宇宙X線検出器シールド用 BGO**ブロックの光読み出しの研究と** APD特性の 自動測定システムの立ち上げ

白井 裕久 広島大学理学部物理科学科

u1479037B

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

2005年2月10月

概 要

2011年頃の打ち上げを目標とされる次期X線観測衛星NeXTに搭載される検出器HXI、 SGDは主検出部をBGOシンチレータによるシールドで覆うことでバックグラウンドの 低減をし、さらなる感度の向上を目指す。シールドの光読み出しは従来の光電子増倍管 (PMT)に代わり、アバランシェフォトダイオード (APD)が用いられる。APDの使用に よりエネルギー分解能の向上、検出器の小型化、計量化が可能となる。そこで、BGOブ ロックを読み出す APDの条件を変えて読み出しを行い、最適化を行って検出器デザイン を固める情報を得ることを目的として研究を行った。その結果、得られる光量が APDの 面積比に比例して増加することがわかった。結果、受光面積を増やすことで得られる光量 が増加し、エネルギー分解能が良くなったが、ノイズが増加し threshold が高くなった。

また、APD による光読み出しが本格化するにあたり、将来的には 100 個を超す APD を 検査することになる。そのため、大量の APD 特性の測定を自動化する必要が ある。そこ で、LabVIEW を用いたプログラムを作成し、大量の APD 特性測定を自動化するシステ ムの立ち上げを行った。

実際に作成したプログラムで 10 個の APDを自動測定した。電圧制御、計測器 制御を行い暗電流、容量を測定した。図 は作成した容量測定のプログラムである。 測定結果をデータシートと比較したとこ ろデータシートと同様の結果を得ており、 APD 性能に大きな差はなかった。



目 次

第1章	序論	3
第2章	結晶シンチレータと半導体検出器を用いた 線検出	4
2.1	結晶シンチレータ・BGO	4
2.2	アバランシェフォトダイオード (APD)	5
2.3	シンチレーション検出器のノイズ	5
	2.3.1 信号処理回路	5
	2.3.2 信号処理回路のノイズ	6
	2.3.3 半導体検出器におけるノイズ表式	8
	2.3.4 結晶シンチレータと APD の場合のエネルギー分解能	8
2.4	NeXT 衛星のアクティブシールド	10
2.5	研究目的....................................	11
第3章	BGO ブロックの読み出し	12
3.1	実験目的...................................	12
3.2	実験方法・セットアップ	12
3.3	小型 BGO と BGO ブロックの光量比	13
3.4	BGO ブロックから APD に入る光子数	14
3.5	APD の大きさと光量	15
	3.5.1 線源の照射位置による比較	15
	3.5.2 光量比較	16
	3.5.3 エネルギー分解能 ·threshold の比較	18
	3.5.4 光量測定の再現性の検証	23
3.6	ノイズを考慮しての考察...........................	25
	3.6.1 APD 特性の測定	25
	3.6.2 ノイズ検証·パラメータ <i>B</i> の評価	27
	3.6.3 最適化のための考察	30
竺ィ卒		00
弗 4早	人重の APD の特性を測定 9 るンステムの立ち上门 測会項目	32
4.1		32
4.2		33
	4.2.1 LabVIEW の特徴とノロクラム方法	33
1.0		34
4.3		34
	4.3.1 咟电 流とノレーソタリン電圧	34
	4.3.2 师士尚谷重	40
	4.3.3 APD ケイン	41
4.4	10 個の APD の 測定結果	44

	4.4.1	暗	電	流									•	•		•			•	•				•		•	45
	4.4.2	峁	子	間褶	三国	L	•		•	•	•		•				•		•	•						•	46
4.5	まとめ).	•			•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•			•	•	•	•	46
第5章	まとめ	5																									47

第1章 序論

宇宙で起こっている高エネルギー現象を起源として、地球にはそこから飛来する放射線 が絶えず降り注いでいる。その放射線を観測することによって我々は高エネルギー現象を 解明するための情報を得ることができる。電荷を持った陽子や原子核と違い、放射線であ る X 線や 線は電荷を持たないために宇宙に存在する磁場によって進路が曲げられてし まうことがない。そのため、放射線の到来方向を決定することができ、目的とする天体の 高エネルギー現象の観測が可能である。

天体からの X 線・線を観測することによって得られる指標は、放射のスペクトル (連続スペクトル、輝線・吸収スペクトル)、時間変動、イメージ、偏光等である。連続スペクトルからは温度、磁場、電離度といった物理量が得られ、輝線・吸収スペクトルからは温度、金属等の化学成分、活動性の高さを知ることができる。さらに、時間変動からは活動の周期、イメージからは天体の空間的な情報を得ることが可能である。また、降着円盤からの X 線を偏光観測することで降着円盤の幾何学的情報を得ることができる。観測から得たこれらの情報を総合的に解析することで様々な天体から起こる高エネルギー現象を解明することができる。

しかし、天体から飛来する X 線・線は大気によって吸収されてしまい地上では観測す ることができない。そのため、観測するためには検出器を搭載した人工衛星を大気圏外へ 飛ばして観測を行う。人工衛星に検出器を搭載する際にはその検出器には大きさ・重量に 制限がつく他、大気圏外で観測を行うために耐久性も考慮しなくてはならず、求められる 性能は地上に比べて厳しいものとなる。検出器はこれら基本性能を満たしたうえで、放射 線観測において高い感度が要求される。感度の向上のためにはバックグラウンドを除去す るためのシールドは必要不可欠である。次期 X 線天文衛星 NeXT(New X-ray Telescope) 衛星では検出器を BGO シンチレータを用いた井戸型アクティブシールドで覆い、感度の 向上を計る。また、NeXT 衛星ではシールドの光読み出しに従来使用されていた光電子増 倍管 (PMT) に代わりアバランシェフォトダイオード (APD) が使われさらなる感度の向上 が期待できる。

検出器開発の技術の向上に伴い、これまで精度良い観測が困難だった硬X線·軟 線領 域の観測が精度よく観測できるようになる。このことは、銀河団、ブラックホール、超新 星残骸、 線バーストなどで起こる非熱的な粒子加速機構の謎を解明する鍵となる。

第2章 結晶シンチレータと半導体検出器 を用いた 線検出

ある物質中で発生するシンチレーション光を利用して放射線を検出する方法は昔から行われてきた。結晶シンチレータを用いた 線検出器は結晶シンチレータと光検出部で構成される。結晶シンチレータは放射線が入射するとそのエネルギーにほぼ比例したシンチレーション光を発生させる。そのシンチレーション光を光検出部で電気信号に変換して放射線の検出を行う。

本研究では結晶シンチレータに BGO、光検出部にはアバランシェフォトダイオード (APD)を用いた。

2.1 結晶シンチレータ・BGO

結晶シンチレータは阻止能が高いことが特徴である。個体は気体に比べ密度がおよそ 1000 倍あるためにガスを用いた比例計数管と比べて小さな体積で放射線を吸収でき検出 器を小型化することが可能になる。

無機結晶中のシンチレーション機構は結晶格子で決まるエネルギー状態に依存する。純 粋な結晶中の電子は価電子帯と伝導帯のどちらかのエネルギー帯にしか存在できない。価 電子帯の電子は格子上の位置に束縛されており、伝導帯の電子は結晶内を自由に移動でき る。価電子帯と伝導帯の間には禁制帯といわれるエネルギーギャップがあり純粋な結晶中 では電子はこの中に存在することができない。放射線がシンチレータに入射すると価電子 帯の電子が伝導帯へ励起され光子を放出して価電子帯へと戻る。この過程は能率が悪い 上にギャップの幅が大きいために放出された光子のエネルギーが大きく、可視光にならな い。光検出器の感度が高いのは可視光領域である。そこで通常、無機シンチレータには少 量の不純物を添加する。この不純物はギャップ内に価電子帯への電子の遷移が可能な新し いエネルギー状態を形成する。この遷移が可視光を発生させ、シンチレーション過程の基 礎となる。

本研究で用いたシンチレータのビスマスジャーマネイト Bi₄Ge₃O₁₂(BGO) は不純物を 添加する必要の無い純粋な無機シンチレータのひとつである。このシンチレータの蛍光は Bi³⁺ イオンの光学的遷移を伴っている。Bi³⁺ 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いう相当大きなシフトがあるためにシンチレーション光の自己吸 収は少ししかおこらず、大きな結晶でもその発光において透明度を保てるという特徴があ る。

BGO のもうひとつの特徴としてビスマスの大きな原子番号 (83) と密度 (7.3g/cm₃) がある。この特徴により単位体積あたりの 線の光電吸収確率が大きい。様々な結晶シンチレータの特徴を表 2.1 に示す。

特性	NaI:Tl	CsI:Tl	BGO	GSO
実効原子番号	50	54	74	59
密度 (g/cm_3)	3.67	4.51	7.13	6.71
最大発光波長 (nm)	410	565	480	430
蛍光出力(相対値)	100	45	12	20
蛍光減衰時間 (ns)	230	1000	300	60
吸収係数 (511keV:cm ⁻¹)	0.34	0.41	0.955	0.674

表 2.1: 無機シンチレータの特性比較

2.2 アバランシェフォトダイオード(APD)

結晶シンチレータと組み合わせる光検出器はこれまで数100keV ~ 数 MeV の領域では光 電子増倍管 (PMT)、GeV 領域ではフォトダイオード (PD) が一般的に使われてきた。

PMT は得られた信号を内部増幅することができるために微弱な信号も読み取ることが 可能である。しかし、装置自体が大きく体積がかさばる。そして、磁場の影響を受け、作 動させるためには 1000V を越える電圧が必要なことから消費電力が非常に大きいといっ た欠点がある。また、PMT は量子効率が~20%と悪いことも欠点のひとつである。対して PD は PMT とは逆の特徴があるといえる。装置が小さくてすみ、作動電圧も通常は 100V 以下ですむ。また、磁場の影響を受けずに丈夫である。量子効率も~80% と良い。しかし ながら、PD は信号を増幅する機能を持たないために微弱な信号はノイズに埋もれて検出 できないという欠点がある。

PMT、PD に対して APD は PMT と PD の長所を合わせたような特徴を持つ。作動電 圧が数 100V で装置が小さいために検出器設計において設計の幅が広がる。また、磁場の 影響を受けずに丈夫というのも大きな特徴といえる。量子効率は~80%と高く、信号を内 部増幅できることが大きな利点である。信号の増幅にはアバランシェ現象を利用してお り、この現象はシンチレーション光によってできたキャリアが逆バイアスの電圧によって 電極に集められる間に別のキャリアと衝突して新たなキャリアを生成する現象である。こ の内部増幅によって信号をノイズレベルから引き上げ微弱な信号の読み出しも可能とな る。この APD によりこれまでの検出器よりもエネルギー分解能や threshold が向上でき ると考えられる。

2.3 シンチレーション検出器のノイズ

検出器には様々な要因のノイズがエネルギー分解能等に影響してくる。得られたデータの信頼性を考えるうえでノイズの考慮は必要不可欠である。ここでは検出器の信号処理回路とそのノイズについて述べる。

2.3.1 信号処理回路

結晶シンチレータを用いた検出器では一般的に以下の流れで信号処理を行う。

結晶シンチレータにX線、線が入射するとそのエネルギーに比例した数のシンチレーション光子を発生する。このシンチレーション光子をPMT、PD、APDといった光検出器で読み出す。光検出器ではX線、線のエネルギーに比例した電荷が作られる。光検

出器で作られた電荷は PreAmp によって電圧へと変換・増幅され、X 線、 線のエネル ギーに比例した高さのパルスハイトを持った波形へ変換される。PreAmp からの出力は ShapingAmp へと送られる。ShapingAmp ではノイズ除去、波形のガウシアン整形といっ た正しいスペクトル情報を得るには必要不可欠な処理が行われる。ShapingAmp を通した 信号は ADC によってデジタル信号へと変換される。そしてヒストグラムが生成される。 ヒストグラム生成までのブロック図を図 2.1 に示す。



図 2.1: シンチレーション検出器の一般的な処理回路

2.3.2 信号処理回路のノイズ

信号処理回路のノイズはそれぞれ特性の違うジョンソンノイズとショットノイズがある。 それぞれのノイズを以下に示す。

• ジョンソンノイズ

ジョンソンノイズは電子回路におけるキャリアの熱的な揺らぎによって生じる。こ の熱的な揺らぎをブラウン運動という。このノイズはブラウン運動に起因するため 外界と熱的な相互作用するところ(抵抗の実部)では必然的に発生し、そこでは揺ら ぎに相当するだけの電位差が生じる。

RLC 共鳴回路を考えることでこのノイズのパワースペクトルを求めることができる。キャリアの熱的揺らぎは L と C で静電ポテンシャルとして蓄えられる。電流揺らぎを i、電圧揺らぎを vとするとエネルギーは式 (2.1) で与えられる。

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

式 (2.1) は一次元調和振動子の場合と同様に考えることができ第一項、第二項それ ぞれの平均エネルギーはエネルギー等分配則より

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

式 (2.2) のようになる。パワースペクトルを $N_v(f)(f$ は周波数)、共鳴周波数を $f_0(\equiv \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}})$ とすると抵抗に発生する熱雑音電圧とその結果コンデンサーにかかる電 圧との関係は次のようになる。

$$\overline{v^2} = \int_0^\infty \frac{N_v(f)df}{1 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2 R^2}$$
$$\simeq \frac{N_v(f_0)}{4RC} \qquad (\omega \equiv 2\pi f)$$
(2.3)

このとき、回路は f_0 で鋭く同調されているとしている。 $L \ge C$ の値により f_0 の値は 任意に変化するので、式 (2.1) と式 (2.2) よりパワースペクトルは

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

となる。このとき、 $N_v(f)$ は周波数に依存しないことがわかる。キャリアの衝突時間を τ_c とすると、キャリア速度の相関が $\exp(-\frac{|\tau|}{\tau_c})$ のような有限時間の減衰で示される場合、 $N_v(f)$ には $\frac{1}{1+\omega^2\tau_c^2}$ という周波数依存性が表れる。しかしながら、 τ_c はほとんどの場合で問題にならないほど短い(典型的な金属では~ 10^{-14})。したがってジョンソンノイズはホワイトノイズと考えることができる。

また、式(2.4)は抵抗に直列に存在する電圧ノイズパワーだが、抵抗に並列に存在する電流ノイズパワーとした次式でも等価である。

$$N_{I} = \frac{N_{v}(f)}{R^{2}} = \frac{4kT}{R}$$
(2.5)

• ショットノイズ

ショットノイズは真空管や半導体素子で問題となる電流性ノイズのことである。ショットノイズはキャリア数の揺らぎに起因するもので、キャリア速度の揺らぎに起因するショットノイズとは違う性質をもつ。

キャリアの正味の流れが存在するところに数の揺らぎがノイズとして現れる。そのため、外部電界、キャリア密度勾配、温度勾配のいずれかが存在するところにショットノイズは発生する。代表的な例として半導体の両端に電圧をかけた場合のショットノイズを考える。光が半導体に吸収されると光子エネルギーによって内部で電子やホールといったキャリアが発生する。この時、両端にかけた電圧によりキャリアが移動し電流が流れる。しかし、光電効果の過程は時間的に均一でない確率過程のために電流に揺らぎが生じてしまう。流れる電流I(t)は半導体中のキャリア数N(t)に比例するはずなので電流揺らぎi(t) = I(t) - Iの自己相関関数を計算すると次式のようになる。

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

このとき、相関 $R_N(\tau) \equiv \overline{N(t) \cdot N(t + \tau)}$ を考えると、これは時刻 t に存在したキャ リアが時刻 $t + \tau$ における電流揺らぎに与える影響を示している。したがって、キャ リアの平均寿命を τ_l 、電極間の平均ドリフト時間を τ_d とすると R_N は τ_l によって指 数関数的に減少し、 τ_d によって直線的に減少すると考えられる。よって、 R_N は

$$R_N(\tau) = \overline{N^2(t)} \cdot (1 - \frac{|\tau|}{\tau_d}) \cdot \exp(-\frac{|\tau|}{\tau_l}) \quad (|\tau| \le \tau_d)$$

= 0 (|\tau| > \tau_d) (2.7)

とおける。Wiener-Khintchineの公式よりi(t)のパワースペクトル $N_I(f)$ は $I = \frac{eN}{\tau_d}$ 、 $\overline{N^2(t)} = \alpha N$ とおき、式 (2.8)を計算することで求まる。

$$N_{I}(f) = 2 \cdot \frac{I^{2}}{N^{2}} \int_{-\infty}^{\infty} R_{N}(\tau) \exp(i\omega\tau) d\tau \quad [\mathbf{A}^{2}/\mathbf{Hz}]$$

$$= 2eI \frac{\alpha}{\tau_{d}} \cdot \int_{-\tau_{d}}^{\tau_{d}} (1 - \frac{|\tau|}{\tau_{d}}) \cdot \exp(-\frac{|\tau|}{\tau_{l}}) \exp(-i\omega\tau) d\tau \qquad (2.8)$$

また、理想的な金属では $\alpha = 0$ となり、単一金属中に電流を流してもこのノイズは 発生しない。次にふたつの場合を考えると

$$N_I(f) \simeq 2\alpha e I \cdot \frac{2\tau_l/\tau_d}{1+\omega^2 \tau_l^2} \qquad (\tau_l \ll \tau_d)$$
(2.9)

$$N_I(f) \simeq 2\alpha e I \cdot \frac{\sin^2(\omega \tau_d/2)}{(\omega \tau_d/2)^2} \qquad (\tau_l \gg \tau_d)$$
(2.10)

となる。典型的な半導体 p-n 接合で逆バイアスをかけた場合、式 (2.10) が適用できる。このとき、高周波領域にならない限りノイズパワーは $N_I(f) \simeq 2\alpha eI$ と表すことができショットノイズはホワイトノイズとして近似できる。

2.3.3 半導体検出器におけるノイズ表式

ジョンソンノイズとショットノイズを合わせた信号処理回路のノイズを電子数の揺らぎ に対応させて $\overline{\delta_e}$ とし、これを等価ノイズ電荷 (ENC) という。Si 半導体で直接 X 線を検出 した場合、平均して E_g (=0.00365keV) の入射エネルギーあたりに 1 個の電子が出る。そ のため、ノイズによる信号電子数揺らぎは $\delta_{noise} = E_g \overline{\delta_e}$ (keV) のエネルギー揺らぎとして 計測される。このときのエネルギー揺らぎは式 (2.11) で表される。

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

式 (2.11)を使って、Si半導体でX線を検出したときのノイズ評価を行う。ここで、 $R_P(\mathbf{G}\Omega)$: バイアス抵抗、 $\tau_s(\mu \mathbf{s})$:シェーピングタイム、 $g_m(\mathbf{n}\mathbf{S})$:プリアンプ内の初段 FET 特性を 示す量、 $C_{in}^2(\mathbf{p}\mathbf{F})$:プリアンプへの入力容量、 $I_n(\mathbf{n}\mathbf{A})$:半導体検出器の暗電流である。式 (2.11)の第1項はほぼ I_n が支配するために電流性ノイズ、第2項は容量性ノイズと呼ばれ る。そして、 δ_{te}^2 はジョンソン、ショットノイズ以外の要因によるノイズである。この式 の I_n 以外のパラメーターはプリアンプの性能で決まり、 $f(C_{in})$ という容量曲線を測定す ることで求めることができる。

2.3.4 結晶シンチレータと APD の場合のエネルギー分解能

放射線計測においての理想は入射した放射線のエネルギーに対応してデルタ関数的にヒ ストグラムが作成されることである。しかし、実際の計測ではシンチレーション光の揺ら ぎや信号処理回路のノイズによって、ある平均値 H_0 のまわりにガウス分布し、広がった スペクトルが得られる。得られたスペクトルの標準偏差 σ が小さいほど検出器の性能は よく、 $R = \frac{2.355\sigma}{H_0}$ で表される R をエネルギー分解能という。すなわち、エネルギー分解能 は検出器の性能を示し、エネルギー値が近い異なる 2 つの放射線を区別して検出する能力 を表す値である。この値が小さいほどより近いエネルギーの放射線を区別して検出することができる。

結晶シンチレータと半導体検出器を用いた放射線検出器のエネルギー分解能は入射した 放射線の E とすると式 (2.12)のようになる。

$$(\frac{\Delta E}{E})^2 = (\delta_{sc})^2 + 2.355^2 \frac{F}{N_{ph}\gamma Q} \cdot \frac{1}{E} + (\delta_{noise} \cdot \frac{1}{E_q} \cdot \frac{1}{N})^2$$
(2.12)

式 (2.12) の第1項にある δ_{sc} (%) はシンチレータの結晶自体の特性によるものである。これは、結晶位置によってシンチレーション効率や表面での反射条件が不均一であることやシンチレーション応答の非直線性によってエネルギー分解能が悪くなることを表している。第2項はシンチレーション光の数の統計的ゆらぎに起因するエネルギー分解能の劣化を表す。F は電荷キャリアの生成過程が独立していないために、キャリアのポアソン揺らぎからの補正因子でファノ因子と呼ばれる。APD の場合、アバランシェ過程におけるゆらぎによって2~3程度となる。 N_{ph} は 1keV あたりのシンチレータの光子数で BGO の場合は $N_{ph} = 9.8$ 、Q は APD の量子効率 0.8、 γ はシンチレーション光の読み出し効率である。第3項は電気回路系ノイズによるエネルギー分解能の劣化である。 δ_{noise} は式 (2.11)によって求めたものだが、半導体検出器に APD を用いた場合はアバランシェ過程に伴う超過揺らぎによって I_n に B というパラメータがかかり、式 (2.13)のようになる。

$$\delta_{noise \cdot APD}^2 = (3.0 \times 10^{-3} \cdot \frac{1}{R_P} + 0.65 \cdot B \cdot I_n) \cdot \tau_s + (2.1 \times 10^{-2} \cdot \frac{C_{in}^2}{g_m}) / \tau_s + \delta_{\text{ft}}^2 (\text{keV})^2$$
(2.13)

式 (2.12) において、N は半導体検出器で作られる電子ホール対である。そのため、N は次式で表すことができる。

$$N = N_{ph} \gamma QG \cdot E \tag{2.14}$$

よって、結晶シンチレータと APD を用いた場合のエネルギー分解能は最終的に式 (2.15) で表される。

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = (\delta_{sc})^2 + 2.355^2 \frac{F}{N_{ph}\gamma Q} \cdot \frac{1}{E} + \left(\delta_{noise} \cdot \frac{1}{E_g} \cdot \frac{1}{N_{ph}\gamma QG} \cdot \frac{1}{E}\right)^2 \tag{2.15}$$

また、ノイズがスペクトルに現れる上限のエネルギーを threthold といい、

$$E_{th} \simeq 3\delta_{noise} \cdot \frac{1}{E_g N_{ph} \gamma QG}$$
(2.16)

で表される。*E*_{th}が低いほど検出器の性能がよく、低エネルギー側まで検出できることになる。そのため、検出器開発ではthretholdを下げることも必要である。

2.4 NeXT 衛星のアクティブシールド

X線天文学の分野で日本は1979年の「はくちょう」から数えて5個の衛星を打ち上げ、 それぞれ成果をあげてきた。宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 (JAXA/ISAS) は 2011年の打ち上げを目標としてX線観測衛星 NeXT 衛星 (New X-ray Telescope)を計画 している。

宇宙では大量の低エネルギー粒子がもつエネルギーを少数の高エネルギー粒子が奪うといった過程がしばしば起こる。そのため、熱平衡分布からは離れた非熱的な分布をした粒子群が作られている。これら非熱的な粒子は10keV以下では熱的放射に圧倒されるために観測は困難である。「すざく」以前の衛星では10keVを超えるエネルギー領域では精度のよい観測ができなかったために非熱的な粒子の加速機構は大きな謎であった。しかし、昨年打ち上げられた「すざく」によって非熱的な粒子の観測がこれまでにない高い精度で可能になった。しかしながら、「すざく」には硬X線領域での撮像能力がないために空間情報を得ることができない。NeXT衛星では80keVまでの硬X線領域の撮像観測や数100keVの軟線領域までを「すざく」を上回るさらなる高い精度で観測することを目標としている。

NeXT 衛星に搭載される硬 X 線撮像検出器 (Hard X-ray Imager:HXI) や軟 線検出器 (Soft Gamma-ray Detector:SGD) はバックグラウンドを低減するためにそれぞれ主検出器 を BGO の井戸型シールドと BGO ブロックで視野以外の部分を囲っている。BGO シール ドを行うことで検出器の視野を絞り、さらなるバックグラウンドの低減を可能とする。ま た、BGO シールドは地磁気異常帯 (South Atlantic Anomary:SAA) 中のプロトンの削減、放射化による崩壊系列を同定して除去する役割が求められている。その BGO の信号読み 出しには従来使われていた PMT ではなく APD が用いられる。APD によって装置の小型 化、検出器設計の幅の広がりが可能となる。さらに量子効率がよいので threshold をさげ ることが可能となる。

このように NeXT 衛星では主検出器を BGO シールドで覆い、BGO の読み出しに APD を用いることでさらなるバックグラウンドの低減、検出器の感度の向上が可能となる。



図 2.2: 軌道上の NeXT 衛星予想図 (左) と HXI 概念図 (中央) と SGD 概念図 (右)

2.5 研究目的

硬X線、 線は非熱的な粒子の情報を持っており、これまで謎になっていた粒子加速の メカニズムを解く鍵になる。NeXT 衛星では世界で始めての軟X線領域での撮像観測や 軟 線までの広い波長域での観測をこれまでにない高い精度で行うことで、謎を解明する ことに期待がよせられている。

精度の高い観測を行うためにはバックグラウンドを減らすためのシールドは必要不可欠 である。「すざく」HXD ではBGO シールドのシンチレーション光読み出しにはPMT が 使われているが、NeXT 衛星ではより高い精度を求め、シールドの読み出しは APD が使 用される。本研究では主検出部の底に置かれる BGO ブロックを APD で読み出す実験を 行った。、BGO ブロックは APD 素子 1 個に比べて大きいために効率よく光を読み出すた めの工夫が必要となる。BGO ブロックの APD による読み出しは、世界でまだなされて おらず、初めての実験である。そのため、BGO ブロックを APD で読み出す時に APD の 条件をどのようにしたら効率よくシンチレーション光を集めることができるかのデータ が無い。BGO ブロック・アクティブシールドを読み出すための最適な APD の配置を決定 しないと、衛星の検出器設計において内部の配置を決定することができず、設計に支障を きたす。よって、本研究は衛星の感度、設計の両方の面において重要なものである。そこ で、APD の大きさ・位置を変えて、BGO ブロックから得られる光量、エネルギー分解能、 threshold がどのように変化するかを検証した。そして、得られたデータをもとに BGO ブ ロックを APD で読み出すための最適化を行うことを目的としている。

NeXT 衛星に APD が使われるようにシンチレーション光の読み出しに APD が本格的 に使われるようになっている。そして、将来的には大量の APD を検査することになる。 その大量の APD の特性を手作業で測定することは非常に時間がかかり、大変な作業とな る。そこで、National Instruments 社のソフトウエアである LabVIEW を用いて測定を自 動化するシステムの立ち上げを行った。測定の自動化により短時間で大量の APD の性能 を測定、評価できるようになることを目的としている。

第3章 BGOブロックの読み出し

3.1 実験目的

HXI、SGD に取り付けられるアクティブシールドはバックグラウンドを除去するうえ で有効な手段である。バックグラウンドを効果的に除去するためにはシールドのもつバッ クグラウンドの情報を正確に得る必要がある。そのためにはシールドに使われる井戸型 BGO、BGO ブロックのシンチレーション光を有効に読み出さなくてはならない。シンチ レーション光の読み出しには従来からの PMT ではなく、コンパクトで量子効率のよい APD が使用される。APD はシールド表面に対して受光面積が小さい。そのため、アク ティブシールドを有効に活かすためには BGO からのシンチレーション光を効率よく集め ることが必要である。

本実験では BGO ブロックを用いて APD による光読み出しを行った。その際に APD の 大きさや APD を BGO ブロックに接着する位置を変えて再現性や光量、エネルギー分解 能がどのように変化するかを検証した。この実験により BGO ブロックを APD で読み出 すための最適化を行う。なお、APD で測定する前に、従来使用されてきた PMT を用い て BGO ブロックの光量を測定した。

3.2 実験方法・セットアップ

測定はBGO ブロックにAPD を接着して線源を照射し、スペクトルを計測した。APD とBGO ブロックの接着には応用光研工業株式会社製の6262A 光学グリースを用いた。測定に用いたAPD は受光面が3mm×3mm、5mm×5mm、10mm×10mm、18mm×18mmのAPD を用いた。その内、5mmAPD、10mmAPD はBGO ブロックに四つ接着した状態での測定も行った。BGO ブロックを図3.1、3.2 に示す。BGO ブロックの大きさは、上部から見ると60mm×60mmの正方形で本体の高さが60mmである。また、底面の直径は45mmである。BGO ブロックに APD を接着する部分以外は、シンチレーション光を反射させるためにゴアテックス反射材で覆った。さらに、ゴアテックスの外側にも反射材としてバルカーテープを巻き、覆ってある。APD を光学グリースで接着した後、APD とBGO の間に隙間ができないようにバルカーテープで覆い、光洩れを起こさないようにしてある。このとき、BGO 結晶が見えている部分も完全に見えなくなるようにバルカーテープで覆った。また、5mmAPD、10mmAPD を四つ接着しての測定は全ての APD を並列に接続し、四つの APD に対して同じ大きさの逆バイアスがかかるようにして、PreAmp への入力も全ての APD からの信号が足し合わされて入力されるように接続した。

光量測定の再現性の検証と APD の条件を変えての光量比較の実験において、どちらも 同じ APD、モジュールを用いた。測定に用いたモジュールを表 3.1 に示す。10mm APD の SPL 4650 は 4APD による測定の際に用いたもので、その中の#32、#40、#42、#48 を用 い、また、5mm APD 四つの測定には#1、#3、#4、old#4 を用いた。信号のアナログ/デ ジタル変換には Pocket MCA (MCA 8000A)を用いた。セットアップを図 3.3 に示す。図 3.3 の括弧の部分は 4APD による測定を行う時に増える三つの APD である。

APD	型番					
3mmAPD	浜松ホトニクス S8664-33					
5mmAPD	浜松ホトニクス S8664-55					
10mmAPD	浜松ホトニクス S8664-1010					
10mmAPD	浜松ホトニクス SPL 4650					
18mmAPD	浜松ホトニクス SPL 4653					
モジュール	形式					
PreAmp	CLEAR-PULSE MODEL 580K					
Shaper	ORTEC MODEL 571					

表 3.1: 使用したモジュール



図 3.1: BGO ブロックの底面



図 3.2: BGO ブロックの側面

HV ADC PC CSA Shaper

図 3.3: APD による測定のセットアップ

3.3 小型BGOとBGOブロックの光量比

今回用いる BGO ブロックの光量を基準光量を出す 5mm 角の小型 BGO と比べるために それぞれスペクトルを計測した。その際、シンチレーション光読み出しには同一の PMT R6231 を用いた。バイアス 710V、 温度-30 のもとで線源に¹³⁷Cs を用いて測定を行っ た。そのときのスペクトルを図 3.4、3.5 に示す。また、PreAmp 出力のパルスハイトの値 を表 3.2 に示す。表 3.2 より、BGO ブロックの光量は小型 BGO に比べて少ないことがわ かる。また、エネルギー分解能は式 (3.1) のようになる。*PH* はパルスハイトである。

$$E_{res} \propto \frac{1}{\sqrt{PH}} \tag{3.1}$$

BGO ブロックを読み出したとき、パルスハイトは $\frac{352}{550} \sim 0.640$ 倍になっている。よってエネルギー分解能は小型 BGO を基準とすると $8.12 \times \frac{1}{\sqrt{0.640}} \sim 10.2$ (%) となる。実際の測定

結果は9.61(%)で誤差を考慮すると式(3.1)の結果と合うといえる。

APD 素子の大きさとBGO ブロックの光量を考慮すると、シンチレーション光を効率よ く集めることが課題といえる。

シンチレータ	パルスハイト	光量比	エネルギー分解能(%)
小型 BGO	$550 \mathrm{mV}$	1	8.12 ± 0.31
BGOブロック	$352 \mathrm{mV}$	0.64	9.61 ± 0.22

表 3.2: 小型 BGO と BGO ブロックの光量比較



3.4 BGO ブロックから APD に入る光子数

BGO ブロックから APD に入る光子数を調べるために、先ほど用いた 5mm 角 BGO を今 回用いた 10mmAPD に接着して測定した。この、小型 BGO の光子数は既知で 10002/MeV である。よって、小型 BGO に 10mmAPD を接着して測定した場合、APD に入射する光 子数は 10002/MeV×0.8 となる。この数と、小型 BGO と BGO ブロックのピークチャン ネルの比から BGO ブロックを 10mmAPD で読み出した際の APD に入射した光子数を求 める。測定は線源に ¹³⁷Cs、逆バイアスは 300V で行った。Shaper ゲインは小型 BGO が 200×15、BGO ブロックが 1000×15 である。得られたスペクトルをそれぞれ図 3.6、3.7 に ピークチャンネルと光子数をまとめたものを表 3.3 に示す。表 3.3 の小型 BGO のピーク チャンネルは BGO ブロックの Shaper ゲインを基準にしてゲイン補正を行った値である。

シンチレータ	ピークチャンネル	APD に入射した光子数
小型 BGO	10646ch	5297 個
BGO ブロック	1610ch	801 個

表 3.3: 小型 BGO と BGO ブロックの光子数

結果から、BGO ブロックから APD に入射した光子数は 662keV で小型 BGO の 15.1%となった。BGO ブロックを APD で読み出すときは小型 BGO に比べて得られる光量が減少するために読み出しの工夫が要求される。



3.5 APDの大きさと光量

BGO ブロックに接着する APD の大きさを変えて測定を行った。APD の条件は 3.2 で述 べた通りである。APD の接着は BGO ブロックの底面と側面に接着した。1APD による測 定は BGO ブロックの底面の中心に接着し、4APD の底面の接着で、5mmAPD による測定 は各 APD の間を 25mm 離して接着した。BGO ブロックの側面への接着は 5mmAPD ×4 の 場合でのみ行った。以後、5mmAPD 四個の底面の接着は 5mm×4-bottom、側面の接着は 5mm×4-side と記述する。測定は逆バイアスが 300V、350V の状態で行い、線源には ¹³⁷Cs、 ²²Na を用いた。線源の照射位置は APD が 3mm、5mm×1、10mm×1、5mm×4-bottom の 測定では BGO ブロックの側面のみで、APD が 5mm×4-side、18mm、10mm×4 の測定で は BGO ブロックの側面のみで、APD が 5mm×4-side、18mm、10mm×4 の測定で は BGO ブロックの側面と上部への二通りの照射を行った。また、5mm×4-side での測定 は側面の照射を二面に対して行った。以後、線源の照射位置の違いは APD 条件に-top(上 部への照射)、-side(側面への照射)を付けて記述する。APD の接着状況と線源の照射位置 を図 3.8、3.9 に示す。図中の黒塗りの部分が APD である。ただし、5mm×4-side の図は 手前と向こう側の側面にも APD が接着してある



図 3.8: 18mmAPD の接着場所と線源の照射 図 3.9: 5mm×4-bottom の接着場所と線源の 位置 (左) と 3mm、5mm、10mm での接着場 照射位置 (左) と 5mm×4-side の接着場所と線 所と線源の照射位置 (右) 源の照射位置 (右)

3.5.1 線源の照射位置による比較

BGO は阻止能が高いために、BGO に入射した放射線はほぼ入射した場所でエネルギー を失う。そのため、シンチレーション光は入射場所から起こると考えられる。放射線の入 射位置によって得られる光量が変わることも考えられ、放射線の入射場所による光量変 化を調べるために放射線の入射場所を変えて測定を行った。5mm×4-side は BGO ブロッ クの側面に APD を接着しているので、放射線が入射する BGO ブロックの側面の違いに よる光量変化を調べるため、異なった2側面へ放射線を入射した。それぞれの入射位置 を-side1、-side2として記述する。結果を表 3.4 に示す。

表 3.4 の結果をもとに比較すると、5mm×4-side での side1、side2 への照射によるピー クチャンネルの変化は平均して 3.51%だった。また、topとside1 のピークチャンネルの変 化は平均で 7.37%、topとside2 のピークチャンネルの変化は平均して 10.6%となった。こ のことから、BGO ブロックの側面に APD を接着したとき、放射線の側面のみへの入射に 伴う光量の変化は少ないが、BGO ブロックの上部への入射と側面への入射には多少の光 量の変化が起こるといえる。また、18mmAPD での topと side の変化は平均して 1.19%、 10mm×4 での topと side の変化は平均して 1.56%で大きな差はなかった。このことから、 底面に受光面積の大きい APD を接着した場合、BGO ブロックへの放射線の入射位置に よる得られる光量の変化は少なく、放射線の入射位置に関係なく光量を得ることができる といえる。

APD	照射	逆バイアス	ピークチャンネル				
条件	位置	(V)	511(keV)	662(keV)	1275(keV)		
	top	300	799	1075	1884		
		350	939	1203	2349		
5 mm $\times 4$	side1	300	761	927	1803		
side		350	861	1128	2189		
	side2	300	737	900	1749		
		350	821	1098	2087		
18mm	top	300	1628	2148	3949		
		350	1032	1342	2602		
	side	300	1650	2181	3994		
		350	1024	1330	2565		
10mm	top	300	2444	3175	5872		
$\times 4$		350	2526	3242	6412		
	side	300	2477	3250	5938		
		350	2577	3285	6488		

表 3.4: 線源の照射位置の違いによるピークチャンネルの比較

3.5.2 光量比較

精度良く観測するためには BGO ブロックから多くのシンチレーション光を集める必要 がある。そこで、BGO ブロックに接着する APD の条件によって、得られるシンチレー ション光がどのように変化するかを検証した。

得られた光量を求めるにはスペクトルによって求めたピークチャンネルと計測したとき の逆バイアスに対応する APD ゲインを求める必要がある。得られた光量をN、APD ゲ インをG、ピークチャンネルをPとすると、式 3.2 の関係がある。

$$N \times G \propto P$$
 (3.2)

式 3.2 より、Shaper ゲインを一定のものにすることでピークチャンネルと APD ゲイン から得られた光量比を求めることができる。基準となる APD 条件の光量を N_0 、光量比 を求めるときの APD 条件の光量を N とし、それぞれの APD ゲイン、ピークチャンネル を G_0 、G、 P_0 、P とすると、式 3.3 によって光量比を求めることができる。

$$\frac{N}{N_0} = \frac{P}{P_0} \times \frac{G_0}{G} \tag{3.3}$$

また、 $5mm \times 4$ 、 $10mm \times 4$ の 4APD による測定での光量比は、4APD それぞれに入射し たシンチレーション光の光量が等しいと仮定して求めた。この仮定により、4APD それぞ れの APD ゲインを G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 とすると式 3.4 によって 4APD による測定での光量比 を求めることができる。

$$\frac{N}{N_0} = \frac{P}{P_0} \times \frac{4G_0}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4} \tag{3.4}$$

式 3.3、3.4 によって光量比を求める際、基準には 5mmAPD ひとつで測定したときの値 を用いた。光量比と受光面積比をまとめたものを表 3.5、BGO ブロックの底面に APD を 接着したときのみの面積比と光量比の関係を図 3.10 に示す。

APD の条件	光量比	受光面積比
3mm	0.360	0.294
$5\mathrm{mm}$	1.00	1.00
10mm	2.02	4.00
5mm×4-bottom	1.71	4.00
5 mm \times 4-side-side1	1.14	4.00
5 mm \times 4-side-side2	1.10	4.00
$5 \text{mm} \times 4$ -side-top	1.23	4.00
18mm-top	5.98	12.9
18mm-side	5.97	12.9
$10 \text{mm} \times 4\text{-side}$	8.14	16.0
$10 \text{mm} \times 4\text{-top}$	8.01	16.0

表 3.5: APD の違いによる光量比較

表 3.5、図 3.10 より、得られる光量は受光面積を増やすことで増加し、受光面積に比例 していることがわかる。また、10mmと5mm×4-bottomを比較すると、同じ受光面積で あるにもかかわらず、得られる光量は10mmのときの方が多い。10mmはBGO ブロック の底面の中心に接着しているのに対し、5mm×4-bottomは4APD全てを対称にBGO ブ ロックの底面の端に接着している。このことから、底面に集まるシンチレーション光は端 よりも中心の方が多いと考えられる。さらに、側面にAPDを接着した状態では、10mm、 5mm×4-bottomの両条件よりも得られる光量が30~45%ほど減少している。よって、シ ンチレーション光を効率良く集めるには、BGO ブロックの側面よりも底面に接着する方 が良いといえる。



図 3.10: 横軸が受光面積比、縦軸が光量比のグラフ。緑のポイントは 5mm×4-bottom の 結果

3.5.3 エネルギー分解能 threshold の比較

APD 条件を変えることによって、エネルギー分解能や threshold がどのように変化す るか検証した。図 3.11、3.12 にそれぞれの APD 条件によるエネルギーごとのエネルギー 分解能、表 3.7、図 3.13 に threshold エネルギーの変化を示す。threshold エネルギーはス ペクトルからノイズが大量にのらなくなるチャンネルを目視で決め、エネルギー・ピーク チャンネルの関係より threshold チャンネルからエネルギーへ変換することで求めた。

図 3.11、3.12より、得られる光量の増加とともに、エネルギー分解能が向上している。また、逆バイアスが 300V のときは 511keV、662keV、1275keV 全てのエネルギーで 12%以上で 10%以下にならないのに対し、350V では 1275keV において最も良い値で 8.12±0.33%を 得ることができた。逆バイアスが 300V から 350V になることで、APD ゲインが増加し、 信号をノイズレベルから大きく引き上げたためにエネルギー分解能が向上したと考えら れる。662keV に対してのエネルギー分解能の変化を表 3.6 に示す。表 3.6 の値はすべて% である。

APD	逆バイアス (V)						
条件	300	350					
3mm	36.89 ± 1.40	34.27 ± 1.67					
5mm	24.89 ± 0.65	$23.47 {\pm} 0.38$					
10mm	18.10 ± 0.23	$15.95 {\pm} 0.14$					
5mm×4-bottom	$26.61{\pm}1.30$	$18.19 {\pm} 0.28$					
$5 \text{mm} \times 4$ -side-side1	33.19 ± 1.05	$25.64 {\pm} 0.37$					
5mm×4-side-side2	32.58 ± 0.88	$25.30 {\pm} 0.83$					
5 mm \times 4-side-top	26.70 ± 0.64	25.11 ± 0.66					
18mm-side	$22.24{\pm}0.97$	$13.57 {\pm} 0.49$					
18mm-top	$21.14{\pm}0.61$	12.29 ± 0.17					
10mm×4-side	20.80 ± 0.89	12.38 ± 0.25					
10mm×4-top	19.17 ± 0.84	$11.56 {\pm} 0.36$					

表 3.6: 662keV のエネルギー分解能の変化



図 3.11: 逆バイアス 300V で測定したときの 図 3.12: 逆バイアス 350V で測定したときの エネルギー分解能の変化 エネルギー分解能の変化

表 3.7、図 3.13 から threshold エネルギーの変化をみると、3mmAPD で測定したときの値が最も高い値である。最も threshold エネルギーが低いのは $5mm \times 4$ -bottom の 350V で、75.9 keV である。threshold エネルギーは逆バイアスが 300V よりも 350V の方が低く、350V にすると 300V のときの $\frac{1}{2}$ 以下になるものが多く、300V より 350V で測定した方が良い結果が得られた。

AP	PD 条件 3mm		5mm	10mm	5mm4-bottom	5mm4-side-side
電	300V 458 超		152	151	367	324
圧	350V	397 超	79.9	85.3	75.9	113
AP	D 条件	5mm4-side-top	18mm-side	18mm-top	10mm4-side	10mm4-top
電	300V	449 超	279	276	245	249
圧	350V	102	117	120	91	96

表 3.7: threshold エネルギー。表中の値は全て keV



図 3.13: threshold エネルギーの変化。横軸は受光面積



図 3.14: 上から、3mm、5mm、10mm、5mm×4-bottom のスペクトル。左ふたつが 300V での 137 Cs と 22 Na、右ふたつが 350V での 137 Cs と 22 Na である。また、10mm·350V での 22 Na のスペクトルは Shaper ゲインが 200×8 になっている



図 3.15: 上から、 $5mm \times 4$ -side-top、 $5mm \times 4$ -side-side1、 $5mm \times 4$ -side-side2 のスペクトル。 たふたつが300Vでの 137 Cs と 22 Na、右ふたつが350Vでの 137 Cs と 22 Na である。



図 3.16: 上から、18mm-top、18mm-side、10mm×4-top、10mm×4-sideのスペクトル。左 ふたつが 300V での¹³⁷Cs と²²Na、右ふたつが 350V での¹³⁷Cs と²²Na である。18mm·300V での²²Na のスペクトルは Shaper ゲインが 500 × 15、10mm×4 の測定では ²²Na のスペク トルの Shaper ゲインは 300V で 500 × 15、200 × 8 である

3.5.4 光量測定の再現性の検証

APDの大きさを変えて光量がどうなるのかを測定した際、再現性も検証した。一度 BGO ブロックに APD をつけて測定し BGO から APD を外した後、同じセットアップで測定し て再現性の検証を行った。

ピークチャンネル

測定には線源に¹³⁷Csを用いた。また、1回目、2回目ともに-30の状態で結晶が完全 に冷えるまで8時間以上冷却してから測定を開始した。完全に冷却された状態でスペクト ルをとり、662keVでのピークチャンネルの比較を行った。そのときのスペクトルを図3.17 に示す。また、Shaper ゲインとピークチャンネルの比較を表にまとめたものを表3.8 に 示す。Shaping time は全て 6µs である。ピークチャンネルを比較すると 5mmAPD の時に 19.6%の再現性の違いがある。しかし、10mmAPD での再現性はいずれも 5%以内で大きな 変化はなかった。これは、10mmAPD で読み出した際に得られた光量が 3mm、5mmAPD で読み出したときに比べ増えたためと考えられる。すなわち、¹³⁷Cs の同一線源に対して のピークチャンネルの値が大きくなったため 3mm、5mmAPD と同じ程度のピークチャン ネルのずれがあったとしても再現性においては数%の違いにしかならないといえる。

	Shaper ゲイン	ピーク	チャンネル	1回目からのずれ(%)
		1回目	2回目	$\frac{ P_1 - P_2 }{P_1} \times 100$
3 mmAPD(300 V)	1000×15	335	307	8.36
3 mmAPD(350 V)	500×8	446	379	15.0
5 mmAPD(300 V)	1000×15	680	779	14.6
5 mmAPD(350 V)	500×8	813	972	19.6
10 mmAPD(300 V)	1000×15	2181	2128	2.43
10 mmAPD(350 V)	500×8	2897	2872	0.863

表 3.8: ピークチャンネルの比較

エネルギー分解能

エネルギー分解能についても比較を行った。その結果を表 3.9 に示す。いずれの結果も 1回目と2回目の差は 10% 以内の再現性となっており、再現性は確認できる。

BGO ブロックを APD で読み出した際の再現性は APD のサイズに関係なく確認でき たといえる。しかし、1回目と2回目には多少のズレがある。その原因として考えられる のは BGO ブロックに APD を接着する状態が不安定であることが考えられ、まだ改善の 余地は残る。接着の精度を高めることで、誤差の少ないより精度の高い計測が可能になる といえる。また、精度の高い測定を行うために 3mm、5mmAPD のピークチャンネルにみ られた 10%以上の再現性の違いを 10%以内にする必要がある。

表 3.8、3.9 から、得られる光量が増えると再現性がよくなるといえる。よって、再現性 の向上のためには得られる光量を増やすことが重要な課題といえ、光量を効率よく集める ことはエネルギー分解能の向上、再現性の向上の両方の面において重要である。

	エネルギ	一分解能	1回目からのずれ(%)
	1回目	2回目	$\frac{ E_{res1}-E_{res2} }{E_{res1}} \times 100$
3 mmAPD(300 V)	29.26 ± 0.70	30.81 ± 0.80	5.30
3 mmAPD(350 V)	31.27 ± 0.99	29.99 ± 0.79	4.09
5mmAPD $(300V)$	20.79 ± 0.45	20.52 ± 0.35	1.30
5 mmAPD(350 V)	21.58 ± 0.47	19.77 ± 0.34	8.39
10 mmAPD(300 V)	13.41 ± 0.09	13.53 ± 0.13	0.894
10 mmAPD(350 V)	13.81 ± 0.15	13.70 ± 0.15	0.797

表 3.9: エネルギー分解能の比較



図 3.17: 上から 3mm、5mm、10mmAPD のスペクトル。左ふたつの列は 300V での 1 回 目 (左端) と 2 回目 (中右) のスペクトル、右ふたつの列は 350V の 1 回目 (中右) と 2 回目 (右端) のスペクトル

3.6 ノイズを考慮しての考察

測定によって得られた結果は前セクションで示した。このセクションでは得られた結果のノイズ評価を行う。ノイズ評価を行うことで、BGO ブロックを APD で読み出す際の 最適な条件を求める。また、エネルギー分解能の理論値を求め、測定結果と比較すること で、測定の際にノイズを落とすことができていたかを評価することがでる。

3.6.1 APD 特性の測定

式 (2.13)、(2.15) より、ノイズ評価には APD 特性である暗電流、端子間容量、APD ゲ インを測定する必要がある。そのため、ノイズ評価に必要な APD 特性を測定した。結果 を次に示す。

1. 暗電流

測定に用いた APD の暗電流の変化を図 3.18、逆バイアスが 300V·350V での暗電流を 表 3.10 に示す。暗電流は-30 で測定し表中の値はすべて [nA] である。また、350V での暗電流を単位受光面積あたりの値にしたものを表 3.11 に示す。表 3.11 より、単 位受光面積あたりの暗電流を比較すると、18mmAPD が最も単位受光面積あたりの 暗電流が小さい。また、APD によっては 10 倍ほど単位受光面積あたりの暗電流が 違うものもあり、APD による個体差が大きい。



図 3.18: 測定に用いた APD の暗電流の変化

APD	電圧		APD	電圧	
	300V	350V		300V	350V
3mm	$8.09 imes 10^{-4}$	3.62×10^{-3}	5mm#1	2.41×10^{-3}	$5.58 \times ^{-3}$
5mm#3	2.32×10^{-3}	$5.31 imes 10^{-3}$	5mm#4	1.12×10^{-2}	3.27×10^{-2}
5mm-old	9.03×10^{-2}	0.190	10mm	9.20×10^{-3}	2.63×10^{-2}
10mm#32	3.18×10^{-2}	6.66×10^{-2}	10mm # 40	8.31×10^{-2}	0.264
10mm#42	6.09×10^{-2}	0.115	10mm#48	6.63×10^{-2}	0.276
18mm	3.03×10^{-2}	5.75×10^{-2}			

表 3.10: 測定に使用した APD の 300V、350V、-30 での暗電流

APD	$\frac{I}{S}$ [nA/mm ²]	APD	$\frac{I}{S}$ [nA/mm ²]
3mm	4.02×10^{-4}	5mm # 1	$2.23 imes 10^{-4}$
5mm#3	2.12×10^{-4}	5mm # 4	1.38×10^{-3}
5mm-old	7.6×10^{-3}	10mm	2.63×10^{-4}
10mm#32	6.66×10^{-4}	10mm # 40	2.64×10^{-3}
10mm#42	1.15×10^{-3}	10mm # 48	2.76×10^{-3}
18mm	1.77×10^{-4}		

表 3.11: 350V での単位受光面積あたりの暗電流

2. 端子間容量

測定に用いた APD の端子間容量の変化を図 3.19、逆バイアスが 300V·350V での容 量値を表 3.12 に示す。容量の単位は全て [pF] である。また、350V での単位受光面 積あたりの端子間容量を表 3.13 に示す。表 3.13 から、単位受光面積あたりの端子間 容量は 3mmAPD が最も大きく、18mmAPD が最も小さい。また、大型の APD ほ ど単位受光面積あたりの端子間容量は小さく、同じ大きさの APD では端子間容量 に大きな差はないことがわかる。



図 3.19: 測定に用いた APD の端子間容量の変化

APD	電圧		APD	電	圧
	300V	350V		300V	350V
3mm	34.11	30.05	5mm # 1	89.77	80.27
5mm#3	89.15	80.40	5mm # 4	89.69	80.64
5mm-old	91.59	81.15	$10 \mathrm{mm}$	305.0	268.3
10mm#32	291.0	268.6	10mm # 40	304.4	267.1
10mm#42	283.1	265.3	10mm # 48	307.5	267.0
18mm	851.3	801.4			

表 3.12: 測定に使用した APD の 300V、350V での端子間容量

3. APD ゲイン

測定に用いた APD の逆バイアスが 300V-350V での APD ゲインを表 3.14 に示す。

APD	$\frac{C}{S}$ [pF/mm ²]	APD	$\frac{C}{S}$ [pF/mm ²]
3mm	3.339	5mm#1	3.211
5mm#3	3.216	5mm # 4	3.226
5mm-old	3.246	10mm	2.683
10mm#32	2.686	10mm # 40	2.671
10mm#42	2.653	10mm # 48	2.670
18mm	2.473		

表 3.13: 350V での単位受光面積あたりの端子間容量

APD	電圧		APD	電圧	
	300V	350V		300V	350V
3mm	14.5	64.7	5mm#1	8.57	26.9
5mm#3	10.8	49.4	5mm # 4	10.0	42.5
5mm-old	23.9	168	10mm	14.8	65.5
10mm#32	4.17	12.8	10mm # 40	8.20	34.0
10mm#42	6.52	22.0	10mm # 48	8.17	39.3
18mm	6.25	14.5			

表 3.14: 測定に使用した APD の 300V、350V での APD ゲイン

3.6.2 ノイズ検証·パラメータ Bの評価

ノイズの種類、表式は第2章で述べたが、式(2.13)からノイズを求めるためには測定に 用いた PreAmp の容量勾配を測定する必要がある。容量勾配の測定は PreAmp の入力端 子に様々な電気容量の値をもったコンデンサーをつけ、パルサーからパルスを入力し、測 定した。得られた容量勾配を図 3.20 に示す。



図 3.20: PreAmpの容量勾配

図 3.20 の直線は得られた点を直線でフィッティングしたもので、この直線は式 (3.5) で ある。式 (3.5) の *C* は PreAmp への入力容量で APD でのノイズ計算の際には測定時の逆

バイアスに対応する端子間容量の値を用いる。

$$\Delta E(\text{keV}) = 2.09 \times 10^{-2} \times C[\text{pF}] + 1.39 \tag{3.5}$$

式 (2.13) のアバランシェ過程にともなうゆらぎのパラメーター B は決まった値がない。 そのため、本論文ではノイズ検証を行う際、ある基準となる APD 条件を決めて、その条 件で測定したときのエネルギー分解能から B を求め、その値を用いて他の条件で測定し たときのエネルギー分解能と比較した。エネルギー分解能から B を求める際、式 (2.15) を用いた。このとき、シンチレーション光の読み出し効率 γ は、5mmBGO との光量比を 用いた。各測定条件の γ の値を表 3.15 に示す。

測定条件	γ	測定条件	γ
3mm	0.0269	$5\mathrm{mm}$	0.0748
10mm	0.151	5mm×4-bottom	0.128
5mm×4-side-side	0.0837	$5 \text{mm} \times 4$ -side-top	0.0919
18mm	0.447	$10 \text{mm} \times 4$	0.604

表 3.15: 各測定条件の γ

また、4APD による測定のエネルギー分解能理論値を求める際、式 (3.6)、(3.7) のよう に計算した。ただし、 $\delta^2_{noise\cdot 1\cdot I} \sim \delta^2_{noise\cdot 4\cdot I}$ はそれぞれの APD の電流性ノイズ、容量性ノイズの *C* はそれぞれの APD の端子間容量の和、 $G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4$ である。

$$\delta_{noise}^2 = \sqrt{\delta_{noise\cdot 1\cdot I}^2 + \delta_{noise\cdot 2\cdot I}^2 + \delta_{noise\cdot 3\cdot I}^2 + \delta_{noise\cdot 4\cdot I}^2 + \delta_{noise\cdot C}^2} \tag{3.6}$$

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = (\delta_{sc})^2 + 2.355^2 \frac{F}{N_{ph}\gamma Q} \cdot \frac{1}{E} + \left(\delta_{noise} \cdot \frac{1}{E_g} \cdot \frac{4}{N_{ph}\gamma QG} \cdot \frac{1}{E}\right)^2 \tag{3.7}$$

式 (3.7)の第一項にあるシンチレータ自信の持つエネルギー分解能 δ_{sc} はエネルギーに よって変化し、一般的に高エネルギー側ほど小さい値をとる。T.Nakamoto et al.(2005) に よると、BGO シンチレータの δ_{sc} は 662keV で 4.7±0.5%とある。本論文ではこの値を用い てエネルギー分解能理論値を計算した。また、ファノ因子 F = 2 とした。

以上の計算方法で、¹³⁷Cs·662keVのエネルギー分解能理論値を APD 条件によって求め た *B* の値を用いて計算し、実験値と比較した。*B* を求める基準として、5mm、10mm、 18mmの測定結果を用い、300V、350V それぞれ *B* を求めた。各基準での *B* の値をそれ ぞれ、*B*_{5·300}、*B*_{5·350}、*B*_{10·300}、*B*_{10·350}、*B*_{18·300}、*B*_{18·350}とする。結果を表 3.16、3.17、3.18 に示す。表中の値の単位は全て [%] である。

	$B_{5\cdot300} = 1.32 \times 10^3$		$B_{5\cdot350} = 1.69 \times 10^4$			
測定条件	エネルギー分解能					
	理論値	実験値	理論値	実験値		
3mm	38.18	36.89	39.59	34.27		
10mm	17.16	18.10	18.17	15.95		
5mm4-bottom	45.03	26.61	43.19	18.19		
5mm4-side-side	67.65	32.89	64.79	25.47		
5mm4-side-top	61.82	26.70	59.22	25.11		
18mm	18.00	21.69	30.33	12.93		
10mm4	28.13	19.99	41.45	11.97		

表 3.16: 5mmAPD での測定結果から求めた B の値とエネルギー分解能の比較。左二列が 逆バイアス 300V で右二列が 350V である

	$B_{10.300} =$	$= 1.82 \times 10^3$	$B_{10.350} =$	$= 9.12 \times 10^3$		
測定条件	エネルギー分解能					
	理論値	実験値	理論値	実験値		
$3\mathrm{mm}$	37.19	36.89	39.66	34.27		
5mm	26.16	24.89	21.04	23.47		
5mm4-bottom	51.88	26.61	33.09	18.19		
5mm4-side-side	78.29	32.89	48.95	25.47		
5mm4-side-top	71.48	26.70	44.86	25.11		
18mm	19.86	21.69	23.11	12.93		
10mm4	32.46	19.99	30.90	11.97		

表 3.17: 10mmAPD での測定結果から求めた *B* の値とエネルギー分解能の比較。左二列 が逆バイアス 300V で右二列が 350V である

表 3.16 から、 $B_{5:300}$ を用いると 3mm、10mm は実験値と比較的合う結果となった。し かし、4APD による測定の結果とはいずれも近い値をとらない。また、 $B_{5:350}$ を用いると 3mm、10mm 意外は理論値が実験値の2倍以上になり、全く合わない。3.17 から、 $B_{10:300}$ を 用いると 3mm、5mm、18mm は実験値と理論値が近い値をとるが、 $B_{5:300}$ と同様に 4APD での測定結果とは全く違う値をとる。また、 $B_{10:350}$ を用いると $B_{5:350}$ と同様に 5mm4bottom 以下の理論値が実験値の2倍程度になってしまう。3.18 から、 $B_{18:300}$ を用いると 4APD による測定意外は理論値と実験値が近い値をとった。 $B_{18:350}$ はこれまでの結果とは 違い、4APD による測定で理論値と実験値が近い値をとった。 以上の結果から、3mm、 5mm、10mm に対しては 300V、350V でそれぞれ $B_{5:300}$ 、 $B_{5:350}$ を用いると実験値に近い 理論値が得られるといえる。また、4APD による 350V での測定はいずれも $B_{18:350}$ を用い ると実験値に近い理論値が得られた。しかし、4APD による測定の 300V での理論値は今 回用いた基準では最適な値はなかった。

アバランシェ過程にともなうパラメータである B を求めるために三つの基準を用いて 実験値と比較したところ、一つの基準に絞って比較しただけでは理論値と実験値が大き くずれるものが多かった。このことから、アバランシェ過程にともなうパラメータ B は APD の個体差が大きいと考えられる。また、逆バイアスが 300V と 350V での B の値を比

	$B_{18\cdot300} = 2.36 \times 10^3$		$B_{18\cdot350} = 1.72 \times 10^3$			
測定条件	エネルギー分解能					
	理論値	実験値	理論値	実験値		
3mm	40.73	36.89	30.16	34.27		
$5\mathrm{mm}$	27.47	24.89	18.39	23.47		
10mm	19.07	18.10	13.50	15.95		
5mm4-bottom	58.38	26.61	19.03	18.19		
5mm4-side-side	88.25	32.89	26.12	25.47		
5mm4-side-top	80.62	26.70	24.30	25.11		
10mm4	36.57	19.99	15.12	11.97		

表 3.18: 18mmAPD での測定結果から求めた *B* の値とエネルギー分解能の比較。左二列 が逆バイアス 300V で右二列が 350V である

較したところ、5mm では300V から350V になるとB がおよそ12.8 倍になり、10mm では 5 倍になった。それに対して、18mm ではおよそ0.73 倍になった。逆バイアスが300V か ら350V になったときの APD ゲインの増加率をみると、5mmAPD では4.57、10mmAPDでは4.43、18mmAPD では2.32 である。APD ゲインの増加率が大きいほど、B の増加率 が大きくなっている。このことは、B がアバランシェ過程にともなうゆらぎのパラメータ であるために、APD ゲインと関係があることのあらわれと考えられる。そのため、B は 値そのものと、増加率において APD の個体差が大きく反映されるといえる。

パラメータ B の値の典型値は数 100~1000 程度といわれている。しかし、求めた B の 値は典型値よりも大きい値となった。この原因として外乱のノイズの影響が考えられる。 ノイズを落としきれていないことによって、エネルギー分解能が悪くなり、B の値が実際 の値よりも大きく算出されたことが考えられる。

3.6.3 最適化のための考察

パラメータ *B* の値を求めたところ、APD による個体差が反映される結果となった。この値を用いて 350V での δ_{noise} の変化を求めると図 3.21 のようになった。ただし、3mm、5mm×4-bottom の#3 の APD 以外、10mm×4 は B = 1720 を使用した。



図 3.21: 350V での δ_{noise} の変化。色の違うポイントは $5mm \times 4$ の δ_{noise} である

図 3.21 から、受光面積の増加にともない δ_{noise} も増加傾向にあることがわかる。また、同 じ受光面積でも接着する APD の数が多い $5mm \times 4$ の δ_{noise} の方が 10mmAPD に比べて大 きい。これは、個々の APD の δ_{noise} の二乗和の平方根によって全体の δ_{noise} となるために 10mmAPD 一つに比べて値が大きいと考えられる。また、10mmAPD に比べ 18mmAPDの δ_{noise} が小さいのは、18mmAPD の *B* の値が小さいためである。そのため、 δ_{noise} は *B* による影響が大きく、電流性ノイズが支配的であるといえる。

結果では受光面積を増やすことでエネルギー分解能が向上し、threshold エネルギーは 増加傾向にあることがわかった。式 (2.15)より、エネルギー分解能にはポアソンゆらぎと δ_{noise} が影響している。また、threshold エネルギーは式 (2.16)より δ_{noise} と γ が影響して いる。エネルギー分解能は受光面積を増やすことで光量、 δ_{noise} ともに増加するが、ポア ソンゆらぎによる影響が大きいためにエネルギー分解能が向上したと考えられる。逆に、 threshold エネルギーは $E_{th} \propto \frac{\delta_{\text{noise}}}{\gamma}$ であり、得られる光量の増加よりも δ_{noise} の増加の方 が大きいために増加傾向にあると考えられる。また、アバランシェ過程にともなうゆらぎ のパラメータ B は APD による個体差が大きいことも考えられ、BGO ブロックを APD で光読み出しするための最適化にはさらなるパラメータ探しが必要であるといえる。

第4章 大量のAPDの特性を測定するシ ステムの立ち上げ

第2章で述べたような利点があることから、APD は放射線計測の光検出器として頻繁 に使用されるようになった。そのため、検出器開発において APD は必要な素子である。 APD を使用した検出器開発を行うにはできるだけ性能の良いものを選び出す作業が必要 であり、全ての APD に対して基本特性である暗電流、端子間容量、ブレークダウン電圧、 APD ゲインは調べておくことが必須である。1個の APD でもこれらを手作業で測定する のは時間がかかり、大量の APD の特性測定にはさらに時間がかかる。この第4章では大 量の APD の特性測定を自動化するためのシステム開発について述べる。

4.1 測定項目

APD による光検出が本格的になるに伴い、将来的に 100 個を超す大量の APD を試験することになる。そのため、APD の特性測定を手作業で行うことは時間のかかる作業となる。ここで述べる APD の特性とは次の 4 つである。

1. 暗電流

APDの価電子帯中の電子が熱励起し、伝導帯へ移ることによって起こる電流。シン チレーション光などの信号が無くても発生し、ノイズの要因となる。電子の熱励起 に起因するために温度を下げると暗電流は減少するが、APDの場合は完全に無視で きないため、できるだけ小さい方が望ましい。

2. 端子間容量

APD に逆バイアスをかけると、内部にはキャリアの存在しない空乏層と呼ばれる層 ができる。このとき、APD を並行板コンデンサーのように近似することができ、そ のときの電気容量 *C* は式 (4.1) で表される。

$$C = \epsilon_{si} \epsilon_0 \frac{S}{d} \tag{4.1}$$

式 (4.1) の ϵ_{si} はシリコンの比誘電率 11.9、 ϵ_0 は真空の誘電率 8.55 × 10⁻¹² [F/m]、S は APD の受光面積、d は空乏層の厚さである。端子間容量は空乏層の厚さ d に反比例するため、逆バイアスを大きくすれば APD の端子間容量は小さくなる。この容量が所定の値でない場合は、不良品ということになる。

3. ブレークダウン電圧

半導体検出器には逆バイアスの電圧をかける。このとき、最初はごくわずかの暗電 流が流れるが、電圧を上げていくと電流が急激に増大し始める。この電圧をブレー クダウン電圧という。ブレークダウン電圧は使用電圧に比べて十分高いことが必要 である。ブレークダウン電圧は電圧を変えながら暗電流を測定することで自動的に 情報が含まれる。 4. APD ゲイン

APD がアバランシェ過程によってキャリアを増幅する増幅率のことをいう。逆バイ アスが100V以下の時はAPD ゲインはほぼ1なので逆バイアス100Vの時のPreAmp 出力のパルスハイトを基準として各電圧での APD ゲインを測定する。

上記の4つの特性を電圧を変えながら測定する。大量のAPD についてこれらの特性 を手作業で測定するのは時間がかかるため、特性測定に必要な電圧制御、データ集録を National Instruments 社のソフトウエアである LabVIEW を用いて自動化するプログラム を作成し、大量のAPD の特性測定を自動化するシステム構築を目的として行う。



図 4.1: LabVIEW 制御の相関図

4.2 LabVIEW プログラム

LabVIEW は National Instruments 社のソフトウエアで、その外観と動作状態がオシロ スコープなどの実際の計測器に似ていることから、仮想計測器 (Virtual Instruments:VI) と呼ばれる。LabVIEW には作成したプログラムのトラブルシューティングが可能なツー ルの他に、データ集録、計測器制御、データの分析、表示、保存といった包括的なツール が含まれている。そのため、ノートパソコンのように小型のモバイルで計測器を制御し、 データ集録・解析、データ保存が可能となる。

4.2.1 LabVIEW の特徴とプログラム方法

LabVIEW VI は大きく分けてフロントパネル、ブロックダイアグラム、アイコン/コネ クタペーンという3つの要素によって構成されている。フロントパネルは VI の外観のよ うな要素で、数値表示やグラフ表示を行う。ブロックダイアグラムはプログラムが描かれ ている要素でブロックダイアグラムに目的のプログラムを構成する。アイコン/コネクタ ペーンとは VI を別の VI に組み込んで使用する際に組み込む VI をグラフィカルに表した ものである。アイコンを編集することで、どの役割をはたす VI であるかを識別すること が可能となる。

LabVIEWのプログラムの最大の特徴は、グラフィカルに表示された関数をワイヤで繋 ぐことによってプログラムを構成することである。個々の関数にはそれぞれ決められた処 理があり、数値、ブールそして文字列といったデータタイプに対応した関数をワイヤで繋 ぐことである処理を行うプログラムが構成される。そのため、プログラム専用の言語を覚 える必要がなく、初心者でも取り組みやすいプログラムといえる。 LabVIEW では業界標準の制御技術を利用すると、様々なタイプの計測器をプログラム によって制御することが可能である。すなわち、シリアル、GPIB、VXI、PXI、SCSI な ど、様々な種類の中から制御したい計測器を選ぶことができるのである。本実験ではGPIB 通信を用いて計測器制御を行った。

GPIB(General Purpose Interface Bus) は ANSI/IEEE 規格 488.1-1987 としても知られ ており、スキャナやフィルムレコーダなど計測器およびコントローラ間の通信用標準イン ターフェースを記述したものである。また、ANSI/IEEE 規格 488.2-1992 は IEEE488.1 を さらに拡張したもので、バス通信プロトコル、共通データコードおよびフォーマット、そ して一般的な共通デバイスコマンドを定義している。

GPIB デバイスおよびインターフェースには0から30までの固有のGPIBアドレスが あり、アドレス0は通常GPIBインターフェースに割り当てられる。GPIB上の計測器に は1から30を割り当てることができ、プログラムによって制御するときは必要な計測器 のGPIBアドレスを指定する必要がある。本実験では、GPIB通信対応の電流計、容量計 を用いて暗電流、端子間容量の自動測定を行った。

4.3 自動制御プログラム

本実験で用いた自動制御プログラムは National Instruments 社のホームページで公開されている VI をダウンロードし、改良した。

4.3.1 暗電流とブレークダウン電圧

暗電流の測定には10個のS8664-33SPL 4974型APD、Keithley社の電流計617型と6517 型を用いた。6517型の電流計は電圧源としてAPDに逆バイアスをかけるために用いた。 測定のセットアップを図4.2に示す。

暗電流測定に用いた LabVIEW プログラムを図 4.3~4.9 に示す。作成したプログラム



図 4.2: 暗電流測定のセットアップ

は大きく分けて0番~3番までの4つのプロセスがあり、各プロセスの中にもいくつかの 小プロセスがある。プロセスは番号の順に実行される。図4.3は0番めのプロセスで、図 中の measure and file write と書かれている部分が小プロセスである。小プロセスを図4.4 に示す。 ● 0番プロセス

0番プロセスではデータを書き込むためのファイルを開き、電圧を出力する内容の プログラムが書かれている。HV Limit は測定する際の APD にかける最大電圧であ る。また、HV Step は一回の測定ごとに上げる電圧の値である。0番プロセス中の 小プロセスは while ループに入れられており、(HV limit/HV Step)+1の演算によっ てループ回数を決めている。決められたループ回数だけ、小プロセスは実行される。 ループは出力電圧が指定した最大電圧になるか、測定中止ボタンを押すまで継続す るようになっている。また、while ループが終了した時点で V ー I カーブが描かれ るようになっている。

- 小プロセス 0,0 小プロセス 1 は電圧を出力するためのプログラムが書かれており、Keithley6517 が ここのプログラムによって電圧を出力する。出力する電圧は HV Step×i(現在のルー プ数)によって指定される。また、この値は小プロセス 0,3 へと渡され、ファイルに 電圧値として書き込まれる。
- 小プロセス 0,1
 小プロセス 0,1 は電圧が出力されてすぐに測定することを防ぐために、多少の時間 をおくためのプログラムが書かれている。ここで時間をおくことで正確な暗電流の 値を測定することができる。
- 小プロセス 0,2

小プロセス 0,2 では電流計で暗電流の値を読むためのプログラムが書かれている。 データ値は 100 個読まれ、その平均値と分散が出力されるようになっている。出力 される値は単位が nA になるようにしてある。また、ここでは、その計測値を次の 小プロセス 0,3 へと渡している。

小プロセス 0,3

小プロセス 0,3 では測定値を電圧、暗電流、分散の順でファイルに書き込むプログ ラムが書かれている。データはこのプロセスによって最初に指定したファイルに書 き込まれる。



図 4.3: 0番プロセス。図中の小プロセスは小プロセス 0,0

次に、1番プロセスを図 4.5 に示す。また、1番プロセスの小プロセスを図 4.6 に示す。

● 1番プロセス

ここには測定終了後、電圧を下げるためのプログラムが書かれている。図 4.5 中の measurement stopped or non-stopped は C 言語の if 文の働きをし、測定を中止した かしてないかによって内容を分けている。図は中止しなかったときのものである。 測定を中止した時のプログラムは図 4.6 の一番上のものである。違いは、測定を途 中で中止しなかったときは最大電圧から下げ始め、中止したときはそのときの電圧 から下げ始めるようになっている。電圧出力のプログラムは For ループに入ってお リ、ループ回数は測定中止しなかったものは (HV limit/HVStep)+1、測定中止した ものは (now Voltage/HV Step)+1 で指定される。電圧を下げるために出力電圧の指 定は (HV Limit or now Voltage)-(HV Step×i) によってループごとに電圧が下がっ て出力されるようになっている。

- 小プロセス1,0
 電圧を出力するためのプログラムである。上記の方法によって指定された電圧を出力する。
- 小プロセス 1,1
 小プロセス 1,1 は電圧が一気に下がらないようにするために 5 秒間のインターバル をおくためのものである。

2番プロセスを図4.7に、3番プロセスを図4.8に示す。2番プロセスは電圧出力のオペレートを切り、安全な状態にしている。次の3番プロセスはデータ書き込みのために開いたファイルをクローズするためのプログラムで、安全にファイルを閉じるためのものである。3番プロセスが終了して、一つの測定が終了する。出力する電圧の最大値等を制御するためのフロントパネルを図4.9に示す。ファイルパスに記録するディレクトリとファイル名を入力する。HV Limit、HV Step、秒待ち時間(インターバルの時間)をフロントパネルによって制御する。隣の測定中止ボタンを押すことで測定を途中でも安全に中止することができる。計測値、分散、V-I カーブはそれぞれ、平均、標準偏差、X-Y グラフに表示される。



図 4.4: 0番プロセスの小プロセス。上から順に小プロセス 0,1、小プロセス 0,2、小プロ セス 0,3



図 4.5: 1番プロセス。図中の小プロセスは小プロセス 1,0



図 4.6: 測定中止の場合 (上) と小プロセス 1,1(下)



図 4.8: 3番プロセス



図 4.9: 暗電流測定プログラムのフロントパネル

4.3.2 端子間容量

端子間容量の測定にはヒューレット・パッカード社製のLCR メータHP4284A を用いて、 電圧源にはKeithley 社製の6517型を用いた。HP4284A はGPIB 通信が可能でLabVIEW により制御可能である。よって、測定は暗電流の測定と同様に電圧を5Vずつ上げていき、 そのときの容量を測定するプログラムをLabVIEW で作成して測定した。端子間容量を測 定するためのプログラムは暗電流測定用のプログラムと同じ構成で作成されている。暗電 流測定用のプログラムと違う点は0番~5番プロセスから構成されている点である。プロ グラムを図 4.10~図 4.12に示す。また、フロントパネルを図 4.13に示す。

0番プロセス

0番プロセスでは容量計の初期設定を行う。設定はフロントパネルで操作でき、行う 設定は積分時間、関数モード、トリガーモード、周波数、電圧レベルである。APD 容量測定の際に行った設定を表 4.1 に示す。

設定項目	使用した設定
関数モード	$C_s - D$
トリガーモード	BUS
周波数	1Mhz
電圧レベル	1.0V
積分時間	MED

表 4.1: APD の容量測定の時の容量計設定





図 4.10: 0 番プロセス

次に示す1番プロセスは暗電流測定プログラムの0番プロセスと同様の構成になってお り、電流値を読み取るプログラムが容量値を読み取るためのものに書き換えてある。図 4.12は1番プロセス中の小プロセスである。

● 1番プロセス

暗電流測定プログラムの0番プロセスと同様の構成で、1番プロセスでは電圧出力 とデータ読み取り、保存が行われる。 小プロセス 小プロセスの流れは暗電流測定プログラムと同じである。



図 4.11: 容量測定プログラムの1番プロセス

1番プロセス以降のプロセスは暗電流測定プログラムの流れとほぼ同様で、2番プロセス が電圧を下げる、3番プロセスが容量計の設定を戻す、4番プロセスが電圧出力のオペレー トを切る、5番プロセスがファイルをクローズするプログラムになっている。図4.13は容 量測定プログラムのフロントパネルである。HV Limit、HV Step、秒待ち時間、測定中 止時間、ファイルパスの働きは暗電流測定プログラムと同じである。容量測定の際、さら にフロントパネルで制御可能なのは Signal Amplitude で電圧レベル、Integr Time で積分 時間、Frequency で周波数、FUNC mode で関数モードを制御することができる。また、 暗電流測定プログラムのフロントパネル同様に最大電圧の測定が終了すると V-C カーブ が表示される。

4.3.3 APD ゲイン

APD ゲインの測定には National Instruments 社の ADC ボードと自動制御プログラムを 用いて測定を行う。ADC ボードはデータをアナログ/デジタル変換し、パルスハイトを作 成するボードである。APD ゲインの測定は電圧を制御しながら ADC ボードによって作成 されるパルスハイトをもとに測定する。また、APD への光入力は LED を用いる。LED は光をコリメートしやすく、光量が大きいためノイズに強いといった利点があるためであ る。そのため、より精度の高い測定が可能となる。

APD ゲイン測定プログラムはまだ作成していないため、今後開発していく予定である。



図 4.12: 容量測定プログラムの1番プロセス中の小プロセス。中央が容量を読み取るプロ グラム



図 4.13: 容量測定プログラムのフロントパネル

4.4 10個のAPDの測定結果

今回の実験で測定に用いた APD は浜松ホトニクス社製の $3mm \times 3mm$ の APD、S8664-33SPL 4974 である。この型番の APD10 個を同時に注文して手に入れたとき、APD の性 能に大きな差が無く、同様の性能を示すか、付属のデータシートの値と一致するかを検証 する。データシートを表 4.2、図 4.14 に示す。検査条件は温度 25、ブレークダウン電 圧は暗電流が 100μ A になったときの電圧、逆バイアスは波長 420nm の光に対して増幅率 M = 50 になる電圧、暗電流・端子間容量は M = 50 のときの値である。また、図 4.14 は #10 の APD のみのグラフである。

No.	ブレークダウン電圧 [V]	逆バイアス [V]	暗電流 [nA]	端子間容量 [pF]
#1	415	371	15	30
#2	414	370	14	30
#3	405	362	13	30
#4	421	377	15	30
#5	436	392	13	30
# 6	430	386	9	30
#7	429	385	8	30
#8	408	365	12	31
# 9	408	365	11	31
#10	407	364	11	31

表 4.2: データシートに記載された値



図 4.14: 暗電流、端子間容量、APD ゲインのグラフ

4.4.1 暗電流

暗電流はノイズ検証を行う上で重要な要因である。LabVIEWを用いて 10 個の APD の 暗電流を常温および-30 で自動測定した。結果を図 4.15、4.16 に示す。

測定は逆バイアスが最大で 360V までで行ったため、データシートにあるような 380V あたりでの急激な暗電流の増加はみられない。常温での測定結果をデータシートのグラフと比較すると、ほぼ一致しているといえる。また、10 個の APD の曲線は極端に離れているものがなく、性能に大きな差が無いことがわかる。また、低温の場合は暗電流の値は全ての APD で減少している。しかし、#3 や#10 の APD に見られるように、350V を過ぎての急激な暗電流の増加がある。#3 は他の APD に比べ特に増加が大きく、360V では 99.7µA となっている。これは、データシートに記載されているブレークダウン電圧よりも 45V 少ない電圧で、ブレークダウンを起こしている状態になっている。



図 4.15: 10 個の APD の暗電流 (30)



45

4.4.2 端子間容量

暗電流と同様、端子間容量もノイズ検証に必要である。LabVIEW によるプログラムで 計測器を制御して測定した 3mm×3mmAPD10 個の端子間容量測定結果を図 4.17 に示す。 図 4.17 とデータシート比較すると、曲線の形や、ほぼ空乏層化したときの端子間容量 30pF の値が一致する。また、10 個の APD についてどれも同じような曲線になり APD の 性能に差がみられないといえる。また、この測定は、APD を使用していった後に初期不 良により故障することが考えられ、それを見極めるための測定となる。



4.5 まとめ

端子間容量は APD の個体差がほとんどなく、データシートと比較しても問題の無い測 定結果となった。しかし、低温で暗電流を測定した結果、#3、#10 の APD において逆バイ アスが 360V 付近でブレークダウンを起こしている兆候がみられる。360V はデータシート に記載されているブレークダウン電圧よりも 45V 程少なく、なぜ、360V でブレークダウ ンが起こってしまったのかを調べるためにも再測定する必要がある。また、今後は APD ゲインを測定するためのプログラムを作成する予定である。

第5章 まとめ

本研究ではバックグラウンド低減のために必要なアクティブシールドに使用される BGO ブロックの光読み出しを APD で行った。APD による光読み出しで、APD の受光面積を 変え、得られる光量の変化を調べ最適な APD 条件を探ることが目的である。また、APD による光読み出しが本格化するにあたり、将来的には大量の APD を検査することになる ため、APD の特性測定を自動化するシステムの立ち上げを行った。

第3章で行ったBGO ブロックの光読み出しでは、一辺が3mm、5mm、10mm、18mm のAPDを用いて光読み出しを行った。また、APD 一つをBGO ブロックに接着するだけ でなく、5mm、10mmAPDをBGO ブロックに四つ接着しての読み出しも行った。受光面 積を増やせば得られる光量は受光面積に比例して増加した。また、BGO ブロックの側面に APDを接着した場合、同じ受光面積でも底面にAPDを接着した場合より得られる光量が 減る結果となった。エネルギー分解能は得られる光量が増えることで良くなり、10mmAPD を四つ接着しての測定では逆バイアス 350V、662keV で11.97%を得た。PreAmp への入 力を工夫し、ノイズを減らすことでさらなるエネルギー分解能の向上が見込まれる。ノ イズ検証を行った結果、アバランシェ過程にともなうパラメータ B がエネルギー分解能 ・threshold に大きく寄与しており、また、その値と増加率には APD の個体差があると考 えられる。ポアソンゆらぎとノイズの影響で受光面積を増やすとエネルギー分解能が良く なるが threshold は高くなった。このことから、読み出し最適化のためにはさらなるパラ メータ探しが必要である。

第4章では APD の特性測定を自動化するシステムの立ち上げについて述べた。測定 を自動化するプログラムは National Instruments 社のソフトウエア LabVIEW を用いた。 LabVIEW で作成したプログラムにより 10 個の APD の暗電流と端子間容量を測定した結 果、-30 で暗電流を測定した際、データシートに記載されている値よりも小さい電圧で ブレークダウンを起こすものがあった。しかし、これらを除くと暗電流、端子間容量とも にデータシートに記載されている値に近いものが得られ APD の性能に大きな差はなかっ た。今後は National Instruments 社の ADC ボードと LabVIEW を用いて APD ゲインを 自動測定するプログラムを作成していく予定である。

謝辞

本研究にあたり、中間発表で指摘をしてくださった大杉先生、さまざまな指導をしてく ださった深沢先生に深く感謝いたします。実験のとき、器具の使用方法やその他のアドバ イスをくださった青井さん、澤本さん、浅野さんありがとうございました。また、一年 間、小部屋で過ごした水野先生、河本さん、山田さん、千代延さん、安田さん、山崎君あ りがとうございました。そして、研究から私生活において様々なアドバイス、協力を頂い た広島大学高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室のみなさま、ありがとうございました。

関連図書

- [1] 中本 達也 「多層シリコンストリップとBGO·フォトダイオードを用いた宇宙軟ガン マ線コンプトンカメラの開発」(修士論文、広島大、2003)
- [2] 中本 達也 「高性能シンチレータとフォトダイオードを用いたガンマ線検出器の開発」 (卒業論文、広島大、2001)
- [3] T.Nakamoto et al. ^r BGO redout with photodiodes as a soft gamma-ray detector at -30 _ J (Nucl.Instr.and Meth.A 536、2005)
- [4] 浅野 哲也「BGO と APD を用いた宇宙 γ 線検出器アクティブシールドの開発」(卒業 論文、広島大、2005)
- [5] 五十川 知子 「宇宙利用に向けた X 線 ·γ 線検出用アバランシェ·フォトダイオードの 開発」(修士論文、東工大、2005)
- [6] Glenn F.Knoll 木村逸郎 阪井英次 訳 「放射線計測ハンドブック 第2版」(日刊工業新 聞社、1991)
- [7] 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)
- [8] 日本ナショナルインスツルメンツ株式会社 「LabVIEW Basics 1 初級コースマニュア ル」(2003)
- [9] 浜松ホトニクス株式会社「S8664-33SPL 4974 検査成績書」(2005)