$Y_2$	YQ	Eth(keV)	$\Delta E(keV)$
PMT	1	0.64	1	63.6	41.3
$3 \times 3 \text{mm}^2 \text{ APD}$	0.3645	0.027	0.062	more than $458$	244
$5 \times 5 \text{mm}^2 \text{ APD}$	0.6966	0.075	0.33	152	165
$10 \times 10 \text{mm}^2 \text{ APD}$	1	0.15	0.94	151	120
$18 \times 18 \text{mm}^2 \text{ APD}$	1	0.45	2.8	276	140

表 3.11: BGO ブロックを用いた場合の PMT と各 APD の一次電子数比 (YQ)、エネ ルギー threshold(Eth)、エネルギー分解能 ( $\Delta E$ ) の比較

#### 3.2.3 PMT+井戸型 BGO アクティブシールド

井戸型 BGO アクティブシールドについて APD と PMT の比較を行う。BGO ブロックの際と同様に PMT を用いた場合における Y を測定する。

測定条件について、表 3.12 に示す。この際、全ての場合において同条件で測定 した。

線源	$^{137}Cs$ (662keV)
Shapingtime	$2\mu s$
測定温度	20
バイアス電圧値	600V
Shapergain	2500 <b>倍</b>

表 3.12: 5mm 立方 BGO と井戸型 BGO アクティブシールドの光量比較における測 定条件

実際に 5mm 立方 BGO、井戸型 BGO アクティブシールドについて測定したスペク トルを図 3.20、3.21 に示す。この際、図 3.24 のように井戸型 BGO アクティブシール ド全面からシンチレーション光を集めるためにライトガイドを井戸型 BGO アクティ ブシールドと PMT の間に挟む。この事による取得光量の理想的な増加はライトガイ ドを装着しない場合の 1.506 倍<sup>1</sup>であり、この効果を考慮する。その結果、測定され たスペクトルから導出される井戸型 BGO アクティブシールドの Y は 0.2140 となっ

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>まずライトガイドの透過率を 5mm 立方 BGO を用いて, PMT で測定した。その結果, 55.89%で あった。次に,井戸型 BGO アクティプシールドをライトガイドありなしで PMT を用いて測定し, ライトガイドありの場合の光量比を上のライトガイド透過率で割って補正して、ライトガイドありな しの光量を比較した。

た。この結果より、APD と PMT の一次電子数比較が可能となり、表 3.13 に示す。 この際、PMT の一次電子数を1 として比較した。この結果より、井戸型 BGO アク ティブシールドからのシンチレーション光を読み出す事において APD は PMT の約 2 割の一次電子数しか得られない。加えて、APD の配置と個数を変えても、現状の 問題を克服できる一次電子数を獲得できるとは考えにくい。更に、BGO ブロックの 時と同様に PMT と APD を用いた場合のエネルギー分解能を表 3.13 に示す。APD のエネルギー分解能が PMT のそれと比較して増加が顕著であることが分かる。こ のことから、井戸型 BGO アクティブシールドにおいて 2 つの検出デメリットがあ ると考えられる。このデメリットの要因として、

I. 井戸型 BGO アクティブシールド1面 (BGO プレート) が大き過ぎる

II. BGO プレート間の接合部での光吸収

が挙げられる。

この2つの要因のどちらがより顕著であるか調べるために、次のセクションで井 戸型 BGO アクティブシールド1面とほぼ同じ大きさの大 BGO プレートについて APD と PMT の一次電子数とE 分解能を比較した。



図 3.20: PMT+5mm 立方 BGO(井戸 型 BGO アクティブシールドとの比較 用:Y=1)



図 3.21: PMT+井戸型 BGO アクティブ シールド

	$Y_1$	$Y_2$	YQ	$\Delta E(keV)$
PMT	1	0.2140	1	169.9
$(3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD}) \times 5$	0.3645	0.02580	0.1758	650.8

表 3.13: 井戸型 BGO アクティブシールドを用いた場合の PMT と  $3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD} \times 5$ の一次電子数比 (YQ)、エネルギー分解能 ( $\Delta E$ )の比較

#### 3.2.4 PMT+大BGO プレート

大 BGO プレートについて APD と PMT の比較を行う。まずは PMT を用いた場合における Y を測定する。

測定条件について、表 3.14 に示す。この際、5mm 立方 BGO と大 BGO プレート の場合で異なる点として Shapergain が挙げられる。

	PMT+5mm 立方 BGO	PMT+大BGO プレート
線源	$^{137}Cs$ (662keV)	
Shapingtime	$2\mu s$	
測定温度	20	
バイアス電圧値	800V	
Shapergain	31 <b>倍</b>	17 倍

表 3.14: 5mm 立方 BGO と大 BGO プレートの光量比較における測定条件

この際、図 3.24 と同様に大 BGO プレート全面からシンチレーション光が PMT に集まるようにライトガイドを大 BGO プレートと PMT の間に挟み、その様子を図 3.25 に示す。ライトガイドによる取得光量の理想的な増加は装着しない場合の1.198 倍<sup>2</sup>であり、この効果を考慮する。その結果 PMT を用いた場合での Y を導出でき、 その値は 0.3034 となる。表 3.15 と表 3.13 において YQ 値とエネルギー分解能を比 較する。大 BGO プレートを用いた場合の YQ 値は井戸型 BGO アクティブシールド のそれの約 2.6 倍と増加している。更に、大 BGO プレートのエネルギー分解能に 関しても井戸型 BGO アクティブシールドの場合と比較してかなり改善されていて、 PMT を用いた場合のエネルギー分解能と遜色ない程である。よって、井戸型 BGO アクティブシールドから APD を用いてシンチレーション光を読み出す場合のデメ リットの主な原因は BGO プレート間の接続部における光吸収であることが分かっ た。そして改善策として、SGD に搭載する BGO アクティブシールドでは BGO を井

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>井戸型 BGO アクティブシールドの場合と同様の方法で導出した。

戸型に接着して一体型にせず、それぞれプレートあるいはブロックを1つずつ APD で読み出す予定となっている。



図 3.22: PMT+5mm 立方 BGO(大 BGO プレートとの比較用:Y=1)



図 3.23: PMT+大 BGO プレート

	$Y_1$	$Y_2$	YQ	$\Delta E(keV)$
PMT	1	0.3024	1	124.2
$3 \times 3$ mm <sup>2</sup> APD	0.3645	0.09471	0.4551	160.2

表 3.15: 大 BGO プレートを用いた場合の PMT と  $3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD}$ の一次電子数比 (YQ)、エネルギー分解能 ( $\Delta E$ )の比較



図 3.24: 井戸型 BGO アクティブシール ド、ライトガイド、PMT の装着図

図 3.25: 大 BGO プレート、ライトガイ ド、PMT の装着図

# 3.3 APD ノイズの評価

 $\S3.1$ で導出したシンチレーション光の読み出し効率 Y と同様に式 2.19、2.23 中に おいて不確定なパラメータである  $\delta_{noise}$  (keV)の評価を行い、APD 性能を定式化す る。 $\delta_{noise}$  についての詳細は評価式 2.18 で示され、その式の様々な測定環境における 正当性を検証する。

実際の検証方法としては、-30~25 の測定温度変化に対する評価式 2.18 の実験 値と理論値の比較、更に-30 での測定におけるバイアス電圧変化に対する実験値と 理論値の比較により APD の性能評価式の検証を行う。また測定温度変化について、 SGD の運用温度で予定している-20~0 を完全に網羅している。

それぞれの場合における実験値については図 3.8 で示されているブロック図にお いて、パルサーからの信号を PreAmp 部に入れることにより導出する。得られるス ペクトルから導出されるノイズ値の詳細を図 3.26 に示す。ノイズ値はパルサー信号 によるピークの FWHM となり、更にエネルギー threshold からも導出することがで きる。これはパルサーからの信号におけるエネルギー threshold とエネルギー分解 能値が APD の電気回路に起因するノイズのみで導出することができるためであり、 以下の式のように示される。APD ノイズの実験値についてはこの 2 要素を考慮に入

$$E_{\rm th} \sim 2 \cdot \delta_{\rm noise} [\rm keV]$$
$$\Delta E = \delta_{\rm noise} [\rm keV]$$



図 3.26: パルサーからの信号を示したスペクトル図(横軸:チャンネル、縦軸: カウント数)

更に理論式について、ノイズの評価式 2.18 における容量性ノイズの項は APD 固 有の値である端子間容量とその端子間容量に対して変化するプリアンプ特性の温度 依存しない 2 つの成分によって決定される。この事より、測定する環境、特に温度 に依存しないので第 2 項は様々な測定温度に対して一定であると言える。ちなみに、 このセクションではプリアンプを固定しているため以下の式により、温度変化によ る比較の場合は定数であり、バイアス電圧変化による比較の場合は各電圧における APD の端子間容量に依存した容量性ノイズが導出できる。

 $\delta_{\text{noise,C}} = 0.01825 \times ($ **端子間容量**) + 1.679 [keV]

電流性ノイズの項に関しては、 $I_n(nA)$ ・APDの内部増幅 M 共に温度、およびバイ アス電圧依存する。よって、APDの性能を定式化するためには $I_n(nA)$ ・APDゲイ ンを考慮した上での検証が必要である。ちなみに、ここでの $I_n(nA)$ とはバルク暗電 流 ( $I_{nb}$ )と表面暗電流 ( $I_{ns}$ )を足し合わせた値である。更に全ての場合において、バ イアス電圧を 300V 以上に設定しているため高ゲインとなる。そのため、表面暗電 流成分は無視することができ、以下の式で表される。

$$I_n = I_{ns} + MI_{nb} \sim MI_{nb}$$

この式を式 2.18 に代入することで実際に使用するノイズ式とし、式 3.1 となる。以下の評価ではこのノイズ式を用いる。

$$(\delta_{\text{noise}})^2 \sim (\delta_{\text{noise},I})^2 + (\delta_{\text{noise},C})^2 \sim 0.02339 I_n FM\tau + \{f(C_{\text{in}})\}^2 [\text{keV}^2]$$
(3.1)

今回はこれらの検証を $5 \times 5$ mm<sup>2</sup>APD について行った。加えて、 $10 \times 10$ mm<sup>2</sup>PD において $25 \ge 40$  における実験値と理論値の比較を行い、APD における検証結果を評価する。

### **3.3.1** 5×5mm<sup>2</sup>APDにおける検証

測定温度を変化させた場合における検証

実験セットアップと測定条件を表 3.16 に示す。ここで、-30~25 の測定温度に

実験セットアップ		
PreAmp	CLEAR-PULSE MODEL 5005H(1ch を使用)	
Shaper	ORTEC MODEL 571	
高圧電源	菊水株式会社製 直流電源	
ADC	PMCA	
パルサー	CLEAR-PULSE MODEL 9028	
測定条件		
Shapingtime	$2\mu s$	
Shapergain	80 倍	
バイアス電圧値	350V	
パルサー信号値	38	

表 3.16: 実験セットアップと測定条件

おけるノイズの実験値と評価式から導出される理論値との比較を行う。測定温度変化に依存するパラメータである暗電流 $I_n(nA)$ と APD の内部増幅 M に関して図 3.27 に各温度に対する値を示す。



この図は実験値と理論値の差が温度上昇とともに大きくなっているという現象を 示している。よって、ノイズ成分中に考察していないパラメータの存在が示唆され る。この場合、実験値と理論値との差が温度上昇に依存しているため、電流ノイズ 成分中における定数項の存在を示唆していることになる。そこで今回の測定におけ る定数項を算出し、その項を考慮に入れた。定数項を考慮に入れた場合のノイズ式 を式 3.2 に示し、その場合における実験値と理論値の比較を図 3.29 に示す。



 $(\delta_{\text{noise}})^2 \sim (\delta_{\text{noise},I})^2 + (\delta_{\text{noise},C})^2 \sim 0.02339 I_n FM\tau \times 20 + \{f(C_{\text{in}})\}^2 [keV^2]$  (3.2)

図 3.29:  $5 \times 5 \text{mm}^2 \text{APD}$  における APD ノイズの実験値と理論値の比較 (横軸:暗電流値  $I_n(\propto 測定温度)、縦軸: \text{APD} ノイズ値)$ 

この結果より、理論値は実験値を誤差10%以内でトレースしており、実験値を精度良く評価できていると言える。考慮した定数項であるが、これはAPDの内部増幅に伴う暗電流の異常増加、あるいは過剰雑音係数Fの正確な値が見積もれていないためであると考えられる。

バイアス電圧を変化させた場合における検証

まず、実験セットアップと測定条件を表3.17 に示す。ちなみに、高圧電源以外の 実験セットアップは測定温度変化における検証時と同じセットアップを用い、変化 させるバイアス電圧値は300、320、340、350、360、370、375V とした。ここで、バ イアス電圧変化に対するノイズの実験値と評価式から導出される理論値の比較を行

実験セットアップ		
高圧電源	CLEAR-PULSE MODEL 6671PP	
測定条件		
Shapingtime	$2\mu s$	
測定温度	-30	
Shapergain	100 倍	
パルサー信号値	38	

表 3.17: 実験セットアップと測定条件

う。バイアス電圧変化に依存する暗電流 I<sub>n</sub>(nA) と APD の内部増幅 M に関して図 3.30 に値を示す。







図 3.33:  $5 \times 5 \text{mm}^2 \text{APD}$  における APD ノイズの実験値と理論値の比較 (横軸:暗電流値  $I_n(\propto \text{MTPR})$ 、縦軸:APD ノイズ値)

この結果より、理論値は実験値を誤差14%以内で精度良くトレースできている。 これらの結果から、測定温度の変化、更にバイアス電圧の変化に対するAPD ノ イズ値の見積りは可能であると言える。ただし、本研究では5×5mm<sup>2</sup>APD1つに対 する評価しか行っておらず、今後は異なる5×5mm<sup>2</sup>APDや異なる受光面積を持つ APD における定数項の導出を行うことが必要である。

## **3.3.2** 10×10mm<sup>2</sup>PDにおける検証

このセクションでは §3.3.1 で考察したノイズ式の電流成分中における定数項の存 在を PD において検証する。

実際には、PreAmp に PD を装着した状態でパルサーからの信号を PreAmp 部に 入れることにより、PD ノイズの実験値を測定する。ここで実験セットアップと測定 条件を表 3.18 に示す。この測定を 25 と 40 の 2 点で行い、ノイズの変動を見る ことで定数項の存在を検証する。

実験セットアップ		
PreAmp	CLEAR-PULSE MODEL 5005H(1ch を使用)	
Shaper	ORTEC MODEL 571	
高圧電源	菊水株式会社製 直流電源	
ADC	PMCA	
パルサー	CLEAR-PULSE MODEL 9028	
測定条件		
Shapingtime	$2\mu s$	
測定温度	25 、40	
Shapergain	80 倍	
バイアス電圧値	40V	
パルサー信号値	38	

表 3.18: 実験セットアップと測定条件

# 第4章 NeXT衛星搭載予定BGOアク ティブシールドの形状を想定し た光量測定

ここでは、§2.6 で説明した SGD(図 2.25) において現在検討されている BGO アク ティブシールドで使用される BGO と APD を組み合わせた場合に発生したシンチ レーション光のどの程度が APD で読み出されるのかを検証する。更に、現在最も 広く使用されている検出器である PMT と APD の取得光量、エネルギー threshold、 エネルギー分解能を比較することで現時点における APD の有用性を検証する。

図 2.27 の上段で示された BGO は実際にアクティブシールドを構成する形状であ る。このような複雑な形状にした背景としては §3.2.4 で導出した結果から来ている。 各 BGO を接着してしまうと、その接着面においてシンチレーション光の吸収が起 こってしまい、APD での光検出量が減ってしまう。そこで、今回の SGD では BGO を細かくブロック状に分割し、各 BGO の周囲を CFRP 構造体で囲み、CFRP 同士 をネジ止めすることでアクティブシールドを組み上げる予定である。そのため BGO 間に微小な隙間ができてしまい、主検出部から外部 (宇宙) が見えてしまう事で隙間 を通過したバックグラウンドの除去が不可能となってしまう。そこで、BGO の形状 を必要に応じて入れ子構造を導入して複雑化することによってこの問題を解決して いる。また、これらの BGO からのシンチレーション光を 10 × 10mm<sup>2</sup> 以上の大面積 APD で読み出す予定である。

今回の検証ではこれらの BGO を簡略化 (図 2.27 の下段)、更に各辺を等分に約 10:3 で縮小し、似通った規模の BGO を同一のものとしてまとめた 7 種類の BGO につい て検証、考察していく (図 2.26)。ちなみに使用した APD は実際に使用する受光面 積を BGO と同じく各辺 10:3 に縮小した 3 × 3mm<sup>2</sup>APD を用いる。

この研究により、BGOの規模、および簡単な形状変化による取得光量の変化と各 BGOにおける APD の有用性を導出することで今後の BGO アクティブシールド開 発の指針となる。

62

# 4.1 BGOの大きさ、形状に依る取得光量、およびエネ ルギーthreshold、分解能の検証

ここでは各 BGO に  $3 \times 3$ mm<sup>2</sup>APD を 1 つ装着してスペクトル測定を行うことで APD の取得光量、およびエネルギー threshold、エネルギー分解能を比較する。ち なみに光量比較は全ての場合において Y<sub>1</sub> = 0.3645 となるため、Y<sub>2</sub>を導出し、比較 することで行う。使用する BGO は 7 つでそのサイズ、および APD の装着位置と放 射線の照射位置を図 4.1 に示す。図で示されているように、APD は BGO との接着 面の中央に位置し、また以降では図中のナンバーを用いることでその BGO を表す こととする。



図 4.1: 今回の検証で使用した BGO の形状、APD の装着位置、放射線の照射位置

実験手順として、まずは  $5mm \, \dot{\sigma} \, \text{BGO} + 3 \times 3mm^2 \text{APD} \, \boldsymbol{\sigma}$ 組合せで光量を測定し て基準の 1 とする。次に、BGO のみを代えて各 BGO における光量を測定し、5mm立方 BGO のセットアップとの光量比 (Y<sub>2</sub>)を導出する。更に、各組合せの場合におけ るエネルギー threshold とエネルギー分解能の値を導出し、これらの値を比較する。

ここでは全ての場合において実験セットアップ、および測定条件は同一とした。その詳細を表 4.1 に示す。

 $5mm 立方 BGO、BGO No.1 ~ 7+3 × 3mm^2 APD の組合せで測定したそれぞれの$ スペクトルを図 4.2 に示す。これらは <sup>137</sup>Cs の 662keV を照射した際のスペクトルであり、ピークチャンネルがそれらの光量と連動している。よって、これらのピークチャンネル比から Y<sub>2</sub>を導出することができ、表 4.2 に示す。更に、測定したエネルギー threshold とエネルギー分解能を図 4.3 に示す。ちなみにエネルギー分解能は全ての場合において、<sup>137</sup>Cs の 662keV を照射した際の値を用いる。

表 4.2 と図 4.3 から、BGO の各形状に依る APD の取得光量比と、それに対する エネルギー threshold、分解能値が導出できた。この結果より、光量比に依存してエ ネルギー threshold とエネルギー分解能が変動することが言え、図 4.3 を見て分かる

実験セットアップ		
PreAmp	CLEAR-PULSE MODEL 5005H(1ch を使用)	
Shaper	ORTEC MODEL 571	
高圧電源	菊水株式会社製 直流電源	
ADC	PMCA	
測定条件		
Shapingtime	$2\mu s$	
測定温度	-30	
Shapergain	300 倍	
バイアス電圧値	$350\mathrm{V}$	

表 4.1: 実験セットアップと測定条件

ように光量とそれらの関係はべき乗である。ちなみに、エネルギー threshold とエネ ルギー分解能の式はそれぞれ以下のように示される。

> (エネルギー threshold) =  $21.28 \times ($ 光量比)<sup>-0.8469</sup>[keV] (エネルギー分解能) =  $72.05 \times ($ 光量比)<sup>-0.3964</sup>[keV]

ここで、光量比にかかるべき乗の項について考察する。まずエネルギー threshold について、APD ノイズの項が効いてくるとべき乗の項は-1 に近付いてくる。また、 エネルギー分解能については-0.5~0 となってくる。このことより、上記の2式は 共に APD ノイズの項が支配的であり、APD の性能改善が直接的な検出器性能の改 善に関わってくる。BGO の形状変化による光量比 (Y<sub>2</sub>) が減少すると、エネルギー threshold、および分解能はべき乗で悪くなる。

今回の実験においても BGO の体積が小さくなるにつれて取得光量が増加してい く傾向にあり、BGO No.5 についてはその取得光量比が約 65%と比較的良い値を示 している。また、BGO No.1 については 5mm 立方 BGO を用いた場合の取得光量の 約 20%まで落ち込んだが、図 4.3 における  $Y_2 \sim 0.1$  以上の光量を取得できているた め、急激な性能悪化は見られない。

また、図 4.4 で示されるように、APD との接着面積が APD の受光面積に近くな ればなるほどおよそリニアで取得光量が増えることが考えられる。この図を用いて、 希望する光量を取得できる BGO と APD のサイズをある程度決定することができる。

加えて、同等の規模である BGO No.1 と No.4 から取得した光量に関して、それ らの体積を考慮に入れて比較すると、ほぼ同程度の光量であると考えられる。この ことから、今回比較した BGO の規模では直方体から三角柱などの簡単な形状変化 によって光量はさほど変化しないと考えられる。



図 4.2: 5mm 立方 BGO、BGONo.1 ~ 7+3 × 3mm<sup>2</sup>APD の組合せで <sup>137</sup>Cs の 662keV を照射した際のスペクトル (横軸:チャンネル、縦軸:カウント数)

	$Y_2$
5mm 立方 BGO	1
BGO No.1	0.2213
BGO No.2	0.3386
BGO No.3	0.4690
BGO No.4	0.2511
BGO No.5	0.6438
BGO No.6	0.4951
BGO No.7	0.5703

表 4.2: 5mm 立方 BGO、BGONo.1~ 7+3×3mm<sup>2</sup>APD の組合せでの 5mm 立 方 BGO との光量比 (Y<sub>2</sub>)



おいて、BGO No.1 ~ 7+3 × 3mm<sup>2</sup>APD の各組合せで測定したスペクトルの比較を 図 4.5 に示し、更にそれらのピークチャンネル、エネルギー threshold、エネルギー 分解能を比較した結果を図 4.6、4.7、表 4.3 に示す。

この結果より、ピークチャンネル、およびエネルギー threshold、分解能の全てに おいて、前回と今回では約6%以下のズレしかなく、前回の結果は非常に良い精度で あり、その値は信頼性があるということが分かった。



図 4.5: <sup>137</sup>Cs の 662keV ピークを比較したスペクトル (横軸:チャンネル、縦軸:カウント数)



ものであり、光量  $N_{ph}$  自体は BGO 毎にほぼ同等であると考えられる。これらの比較、検証を行うために、まずは 5mm 立方 BGO、BGO  $No.1 \sim 7+PMT$  の各組合せにおけるスペクトル測定を行う。

ここで、PMTを用いた場合の実験セットアップ、および測定条件を表4.4に示す。 ちなみに全ての組合せにおいて同一とする。更に、PMT は図4.1において APD を 装着した面に装着するものとし、照射位置も APD の場合と同様の場所とする。

実験セットアップ		
PreAmp	CLEAR-PULSE MODEL 2869	
Shaper	ORTEC MODEL 571	
高圧電源	ORTEC MODEL 556	
ADC	PMCA	
測定条件		
Shapingtime	$2\mu s$	
測定温度	20	
Shapergain	150 <b>倍</b>	
バイアス電圧値	800V	

表 4.4: 実験セットアップと測定条件

5mm 立方 BGO、BGO No.1~7+PMT の組合せで測定したそれぞれのスペクト ルを図 4.8 に示す。これらは<sup>137</sup>Cs の 662keV を照射した際のスペクトルである。こ の測定により、PMT を用いた場合における各性能を導出することができ、それらの 性能について APD と PMT とで比較した結果を表 4.7、図 4.9 に示す。

この結果より、PMT に対する  $3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD}$  の各一次電子数比 (YQ) が導出で き、PMT の場合の  $40 \sim 150\%$ となった。また、エネルギー threshold、およびエネル ギー分解能値においては YQ 比の向上に応じて改善された。特に、BGO No.5 ~ 7 と  $3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD}$  を組み合わせた場合の一次電子数、およびエネルギー threshold、分 解能は PMT 以上か同等であることが分かった。また逆に、BGO をブロック状にし てスペクトル測定を行った場合は APD の受光面積に対して接着面積が大きいため、 PMT に対して APD の各パラメータが悪化してしまう。

加えて、本研究で用いた SGD を簡易化した BGO と  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ APD を組み合わ せた場合のエネルギー threshold、およびエネルギー分解能値の理論値を導出する。  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ の受光面を持つ APD は実際の SGD における BGO アクティブシールド 部で用いる予定であるため、ここでは今回使用した一回り小さな BGO における性 能を検証しておく。この際、各理論値の導出には式 2.23、2.19 を用いる。また、用
いた  $10 \times 10 \text{mm}^2 \text{APD}$  の各パラメータを表 4.5 に示す。ちなみに、この検証は BGO No.1 のみに対して行い、-30 の場合を想定する。更に Y<sub>2</sub> は §4.1 で導出した値を 用いる。

$I_{n}\left( nA\right)$	0.05691
M( <b>倍</b> )	30.16
$Y_1$	1
$Y_2$	0.2213
$\delta_{\rm noise,C}  (\rm keV)$	8.696

表 4.5: 10×10mm<sup>2</sup>APD の各パラメータ

また、PMT で測定した BGO No.1 ~ 7 の各光量比 (Y) は多少バラついていること が分かる (表 4.7)。本来、PMT には各 BGO で発生したシンチレーション光が全て 入射するはずであるため、Y は 1 に近い値を示す。この原因として BGO の規模に よる BGO 内の光吸収、または BGO の劣化が考えられる。これらの原因を考慮しな い理想的な BGO を用いた場合も考慮すべく、PMT で測定した Y=0.7523 を 1 とし て APD における光量比を補正する。その結果、補正光量比 (Y'<sub>2</sub>) は <u>0.2942</u> となる。 この 2 つの場合におけるエネルギー threshold、およびエネルギー分解能の理論値を 表 4.6 に示す。ちなみにエネルギー分解能は <sup>137</sup>Cs の 662keV を照射した場合の値で ある。

<b>実際の</b> BGO における性能 (Y <sub>2</sub> )		光損失のない $\operatorname{BGO}$ における性能 $(\operatorname{Y}_2')$		
$E_{\rm th}({\rm keV})$	$\Delta E (keV)$	$E_{\rm th}({\rm keV})$	$\Delta E (keV)$	
82.95	80.87	62.39	69.56	

表 4.6:  $10 \times 10 \text{mm}^2$ APD を使用した際に想定されるエネルギー threshold(E<sub>th</sub>) とエ ネルギー分解能 ( $\Delta E$ )

表 4.6 における光損失のない BGO を考えた場合、その結果は東京工業大学の和田氏の実験結果に類似する。その測定は-20 で行い、BGO のサイズは  $30 \times 50 \times 100 \text{ mm}^2$ である。また用いた APD は  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  APD である。この実験セットアップで得られたエネルギー threshold は約 60keV、またエネルギー分解能は <sup>137</sup>Cs の 662keVを照射した場合、約 75keV となった。このことより、実際の測定においても光損失のない BGO を用いた場合の性能値が妥当であることが分かる。

更に、現行の HXD におけるエネルギー threshold 値が~50[keV] であることより、 更なる BGO、あるいは APD の改良により PMT を用いた場合の性能を上回ること が可能であると考えられる。



図 4.8: 5mm 立方 BGO、BGONo.1~7+PMT の組合せで <sup>137</sup>Cs の 662keV を照射し た際のスペクトル (横軸:チャンネル、縦軸:カウント数)

		Υ	YQ LL	$E_{th}(keV)$	$\Delta E (\mathrm{keV})$
SGD No.1	PMT	0.7523	1	36.97	83.98
	$3 \times 3 \mathrm{mm^2 APD}$	0.08066	0.4289	72.42	130.8
SGD No.2	PMT	0.8251	1	34.49	78.27
	$3 \times 3 \mathrm{mm}^2 \mathrm{APD}$	0.1234	0.5983	52.00	109.5
SGD No.3	PMT	0.8522	1	28.49	77.75
	$3 \times 3 \mathrm{mm}^2 \mathrm{APD}$	0.1710	0.8024	42.62	94.05
SGD No.4	PMT	0.6952	1	37.37	91.26
	$3 \times 3 \mathrm{mm}^2 \mathrm{APD}$	0.09153	0.5266	67.43	124.5
SGD No.5	PMT	0.6155	1	41.78	93.51
	$3 \times 3 \mathrm{mm}^2 \mathrm{APD}$	0.2347	1.525	30.73	86.68
SGD No.6	PMT	0.7379	1	36.59	90.20
	$3 \times 3 \mathrm{mm}^2 \mathrm{APD}$	0.1805	0.9783	37.84	93.95
SGD No.7	PMT	0.7113	1	38.47	90.87
	$3 \times 3 \text{mm}^2 \text{APD}$	0.2079	1.169	34.79	88.29

表 4.7: BGONo.1 ~ 7 を用いた場合の PMT との一次電子数比 (YQ 比)、エネルギー threshold( $E_{th}$ )、エネルギー分解能 ( $\Delta E$ ) の比較



## 第5章 結論

本研究では次期 X 線天文衛星 NeXT に搭載される SGD における BGO アクティ ブシールドの硬 X 線・軟ガンマ線検出について検証してきた。その1つは BGO ア クティブシールドの主要な役割となるアンチコインシデンスシールドとして、重要 な性能であるエネルギー threshold とエネルギー分解能の評価式の導出を行った。ま た、2つ目として今現在検討されている BGO アクティブシールドの形状を簡易化し た BGO と APD を組み合わせて光量、およびエネルギー threshold、分解能の評価 を行った。以下にその2つについての結果をまとめる。

- BGO は阻止能が高く、その化学的性質によって耐衝撃性に優れ、取扱いが容 易であるため、宇宙における軟ガンマ線検出に有用である。この BGO のアク ティブシールドから発されるシンチレーション光の検出部として APD の適用 が予定されている。しかし、BGO と APD を用いた検出器の正確な性能評価 は未だ成されていない。そこで本研究では測定環境、特に温度変化に対するエ ネルギー threshold 値、エネルギー分解能値の変化をトレースする評価式の導 出を行った。これらの性能評価式中で未だ確定していないパラメータは2つあ り、BGOの形状変化による光量損失を考慮したパラメータと、APDの電気回 路系ノイズである。実際にはこれら2つのパラメータを導出することで評価式 の決定を行った。前者はBGOの形状に依存するため、測定するセットアップ 毎に導出する必要があり、本研究では様々なタイプのAPDとBGOを組み合 わせた場合の値を測定により導出し、今後のパラメータ測定の指針を作った。 更に、後者の APD ノイズについては 5×5mm<sup>2</sup> APD を用いた場合での実験値 と理論値との比較を各測定温度毎に行い、実験値を精度良くトレースできた。 この際、APDの電流性ノイズ中に定数項の存在を示唆したが、この考察は異 なる APD における測定を行った上で、更なる議論が必要である。これらの理 論値を実験値と合致することにより、今後の放射線計測実験における検出器性 能の評価が格段に正確、かつ迅速になると期待され、また宇宙における検出器 性能の見積りに関しても有用である。
- SGD における BGO アクティブシールドについて、すでにアンチコインシデン スシールドとして十分に役割を果たしている X 線天文衛星「すざく」の HXD

と異なる点としてHXDで採用されているPMTと比較して小面積であるAPD への代用、更に複数のBGOを組み合わせた構造が計画されているため、BGO 形状の複雑化が挙げられる。これらの変更点を考慮に入れた上で HXD と同 等かそれ以上の性能を SGD で実現するために、検討されている各 BGO アク ティブシールドを簡易化したものを APD と組み合わせて光量、エネルギー threshold、エネルギー分解能の検証を行った。その結果、BGO の体積が大き くなるにつれて光量が少なくなりエネルギー threshold、分解能も悪くなる。し かし、PMT との一次電子数比較では最も体積の大きなBGO に対しても PMT の約40%をAPDで検出することが可能であった。また、APDとの接着面積 と APD の受光面積の相関が取得光量に関係することが分かり、光量の取得目 標を設定すれば BGO 規模と APD の受光面積の決定がある程度、可能である ということが分かった。また、今回用いた BGO 中で最も体積のあるものと  $10 \times 10 \text{mm}^2 \text{APD}$ を組み合わせた場合の性能値を評価式から予測してみると、 現行の HXD との性能比較においては多少劣っていたものの、今後の大面積か つ低ノイズ APD の開発と BGO の性能向上を考慮に入れると HXD と同等か それ以上の性能を達成することが期待される。

## 謝辞

本研究を行うとともに研究生活全般において、様々な御指導をして下さった大杉 節氏、深澤泰司氏に深く感謝を申し上げます。主に指導して下さった深澤氏に致し ましては、研究に対する物覚えが悪いため大変な労力と苦労をかけてしまったこと を深く反省し、同時にいくら感謝してもし尽くせない限りです。また、研究に関す る疑問や研究室内発表で的確な指示を与えて下さった水野恒史氏、片桐秀明氏、高 橋弘充氏、更に宇宙科学センターの山下卓也氏、川端弘治氏、植村誠氏、磯貝瑞希 氏に致しましても非常に感謝しております。宇宙に関する研究に携わり、無事に卒 業することができるのは上に挙げさせてもらいました先生方の御尽力なしではあり えなかったことと実感しております。

また、同学年である、田中琢也氏には研究面、および生活面の知恵袋として様々 なことを教えて頂き、感謝しています。誠に無礼ではありますが使いどころを間違 えている英語の口ぐせは直したほうが良いと思われます。また、白井裕久氏は半年 の自転車旅行を実行できる能力が羨ましい限りです。保田知則氏は来年度から同じ 業界に入る仲間であるので、また話でもできればと思っています。山崎智紀氏はと ても1つ上には見えない貫禄があり、常々羨んでいます。後者の御二方はとりあえ ず健康でいて下さい。これは形でもなんでもない心からの願いであります。御二方 とも厳しい職場環境でありますが、御自愛下さい。

あと、自分の研究を引き継いでくれるであろう池尻祐輝氏、期待しています。遅 くまで実験等で研究室に残っていた際、必ずと言って良い程、池尻氏がおられたこ と、非常に感謝しています。一人で実験すること程、寂しい状況はございません。ま た、来年度からの APD および、BGO に関しての知恵袋となってくれることを願っ ております。

大部屋の大野雅功氏、戸塚都氏、吉良知恵氏、田中祐行氏、西野翔氏、松井理紗 子氏、吉田広明氏、扇拓矢氏には研究や生活面に関しても非常に御世話になりまし た。自分のような唯我独尊な者の相手が非常に大変であったと推測されます。その 中で、非常に親切に接してくださった皆様には感謝し尽くせません。大野氏、今後 のますますのご活躍によって新聞等で御拝見できることを楽しみにしています。戸 塚氏、最後の数ヵ月での机の配置、非常に気まずかったです。吉良氏、自分を大切 に、これは無理だと思うことがあれば相談にのってくれる人は必ずいます。田中氏、 アニメ的な趣味はいただけません。動画を見過ぎです。西野氏、西野氏を見ている と研究に対する楽しさが滲み出ています。そのような西野氏こそ、研究職に就き、 大成できると信じています。松井氏、その天真爛漫な性格には人知れず、癒されて ました。その性格は長所であるので、どんどん伸ばして下さい。

その他、同研究室の皆様に関しましても、その時々において研究、またはその他 のことで御世話になりました。不肖ながら、今後の高エネルギー宇宙・素粒子実験 研究室の益々の発展をお祈りします。

## 関連図書

- T. Takahashi et al.,2004,Hard X-ray and Gamma-Ray Detectors for the NEXT mission New Astronomy Reviews, 48, pp. 309-313
- [2] http://www.astro.isas.jaxa.jp/ takahasi/Detectors/NeXT.html
- [3] 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 (2005)
- [4] GLENN F. KNOLL, 放射線計測ハンドブック 第3版, 日刊工業新聞社 (2001)
- [5] http://www.johncaunt.com/pages/detectors/scint\_properties.html
- [6] T. Nakamoto et al., BGO readout with photodiodes as a soft gamma-ray detector at 30 , Nucl. Instr. and Meth. A 536(2005)
- [7] http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/pdf/s8664\_series\_kapd1012j03.pdf
- [8] 斎藤孝男, 修士論文, 東京工業大学 (2006)
- [9] 浅野哲也, 卒業論文, 広島大学 (2005)
- [10] 中本達也, 修士論文, 広島大学 (2003)
- [11] http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/pdf/tech/si\_pd\_technical\_information.pdf
- T. Ikagawa et al., Performance of large-area avalanche photodiode for low-energy X-rays and -rays scintillation detection, Nucl. Instr. and Meth. A 515(2003)
- [13] Y. Yatsu et al., Study of avalanche photodiodes for soft X-ray detection below 20 keV, Nucl. Instr. and Meth. A 564(2006)
- [14] M.Moszyński et al., Large area avalanche photodiodes in scintillation and X-rays detection, Nucl. Instr. and Meth. A 485(2002)
- [15] P. P. Webb et al., Properties of Avalanche Photodiodes, RCA. Rev., Vol. 35, p.234, June 1974

- [16] 白井裕久, 卒業論文, 広島大学 (2006)
- [17] T. Takahashi et al., A Si/CdTe Compton Camera for gamma-ray lens experiment, Experimental Astronomy, Volume 20, pp. 317-331(2006)
- [18] R. J. McINTYRE et al., Multiplication Noise in Unitform Avalanche Diodes, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-13, p.164(1966)
- [19] T. Ikagawa et al., Study of large area Hamamatsu avalanche photodiode in a -ray scintillation detector, Nucl. Instr. and Meth. A 538(2005)