# NeXT衛星搭載BGOシールド検出器と アバランシェ・フォトダイオードの性能特性

和田 健介

# 卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科

# 2008年3月

#### 要旨

次世代 X 線天文衛星 NeXT は宇宙の非熱的な姿を捉えることを目標とした衛星計画で ある。その為に、波長領域が 10 keV ~ 300 keV 程度の広い領域での観測を行う。その実 現のため NeXT には 4 種類の観測装置が搭載されるが、そのうちの硬 X 線撮像システム (HXI)と軟 線検出器 (SGD)では低バックグラウンド化が重要な課題であり、それを 実現するため BGO シンチレータとアバランシェフォトダイオード (APD)を用いたアク ティブシールドの搭載が検討されている。

本論文では、このBGOアクティブシールドで用いられることが検討されている、30×50×100 mm<sup>3</sup> サイズのブロック型 BGO シンチレータと 3 種類の単素子型 APD、3×48×300 mm<sup>3</sup> サイズの平板型 BGO シンチレータと 1 次元アレー型 APD の性能評価を行い、エネルギー 閾値が最も下がる条件の検討を行った。また、ライトガイドの有無や、読み出し回路の電 荷積分増幅器の時定数、APD と電荷積分増幅器間のケーブルの長さについて性能の変化 を調べた。

ブロック型 BGO シンチレータを読み出す際には 10×10 mm<sup>2</sup>APD を用いる事でエネ ルギー閾値が最も下がり、-20 でエネルギー閾値が 27 keV、エネルギー分解能が 11.4 %という結果が得られた。平板型 BGO シンチレータを読み出す際には、1 次元アレー型 APD のもつ素子を全て読み出すことでエネルギー閾値が最も下がり、その時の値は -20

で44 keV、エネルギー閾値は18.6 %という結果が得られた。ライトガイドは長さが30 mm と50 mm のものを用いた場合に光量が6割~7割程度減少すること、これらを読み出 す際に用いるプリアンプの時定数は1 µsec 以上で行うことが望ましく5~10 µsec 程度が 適していること、同軸ケーブルは長くなると2乗に比例してエネルギー分解能が悪くなる ことがわかった。

# 目 次

第1章	はじめに	6
1.1	現在のX線天文学と非熱的宇宙	6
1.2	次世代 X 線天文衛星 NeXT	6
1.3	BGO アクティブシールドとアバランシェフォトダイオード	7
1.4	本論文の目的	8
第2章	実験装置	10
2.1	アバランシェフォトダイオード (APD)	10
	2.1.1 半導体検出器の原理	11
	2.1.2 APD の特徴と種類	13
	2.1.3 増幅率	14
	2.1.4 暗電流	15
	2.1.5 電気容量	16
	2.1.6 過剰雑音係数	17
2.2	光電子増倍管	18
	2.2.1 構造と増幅原理	18
	2.2.2 浜松ホトニクス社製光電子増倍管 R3998-100-02HA	19
2.3	BGO シンチレータ	20
2.4	電荷積分増幅器	21
第3章	シンチレータと光検出器を用いた放射線観測	<b>24</b>
3.1	読み出し回路の構造と原理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
3.2	エネルギー閾値	25
3.3	エネルギー分解能..................................	26
第4章	ブロック型 BGO シンチレータの読み出しと性能最適化	30
4.1	反射材の比較	30

4.2	PMT を用いた読み出し	33
4.3	APD <b>の集光量の変化</b>	35
	4.3.1 温度依存性	36
	4.3.2 <b>受光面積依存性</b>	37
4.4	エネルギー閾値とエネルギー分解能の変化	40
	4.4.1 エネルギー閾値の変化	40
	4.4.2 エネルギー分解能の変化	41
4.5	ライトガイドを付けた場合の変化	43
4.6	まとめ...................................	48
第5章	1次元 APD アレーを用いた平板型 BGO シンチレータの読み出しとその最 適化	19
5 1	麦子数を恋えたときの其磁性性の恋化	<b>40</b>
0.1	<ul><li>5.1.1 陪審法と容量の空化</li></ul>	-10
	5.1.1 唱電流で白重の変化 5.1.2 回路雑音の変化	51
5.2	BGO プレートのスペクトルの比較	52
5.3	まとめ	55
0.0		00
第6章	アクティブシールドの読み出し回路の条件	56
6.1	ケーブルの長さによるエネルギー閾値の変化...........	56
6.2	電荷積分増幅器の時定数を変化させたときの分解能の変化	59
6.3	まとめ	62
第7章	結論	64

# 図目次

1.1	NeXT 搭載予定の観測装置の観測可能なエネルギー領域。	7
1.2	BGO <b>アクティブシールドの</b> 写真。	9
2.1	単素子 (正方形型) の APD(S8664-55、SPL4650、SPL4653) と 1 次元 APD	
	アレー (S8664-30array)の写真。	10
2.2	半導体検出の原理。	12
2.3	各種 APD の構造と電場勾配。	13
2.4	3種類の単素子型 APD の増幅率の印加電圧依存性。	15
2.5	3 種類の単素子型 APD の暗電流の温度変化。	16
2.6	5×5 mm <sup>2</sup> APD(S8664-55) の容量の印加電圧依存性。	17
2.7	光電子増倍管の検出原理。	19
2.8	R3998-100-02HA の写真。	20
2.9	各種シンチレータの出力光子数の温度依存性。・・・・・・・・・・・・・・・	21
2.10	電荷積分増幅器の等価回路。	22
2.11	電荷積分増幅器の出力。	23
3.1	APD <b>の読み出し回路。</b>	24
4.1	APD を用いたブロック型 BGO 読み出しの実験セットアップ。	31
4.2	APD+BGO の読み出しに用いる実験器具。	31
4.3	各温度での反射材の比較。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	33
4.4	PMT を用いたブロック型 BGO 読み出しの実験セットアップ。	34
4.5	PMT+BGO <b>の読み出しに用いる実験器具。</b>	34
4.6	PMT と BGO を用いて各温度で得られたスペクトル。	35
4.7	APDとBGOを用いて各温度で得られたスペクトル。	37
4.8	4種類の異なる受光面積で得られたスペクトル。	38
4.9	横軸を印加電圧でプロットした、各温度におけるそれぞれの APD のエネ	
	ルギー閾値の変化。	41

4.10	横軸を増幅率でプロットした、各温度におけるそれぞれの APD のエネル	
	ギー閾値の変化。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	42
4.11	横軸を印加電圧でプロットした、各温度におけるそれぞれの APD のエネ	
	ルギー分解能の変化。	44
4.12	横軸を増幅率でプロットした、各温度におけるそれぞれの APD のエネル	
	ギー分解能の変化。	45
4.13	ライトガイドを用いた、ブロック型 BGO+APD の読み出しの実験セット	
	アップ。	45
4.14	本実験で用いたライトガイドの写真。	46
4.15	ライトガイドを付けた場合の、各温度におけるスペクトルの変化。	46
51	1次元 ADD マレーの容景測定と暗雲法測定のセットマップ	50
5.1 5.0		50
5.Z		51
5.3	1次元 APD アレーの回路維音変化の実験セットアップ。	52
5.4	得られたテストパルスのピーク。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	52
5.5	1 次元 APD アレー+BGO プレートを用いた測定のセットアップ。	53
5.6	1 次元 APD アレー+BGO プレートを用いて得られたスペクトル。	54
5.7	1 次元 APD+BGO プレートを用いて得られたスペクトルの横軸をエネル	
	ギーに換算したもの。	54
6.1	APD-プリアンプ間の同軸ケーブルの長さを変えたときのスペクトルの変	
	化とピーク位置の変化。	57
6.2	APD-プリアンプ間の同軸ケーブルの長さを変えたときの、エネルギー閾値	
	とエネルギー分解能の変化。	57
6.3	同軸ケーブルを加えた際の実験系の回路図。・・・・・・・・・・・・・・・・・	58
6.4	プリアンプの時定数を変化させたときの、スペクトルの変化と、ピーク位	
	置の変化。	60
6.5	プリアンプの時定数を変化させたときのエネルギー閾値、分解能の変化。	61
6.6	帰還時定数 $( au)$ を変えた場合のプリアンプ出力。	61
6.7	$ au$ を変えた場合のプリアンプ出力のうち、 $ au$ =0.5 $\mu { m sec}$ と $ au$ =0.1 $\mu { m sec}$ のプ	
	リアンプ出力を拡大したもの。	62

# 表目次

2.1	光検出器の比較。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	12
2.2	3 種類の単素子型 APD の各温度での増幅率が 50 となる印加電圧。	15
2.3	R3998-100-02HA の基礎特性。	19
2.4	シンチレータの種類と基礎特性。	20
2.5	本実験で用いた電荷積分増幅器の帰還パラメータ。	23
4.1	各温度におけるピーク位置と分解能の比較。	32
4.2	PMT で得られたスペクトルの光電ピーク位置と分解能。	35
4.3	各 APD で得られた各温度における光電ピーク位置の ADC のチャンネル数。	36
4.4	20 における光量を1とした時の、各温度における光量の比。	37
4.5	4 種類の異なる受光面積で測定した場合の光電ピーク位置と分解能。	39
4.6	ライトガイドを付けた場合の、各温度におけるスペクトルの 662 keV の光	
	電ピーク位置。	47
5.1	全ての素子を読み出した場合と半分の素子を読み出した場合の、662 keV	

の光電ピーク位置のチャンネル数、エネルギー閾値と分解能。 . . . . . . . 54

# 第1章 はじめに

## 1.1 現在のX線天文学と非熱的宇宙

1962 年に Bruno Rossi によって X 線天体が観測されたことにより幕をあけた X 線天文 学は、現在まで急速に発展をとげており、クェーサーやブラックホール、X 線星のような 高温・高エネルギー天体を発見してきた。また、そのような天体の発見を経て中性子星の 研究、X 線銀河の研究、宇宙全体の X 線放射など、物理学を大きく発展させてきた。

今までのX線天文学は主に10 keV以下の軟X線を集光結像するX線望遠鏡によって、 宇宙の熱的な姿を明らかにしてきた。しかしながら、現実の宇宙空間は完全に熱的なの ではなく、著しく非一様で非平衡、つまり非熱的である。宇宙空間では、必ずしも粒子間 でのエネルギーが等しく分配されず、低エネルギーの粒子から高エネルギの粒子がエネル ギーを奪うということも起こる。その結果、狭いエネルギー範囲の熱平衡から離れ、10 桁以上エネルギー範囲が広がった粒子群が随所に見られる。このような非熱的粒子は、広 く連続的なエネルギー分布を持っている為、熱的粒子と比べ観測が難しい。これまでのX 線天文衛星によって、激しく膨張する銀河団や線バーストなど、加速された粒子による 非熱的放射の片鱗を捉えてきた。しかしながら、10 keV 以下のエネルギー領域では熱的 放射に隠れてしまい非熱的放射を完全に見ることはできなかった。宇宙の熱的放射が影を 潜め宇宙の高エネルギー現象が姿を表す 10keV 以上の硬X線領域において、非熱的エネ ルギー源を探り、いまだ明らかになっていない宇宙の非熱的な姿を明らかにすることが、 宇宙物理学・天文学の大きな課題である。

# 1.2 次世代X線天文衛星NeXT

NeXT(Non-thermal energy eXploration Telescope) は 2010 年代初頭の打ち上げを目指 して計画が進んでいる、次世代 X 線天文衛星である。その目的は、(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うこと、(2) 静的で平衡常態の熱的宇 宙からどのような過程を経て非平衡の非熱的な宇宙が創られたのかを解明すること、であ る。この為、NeXT 衛星の観測可能なエネルギー領域として、1~300 keV 程度までの広 い領域を観測することが求められる。さらに、粒子加速の源となる天体内部の X 線プラ ズマの速度分布をより高い精度で観測するためには、検出器のエネルギー分解能を現存の CCD 検出器 (7 keV で 130 eV FWHM) と比較して 1 桁上げる必要がある。以上の事を実 現するために、NeXT 衛星には以下に示す 4 種類の観測装置を搭載することが検討されて いる。これらの観測可能なエネルギー領域を表したものを図 1.1 に示す。

- ・硬X線撮像システム(Hard X-ray Imager,HXI):数keV~80keVまでの広いエネル ギー範囲にわたって撮像観測を行う。
- 高分散軟 X 線分光撮像観測システム (Soft X-ray Spectrometer,SXS): 0.3 keV~10 keV で優れたエネルギー分解能で分光、撮像を行う。
- 軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector,SGD): 300 keV までのエネルギー範囲にしぼり、特に100 keV 前後で HXD を一桁上回る感度を持つことを目標とする。



図 1.1: NeXT 搭載予定の観測装置の観測可能なエネルギー領域。青が SXS、緑が SXI、 赤が HXI、黒が SGD である。

# 1.3 BGOアクティブシールドとアバランシェフォトダイオー ド

NeXT 衛星に搭載される HXI では、宇宙線が直接検出器と反応したり、衛星や検出機器の周辺で反応を起こした結果生成される2次X線などによるバックグラウンドが感度を決定する。したがって検出器の大幅な低バックグラウンド化が課題になる。同様に、SGD では100 keV 前後でバックグラウンドを大幅に下げることで HXD の感度を1桁上回るこ

とが課題である。この2つの検出器の低バックグラウンド化に為に計画されているのが、 BGO シンチレータとそれを読み出すアバランシェフォトダイオード (APD) で構成される アクティブシールドである。HXI と SGD に用いる BGO シンチレータの写真を図 1.2 に 示す。

BGO アクティブシールドの目的は、開口角を狭め Diffuse 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 等のバックグランドを抑えることである。NeXT 衛星は軌道上でプラジル上空の地磁気異 常帯を通過する。そこには、地磁気に束縛された高エネルギーの陽子が密集しており、通 過する際にそれらが検出器を構成する物質と原子核反応を起こし、検出器内に多量の放射 性同位体を生成する。それらの放射性同位体が崩壊する際に放出されるβ線や 線は、コ ンプトン散乱されると天体からではないバックグラウンドとして検出される。このような バックグラウンドの除去は、シールドをアクティブにし反同時計数をとることで可能にな る。また、HXIで観測する硬 X 線領域ではコンプトン散乱の断面積が大きいので、シー ルドはパッシブなものでは効果が薄い。シールド内でエネルギーを失い内部の検出器に入 る 線のようなバックグラウンドも内部の検出器と反同時係数をとることで除去が可能 になる。SGD では、コンプトンカメラから逃げ出す光子等を同定して除去する役割があ る。また、NeXT 衛星の軌道では低エネルギーの陽子も多いため、1 cm 程度の厚みを持 つBGO シンチレータをシールドとして用いるだけでも、バックグラウンドを低減する効 果がある。

読み出しに APD を用いることにより、光電子増倍管を用いるよりも検出器全体のサイズを小さくできるほか、BGO からのシンチレーション光に対する量子効率が格段にあがることが期待される。

## 1.4 本論文の目的

本論文では、NeXT 衛星に搭載予定の BGO アクティブシールドと APD の性能評価を 行う。また、読み出し回路についても考察を行い、より低エネルギーで読み出すことので きる条件の検討を行う。



図 1.2: HXI と SGD に用いることが検討されている BGO アクティブシールド。左側が HXI、右側が SGD。

# 第2章 実験装置

# 2.1 アバランシェフォトダイオード(APD)

HXIとSGDのアクティブシールドとなるBGOシンチレータからの読み出しは、アバ ランシェフォトダイオード (Avalanche Photodaiode、以下 APD)の使用が検討されてい る。APD は内部に増幅機能をもつ半導体検出器である。検出器内部で信号を増幅するこ とができるため、回路内で発生する雑音を相対的に増幅した分だけ抑えることができ、通 常のフォトダイオードよりも高いS/N比が得られる。

本論文では浜松ホトニクス社製 APD のうち、5×5 mm<sup>2</sup> の受光面を持つ S8664-55(以下 5×5 mm<sup>2</sup>APD)、10×10 mm<sup>2</sup> の受光面を持つ SPL4650(以下 10×10 mm<sup>2</sup>APD)、18×18 mm<sup>2</sup> の受光面を持つ SPL4653(以下 18×18 mm<sup>2</sup>APD) という 3 種類の単素子型の APD の 比較を行った。また、直径が 3 mm の円形の APD が直線上 11 個ならんだ 1 次元 APD ア レー (S8664-30array)を平板型 BGO の読み出しに用いることを検討しており、その性能 評価も行った。それぞれの写真を次の図 2.1 に示す。



図 2.1: (左図) 単素子 (正方形型) の APD の写真。左から S8664-55、SPL4650、SPL4653。 (右図)1 次元 APD アレー (S8664-30array) の写真。

本項では、最初に一般的な APD の原理、特徴について述べた後、実験で用いる 4 種類の APD の特性や性質について詳しく述べる。

#### **2.1.1** 半導体検出器の原理

APD は半導体検出器であるので、その読み出しの原理はn型半導体、p型半導体を接合させた簡単なモデルで近似的に考えることができる。

結晶中の電子は周期的ポテンシャルを受けており、その影響からエネルギー準位は低準 位側の荷電子帯と高準位側の伝導帯にわかれる。そのふたつの準位の間には、電子の存在 できない禁止帯ができる。荷電子帯の電子は熱や光等のエネルギーによって伝導帯へ励起 され、このとき荷電子帯は電子が一つ抜けた状態になる。電子が抜けた部分はホール(正 孔)と呼ばれる穴になり、そこに電子が入ることで荷電子帯の中をホールが移動し、正電 荷のように振る舞う。禁止帯のバンド幅は小さく、シリコン半導体では1.2 eV である。典 型的なシンチレーション光は3~4 eV のエネルギーを持っており、荷電子帯の電子を励起 させるのに十分である。

放射線計測では、半導体内部に光や放射線が入ることで生成された電子とホールを電場 をかけることで両端に移動させ、そこから得られる電流を信号として読み出す。真性半導 体では電圧を印加すると熱電子が多く発生してしまうため、信号となる電流を読み出す のが困難である。そのため、実用的な半導体検出器は、真性半導体に価数の多い不純物原 子を加えたn型半導体と、価数の少ない不純物原子を加えたp型半導体を接合して作ら れる。そのような半導体はpn型半導体と呼ばれ、その接合面では電子と正孔が互いに打 ち消しあうため、空乏層と呼ばれる電荷の存在しない領域ができる。空乏層には閉殻原子 核のみが残り、両側は電子が多く存在する側とホールが多く存在する側に別れるため、空 乏層には電場勾配ができる。そこに放射線や光が入ると、そのエネルギーに比例した量の 電子・ホールペアができ、それらはそれぞれ正の電極、負の電極に移動し収集される。こ のpn 半導体の両側に逆バイアスをかけることで両側にあった電子とホールはさらに外側 に移動するため空乏層が広がり、より広い範囲で放射線や光が検出できるようになる(図 2.2)。

半導体検出器の大きな特徴は量子効率が高いことである。これにより、シンチレータからの光を高い確率で電荷に変換することができる。したがって原理的には光電子増倍管と 比べて良いエネルギー分解能が得られる。また、そのほかに光電子増倍管印加電圧と比べて(1)数十 V~数百 V と低電力で動作可能である、(2) コンパクトで頑丈であるなどの優れた性質がある。

半導体検出器の具体例の一つがフォトダイオードである。通常のフォトダイオードは、シンチレーション光を電子・ホールペアに変換したあと、増幅せずに信号として出力する。

11



図 2.2: (左図)p-n 型半導体のバンド構造。(右図) 半導体検出器の構造。

それゆえ信号がとても小さく、検出器から出力された信号は回路内で発生した雑音によっ て容易に歪んでしまうため、量子効率が高くても光電子増倍管より性能が劣ってしまう。 APD は内部に増幅機能を持つことで相対的に回路雑音を小さく抑えることができ、通常 のフォトダイオードよりもはるかに優れた S/N 比を得ることができる。APD は高い増幅 率を持つ光電子増倍管と、高い量子効率を持ったフォトダイオードの両方の長所をもって いる。表 2.1 に各光検出器の特徴を示す。

	光電子増倍管	フォトダイオード	APD
量子効率	≤35 <b>%</b>	≥80 <b>%</b>	≥80 %
増幅機能	(~10 <sup>6</sup> 倍)	× (無し)	(~100 倍)
印加電圧	${\sim}1000~{\rm V}$	$\leq 100 \text{ V}$	$\sim 400 \text{ V}$
容積	× (大)	(\J\)	(小)
磁場の影響	× (大)	(۱ <b>۱</b> ۷)	(小)
構造	× (複雑)	(単純)	(単純)
消費電力	× (大)	(/[/)	(小)

表 2.1: 光検出器の比較。

#### 2.1.2 APD の特徴と種類

現在開発されている APD には、その構造の違いによって (a) 斜めエッジ型 (bevelededge)、(b) リーチスルー型 (reach-through)、(c) リバース型 (reverse-type) の3種類の APD が存在する (図 2.3)。全ての種類の APD で共通する点は、内部に非常に強い電場領域が 存在することである。光電効果で励起された電荷キャリアがこの強い電場領域に入ること で加速され、衝突電離を起こす。この衝突電離によって生まれた電荷がまた同様に衝突電 離を起こす、というようにして次々と電荷が生成され雪崩 (アバランシェ) 増幅を起こす。 これが、他の半導体検出器と異なる APD の特徴である。信号を内部で増幅させると回路 内で発生する雑音を相対的に小さくできるため、通常のフォトダイオードと比べ優れた S/N 比が得られる。



図 2.3: 各種 APD の構造と電場勾配。(a) 斜めエッジ (beveled-edge)、(b) リーチスルー (reach-through)、(c) リバース型 (reverse-type)。

本論文で用いる APD は全て reverse-type の APD である。reverse-type APD はシンチ レーション光の検出に特化するよう改良されたもので、受光面のすぐ後ろ、5  $\mu$ m 程度の 深さに狭い増幅領域が存在する。一般的なシンチレータの出力波長は500 nm よりも短く、 シンチレーション光は受光面から 1~3  $\mu$ m のところで電子・ホールペアが形成されるの で、得られた電子・ホールペアは完全にこの領域で増幅される。増幅領域を表面に持って くることで、ドリフト領域 (雪崩増幅を起こす程強い電場のかかっていない部分。生じた 電荷を高速で移動させる。) で発生する熱励起電子を増幅させずに済むため、他の APD と比べて暗電流を低く抑えることができる。また、空乏層の厚さが~40  $\mu$ m と薄く、動作 電圧が 300 V~400 V 程度と、光電子増倍管の動作電圧 (~ 1000V) に比べて低電圧で十分 な増幅率が得られる。

#### 2.1.3 増幅率

電子及びホールは APD の増幅領域において増幅されるので、増幅によって生じる信号 は電子の増幅とホールの増幅を重ね合わせたものになる。電子とホールの単位長さあた りの電離確率を $\alpha,\beta$ とし、光子の入射位置からの距離xにおける信号の増幅率M(x)は、 ホールの電子に対する電離確率 $k_0$ と単位長さあたりの電離確率の重み付き平均 $k_1$ を用い て次のように書ける。

$$M(x) = \frac{1 - k_1}{\exp[-\delta(1 - k_0) - k_1]}$$
(2.1)

ここで、

$$\delta = \int_0^x \alpha dx \tag{2.2}$$

$$k_0 = \frac{\int_0^x \beta dx}{\int_0^x \alpha dx} \tag{2.3}$$

$$k_1 = \frac{\int_0^x \beta M(x) dx}{\int_0^x \alpha M(x) dx}$$
(2.4)

である。電子に対するホールの電離確率が大きくなれば $k_0 \ge k_1$ は増加する。増幅領域の 電場を大きくすると $\alpha,\beta$ は大きくなるので、印加電圧を大きくすると増幅率は増加する。  $\beta > 0$ であるから、増幅率をあげていくとM(x)は際限なく増加してしまい、APD はある 印加電圧 (降伏電圧)に達すると絶縁破壊をおこす。ホールの電離確率は電子よりも非常 に小さく、 $k_0 \sim 0.01$ 程度であるので、ホールの増幅率は電子の増幅率の数%以下になる。

低温にすると半導体中の原子の熱運動が抑制されるため、電子が加速中に散乱されにく くなり、より効率的に加速される。これによって電子やホールは電離しやすくなるため、 低温では同じ電圧でも常温時より高い増幅率が得られるようになる。また、これにより降 伏電圧も下がるので、低温では高電圧でおこる絶縁破壊が起こりやすくなる。

本論文で用いる3種の単素子型APDの増幅率の印加電圧依存性を図2.4 に示す。また、 各温度、各APDにおける増幅率が50になる印加電圧は次の表2.2のようになる。印加電 圧が低いと内部増幅がおこらず増幅率は1のままであるが、100 V 付近からは指数関数的 に増幅率が大きくなる。また、素子の面積が広くなる程同じ増幅率を得るのに高電圧が必 要になる。



図 2.4: 3 種類の単素子型 APD の増幅率の印加電圧依存性。左が 5×5 mm<sup>2</sup>APD(S8664-55)、右上が 10×10 mm<sup>2</sup>APD(SPL4650)、右下が 18×18 mm<sup>2</sup>APD(SPL4653) を表す。ま た、赤が 20 の場合、緑が 0 の場合、青が -20 の場合である。

	20	0	-20
$5 \times 5 \text{ mm}^2$	371 V	$356 \mathrm{V}$	341 V
$10 \times 10 \text{ mm}^2$	385 V	369 V	351 V
$18 \times 18 \text{ mm}^2$	419 V	402  V	388 V

表 2.2: 各温度、各 APD における増幅率が 50 となる印加電圧。

#### 2.1.4 暗電流

暗電流はAPDから定常的に流れ出している電流であり、回路雑音の主な原因の一つとなっている。暗電流は主に熱励起によって定常的に生成される電子・ホールペアによって発生し、APDの表面に発生する表面暗電流と半導体内部で発生するバルク暗電流にわけられる。表面暗電流は増幅領域を通らないため増幅されることはないが、印加電圧に依存し高電圧になるほど増加する。バルク暗電流はAPDの内部で発生するため増幅領域で増

#### 幅率に比例して増加する。

暗電流の原因は熱励起による電子・ホールペアの生成であったため、低温にすると熱励 起が起こりにくくなり暗電流は低くなる。本実験で用いる APD のうち、5×5 mm<sup>2</sup>APD、 10×10 mm<sup>2</sup>APD、18×18 mm<sup>2</sup>APD の暗電流について各温度で調べたものを図 2.5 に示 す。これより、温度を 20 下げるごとに、各 APD で暗電流がほぼ 1/10 になることがわ かる。-20 では 20 の時と比べて暗電流がおよそ 1/100 になり、殆ど無視できるよう になる。



図 2.5: 暗電流の温度変化。左が 20 、右上が 0 、右下が -20 のおける暗電流を表 し、赤が S8664-55、緑が SPL4650、青が SPL4653 を表す。

#### 2.1.5 電気容量

APD の電気容量が大きいと容量性雑音として回路雑音を増加させる原因になる。電気 容量は空乏層が薄いと大きくなるため、印加電圧を加え空乏層を厚くしていくと、容量が 小さくなり容量性雑音が減少する。印加電圧を変化させた時の 5×5 mmAPD<sup>2</sup> の容量の変 化を図 2.6 に示す。APD の容量は印加電圧を高くしていくと一定値に近付く。



図 2.6: 5×5 mm<sup>2</sup>APD(S8664-55)の容量の印加電圧依存性。

5×5 mm<sup>2</sup>APD、10×10 mm<sup>2</sup>APD、18×18 mm<sup>2</sup>APD の増幅率が 50 となるときの容量 は、浜松ホトニクス社の仕様書 (e.g.,Ref「浜松ホトニクス社個体事業部検査成績書 (2006)) によれば、それぞれ 25 で、80 pF、257 pF、811 pF となる。これらの比を取ると、1: 3.2:10.1 となる。ここで、APD の面積の比は 1:4:13 となるのでこれらの値は近い値 をとっており、APD の容量と受光面積はおよそ

$$(容量) \propto (受光面積) \tag{2.5}$$

という関係があると考えられる。容量は温度に依存せず、常温では回路雑音として暗電 流性雑音が容量性雑音に比べて相対的に大きくなるが、低温時では容量性雑音が大きく なる。

#### 2.1.6 過剰雑音係数

雪崩増幅は確率過程であるため増幅率は一定ではなく、実際はある程度のゆらぎを持っている。過剰雑音係数 F は増幅率のゆらぎを表す値であり次の式で表される。

$$F = \frac{\langle m^2 \rangle}{\langle m \rangle^2} = \frac{\langle m^2 \rangle}{M^2}$$
(2.6)

通常のフォトダイオードのような増幅機能の持たない検出器では $F \simeq 1$ 、光電子増倍管で は $F \simeq 1.2$ 程度である。APD は電子だけでなくホールも増幅するため、それぞれの過剰 雑音係数を考える必要があり、それぞれ $F_{\rm e}$ , $F_{\rm h}$ とおく。ここで次に示すような電離確率の 重み付き平均  $k_2$  を

$$k_2 = \frac{\int_0^x \beta M^2 dx}{\int_0^x \alpha dx} \tag{2.7}$$

とおくと、 $F_{e}$ , $F_{h}$  は次のように書ける ([1])。

$$F_{\rm e} = k_{\rm eff} M + (2 - \frac{1}{M_{\rm e}})(1 - k_{\rm eff})$$
(2.8)

$$F_{\rm h} = k_{\rm eff} M + (2 - \frac{1}{M_{\rm h}})(1 - k_{\rm eff})$$
 (2.9)

ここで

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_2 - k_1^2}{1 - k_2} \approx k_2$$
 (2.10)

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\text{eff}}}{k_1^2} \approx \frac{k_2}{k_1^2}$$
 (2.11)

である。

これより過剰雑音係数は k<sub>2</sub> が最小の時に小さくなる。k<sub>2</sub> は電子の単位長さあたりの電 離確率に比ベホールの電離確率が小さくなれば小さくなる。したがって、過剰雑音係数は 電子に対するホールの電離確率で決まり、それが十分低ければ増幅のゆらぎを抑えること ができる。シリコンは電子に対するホールの電離確率が低いので、APD にはシリコン半 導体が多く用いられている。

### 2.2 光電子増倍管

光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube、以下 PMT) は、光電効果を利用して光エネル ギーを電気エネルギーに変換する光電管を基本に、電流増幅(=電子増倍)機能を付加し た高感度光検出器である。

#### 2.2.1 構造と増幅原理

一般的な光電子増倍管の構造を図 2.7 に示す。光電子増倍管は光電陰極と呼ばれる感光 層と増幅を行う電子増倍管の 2 つで構成されており、電子増倍管は 8~10 段程度のダイ ノードと増幅された電子を読み出すアノードで構成されている。使用時には光電陰極と アノードの間に 1000~2000 V の電圧をかける。光電陰極に入った光子は光電効果により 光電子を生み出す。ここで、(生成された光電子数)/(入射光子数)の値を量子効率と呼ぶ。 この光電子は電場により加速され、ダイノードに入ると多くの 2 次電子を生み出す。生み 出された 2 次電子が次のダイノードに同様にして引きよせられ加速し、2 次電子を生み出 す。このプロセスを繰り返すことで信号を増幅する。ダイノード上で1 つの電子がδ 個の 2次電子を生み出すとすると、10段ダイノードがある光電子増倍管であれば $\delta^{10}$ 倍だけ電子を増幅できる。また、光が入ってくる部分は光電面と呼ばれる。光電面は材質によって受光できる光の波長が異なるため、用途に応じて適切な光電面をもった PMT を使わなくてはならない。



図 2.7: 光電子増倍管の検出原理。

#### 2.2.2 浜松ホトニクス社製光電子増倍管 R3998-100-02HA

シンチレーションカウンティングによる放射線計測で用いる PMT は、シンチレータの 発光波長に対応した光電面をもつものを選ぶ必要がある。その際に用いられるのは、主 にバイアルカリと呼ばれる2種類のアルカリ金属で構成された光電面である。バイアルカ リの光電面で受光できる光の波長域は約300 nm ~ 650 nm、本実験で用いる BGO シンチ レータの出力波長は480 nm であるから、バイアルカリの受光可能波長域と対応している。

本実験で用いる浜松ホトニクス社製光電子増倍管 R3998-100-02HA の光電面の材質は、 バイアルカリと同じ材質を用い、検出できる光の波長も同じまま量子効率を1.5 倍にあげ た、スーパ - バイアルカリという材質である。このため、バイアルカリ製の PMT よりも 高精度の測定が可能となっている。

R3998-100-02HAの基礎性能を表 2.3 に、R3998-100-02HAの写真を図 2.8 に示す。

	管経	<b>量子効率</b> @ 400 nm	増幅率 @ 1000V
R3998-100-02HA	φ28	33 <b>%</b>	$1.5 \times 10^{6}$

表 2.3: R3998-100-02HA の基礎特性。



図 2.8: R3998-100-02HA の写真。

# 2.3 BGOシンチレータ

シンチレータとは放射線を吸収したときにそのエネルギーに比例した量の光(シンチレーション光)を発生させる装置で、これに APD や PMT のような光検出器をとりつけることで放射線計測を行う。BGO シンチレータは様々な種類のある無機シンチレータの 一種であり、NeXT 衛星でアクティブシールドとして搭載される他、すざく衛星にもアクティブシールドとして搭載されその有用性が示されている。

表2.4は、各種シンチレータの基礎特性の典型値を示したものである。BGOシンチレー

	BGO	CsI(Tl)	NaI(Tl)	YAP(Ce)	GSO(Ce)
<b>密度</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	7.1	4.5	3.7	5.6	6.7
有効原子番号	74	54	50	35	60
出力波長 [nm]	480	550	415	350	430
減衰時定数 [nsec]	300	1000	230	27	60
出力光子数 [個/keV]	8-10	61	38	18	10
潮解性	なし	若干あり	あり	なし	なし

表 2.4: シンチレータの種類と基礎特性。

タは他のシンチレータと比べて有効原子番号が大きく密度も高い為、阻止能が高く、単位 体積あたりの放射線の光電吸収率が高い。これより、視野以外からの放射線を確実に阻 止し検出することが必要となるアクティブシールドのシンチレータとして、BGOシンチ レータは最も適しているということができる。また潮解性が無く取扱いが容易であるた め、人工衛星搭載用のシンチレータとしても適している。また、 図 2.9 より、BGO シン チレータは低温にすると出力光子数が増加することがわかる。



Fig. 3.3 Temperature dependence of the scintillation yield of Nal(TI), Csl(Na), Csl(TI) and BGO.

図 2.9: 各種シンチレータの出力光子数の温度依存性。

BGO のシンチレーション光は、結晶の主成分である Bi<sup>+3</sup> イオンの光学的遷移によるも のである。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。この点も、アクティブシールドで用いるシン チレータとして適している点である。

本実験では、全面研磨された  $30 \times 50 \times 100 \text{ mm}^3$  のブロック型、 $3 \times 48 \times 300 \text{ mm}^3$  プレート型、 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  の立方体型の計 3 種類の BGO シンチレータを用いた。

### 2.4 電荷積分増幅器

電荷積分増幅器は検出器からの出力を積分することで雑音を減らすと同時に、増幅機能 によって信号を増幅し、得られる出力のS/N比をあげる働きがある。電荷積分増幅器の 回路図は図 2.10のようになる。

Aをオペアンプの利得、 $C_{\rm f}$ を帰還コンデンサの容量、 $R_{\rm f}$ を帰還抵抗とし、APDの持つ 容量とケーブル等が持つ浮遊容量を合わせて $C_{\rm in}$ とする。プリアンプの入力電圧を $V_{\rm in}$ 、



図 2.10: 電荷積分増幅器の等価回路。

プリアンプからの出力電圧を $V_{out}$ とすると、 $V_{in}$ と $V_{out}$ の間には次の関係がなりたつ。

$$V_{\text{out}} = -AV_{\text{in}} \tag{2.12}$$

 $R_{\rm f}$ は十分大きい為、入力電荷 $Q_{
m in}$ はすべて $C_{
m f}$ に入ると考えると $C_{
m f}$ について次の式が成り立つ。

$$(V_{\text{out}} - V_{\text{in}})C_{\text{f}} = Q_{\text{in}} - V_{\text{in}}C_{\text{in}}$$

$$(2.13)$$

式 2.12 を用いて式 2.13 を変形し、Vout について解くと次のようになる。

$$V_{\text{out}} = \frac{AQ_{\text{in}}}{C_{\text{f}}(A+1) + C_{\text{in}}}$$
(2.14)

オペアンプの利得は非常に大きい為  $(A \gg 1000)$ 、 $A \gg (C_{\rm in} + C_{\rm f})/C_{\rm in}$ を仮定するとプリアンプの出力電圧は  $V_{\rm out} \simeq -Q_{\rm in}/C_{\rm f}$ となり検出器の容量に依存しなくなる。

基本的な電荷増幅器は図 2.10 において  $R_{\rm f}$  がないものである。 $R_{\rm f}$  がない時、入力として電荷  $Q_{\rm in}$  があたえられると出力は図 2.11 の (a) のようになる。しかしこの状態のまま電荷が続けて入ってくると、図 2.11 の (b) のように階段状に増加し、いずれは増幅器の持つ有効出力範囲を越えてしまう。これを防ぐために  $R_{\rm f}$  を  $C_{\rm f}$  と並列に接続する。これにより、 $C_{\rm f}$  に溜った電荷を徐々に放電することが可能となるので、立て続けに電荷が入り出力電圧が有効出力範囲を越えるというこが防ぐことができる。このときの出力は図 2.11 の (c) のようになる。

電荷積分増幅器に入った入力電圧は $\exp(-t/\tau)$ で減衰する。ここで $\tau$ は電荷積分増幅器の出力が減衰する時間(減衰時定数)を表し、 $\tau = C_{\rm f} \times R_{\rm f}$ で与えられる。時定数が長いと、短い時間間隔で立て続けに電荷が入ったときに $R_{\rm f}$ を入れない場合と同じように階段



図 2.11: 電荷積分増幅器の出力。(a) は  $R_{\rm f}$  をつながない場合、(b) は  $R_{\rm f}$  をつながない場合に信号が連続に入った場合、(c) は  $R_{\rm f}$  をつないだ場合。

状に出力が増加し有効出力範囲を越えて飽和してしまうため、減衰時定数は入力される信 号の単位時間あたりの数(入力レート)に合わせて決定しなくてはならない。

本実験で用いる電荷積分増幅器は、クリアパルス社製電荷有感型前置増幅器 595H 型、 581K 型と同社製 557 型 8 チャンネル前置増幅器の 3 種類である。表 2.5 にそれらの C<sub>c</sub>、 C<sub>f</sub>、R<sub>f</sub>の値を示す。

	Cc	$C_{\mathbf{f}}$	$R_{\mathrm{f}}$	
595H <u>型</u>	6.8 nF	1 pF	$1 \ \mathrm{G}\Omega$	
581K 型	2.2 nF	0.5 pF	$5 \ \mathrm{G}\Omega$	
557 <b>型</b>	10 nF	56 pF	$280 \text{ K}\Omega$	

表 2.5:本実験で用いた各電荷積分増幅器の帰還パラメータ。 $C_c$ は電荷積分増幅器内の カップリングコンデンサの容量。ただし 595H 型は $C_f$ 、 $R_f$ は付け変えが可能な為、初期 のものを示した。

23

# 第3章 シンチレータと光検出器を用いた

# 放射線観測

本章では、まず始めにAPDの読み出し回路について説明し、その後に検出器系の性能 を決めるエネルギー閾値とエネルギー分解能について述べる。

# 3.1 読み出し回路の構造と原理

APD を用いた放射線観測には図 3.1 のような回路を用いる。検出器と高電圧電源の間には、信号が高電圧電源側に流れないよう高抵抗を挿入する



図 3.1: APD の読み出し回路。

放射線がシンチレータに入ると、シンチレータはそれに比例した量の光子を出す。それ がAPDに入射すると、光電効果によりAPDの空乏層内で入力光子数に比例した量の電 子・ホールペアが生じる。このうちの主に電子が増幅領域において雪崩増幅を起こしてカ ソードに到達し、結果としてAPDの出す信号となる。ここで得られる電荷の総数を*Q*<sub>in</sub> とする。

C<sub>c</sub>はカップリングコンデンサであり、検出器で生じた電荷はこれを介して電荷積分増 幅器に注入される。コンデンサは直流電流は遮断し交流電流は通すため、APDの信号の みを通すことが可能になる。カップリングコンデンサの容量が小さいと、検出器で生じた 電荷を完全に貯める事ができないため、この容量は大きめに設定される。

プリアンプに $Q_{in}$ が入ると、 $V_{out} \simeq -Q_{in}/C_f$ にしたがって電荷は電圧に変換される。 プリアンプから出力された信号は波形整形器で再度増幅され、選択した時定数で整形される。この際の増幅率は任意に調節することができる。波形整形器は、バンドパスフィルターとしてS/N比を改善させる役割を持つ。このとき、波形整形器の出力は入力をほぼ線形に増幅して得られる。

波形整形器から出力された信号は Analog Digital Converter(以下 ADC) に入る。ADC は 10 V を下から 0 チャンネル ~ 1023 チャンネル まで 1024 等分することにより、電圧 として入ってくるアナログ信号をデジタル信号に変換する役割を持つ。つまり ADC の 1 チャンネルは約 10 mV である。得られた信号はその電圧に応じたチャンネル数に変換さ れ PC で読み出す事が可能になる。ゆえに、10 V を越える信号は読み出すことができな い為、波形整形器で 10 V 以下の信号に変換することが必要になる。デジタル信号になっ た信号は PC でスペクトルとして得られる。

以上より、パソコン上で得られるチャンネルは Q<sub>in</sub> と次の関係にあることがわかる。

channel 
$$\propto Q_{\rm in}$$
 (3.1)

Q<sub>in</sub>はAPDの入射光量と比例しているので channel 数は光量と比例していることがわかる。したがって、シンチレータから APD に入射する光の量(光量)を比較する際には、波形整形器の増幅率を一定にして、同じエネルギーを持つ放射線の光電ピークの位置を比較すればチャンネルをエネルギーに変換することができる。

## 3.2 エネルギー閾値

エネルギー閾値は、検出器が検出可能なエネルギーの下限であり、この実験では特に BGO アクティブシールドから得られるエネルギー範囲を知るために必要となる。エネル ギー閾値を決めるのは、読み出し回路の持つ雑音(回路雑音)と光量である。回路雑音が 大きければ、低エネルギー側の信号はそれに埋もれて見えなくなる。光量が大きくなれ ば、スペクトル中で回路雑音の占める割合が相対的に小さくなる為、低エネルギー側の信 号でも見えるようになる。以下では、まず回路雑音について述べた後、エネルギー閾値の 定義について述べる。 回路雑音の原因は、電子の熱運動に由来する熱雑音、生成される電子・ホールペア数が 統計的に揺らぐことに由来するショット雑音、半導体に固有で、不純物原子のランダム運 動や構造に由来し、エネルギースペクトルが周波数に反比例する 1/f 雑音であるが、APD の読み出し回路で生じる雑音は、暗電流性雑音と容量性雑音という 2 つの部分にわけら れる。暗電流性雑音は APD の表面暗電流とバルク暗電流の和で与えられ、容量性雑音は APD のもつ容量とプリアンプの入力容量の和で与えられる。これら 2 つの線形和が、観 測される回路雑音である。

回路雑音  $\delta_{noise}$  は信号電荷と比較すべき量として、電荷を単位として次の式で表される ([14])。

$$\delta_{\text{noise}}^2 = 2q_{\text{e}}(I_{\text{ds}}/M^2 + I_{\text{db}}F)\tau a_1 + 4kTR_{\text{s}}(C_{\text{tot}}^2/M^2)(1/\tau)a_2$$
(3.2)

ここで、 $q_{in}$ は電子の電荷、 $I_{ds}$ はAPDの表面暗電流、 $I_{db}$ は半導体の内部で発生するバルク暗電流、Fは過剰雑音係数、MはAPDの増幅率、 $\tau$ はプリアンプの時定数、kはボルツマン定数、Tは絶対温度、 $R_s$ はプリアンプのノイズ、 $C_{tot}$ はAPDとプリアンプの容量と回路の浮遊容量の和、 $a_1 \ge a_2$ はメインアンプの整形関数による無次元の係数を表す。

式 3.2 の第1項は暗電流性雑音の2乗を表し、第2項は容量性雑音の2乗を表す。式 3.2 より、暗電流性雑音はプリアンプの時定数に比例し、容量性雑音は反比例する。

#### エネルギー閾値の定義

エネルギー閾値は、定量的に評価するために、照射する線源の種類やバックグラウンド の環境によって適切に定義されるものである。本論文では雑音スペクトルを指数関数で フィッティングし、カウントレートが1 count/sec となる値と定義した。ここで、雑音ス ペクトルをエネルギーの単位に変換するには、同じ測定条件で得られた 線の光電ピーク を基準とした。

## 3.3 エネルギー分解能

シンチレータと光検出器を用いて、あるエネルギーを持つ放射線を観測した場合、スペ クトルには光電吸収によるピーク(光電ピーク)が表れる。光電ピークの波高分布の形状 は、入力信号がある程度大きくなると次式で示されるガウス分布でよく近似される。

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\overline{x})}{2\sigma^2}\right)$$
(3.3)

ここで、光電ピークの $\sigma$ は標準偏差、 $\overline{x}$ は光電ピークの平均値である。 $\sigma = \sigma_P$ 、 $\overline{x} = P$ と置くと、エネルギー分解能 F(FWHM)は、半値幅 (FWHM=2.354× $\sigma_P$ ) と P の比で表され

$$F = 2.354 \times \frac{\sigma_{\rm P}}{P} \tag{3.4}$$

と表される。

APD でシンチレーション検出を行う場合、エネルギー分解能に影響を与える因子は主に、(1) 生成された電子・ホールペアの統計揺らぎによるもの、(2) 回路雑音によるもの、(3) 結晶自体によるものである。(1) の分解能を $R_{\rm eh}$ 、(2) の分解能を $R_{\rm noise}$ 、(3) の分解能を $R_{\rm sc}$ とおくとエネルギー分解能 $R_{\rm total}$  は次のように書ける。

$$R_{\text{total}}^2 = R_{\text{eh}}^2 + R_{\text{noise}}^2 + R_{\text{sc}}^2 \tag{3.5}$$

以下ではそれぞれの分解能について詳しく見ていく。

(1) 生成された電子・ホールペアの統計揺らぎによるもの

電子数で表した APD の出力信号の分散  $\sigma_N^2$  は、APD の増幅率 M、APD 内で生成された - 次電子の分散  $\sigma_n$ 、生成された - 次電子の数  $N_{eh}$ 、増幅率の分散  $\sigma_M$ を用いて次の式で表される。([1])

$$\sigma_{\rm N}^2 = M^2 \sigma_n^2 + N_{\rm eh} \sigma_{\rm M} \tag{3.6}$$

 $\sigma_{
m N}$ は増幅後の電子数の分散であるから、増幅前の生成された一次電子の分散  $\sigma_{
m st}$  を考えると

$$\sigma_{\rm st} = \frac{\sigma_{\rm N}^2}{M^2} \tag{3.7}$$

と書ける。よって式 3.6 より

$$M^2 \sigma_{\rm st} = M^2 \sigma_{\rm n}^2 + N_{\rm eh} \sigma_{\rm M}^2 \tag{3.8}$$

$$\sigma_{\rm st}^2 = \sigma_{\rm n}^2 + N_{\rm eh} \frac{\sigma_{\rm M}^2}{M^2} \tag{3.9}$$

ここで、過剰雑音係数 F は増幅率の分散  $\sigma_{\rm M}$  を用いて  $F = 1 + \sigma_{\rm M}^2/M^2$  と書ける。また、シンチレーション検出では生成される一次電子の分散はポアソン分布で表されるので  $\sigma_{\rm n}^2 = N_{\rm eh}$  と書ける。これより式 3.9 は次のように変形できる。

$$\sigma_{\rm st} = N_{\rm eh}F \tag{3.10}$$

ガウス分布を過程すると、半値幅 FWHM は標準偏差  $\sigma_{\rm st}$ の 2.354 倍で得られるので、 $R_{\rm eh}$ は次のようになる。

$$R_{\rm eh} = \frac{2.354 \times \sigma_{\rm st}}{N_{\rm eh}} = 2.354 \sqrt{\frac{F}{N_{\rm eh}}}$$
 (3.11)

この式から、生成された電子・ホールペアの統計揺らぎによる分解能は、APDへ入射 する光量を増やす、量子効率を上げるなどで生成される電子・ホールペアの数を増やすこ とで改善される。光電子増倍管では量子効率が低いため、生成される電子・ホールペアの 統計ゆらぎが分解能を下げる主な原因となっているが、APD のような量子効率の高い検 出器ではそれによる分解能の低下の割合が少なくなる。

(2)回路雑音によるもの

回路雑音による分解能を決める要因は、プリアンプと検出器が持つ容量、暗電流によっ て生じる電子の揺らぎである。実際に計測する場合には、読み出し回路のプリアンプにテ ストパルスを入力し、得られるスペクトルのピークの広がりから求める事ができる。得ら れる分解能はテストパルスの大きさによらず、温度、整形時定数、検出器特性のみのよっ て決まる。テストパルスのピークの半値幅を ΔN<sub>noise</sub> とおくと、回路雑音によるエネル ギー分解能は次のように書ける。

$$R_{\text{noise}} = \frac{\Delta N_{\text{noise}}}{N_{\text{eh}}} \tag{3.12}$$

この式から、回路雑音による分解能は回路雑音に比例し、生成される電子・ホールペア に反比例することがわかる。したがって、低温にするなどして回路雑音を減らすことで回 路雑音による分解能は改善される。

(3) 結晶自体によるもの

結晶自体による分解能 *δ*<sub>scSC</sub> は、シンチレータとなる結晶の特性によるもので、結晶の 非均一性や自己吸収によってシンチレーション効率が変動することが原因となる。結晶に よるエネルギー分解能の変化はシンチレータに入射される放射線のエネルギーによって変化する。低エネルギー側の放射線では、入射エネルギーに対するシンチレーション光の非線型性が大きくなるため、エネルギー分解能が悪くなる。

以上より、3種類の要因をあわせたエネルギー分解能の関係式は次の式のようになる。

$$R_{\text{total}} = \frac{2.354^2 F}{N_{\text{eh}}} + (\frac{\Delta N_{\text{noise}}}{N_{\text{eh}}})^2 + \delta_{\text{sc}}^2$$
(3.13)

# 第4章 ブロック型BGOシンチレータの 読み出しと性能最適化

30×50×100 mm<sup>3</sup> サイズのブロック型 BGO シンチレータは、NeXT 衛星に搭載する HXI(硬 X 線撮像検出器) と SGD(軟 線検出器) を囲むアクティブシールド部に用いられ る。これは、観測のバックグラウンドとなる地球大気起源の放射線や宇宙線を BGO シン チレータによって遮るとともに、HXIに用いる CdTe 検出器内部に生成された不安定同位 体が崩壊するときに放出する 線や 線を BGO シンチレータと APD で読み出し、反同 時計数をとることによって検出器そのものからのバックグラウンドも除去するために用 いる。

この章では、30×50×100 mm<sup>3</sup> のブロック型 BGO シンチレータ (以下 BGO) を光電子 増倍管と受光面積の異なる 3 種類の APD を用いて読み出し、その性能を評価し、最も適 切な条件の検討を行う。

# 4.1 反射材の比較

BGOには、シンチレーション光を効率的に集めるために反射材を巻く。反射材によってAPDへ入る光の量が変化するので、反射材を付ける際には、それによってどのように 光量が変化するかを評価する必要がある。

この実験では、アクティブシールドに用いる BGO に対して、APD でスペクトルを取 得する際に、BGO に巻く反射材を

1. ゴアテックス (厚さ 250 µm) のみ巻いた場合

2. ゴアテックスの内側に ESR(厚さ 65 µm) も巻いた場合

の2通りについて、それぞれスペクトルをとり光量と分解能の比較を行った。ここで ESR(Enhanced Specular Reflector)はポリエステル系樹脂を用いた多層膜構造をした、 スリーエム社製の反射材である。 セットアップ

実験セットアップのブロック図を図 4.1 に、実験で用いた器具の写真を図 4.2 に示す。線 源は<sup>137</sup>Csを使用し、662keVの線を測定した。BGO と APD はシリコングリスを用いて 接着し、接着面以外を反射材で巻いた。本実験では、BGO の読み出しに 10×10 mm<sup>2</sup>APD を使用した。前置増幅器(以下プリアンプ)は、クリアパルス社製電荷積分増幅器(型番 581K、シリアルナンバー 033137)、波形整形器は ORTEC 社製(型番 570)、ADC はクリ アパルス社製(型番 1125)を用いた。また、APD は各温度における増幅率が 50 となるよ うにバイアス電圧を印加した(表 2.2)。波形整形器の整形時間は、1.0 µsec とした。



図 4.1: 実験セットアップ。



図 4.2: 実験器具。BGO と APD 部分が入っている。恒温槽の振動で接着面がずれないように、BGO をクッションではさんである。

#### 結果と考察

図 4.3 に得られたスペクトルを、表 4.1 に各温度における 662 keV の光電ピーク値と分解 能 (FWHM[%])の比較を示す。ピーク位置は、ESR を巻いた方が 20 で 1.37 倍、0 で 1.22 倍、-20 で 1.22 倍だけ大きくなった。ピーク位置は APD に入ってくる光の量 (光 量) によって決まるので、光量がその分だけ増えたと考えられる。また、分解能は、ESR を巻いた方が、20 で 6.0 %、0 で 2.2 %、-20 で 2.7 %程度良くなった。

光量が増えた理由として、ESR を巻いたことにより BGO のシンチレーション光が外に 洩れる割合が減少した為であると考えられる。

分解能を決める要因は回路雑音と光量である。図 4.3 のスペクトルでは回路雑音のピー クの裾が 20 では 300 チャンネル程度、0 では 200 チャンネル程度、-20 では 170 チャンネル程度でほぼ同じ値を取っているため、回路雑音はどちらの反射材も同じ程度で あることがわかる。よって分解能は光量によって決まると考えられる。式 3.4 において、 回路雑音が一定であると $\sigma_{\rm P}$ は一定になると考えられ、この時分解能  $\propto$  光量 <sup>-1</sup> となる。分 解能の比を算出すると、ESR を巻いたほうが、20 で 1/1.32 倍、0 で 1/1.17 倍、-20

で 1/1.23 倍となり、およそ光量に反比例していることがわかる。以上のことから得ら れた結果は妥当なものであると考えられる。

	ゴアテ	ゴアテックスのみ ゴアテックス+ESR		
温度	ピーク位置 [ch] 分解能 (FWHM[%])		ピーク位置 [ch]	<b>分解能</b> (FWHM[%])
20	$671.2 \pm 0.3$	24.8±0.1 %	$917 \pm 0.3$	18.8±0.1 %
0	$1095 \pm 0.2$	15.1±0.1 %	$1340 \pm 0.4$	12.9±0.1 %
-20	1112±0.2	14.4±0.1 %	$1360 \pm 0.3$	11.7±0.1 %

表 4.1: 各温度におけるピーク位置と分解能 (FWHM[%]) の比較。誤差は正規分布でフィッ ティングした時の各値の誤差を用いた。

以上の事から BGO に巻く反射材には、ゴアテックスのみではなく ESR も巻いた方がよ りよい結果が得られることがわかった。これより、以降の実験では反射材は常にゴアテッ クスの内側に ESR も巻いて実験を行う。

32



図 4.3: 各温度での反射材の比較 (左上が T=20 、右上が T=0 、下が T=-20 )。縦 軸はカウント数、横軸は ADC のチャンネル数。

# 4.2 PMT を用いた読み出し

PMTで得られるデータはAPDの性能を知る上で基準となる。本実験では、PMTを用いてBGOの読み出しを行いその性能を調べる。同時に、PMTの増幅率が温度に依存しない事を用いて、光量の温度変化について調べる。

セットアップ

実験のセットアップのブロック図を図 4.4 に、用いた器具の写真を図 4.5 に示す。シン チレーション光の検出には浜松ホトニクス社製光電子増倍管 R3998-100-02HA を用い、プ リアンプには多チャンネル電荷積分増幅器 (クリアパルス社製 8CH 前置増幅器 557 型)を 用いた。線源は<sup>137</sup>Cs を用い 662 keV の 線を測定した。BGO と PMT の接着にはシリコ ングリスを用いた。また、PMT の印加電圧は各温度 950 V に定め、波形整形器の整形時 間は 1.0 μsec とした。



図 4.4: PMT を用いたブロック型 BGO 読み出しの実験セットアップ。



図 4.5: BGO を読み出すために用いた治具。

#### 結果と考察

得られたスペクトルを図 4.6 に、それぞれのスペクトルの 662 keV の光電ピーク位置と 分解能を表 4.2 に示す。これより、20 の時の光量を1としたときのそれぞれの温度の光 量の比を求めると、(20 の光量):(0 の光量):(-20 の光量) = 1:1.28:1.52 となっ た。PMT は増幅率が温度に依存しないため、この変化は BGO の特性によるものと考え られる。図 2.9 より BGO は温度を下げると出力光子数が変化することがわかるが、その 割合はおおよそ (20 の光子数):(0 の光子数): (-20 の光子数) = 1:1.3:1.6 程度と 読み取れる。これは実験結果と一致しており、光量の温度依存性は BGO の出力光子数の 温度依存性によるものだと考えられる。

図 4.6 より、全ての温度において<sup>137</sup>Cs の 32 keV の光電ピークが低エネルギー側の裾



図 4.6: PMT で得られたスペクトル。赤が 20 、緑が 0 、青が - 20 のスペクトル。 横軸が ADC のチャンネル、縦軸がカウント数を表す。

温度 [ ]	20	0	-20
ピーク位置 [channel]	569.27	731.46	866.48
分解能 [%]	14.93	13.52	12.63

表 4.2: PMT で得られたスペクトルの光電ピーク位置と分解能。

まで見えている。BGO が1 MeV あたりに出す光子の量は 5000 個程度であり、PMT の 量子効率がおよそ 30 %であることから PMT には 1500 個/MeV の光子が入ると考えら れる。しかし、光洩れなども存在するためその半分程度をロスしてしまうと考えると 700 個/MeV 程度の光子が入ることになる。よって1 光電子のエネルギーはおよそ 1.5 keV 程 度と考えられる。このこととスペクトルの形から、PMT のエネルギー閾値は少なくとも 10 keV 以下程度であると考えられる。また、分解能は低温になるにつれて良くなってい る。エネルギー閾値は温度変化によって殆ど変化しないため、これは光量の変化によるも のであると考えられる。

# 4.3 APD の集光量の変化

光量が増加すると、スペクトルのピークが高エネルギー側へシフトするため、相対的に エネルギー閾値が減少し、分解能も良くなる。APD で読み出す場合、光量は主に温度と APD の受光面積に依存する。本実験ではそれらを変化させることで、APD の集光量がど のように変化するか調べる。

#### 4.3.1 温度依存性

4.2 節で、BGO から得られるシンチレーション光の量には温度依存性があり、その比は 20 : 0 : -20 ~ 1 : 1.3 : 1.5 となることがわかった。本実験では、受光面積の異 なる 3 種類の APD を用いて同様の実験を行い、APD でも PMT と同様の性能が得られる か検証する。

セットアップ

実験のセットアップは、反射材の実験の時と同様にして行った (図 4.1)。APD は、 $5\times5$  mm<sup>2</sup>APD、 $10\times10$  mm<sup>2</sup>APD、 $18\times18$  mm<sup>2</sup>APD の 3 種類を用い、比較を行った。波形整 形器の整形時間は 1.0  $\mu$ sec とした。APD には、それぞれ増幅率が 50 となるよう印加電圧 をかけた (表 2.2)。

#### 結果と考察

各 APD によって得られたスペクトルを図 4.7 に、662 keV の光電ピーク位置を表 4.3 に 示す。ピーク位置から、各 APD ごとに 20 の時の光量を 1 とした時の光量の比を求める と次の表 4.4 のようになった。

APD の増幅率は、各温度・各 APD において全て 50 となるように印加電圧を設定してあ るので光量の比は PMT と一致しなくてはならない。表 4.4 より、5×5 mm<sup>2</sup>APD と 10×10 mm<sup>2</sup>APD は PMT で得られた光量の比とほぼ一致しているため、得られた 5×5 mm<sup>2</sup> 角 APD と 10×10 mm<sup>2</sup> APD の結果は妥当であると判断できる。18×18 mm<sup>2</sup>APD だけ光量 の増加量が大きいが、これは 18×18 mm<sup>2</sup>APD の素子に原因があるものと考えられる。こ の原因については 4.3.2 で考察する。

	APD のサイズ $[mm^2]$				
	$5 \times 5$	10×10	18×18		
20	811	1427	1375		
0	1021	2061	2442		
-20	1216	2125	3337		

表 4.3: 各 APD で得られた各温度における光電ピーク位置の ADC のチャンネル数。



図 4.7: 各 APD で得られたスペクトル。赤が 5×5 mm<sup>2</sup>APD、緑が 10×10 mm<sup>2</sup>APD、青 が 18×18 mm<sup>2</sup>APD。左上が 20 、右上が 0 、左下が -20 。横軸が ADC のチャンネ ル、縦軸がカウント数。

	20	0	-20
PMT	1	1.28	1.52
$5 \times 5 \text{ mm}^2 \text{APD}$	1	1.26	1.50
$10 \times 10 \text{ mm}^2 \text{APD}$	1	1.44	1.49
$18 \times 18 \text{ mm}^2 \text{APD}$	1	1.78	2.43

表 4.4: 20 における光量を1とした時の、各温度における光量の比。

#### 4.3.2 受光面積依存性

APD は素子の面積が大きくなると暗電流性雑音や容量性雑音が増加するため、もし低 面積の APD でも十分な光を集められるのであれば、低面積の APD を用いる方が好まし い。そのため、集光量の面積依存性を調べることは、適切な APD を探す上で大切である。 本実験では APD の受光面積を変化させることにより、得られる光量の比較を行う。APD の素子の特性による違いが出ないよう、実験は全て  $18 \times 18 \text{ mm}^2$  の APD を用い、そこに 様々な大きさの穴を空けた ESR をつけて、光量の面積依存性を調べる。同時に、 $18 \times 18$  $\text{mm}^2$ APD の温度の変化に対する光量の変化についても検証する。

セットアップ

APD を用いた実験のセットアップは、反射材の実験の時と同様にし(図 4.1)、APD には 4.3.1 節と同様増幅率が 50 となるように印加電圧をかけた(表 2.2)。APD は先に述べたように 18×18 mm<sup>2</sup> の APD を用いた。APD を取り付ける面の反射材は、5 mm 角の穴を空けたもの、10 mm 角の穴を空けたもの、18 mm 角の穴を空けたもの、20 mm 角の穴を空けたものの4 種類を用意し、それぞれについて実験を行った。ここで、セラミックパッケージから光が漏れているかどうかを調べるため、受光面積ぴったりの大きさである 18mm 角の穴を空けた ESR と、セラミックパッケージを含めた大きさである 20mm 角の

#### 結果と考察

それぞれの ESR を 18×18 mm<sup>2</sup>APD 取り付けて得られたスペクトルを図 4.8 に、ピー ク位置と分解能を示したもの表 4.5 に示す。



図 4.8: 異なる受光面積で得られたスペクトル。それぞれ、赤が5mm角の穴、緑が10mm 角の穴、青が18mm角の穴、紫が20mm角の穴を空けたESRを付けた場合のもの。20 では、5mm角の穴を空けた時のスペクトルはノイズに埋もれてしまって見えていない。

表4.5から、-20 において受光面積に対する光量の比をみてみると、(5mm角の穴):(10mm角の穴):(18mm角の穴) = 1 : 1.68 : 3.58 ~ 1 : 2 : 3.6 となる。受光面積の比は (5×5

	ピーク	で位置 [Channel]	分解能 [%]		
	20	-20	20	-20	
5 mm 角穴	_	535.3	_	23.70	
10 mm <b>角穴</b>	385.8	898.4	46.98	16.08	
18 mm <b>角穴</b>	796.0	1914.1	21.86	10.19	
20 mm <b>角</b> 穴	775.9	1882.6	24.17	10.83	

表 4.5: 様々な大きさの穴を空けた反射材を付けたときの、ピーク位置と分解能。5 mm 角 穴での 20 のデータは、ピークがノイズに埋もれてしまったため。

mm<sup>2</sup>APD):(10×10 mm<sup>2</sup>APD):(18×18 mm<sup>2</sup>APD) = 1:4:13 であるから、受光面積と 集光量の間にはおよそ

$$(集光力) \propto (受光面積)^{1/2}$$
 (4.1)

という関係があると考えられる。集光量が受光面積に比例しないのは、受光面積が大きく なるにつれて外に洩れる光の量も増加するためであると考えられる。この結果は、4.3.1 節の表 4.3 で得られた結果ともおよそ一致しているので、APDの素子そのものにこのよ うな特性があると考えられる。

各大きさの穴を空けた ESR を付けた場合の結果について (20 の光量):(-20 の光量) を求めると、10mm 角の穴を空けた ESR を付けた時 1 : 2.33 、18mm 角の穴を空けた ESR を付けた時 1 : 2.40 、20mm 角の穴を空けた ESR を付けたとき 1 : 2.43 となり、-20

ではどのような受光面積で実験を行っても20 の2.4倍程度の光量が得られる。この結 果は4.3.1で得られた18×18 mm<sup>2</sup>APDのものと一致しているが、PMT や他の APD 素子 で得られた1:1.5 という結果とは大きく異なる。この原因は、18×18 mm<sup>2</sup>APD の表面 一様性に問題があるのだと考えられる。18mm 角 APD は増幅率に斑ができやすく、その 非一様性は温度によっても変化する。増幅率の測定は、LED の光をすりガラスを通して APD に当てることによって行ったが、その時 LED の光が APD の一部分にしか照射され ないと、表面の非一様性により得られた増幅率が APD 全体の増幅率と異なってしまう。 このため、18×18 mm<sup>2</sup>APD の増幅率の見積りに誤差が生じてしまい正確な結果が得られ なかったと考えられる。今回の結果では、それが原因で、20 における増幅率 50 となる 印加電圧をやや低めに、-20 となる印加電圧をやや高めに見積もってしまったのだと考 えられる。

# 4.4 エネルギー閾値とエネルギー分解能の変化

APD は動作温度、受光面積、印加電圧によってエネルギー閾値とエネルギー分解能が 大きく変化する。本実験では、APD の動作温度、受光面積、印加電圧をそれぞれ変えた 場合のエネルギー閾値とエネルギー分解能を評価する。

#### 4.4.1 エネルギー閾値の変化

エネルギー閾値が高いと、宇宙空間へ行った時に地球大気起源等のバックグラウンドを 除去する事ができず信号が雑音に埋もれてしまいS/N比が悪くなってしまう。そのため、 エネルギー閾値が低くなる条件でAPDを動作させることが大切になる。ここでは、エネ ルギー閾値がもっとも低くなる条件を調べるとともに、どの程度までの性能が得られるか 検証を行う。

セットアップ

セットアップは反射材の実験の時と同様にして行い (図 4.1)、APD は 4.3.1 と同様に、 5×5 mm<sup>2</sup>、10×10 mm<sup>2</sup>、18×18 mm<sup>2</sup>のものを用い、比較を行った。

#### 結果と考察

それぞれの APD における各温度でのエネルギー閾値の変化を、横軸を印加電圧として プロットしたものを図 4.9 に、横軸を増幅率としてプロットしたものを図 4.10 に示す。ま た、印加電圧は APD の降伏電圧の直前までを調べた。

図 4.9 や図 4.10 を見ると、低温になるにつれてエネルギー閾値が下がっていくのがわか る。エネルギー閾値を決定する主な要因は、暗電流性雑音、容量性雑音であるが (式 3.2)、 このうち暗電流性雑音は温度を下げるにつれて大きく減少し、容量性雑音も係数に絶対温 度が掛かっているため温度の減少に伴って線形に減少する。その為、低温にするとエネル ギー閾値が小さくなるのだと考えられる。

エネルギー閾値は印加電圧をあげていくと下がる傾向がある。これは、暗電流性雑音の うちの表面電流と容量性雑音は増幅されないが信号は増幅されるためである。一方、印加 電圧がある一定値より高くなると5×5 mm<sup>2</sup>APDと10×10 mm<sup>2</sup>APDは途中でエネルギー 閾値が増加してしまっているのがわかる。これは印加電圧が大きくなり増幅率が十分大き



図 4.9: 横軸を印加電圧でプロットした、各温度におけるそれぞれの APD のエネルギー 閾値の変化。左上が 20 、右上が 0 、左下が -20 である。

くなると、式 3.2 の 1/M に比例する項が十分小さくなり、残った増幅を受けるバルク暗 電流に起因する過剰雑音係数の項が相対的に大きくなる為であると考えられる。

全体として、 $5\times5 \text{ mm}^2\text{APD} \ge 10\times10 \text{ mm}^2\text{APD}$ はエネルギー閾値が同程度となり、  $18\times18 \text{ mm}^2\text{APD}$ のエネルギー閾値が他の APD よりも高くなるという傾向がある。こ れは、 $18\times18 \text{ mm}^2\text{APD}$ は容量が大きい為、温度依存性のない容量性雑音が大きくなるた めであると考えられる。

各 APD で最もエネルギー閾値が最も低くなる時、その値は 5×5 mm<sup>2</sup>APD で 28 keV、 10×10 mm<sup>2</sup> で 27 keV、18×18 mm<sup>2</sup> で 47 keV であり、その時の条件は動作温度が –20 の時で、印加電圧がそれぞれ 360 V、380 V、410 V であった。

#### 4.4.2 エネルギー分解能の変化

エネルギー分解能は、信号をどれだけはっきりと読み出せているかを表す量であり、こ れが悪いと信号を適切に読み出すことができなくなる。ここでは、エネルギー閾値の項と 同様に、エネルギー分解能がよくなる条件を知るとともに、どの程度の性能が得られるか



図 4.10: 横軸を増幅率でプロットした、各温度におけるそれぞれの APD のエネルギー閾 値の変化。左上が 20 、右上が 0 、左下が -20 である。

について検証する。

セットアップ

エネルギー閾値の実験と同様にして行った。

結果と考察

それぞれの APD における各温度でのエネルギー分解能の変化を、横軸を印加電圧とし てプロットしたものを図 4.11 に、増幅率としてプロットしたものを図 4.12 に示す。10×10 mm<sup>2</sup>APD は全体的にエネルギー分解能が良く、20 と0 では最も良い値を取ってお リ、-20 では最も良い値を取る 20×20 mm<sup>2</sup>APD と同程度の性能を持っている。5×5 mm<sup>2</sup>APD は 20 では増幅率 70 付近までは 18×18 mm<sup>2</sup>APD よりも良い値を取っている ものの、それよりも増幅率が大きくなると分解能が悪くなってしまう。このような傾向 は低温にしたときにも存在し、0 と-20 では増幅率 25 付近から 18×18 mm<sup>2</sup>APD よ りも分解能が悪くなり、全体的に見て 3 種類の APD の中では分解能が最も悪い。18×18 mm<sup>2</sup>APD は低温にするにつれてエネルギー分解能がよくなり、-20 では増幅率 40 付近 から最もエネルギー分解能が良くなる。

エネルギー分解能を決める要因は式 3.13 より回路雑音と生成される 1 次電子の数であ る。1 次電子の数は入射光量に比例することから、エネルギー分解能は回路雑音と考量で 決まる。低温では、回路雑音のうち暗電流性雑音が殆ど無視できるようになりその分だけ 回路雑音は少なくなる。そのため、低温側では回路雑音のうちの容量性雑音と光量が分解 能を決める要因になると考えられる。容量性雑音は温度には依存せず、APDの素子の面 積と印加電圧によって決まり、印加電圧をあげていくと空乏層が広がって容量は減少する 為それに伴い容量性雑音も減少する。-20 では、増幅率 25 以下の低印加電圧側では容 量性雑音が効くため、面積の大きい 18×18 mm<sup>2</sup>APD は他の APD と比べて分解能が悪く なっていると考えられる。5×5 mm<sup>2</sup>APD と 10×10 mm<sup>2</sup>APD の分解能が同程度であるの は、光量の効果が効いているためであると考えられる。印加電圧を大きくしていくと、容 量性雑音よりも光量が効くようになり集光量の多い 18×18 mm<sup>2</sup>APD の分解能が良くなる のだと考えられる。0 でも同様の傾向が見られる。20 では、回路雑音のうちの暗電流 性雑音が無視できない。18×18 mm<sup>2</sup>APD は暗電流性雑音も他の APD と比べ 5~50 倍程 度大きい為、集光量が多くても回路雑音が他の APD よりも大きくなってしまうため全体 的に分解能が悪くなってしまうと考えられる。

5×5 mm<sup>2</sup>APD は各温度で増幅率が 50~70 付近のところで、分解能が悪くなる傾向が ある。図 4.10 を見るとエネルギー閾値が増加し始めていることがわかる。エネルギー閾 値の増加は、回路雑音の増加を表しているため、このことから分解能が悪くなるのは回路 雑音が増えてしまっているためだと考えられる。

各APDについて、-20 におけるエネルギー分解能の最適値を比較すると、5×5 mm<sup>2</sup>APD は16.5±0.1%、10×10 mm<sup>2</sup>APDは11.4±0.1%、18±18 mm<sup>2</sup>APDは10.2±0.1%となり、 10×10 mm<sup>2</sup>APDと18×18 mm<sup>2</sup>APDの分解能は同程度であることがわかる。また、その 時の条件は、動作温度が-20 、印加電圧がそれぞれ340 V、350 V、410 V であった。

# 4.5 ライトガイドを付けた場合の変化

ライトガイドは、シンチレータと検出器が離れている、シンチレータと光検出器の形状が合わない等の、シンチレータを検出器に直接接着することが困難な場合に使用され、シンチレーション光を検出器まで導く役割がある。NeXT衛星で用いるBGOアクティブシールドのような大型のシンチレータを読み出す際には、ライトガイドを用いてシンチ



図 4.11: 横軸を印加電圧でプロットした、各温度におけるそれぞれの APD のエネルギー 分解能の変化。左上が 20 、右上が 0 、左下が -20 である。

レーション光を APD で読み出すことも検討している。

本実験では、BGO を 10×10 mm<sup>2</sup>APD で読み出す際に、ライトガイドを用いると光量 や分解能にどのような変化があるかを調査し、その必要性について検討する。

セットアップ

ライトガイドは、30×50 mm<sup>2</sup> と 10×10 mm<sup>2</sup> の面を持つアクリル製ライトガイドのう ち、高さが 50 mm と 30 mm の 2 種類を用いてそれぞれについて検討を行った (図 4.14)。 このライトガイドには、BGO と同様に内側に ESR、外側にゴアテックスを巻いて実験を 行う。実験セットアップを図 4.13 に示す。APD は 10×10 mm<sup>2</sup>APD を用い、増幅率が 50 となる印加電圧を加えた。線源は<sup>1</sup>37Cs を用いた。

#### 結果と考察

各温度で、ライトガイドを付けなかった場合、高さ 30 mm のライトガイドを付けた場合、高さ 50 mm のライトガイドを付けた場合のスペクトルの変化をあらわしたのものを



図 4.12: 横軸を増幅率でプロットした、各温度におけるそれぞれの APD のエネルギー分 解能の変化。左上が 20 、右上が 0 、左下が – 20 である。



図 4.13: 実験セットアップ

図 4.15 に示す。また、それぞれのスペクトルの 662 keV 光電ピーク位置と分解能は表 4.6 のようになった。

表 4.6 より、20 の光量を1としたときの各温度での光量の比を求めると、ライトガイ ドを付けていない場合では 1:1.44:1.49、高さ 30 mm のライトガイドでは 1:1.44: 1.51、高さ 50 mm のライトガイドでは 1:1.42:1.47 となり、全て一致している。また、 4.3.1 節で算出した、PMT と 5×5 mm<sup>2</sup> 角 APD の比とも一致しており、この実験で得ら れた値は妥当なものであると考えられる。



図 4.14: 本実験で用いたライトガイドの写真。



図 4.15: ライトガイドを付けた場合の各温度におけるスペクトルの変化。左上が 20 、 右上が 0 、左下が – 20 。赤がライトガイドを付けなかった場合、緑が高さ 30 mm の ライトガイドを付けた場合、青が高さ 50 mm のライトガイドを付けた場合。

高さ 50 mm のライトガイドを付けると光量はライトガイドを付けない場合の 65 % 程度 に、高さ 30 mm のライトガイドを付けると光量はライトガイドを付けない場合の 74 % 程

	20		0		-20	
ライトガイドの種類	ピーク位置	分解能	ピーク位置	分解能	ピーク位置	分解能
無し	1427 ch	18.45 <b>%</b>	2061 ch	13.11 %	2125 ch	11.41 %
高さ 30 mm	1047 ch	24.39 <b>%</b>	1514 ch	16.10 <b>%</b>	1585 ch	14.22 %
高さ 50 mm	943 ch	28.07 <b>%</b>	1343 ch	17.12 %	1387 ch	15.72 <b>%</b>

表 4.6: 各温度における、それぞれのスペクトルの 662 keV の光電ピーク位置。

度に減少する。これより、ライトガイドを付けると光量が減少し、その減少量はライトガ イドの長さが長くなればなるほど多くなるということがわかる。これは、ライトガイドと シンチレータの接合面や、ライトガイド中での光の損失が原因であると考えられる。よっ て、ライトガイドをつけても、全ての光を集光できるわけでは無いことがわかる。

ー方、エネルギー分解能もライトガイドの長さが長くなるにつれて悪くなっている。ラ イトガイドを装着した場合、変化するのは光量だけであり、回路雑音等に変化は無い為  $\sigma_{\rm P}$  は本実験では一定値を取る。ゆえに、エネルギー分解能を決める要因は光量である。 光量は光電ピーク位置に比例するので、式 3.4 から光電ピーク位置と分解能は反比例の関 係にあることがわかる。ゆえに、高さが 30 mm のライトガイドの分解能はライトガイド が無い場合の 1/0.65 倍に、高さが 50 mm のライトガイドの分解能はライトガイドが無い 場合の 1/0.74 倍になると考えられる。この計算結果を表 4.6 の 20 の分解能と比較をす ると、計算では、高さ 30 mm のライトガイドでは 18.45×1/0.74=24.93 [%]、高さ 50 mm のライトガイドでは 18.45×1/0.65=28.38 [%] になると考えられるが、これは実験で得ら れた結果とほぼ一致している。他の温度でも同様の事がいえるので、ライトガイドを付け たときの分解能の変化は、光量に反比例する事が示された。

以上より、ライトガイドを装着した場合、高さが 30 mm のライトガイドでも光量が7 割程度になってしまい、それに反比例して分解能も悪くなってしまうので、NeXT 衛星に 搭載する際にはライトガイドは付けずに、直接アクティブシールドに APD を接着するこ とが望ましい。

47

## 4.6 まとめ

アクティブシールドには反射材を巻くが、その際にはゴアテックスだけではなく、内側 に ESR を巻くことが望ましい。これにより、1.2~1.3 倍程度の光量の増加が見込まれる。

PMT と APD を比較した場合について考える。エネルギー閾値は PMT の方が良い値 を取るが、APD でも 30 keV 程度までエネルギー閾値を下げることができる。また、エネ ルギー分解能は APD の方が良い値を取る。したがって、APD も PMT と同程度の性能を 持っていることがわかる。これより、PMT と比べ、小型で低電力で使用できる APD は アクティブシールドの読み出しを行うのに適していると考えられる。

ブロック型 BGO シンチレータを読み出す際に用いる APD として最適なのは 10×10 mm<sup>2</sup>APD であると考えられる。その理由として次の事があげられる。まず 5×5 mm<sup>2</sup>APD は、エネルギー閾値が同程度まで下がるものの、集光量が少なく分解能が悪くなってしまう。次に 18×18 mm<sup>2</sup>APD は、集光量が多く分解能は最も良くなるが、回路雑音が大きくエネルギー閾値が大きくなってしまう。それに加え、受光面積が大きいことからその非一様性の効果が無視できない為、衛星に搭載するには不安が残る。

ライトガイドは、それを用いてもアクティブシールドの読み出しは可能であるが、高さ 50 mm のものをつけるだけでも光量が6割程度に減少してしまうため、極力使用しない ことが望ましい。

# 第5章 1次元APDアレーを用いた平板 型BGOシンチレータの読み出し とその最適化

NeXT 衛星に搭載が予定されている SGD の基本概念は、すざく衛星に搭載されていた HXD の低バックグラウンドに、コンプトンカメラによるバックグラウンド除去を重ね合 わせることである。このため、NeXT 衛星用 SGD はすざく衛星用 HXD とよく似た BGO シールドを搭載することが検討されている。

本実験ではすざく衛星の HXD に搭載されたものと同じ、幅 48 mm × 長さ 300 mm × 厚さ 3mm の平板型 BGO シンチレータ (以下 BGO プレート)を用いて、直径 3 mm の円 形の APD が 11 素子並べてある 1 次元アレー型 APD(浜松ホトニクス社製 S8664-30、以下 APD array) の読み出しを行った。

式4.1 にあるように、APD の集光力は面積の1/2 乗に比例する。また、APD array の回 路雑音は APD の素子が減少すればその分だけ減少すると考えられる。したがって、APD array を用いてシンチレーション光を読み出す際に、11 個の素子全てを読み出すのではな く、読み出す APD 素子の数を減らすことにより S/N 比がよくなる可能性がある。

以上のことから、本実験では読み出す APD array の素子の数を、11 個の素子全てを読 み出した場合と、素子を一つ置きに半分の6 個を読み出した場合について、暗電流、容量 をそれぞれ調べ、得られるスペクトルがどのように変化するか検証を行った。

## 5.1 素子数を変えたときの基礎特性の変化

#### 5.1.1 暗電流と容量の変化

読み出し可能な APD 素子の数を減らす場合、APD のアノードとグラウンドをつなぐ 部分を断線し APD を回路上で無視できるようにする。しかし、アノードを断線すること はできないため、APD が機能しないだけで容量性雑音や暗電流が乗る可能性もある。本 実験では、読み出し可能な APD 素子の数を半分にしたときに、暗電流と容量がどのよう に変化するかを調べる。

セットアップ

実験セットアップのブロック図を図 5.1 に示す。容量計はクリアパルス社製半導体検出 器容量計 (型番 7500、シリアルナンバー 029465)を用い、暗電流の測定は Keithley 社製 High Voltage Source Measure Unit(型番 GPIB05:K237)を用いた。



図 5.1:1次元 APD アレーの容量測定と暗電流測定のセットアップ。左図が容量を測定する場合、右図が暗電流を測定する場合。読み出す APD 素子を半分にするときには×印の部分を断線する。

結果と考察

得られた測定結果を図 5.2 に示す。これより、全ての素子を読み出した場合と半分の素 子を読み出した場合の容量と暗電流の変化の仕方はほぼ一致している。印加電圧が 410 V のところで容量を比較すると、全ての素子を読み出した場合 249 pF、半分の素子を読み 出した場合 142 pF となっており、半分の素子を読み出した場合の容量は全ての素子を読 み出した場合のおよそ 6/11 倍になっていることから、容量は読み出している APD の数 に比例していると考えられる。これは他の印加電圧をかけた時でも成り立っている。

同様に暗電流について、印加電圧が410 Vのところで比較をすると、全ての素子を読み 出した場合13.73 nA、半分の素子を読み出した場合7.69 nA となっており、半分の素子を 読み出した場合の暗電流は全ての素子を読み出した場合のおよそ6/11 倍になっているこ とから、暗電流も読み出している APD の数に比例していると考えられる。これは他の印 加電圧をかけた時でも成り立っている。

50



図 5.2: 左図が容量、右図が暗電流の測定結果。横軸が印加電圧 (HV)、縦軸がそれぞれ 容量と暗電流を表す。赤が全ての素子を読み出した場合、緑が半分だけ素子を読み出した 場合。

以上のことから、APDarrayの容量と暗電流は読み出す APD 素子の数に比例している ということが言える。

#### 5.1.2 回路雑音の変化

5.1.1 節で、APD array の暗電流と容量が、読み出す APD 素子の数に比例することが示された。本実験では、APD array を実際に実験系につないだときに、それらが回路雑音にどのような影響をもたらすかを、テストパルスを入力することによって検証する。

セットアップ

実験セットアップを図 5.3 に示す。パルス発生器は BNC 社製 Pulse Generator model PB-4 を用い、プリアンプはクリアパルス社製電荷積分増幅器 (型番 581K、シリアルナ ンバー 033137)、波形整形器は ORTEC 社製 (型番 570)、ADC はクリアパルス社製 (型番 1125) を用いた。動作温度は 20 とし、印加電圧は 410 V で行った。

#### 結果と考察

テストパルスを入力して得られたピーク値を図 5.4 に示す。読み出す APD 素子を半分 にした場合の方がピークの半値幅が狭くなっている。それぞれのピークの分解能は、全 ての素子を読み出した場合が 3.86±0.1 [%]、読み出す素子を半分にした場合が 3.38±0.1 [%] となる。ここで、読み出したピークは APD で読み出した場合 3.0 MeV に相当する。



図 5.3: 実験セットアップ。読み出す素子を半分にするときには×印のところを断線する。



図 5.4: 得られたテストパルスのピーク。赤が全ての APD 素子を読み出した場合、緑が読み出す APD 素子を半分にした場合。

ピーク値は等しいので分解能は半値幅に比例する。また、テストパルスの半値幅は回路雑 音に比例するため、この場合分解能は回路雑音に比例することがわかる。分解能は読み出 す素子を半分にすることによって14%程度良くなっていることから、回路雑音もそれに よって14%程度減少すると考えられる。暗電流と容量が6/11になっているにも関わらず 14%程度しか回路雑音がよくならない理由は、まずプリアンプの出す雑音が無視できな いため、そしてつながない素子の端子は空気中に露出されており、それが環境雑音を拾っ てしまっているためだと考えられる。

# 5.2 BGO プレートのスペクトルの比較

BGO プレートを APD array を用いて読み出すことにより、どの程度の性能が得られる か検証を行う。同時に、読み出す APD 素子の数を半分にすると、光量,エネルギー閾値, エネルギー分解能がどのように変化するか調べ、全ての素子を読み出す場合と半分の数の 素子を読み出す場合でどちらの方が優れているか調べる。

セットアップ

実験セットアップを図 5.5 に示す。プリアンプ、波形整形器、ADC は 5.1.2 と同様のも のを用いた。BGO プレートは内側に ESR を、外側にゴアテックスを巻き、シリコングリ スを用いて APD array に接着した後テフロンテープを巻いて固定した。BGO シンチレー タは阻止能が高く、宇宙線などの自然放射線を検出してしまうため、回りを鉛板で囲ん でバックグラウンドを低減させた。また、APD はアルミ製ケースに入れて測定を行うが、 シンチレータがケースから出てしまうため、検出器とシンチレータのまわり全体にアルミ ホイルを巻いて静電遮蔽を行った。線源は<sup>137</sup>Cs を用い 662 keV の 線を測定した。

動作温度は 20 と -20 の 2 つの場合で行った。印加電圧は各温度でエネルギー閾値 が最も低くなる印加電圧を選び、波形整形器の整形時間は  $1 \mu sec$  とした。



図 5.5: 実験セットアップ。

#### 結果と考察

得られたスペクトルを図 5.6 に、そのスペクトルの横軸をエネルギーに換算したものを 図 5.7 に示す。また、それぞれの 662 keV の光電ピーク位置、エネルギー分解能、エネル ギー閾値は表 5.1 のようになった。

ピーク位置のチャンネル数から、検出された光量は読み出す APD の素子の数を半分に すると 20 では約79%に、-20 では約67%程度に減少していることがわかる。素子 の数は 11個から 6個に減少しているため、読み出すことのできる APD の面積も 6/11倍 になる。よって、式 4.1から集光力は $\sqrt{6/11} \sim 0.74$ 、つまり74%程度に減少すると考え られる。この値は実験結果とほぼ一致しており、このことから、APD は APD array のよ うに直線状に並んでいても式 4.1のような関係が成り立つということがわかる。



図 5.6: 得られたスペクトル。横軸が ADC のチャンネル、縦軸がカウント数を表す。赤が 全ての APD 素子を読み出した場合、緑が半分の素子を読み出した場合。



図 5.7:得られたスペクトルの横軸をエネルギーに換算したもの。縦軸はカウント数表す。 赤が全ての APD 素子を読み出した場合、緑が半分の素子を読み出した場合。

エネルギー閾値は回路雑音に比例し、ピーク位置のチャンネル数、つまり光量に反比 例する。このことから、読み出す素子の数を半分にしたときのエネルギー閾値の変化は

	20			-20		
	ピーク位置 [ch]	<b>閾値</b> [keV]	分解能 [%]	ピーク位置 [ch]	<b>閾値</b> [keV]	分解能 [%]
全て	609.79	302.31	31.21	759.99	44.32	18.62
半分	481.25	356.86	40.27	512.70	57.93	24.35

表 5.1: 全ての素子を読み出した場合と半分の素子を読み出した場合の、662 keV の光電 ピーク位置のチャンネル数、エネルギー閾値と分解能。

次のように計算できる。回路雑音は 5.1.2 節より 14 %減少するが、光量も平均 74 %程度 減少するので、エネルギー閾値は読み出す素子の数を半分にすると 0.86/9.74 ~ 1.2 倍程 度に増加すると考えられる。表 5.1 より全ての素子を読み出した場合のエネルギー閾値を 1.2 倍すると、半分の素子で読み出した場合のエネルギー閾値は 20 では 360 keV 程度、 -20 では 53 keV 程度と計算されるが、これは実験で得られた結果とほぼ同程度の値を 取っていると考えられる。

エネルギー分解能も同様に考えることができ、全ての素子を読み出した場合の分解能を 1.2 倍すると、読み出す素子の数を半分にしたとき 20 では 37 %程度、-20 では 22 %程度と計算され、実験で得られた値と同程度の値を取ることがわかる。

以上より、読み出す素子の数を半分にするとエネルギー閾値とエネルギー分解能はとも に1.2倍程度増加し、性能が悪化すると考えられる。

### 5.3 まとめ

APDarrayの持つ APD の素子一つ一つは、グラウンドを断線することで完全に機能を 止めることができ、容量、暗電流ともに APD 素子が存在しない場合と同様になる。しか しながら、装置につなぎ回路雑音を考える場合、それは半分にならず14 %程度にしか減 少しない。また、読み出す素子の数を減らした場合の集光量の変化は式 4.1 に従う。これ らのことから、読み出す素子の数を減らした場合、回路雑音の減少量よりも光量の減少量 の方が多くなってしまうため、エネルギー閾値とエネルギー分解能は悪化すると考えられ る。また、今回実験で用いた1次元アレー型 APD(S8664-30array)では、全ての素子を読 み出した場合、エネルギー閾値は 44 keV 程度まで下げることができており、これはアク ティブシールドとして用いるのには十分な性能を持っている考えられる。以上のことから APDarrayを用いて BGO シンチレータを読み出す場合は、APDarray のもつ素子を全て 読み出すのが最適であると考えられる。

# 第6章 アクティブシールドの読み出し回 路の条件

# 6.1 ケーブルの長さによるエネルギー閾値の変化

実験室では APD からの信号を電荷積分増幅器を通して読み出す際に、ケーブル等を用 いずに直接接続し読み出すことが可能であるが、人工衛星に乗せる際にはそのような事は できず、APD からの信号をケーブルを用いて電荷積分増幅器まで導く必要がある。

本実験では、APD と電荷積分増幅器との間の接続を、様々な長さの同軸ケーブルを用 いて行い、エネルギー閾値がどのように変化をするかを調べ、回路雑音の変化について考 察を行う。

セットアップ

実験装置は、図 4.1 と同様にセットした。その際に APD とプリアンプをつなぐ部分に 同軸ケーブルを用いた。その際にケーブルの長さは、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m の 5 種類について実験を行った。

シンチレータは、内側に ESR、外側にゴアテックスを巻いた  $30 \times 50 \times 100 \text{ mm}^3$  の BGO ブロックを用い、その読み出しには  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ APD を用いた。プリアンプはクリアパル ス社製電荷有管型前置増幅器 581K型 (シリアルナンバー 033137)、波形整形器は ORTEC 社製 (型番 570)、ADC(Analog Digital Converter) はクリアパルス社製 (型番 1125) のも のを用いた。また、実験に用いる同軸ケーブルとして LEMO ケーブルを用いた。線源は 137Cs を用い 662 keV の 線を測定した。

実験は 20 で行い、印加電圧は 10×10 mm<sup>2</sup>APD の増幅率が 50 となる 385 V とした。 波形整形器の整形時間は 1.0 μsec とした。

56

結果と考察

得られたスペクトルとピーク位置の変化を図 6.1 に、エネルギー閾値とエネルギー分解 能の変化を表したものを図 6.2 に示す。比較の為、同軸ケーブルを用いない場合に得られ る結果を含めたものを示す。



図 6.1: (左図)APD-プリアンプ間の同軸ケーブルの長さを変えたときのスペクトルの変 化。赤がケーブルを付けない場合、緑が1.0m、青が1.5m、紫が2.0m、水色が2.5m、 黒色が3.0mの同軸ケーブルを付けた場合。横軸がADCのチャンネル数、縦軸がカウン ト数を表す。(右図) ピーク位置の変化。青線は得られた近似曲線。横軸が同軸ケーブルの 長さ、縦軸がピーク位置のチャンネル数を表す。



図 6.2: APD-プリアンプ間の同軸ケーブルの長さを変えたときのエネルギー閾値 (左図) とエネルギー分解能 (右図) の変化。横軸が同軸ケーブルの長さ、縦軸がそれぞれエネル ギー閾値とエネルギー分解能を表す。

同軸ケーブルをつなぐとプリアンプ前後での回路は図 6.3 のようになり、プリアンプと 同軸ケーブルの容量は並列につながる。同軸ケーブルの単位長さあたりの電気容量を *C*<sub>ℓ</sub>



図 6.3: 同軸ケーブルを加えた際の実験系の回路図。点線の中が同軸ケーブルの等価回路。

とする。同軸ケーブルをxm つなげた場合並列にコンデンサが並ぶことと等価になるので、APD 等が持つ浮遊容量  $C_{\text{in}}$ が同軸ケーブルをつながなかった場合に比べて $C_{\text{in}} + xC_{\ell}$ のように増加する。したがって、プリアンプの出力電圧  $V_{\text{out}}$ は式 2.14 より次のようにかける。

$$V_{\text{out}} = \frac{AQ_{\text{in}}}{C_{\text{f}}(A+1) + C_{\text{in}} + xC_{\ell}}$$
 (6.1)

また、プリアンプの出力電圧は得られたピーク位置と比例する。このことからピーク位置 Pは、同軸ケーブルの長さxと $P = \frac{a}{x+b}$ の関係にあると考えられる。この近似により得 られた曲線が図 6.1 の右図の青線である。得られた曲線は実験結果とほぼ一致しているの で、得られた結果は妥当なものだと考えられる。

エネルギー閾値は同軸ケーブルの長さを長くすると増加しているが、図 6.2 を見ると線 形に増加していないことがわかる。この原因は次のように考えられる。同軸ケーブルをつ なぐことにより同軸ケーブルの分だけ電気容量が増加し、それに伴って容量性雑音が増加 する。暗電流性雑音は APD によるものであるから、暗電流性雑音は同軸ケーブルに依存 せず、式 3.2 において第 1 項は定数になると考えられる。第 2 項のうち同軸ケーブルの長 さを変えることにより変化する項は  $C_{\text{tot}}$  であり、この項を同軸ケーブルの容量を加えた  $C_{\text{tot}} + xC_{\ell}$  と変化させれば同軸ケーブルを加えた場合の  $\delta_{\text{noise}}$  が得られる。同軸ケーブ ルの長さ以外は全て同じ条件のもとで実験を行ったため、他のパラメータは全て定数と考 えることができる。ゆえに  $\delta_{\text{noise}}$  は定数 A, B, C, a, b, c を用いて次のように書ける。

$$\delta_{\text{noise}} = \sqrt{A + B(x+C)^2} \tag{6.2}$$

$$= \sqrt{ax^2 + bx + c} \tag{6.3}$$

エネルギー閾値はピーク値に反比例し(回路雑音)/(ピーク値)となる。ピーク値を表す関

数を $\frac{1}{x+d}$ とすれば、エネルギー閾値 $E_{th}$ は次のように書ける。

$$E_{th} = (x+d)\sqrt{ax^2 + bx + c} \tag{6.4}$$

式 6.4 で近似したものが図 6.2 左図の青線である。このとき、a = 14.21、b = -68.08、 c = 575.6、d = 9.927 であった。この曲線は実験値とほぼ一致しており、同軸ケーブルの 長さを変えた時のエネルギー閾値は、式 6.4 のように変化すると考えられ線形に変化しな いことがわかる。エネルギー分解能も回路雑音とピークチャンネルによってきまるので同 様に考えることができる。

以上の事から、エネルギー閾値とエネルギー分解能は同軸ケーブルの長さが長くなる と2乗で悪くなっていく傾向があるため、極端に長くすることは好ましくない。よって、 同軸ケーブルはできる限り短くして用いるのが望ましい。同軸ケーブルを用いる場合は、 長さを1m以内に抑えることができれば、エネルギー閾値、エネルギー分解能ともに大 きく悪化しないと考えられる。

### 6.2 電荷積分増幅器の時定数を変化させたときの分解能の変

#### 化

APD の読み出しに用いるプリアンプの時定数はシンチレータによって適切なものを選 ぶ必要があり、適切な値を選ばないと信号が小さくなりエネルギー分解能が悪くなってし まう。また、プリアンプの出力はその時定数にしたがって減衰するため、この時間が長い と 2.4 節で述べたように、短い時間間隔で立て続けに信号が入ったときに出力が階段状に 増加し、プリアンプの有効出力範囲を越えてしまう。したがって時定数は短い方が望まし い。本実験では、プリアンプの時定数をいろいろな値に設定し適切な値を探すと同時に、 どこまで短くできるか検証する。

セットアップ

実験装置は、図 4.1 と同様にした。その際に用いるプリアンプは、内部の帰還抵抗と帰 還コンデンサが付け変え可能なクリアパルス社製の電荷積分増幅器 595H型(シリアルナン バー 055251)を用いた。他の装置は 4.1 節等の実験と同様に、波形整形器は ORTEC 社製 (型番 570)、ADC はクリアパルス社製(型番 1125)を用いた。シンチレータは 10 mm×10 mm×10 mm の BGO を用い、その読み出しには 10×10 mm<sup>2</sup>APD を用いた。線源は<sup>137</sup>Cs を使用し 662 keV の 線を測定した。動作温度は -20 とし、印加電圧は 10×10 mm<sup>2</sup>APD の増幅率が 50 となる 351 V とした。

プリアンプの時定数は、帰還コンデンサを1 pF に固定したまま帰還抵抗を小さくする ことによって変化させた。

#### 結果と考察

プリアンプの時定数を変化させたときの、スペクトルの変化と光電ピーク位置の変化を 表したものを図 6.4 に、エネルギー閾値とエネルギー分解能の変化を表したものを図 6.5 に示す。また、図 6.6 は各時定数におけるプリアンプからの出力をオシロスコープでモニ ターしたもののうち、縦軸と横軸をそれぞれ 1 マス 10 mV と 10  $\mu$ sec に統一したもので あり、図 6.7 は時定数が 0.5  $\mu$ sec と 0.1  $\mu$ sec のものを拡大したものである。



図 6.4: (左図) プリアンプの時定数を変化させたときのスペクトルの変化。赤が 10 µsec、 緑が 5 µsec、青が 1 µsec、紫が 0.5 µsec、水色が 0.1 µsec のスペクトル。横軸は ADC の チャンネル、縦軸はカウント数を表す。(右図) 光電ピーク位置の変化。横軸はプリアンプ の時定数、縦軸はピーク位置の ADC のチャンネルを表す。

BGO の減衰時定数は 300 nsec であり、これが図 6.6、6.7 で得られたパルスの立上りの 時定数となっている。その後、半値幅がプリアンプの時定数になるように減衰する。プリ アンプの時定数を $\tau$ とおくと、パルスは $exp(-t/\tau)$ で減衰し、その傾きは $-1/\tau$  に比例す るため、図 6.6、図 6.7 のように時定数を短くしていくにつれて減衰の仕方が急になるの だと考えられる。また、プリアンプの時定数を短くするにつれて波高が低くなるのは、プ リアンプの時定数が短くなるとパルスが立ち上がりきる前に減衰が始まってしまうため であると考えられる。そのため、図 6.4 にあるように、プリアンプの時定数を短くすると ピーク位置が下がっていくのだと考えられる。また、この図から時定数を長くすれば光電



図 6.5: プリアンプの時定数を変化させたときのエネルギー閾値、分解能の変化。左図が エネルギー閾値の変化、右図がエネルギー分解能の変化。横軸はプリアンプの時定数、縦 軸がそれぞれエネルギー閾値、分解能を表す。



図 6.6: 帰還時定数 ( $\tau$ ) を変えた場合のプリアンプ出力。左上から、 $\tau = 10 \ \mu sec$ 、 5  $\mu sec$ 、 1  $\mu sec$ 、 0.5  $\mu sec$ 、 0.1  $\mu sec$ 。

ピーク位置は一定の値になると考えられる。これは、時定数を長くすることで、減衰時間 が立上りの時間よりも十分長くなり、パルスが立ち上がりきってから減衰が始まるためだ と考えられる。

式 3.2 より、 $\delta_{noise}^2$ の暗電流性雑音は $\tau$ に比例し、容量性雑音は反比例する。 $\tau$ が小さい場合、動作温度が-20であることと、増幅率が50の印加電圧ではFは小さいことか



図 6.7: 左が時定数 0.5 µsec、右が時定数 0.1 µsec のプリアンプの出力の拡大図。

ら、暗電流性雑音はおよそ0になると考えられるので第1項は無視できる。ゆえに、 $\tau$ が小さい時 $\delta_{noise}$  は $\sqrt{1/\tau}$ に比例すると考えられる。これより、図6.5のエネルギー閾値の変化は $5 \mu$ sec 程度までは $\tau$ に反比例していると考えられる。 $10 \mu$ sec ではエネルギー閾値が少し高くなっていることから、 $\tau = 5 \mu$ sec を過ぎたところで、暗電流性雑音の項が無視できなくなりこのような結果が得られたと考えられる。また、 $\tau$ を小さくすると $\delta_{noise}$ は大きくなると考えられ、それに伴ってピークの半値幅が広がると考えられる。また、先に述べたようにプリアンプの時定数を短くするとパルス波高が低くなるので、ピーク値は小さくなる。以上より、プリアンプの時定数を短くすると式3.4のFは大きくなるのでエネルギー分解能が悪くなるのだと考えられる。ここで、エネルギー分解能がプリアンプの時定数が $1 \mu$ sec から急激に悪くなるのは、 $\delta_{noise}$  が $\sqrt{1/\tau}$ に比例する効果が効いていると考えられ、 $10 \mu$ sec で少し増加しているのは暗電流性雑音の $\tau$ の項が効くようになったためと考えられる。

### 6.3 まとめ

APD とプリアンプの間のケーブルの長さは短いほどよいが、1m 程度であればエネル ギー閾値とエネルギー分解能は酷く悪化することはなく、特にエネルギー分解能は1m 伸ばしても0.3%程度しか悪くならない。しかし、長くなると2乗に比例して悪化するた め、極端に長くすることは好ましくない。

BGO シンチレータを読み出す際には、プリアンプの時定数は $1.0 \ \mu sec$  まではエネルギー 分解能は殆ど悪化しないが、それよりも短くなると急激に悪化してしまうため、 $1.0 \ \mu sec$ 以上で定めるのがよい。また、 $5.0 \ \mu sec$  と $10 \ \mu sec$  ではパルス波高も殆ど変化しない。こ のことから、プリアンプの時定数として $5.0 \ \mu sec \sim 10 \ \mu sec$  を選ぶのが最適であると考え られる。

# 第7章 結論

#### BGO アクティブシールドと APD の性能特性

反射材について、ブロック型シンチレータと 10×10 mm<sup>2</sup>APD を用いて、ゴアテック スのみ巻いた場合とゴアテックスの内側に ESR を巻いた場合で比較を行った。ESR を巻 いた場合、光量が 1.22 ~ 1.37 倍になり、分解能が 2.2 ~ 6.0 %改善された為、ブロック型 BGO シンチレータに限らず BGO アクティブシールドの読み出しを行う際にはゴアテッ クスの内側に ESR を巻くのが望ましい。

5×5 mm<sup>2</sup>APD、10×10 mm<sup>2</sup>APD、18×18<sup>2</sup>APD の3種類について比較を行った場合、 5×5 mm<sup>2</sup>APD はエネルギー閾値は10×10 mm<sup>2</sup>APD と同程度まで到達できるが、光量が 少ない為分解能が悪化してしまう。18×18 mm<sup>2</sup>APD は光量が多くエネルギー分解能は良 いが、面積が大きい分容量性雑音が増えエネルギー閾値が高くなる。また18×18 mm<sup>2</sup>APD は表面一様性が未だ不透明である。以上より、読み出しには10×10 mm<sup>2</sup>APD を用いるの が最適だと考えられる。

APD とPMT と比較をした場合、エネルギー分解能は APD の方が優れているが、エネ ルギー閾値は PMT に劣る。しかしながら、APD のエネルギー閾値の最小値は 27±2 keV と、アクティブシールドとして十分な性能を持っている。したがって、BGO アクティブ シールドを読み出す検出器として APD は十分な性能を持っていることが示された。

ライトガイドを付けると、50 cm の高さのもので 65 %程度、30 cm の高さのもので 74 %程度に光量が減少する。したがってライトガイドは極力使用しない事が望ましい。

プレート型 BGO を 1 次元 APD アレーで読み出す際に、読み出す APD の数を半分にし ても回路雑音は 14 %程度しか良くならず、光量は 79 %に減るため、エネルギー閾値が 高くなってしまう。したがって、APD の数を減らさずに全ての APD を読み出す事が望ま しい。全ての APD を読み出したときの性能は、-20 でエネルギー閾値は 44 keV、エ ネルギー分解能は 18.6 %であった。

64

### 読み出し回路の条件

APD とプリアンプの間に同軸ケーブルをつなぐと、その長さが長くなるとエネルギー 閾値とエネルギー分解能は2乗に比例して悪くなるため、長いケーブルを用いるのは望ま しくない。しかし、長さを1m以内に抑えることができれば大きく悪化することはない と考えられる。

プリアンプの時定数は 1  $\mu$ sec よりも短くなるとエネルギー分解能が急激に悪化するため、時定数は 1  $\mu$ sec 以上で設定するのが望ましい。そして、1  $\mu$ sec では信号が小さくなってしまうので、時定数は 5  $\mu$ sec ~ 10  $\mu$ sec 程度にするのが良いと考えられる。

# 関連図書

- [1] 五十川 知子、修士論文 「宇宙利用に向けた X 線・ 線検出用アバランシェ・フォト ダイオードの開発」東京工業大学 (2005)
- [2] 倉本 祐輔 修士論文 「東工大衛星 Cute-1.7 搭載 APD 荷電粒子モニターの開発」 東 京工業大学 (2006)
- [3] 小泉 誠 卒業論文 「アバランシェフォトダイオードを用いた次世代 PET 用 LSI の開 発」 東京工業大学 (2007)
- [4] クリアパルス株式会社「取扱説明書 581 型シリーズ 電荷有感型前置増幅器 581 型 581H型 581K型」 クリアパルス株式会社 (2003)
- [5] クリアパルス株式会社「取扱説明書 581 型シリーズ 電荷有感型前置増幅器 595H 型」 クリアパルス株式会社 (2006)
- [6] クリアパルス株式会社「取扱説明書 557 型8 チャンネル前置増幅器」クリアパルス 株式会社 (2006)
- [7] 斎藤 孝男 修士論文「2次元 APD array と VLSI を用いた X 線・ 線用撮像検出器の 開発」東京工業大学 (2007)
- [8] 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)
- [9] 戸泉 貴裕、卒業論文「硬 X 線偏光計用多チャンネルシンチレーション検出器の開発」 東京工業大学 (2007)
- [10] 東京工業大学物理学科「物理学実験第一」東京工業大学(2006)
- [11] 東京工業大学物理学科「物理学実験第二」 東京工業大学 (2006)
- [12] 浜松ホトニクス株式会社 編集委員会「光電子増倍管 その基礎と応用 第2版」 浜松 ホトニクス株式会社 (1998)

- [13] 浜松ホトニクス株式会社ホームページ「UBA(ウルトラバイアルカリ)、SBA (スーパ・バイアルカリ)光電子増倍管シリーズ」
   http://jp.hamamatsu.com/resources/products/etd/jpn/html/pmt\_003.html
- [14] R.Sato, J.kataoka, Y.kanai et al., Nucl. Instr. and Meth, A,556(2006)535-542
- [15] SCIONIX 社ホームページ「Scintillation Crystals」 http://www.scionixusa.com/pages/navbar/scin\_crystals.html

謝辞

この論文を書くにあたって多くの方々に御世話になりました。指導教官の河合誠之教授 には、プレゼンの際の発表の仕方やスライドの作り方、論文の書き方をとても丁寧に見て いただいただけでなく、ゼミで天文学の基礎をしっかりと教えていただきました。ゼミ中 では、ウフル衛星やMACHO 天体など、教科書以外の宇宙に関することもお話してくだ さり、宇宙の魅力をたくさん教えていただきました。助手の片岡さんは、NeXT 衛星とい う大きなプロジェクトの実験を与えてくださり、一から丁寧に実験の方法や結果の考察の 方法を教えてくださいました。実験を何度もやり直すことがあっても、根気よく最後まで 見てくださいました。本当に感謝しています。

津布久さんはいつも気さくに接してくださいました。実験で困るといつでも手助けをし てくださり、またレポートやコロキウムの時もアドバイスをくださいました。いつも支え てくださって本当にありがとうございました。戸泉さんは APD とシンチレータのこと、 実験室にある装置のこと、パソコンのことなど、様々なことを教えていただきました。実 験以外でもいろいろお話をすることができ、本当に御世話になりました。同期の小林君 は、コロキウムやゼミ等の研究のことから普段の生活のことまでいろいろな話ができ、い つも相談相手になってくれました。田中さん、小泉さんは放射線に関することを色々教え てくださいました。谷津さんはプリアンプや APD のことなどを教えてくださいました。 石村さんは、一度やってみたかった天体観測について、明野の望遠鏡で得た写真を使って 丁寧に教えてくださいました。植野さんと小谷さんには、統計ゼミでとても御世話になり ました。有本さんは、普段から気さくに話しかけてくれ、飲み会でもいつも楽しい話をし てくれました。また、プレゼンで的確なアドバイスをくださいました。その他の研究室の 皆様にもとても御世話になりました。感謝しています。

最後に、金銭的・精神的にいつも支えてくださった両親にこの場を借りて感謝の意を述 べたいと思います。本当にありがとうございました。

68