

HV制御によるAPDとBGOシンチレータの
温度依存相殺システムの開発

卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科 河合研究室

益田 智弥

2009年 3月

要旨

次期 X 線観測衛星 ASTRO-H に搭載される SGD(軟ガンマ線検出器)、HXI(硬 X 線撮像器)には、APD(アバランシェフォトダイオード)で読み出す BGO シンチレータがアクティブシールドとして用いられる。しかし APD は増幅率、BGO は発光量がそれぞれ温度に大きく依存してしまう。また APD と BGO を組み合わせた検出器の性能を正確に見積ることは未だに成されていない。そこで本論文においては、APD+BGO 検出器の温度依存性を見積もり、この欠点をキャンセルするシステムを構築することを目的とする。APD 単体では増幅率を一定に保つための印加電圧と温度の関係は線型で表せることが分かっている。それを踏まえつつ APD+BGO 検出器の増幅率を一定に保つための温度と印加電圧の関係性を考えた。すると APD と BGO を組み合わせた場合でも線型で十分モデル化出来ることが分かった。そこで 1cm 角の BGO を用いて検出器の増幅率を制御するパラメータ (APD 印加電圧の温度変化率とオフセット) を決定した。衛星に搭載される 30mm × 50mm × 100mm の BGO と APD を組み合わせた場合の検出器は APD に入射してくるシンチレーション光の光量が変わるだけなので、パラメータはそのまま利用することが可能であった。そして検出器の増幅率を温度変化に依らず 3%以内の変動に抑えることに成功した。ここにおいて、APD+BGO 検出器の最大の欠点であった 温度依存性のキャンセルに成功したと言える。

目次

第1章	はじめに	6
1.1	ASTRO-Hの概要と主なミッション	6
1.2	アクティブシールド	8
1.3	本論文の目的と構成	8
第2章	APD (アバランシェフォトダイオード)	10
2.1	半導体検出器	10
2.1.1	半導体検出器の型	11
2.1.2	pn型半導体	11
2.1.3	雑音と分解能	13
2.2	APDの種類と特徴	13
2.2.1	APDの種類	14
2.2.2	増幅過程と増幅率	15
2.2.3	過剰雑音係数	17
2.2.4	暗電流	17
2.2.5	APDの基礎特性評価	18
第3章	APD+小型BGOの基礎特性	20
3.1	アクティブシールドとしてのBGO	20
3.1.1	測定装置	22
3.2	測定方法と実験	25
3.3	結果のまとめ	26
第4章	APD+小型BGO検出器の増幅率自動制御	28
4.1	装置と制御方法	28
4.2	HVboardを用いての測定	30
4.2.1	測定の準備	30

4.2.2	温度を振った場合の測定結果と考察	31
第 5 章	APD+大型 BGO 検出器の増幅率自動制御	36
5.1	セットアップ	36
5.2	温度センサー出力のモニタリング	37
5.3	大型 BGO を用いた HVboard での測定	40
5.3.1	エネルギー分解能	41
5.3.2	スペクトル測定	41
5.3.3	大型 BGO での測定のまとめ	45
第 6 章	まとめ	46

目 次

1.1	ASTRO-H の概観	6
1.2	観測衛星将来計画	7
2.1	半導体のエネルギー準位模式図	11
2.2	pn 型半導体の模式図	12
2.3	APD の種類別の内部構造と電場勾配の模式図	16
2.4	実験で用いた 10mm × 10mm APD	18
2.5	温度一定での増幅率と印加電圧の関係	19
2.6	APD の印加電圧と暗電流の関係	19
2.7	印加電圧一定での温度と増幅率の関係	19
3.1	BGO シンチレータ発光量の温度依存性	20
3.2	APD の波長に対する量子効率	22
3.3	前置増幅器 581K の内部構造	24
3.4	一般的な波形整形器の等価回路	24
3.5	波形整形器でパイルアップの影響を排除	25
3.6	APD+小型 BGO のセットアップ	25
3.7	小型 BGO の時間経過による光電ピーク位置の変化の様子	26
3.8	APD 単体で増幅率を一定に保つための印加電圧の温度依存性	27
3.9	APD+BGO 検出器の増幅率を一定に保つための印加電圧の温度依存性	27
4.1	恒温槽の設定温度と温度センサーの温度変化のようす	28
4.2	DC/DC を載せた HVboard の写真	29
4.3	APD+小型 BGO+温度センサーのセットアップ写真	30
4.4	DC/DC から出力される温度勾配の関数	31
4.5	HV board で測定した ^{137}Cs の γ 線スペクトル	31
4.6	-10 °C, -30 °C で温度固定の場合と温度を振った場合のスペクトル	32
4.7	-10 °C, -20 °C, -25 °C, -30 °C で温度固定のスペクトル	33

4.8	印加電圧を制御した場合と固定し温度を振った場合のスペクトル	34
4.9	温度センサーを治具から出した場合、入れた場合、APD に接触させた場合 のスペクトル	35
5.1	APD+大型 BGO、温度センサーが入っている治具の内部	37
5.2	APD+大型 BGO と温度センサーの接着面	37
5.3	大型 BGO で恒温槽を -20°C から -22°C に冷却した後のスペクトルのピー ク ch の推移	37
5.4	-10°C から温度を振りモニターした	39
5.5	-30°C から温度を振った場合	40
5.6	-30°C から温度変化させた時の温度センサーの変化のようす。	40
5.7	-10°C から温度変化させた時の温度センサーの変化のようす	40
5.8	APD+大型 BGO での -10°C , -30°C 温度固定の場合のスペクトル	42
5.9	APD+大型 BGO の温度を -10°C から振った場合の光電ピーク	44
5.10	APD+大型 BGO の温度を -30°C から振った場合の光電ピーク	45

表 目 次

2.1	n型、p型半導体の特徴	12
2.2	光検出器の特徴	14
2.3	APDのパラメータ (@25 °C)	18
3.1	無機シンチレータの主な特性	21
3.2	581Kのパラメータ	24
3.3	増幅率を一定に保つための温度勾配 [V/°C	27
4.1	温度センサー AD590 の各パラメータ	29
4.2	HV board で得られた温度固定スペクトルの FWHM とピーク ch	31
4.3	1cycle 目、2cycle 目の分解能とピーク ch、各温度との増幅率の差	32
4.4	印加電圧を固定し温度を振った場合の分解能、ピーク ch、増幅率の差。 . .	33
5.1	バッファの接続場所と有無による影響	38
5.2	APD+大型 BGO での -10 °C, -30 °C 温度固定の場合の分解能とピーク ch .	42
5.3	統計揺らぎの比重と入射光電子数の関係	43
5.4	-10 °C から温度を振った場合の分解能とピーク ch と増幅率の差の割合 . .	44
5.5	-30 °C から温度を振った場合の分解能とピーク ch と増幅率の差の割合 . .	45

第1章 はじめに

1.1 ASTRO-Hの概要と主なミッション

ASTRO-Hは2013年に種子島宇宙センターからH-IIA ロケットに搭載されて打ち上げが予定されている次期X線観測衛星である(図1.1)。2013年度近辺は世界的に見てもX線観測の空白期に入る恐れがあり、打ち上げられることの意義は非常に大きい(図1.2)。

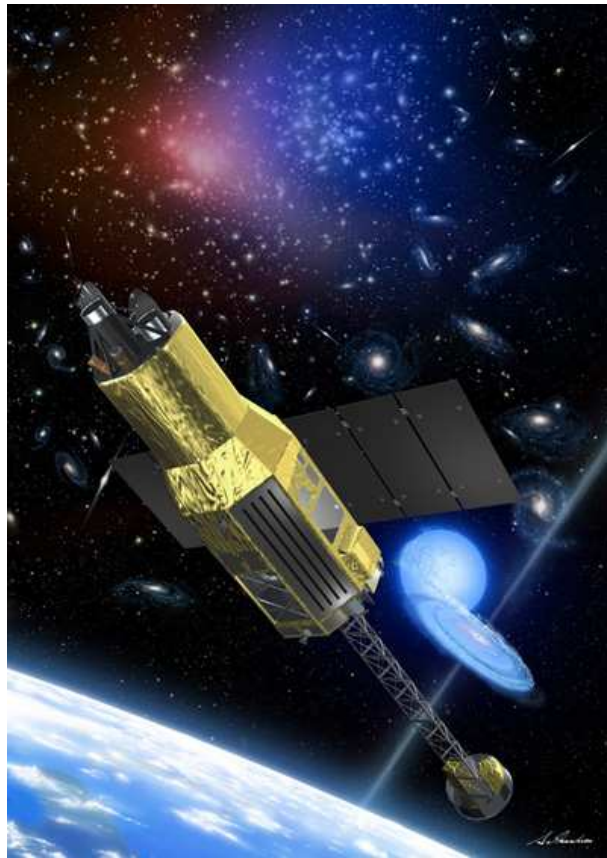


図 1.1: ASTRO-H の概観 [14]

X線は地球大気に吸収されてしまうので飛行体を使った観測が不可欠であり、1950年代以前は観測が困難であった。しかし1960年代に大気圏外に望遠鏡を打ち上げ太陽からのX線を観測して以来([14])、高温・高エネルギー現象を通じて宇宙の姿を研究する学問



図 1.2: 観測衛星の今後の打ち上げスケジュール [14]

として X 線天文学は発達している。また X 線と一口に言っても、そのエネルギーにより軟 X 線と硬 X 線とに分類出来て、数 keV から 10keV 以下のものを軟 X 線、10keV から 100keV 以下のものを硬 X 線と呼んでいる。宇宙で直接検出可能な物質の 90%が、温度が高いプラズマであり [14]、これらは X 線でのみ観測が可能である。すなわち X 線天文学は高温・高エネルギーの現象を通じて宇宙の真の姿を研究する鍵であると言える。

これまでの研究により宇宙の非熱的な姿が少しずつ明らかになってきた。それによると現在の宇宙は初期宇宙の量子揺らぎからの過程で、著しく非一様で非平衡の世界へと進化を遂げてきたことが分かっている。密度で 40 桁、温度で 8 桁もの多様性を持っている [14]。すなわち宇宙の進化は平衡から遠ざかる進化とも言える。例えば少数の粒子が非常に高いエネルギーを持っており、これは少数の粒子にエネルギーを集中的に与える粒子加速が生じていることを示す。このような加速された粒子の非熱的エネルギーは熱的エネルギーと並んで、宇宙の天体進化を支配しうる。そしてそのような非熱的な宇宙からの信号は硬 X 線、軟 γ 線に最も強く表れる。ASTRO-H では 4 種類の検出器を搭載し、4 通りの観測システムを用いることにより 3 桁におよぶ広いエネルギー帯域において、現行の「すざく」より 10 倍から 100 倍高感度の観測を実現することを目標としている。搭載が予定されている 4 種類の検出器は下記の通りである。

- 硬 X 線撮像検出器 (Hard X-ray Imager, HXI) : 10 keV - 80 keV と非常に広いエネルギー帯域において撮像を行う。硬 X 線領域において従来から 2 桁の感度向上が期待され、1 分角をきる空間分解能の撮像も初めて実現される。
- 軟 X 線分光撮像検出器 (Soft X-ray Spectrometer, SXS) : X 線領域で、4 - 7 eV のエネルギー分解能をもち、非常に精密な分光観測が可能となっている。

- 軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager, SXI) : 0.3 - 12 keV のエネルギー帯域において、約 30 分の広い視野での撮像・分光を行う
- 軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector, SGD) : HXD 検出器の感度を一桁以上向上させたものであり、日本発の狭視野コンプトンカメラという設計概念に基づいている。初のガンマ線の偏光観測も期待されている。

1.2 アクティブシールド

上記で述べた 4 種の検出器の内の SGD と HXI ではバックグラウンドを除去するシールドとして、BGO シンチレータとアバランシェフォトダイオード (APD) を組み合わせた検出器がアクティブシールドとして搭載される予定である。

SGD では 80keV 以上のエネルギー領域で支配的となるコンプトン散乱の運動学を用いた低バックグラウンド化の実現を目指している。また、入射ガンマ線の到来方向を精密に測定するために、視野をアクティブシールドで狭く絞った上で、この狭い視野と交点をもたない場合はすべてバックグラウンドとして除去するという概念に基づいている。これにより放射化バックグラウンドを優れた効率で落とし、HXD を 1 桁上回る感度の達成を目指す。

一方 HXI のエネルギー領域では、宇宙線が、HXI そのものや衛星本体などの周辺物質と反応して生成される 2 次 X 線によるバックグラウンドが感度を決定する。そのため、検出器をアクティブシールドによって遮蔽する方法が有効となる。この場合、シールドと検出との両方でガンマ線や荷電粒子が反応を起こした事象をアンチコインシデンスで除去する。

1.3 本論文の目的と構成

検出器の性能向上の鍵はどれだけバックグラウンドを低く抑えられるかにかかっている。そこで本論文ではアクティブシールドに用いられる APD と BGO を組み合わせた検出器の性能の評価を行う。APD は増幅率が、BGO は発光量が温度依存性を持つため、軌道上では温度が $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度に保たれている。しかしながら、軌道上では温度制御装置が壊れてしまうなど、どのような不具合にさらされるか分からず、またそのような不具合に陥った場合、修正することは困難である。そこで、本論文では温度という点に焦点を絞り、APD と BGO を組み合わせた検出器が温度変化に応じて、自律的に増幅率を一定に保つシステムを作ることを目的とする。そこで行った実験としては (i) APD 単体で増幅率

を一定に保つための印加電圧に対する温度依存性の評価、(ii)APD と小型 BGO を組み合わせて (i) と同様の性能評価を行ない、制御するためのパラメータの決定、(iii)APD と大型 BGO を用いて決定されたパラメータを適用した評価、(iv)±20℃/45min の温度変化が生じてなお増幅率を一定に保ち性能を維持出来るかの評価を行った。

第2章 APD (アバランシェフォトダイオード)

APD とはアバランシェフォトダイオードと呼ばれる半導体検出器である。我々はこの半導体が、宇宙や医療の分野に活躍の場を見出すべくその性能の評価を行ってきた。APD と通常のフォトダイオードとの違いは、APD が内部増幅機能を持っているという点である。この特徴により、回路のノイズが相対的に小さくなり、優れた S/N 比を実現する。また APD の増幅率、暗電流は温度と印加電圧への依存性を持つ。ここでは半導体検出器の特徴・原理から始め、APD の種類や基礎特性についても述べてゆく。

2.1 半導体検出器

不純物がまったく含まれていない半導体を真性半導体といいシリコンやゲルマニウムなどが該当する。これに不純物を加えることで半導体の性質は大きく変わり、不純物の種類によって n 型半導体、p 型半導体と呼ばれるものになる。最も基本的な型の半導体として、n 型半導体、p 型半導体が接合したものがある。半導体を検出器として利用する主な目的は、他の種類の検出器と比較してみても、半導体に入射してくる 1 photon 当たり、すなわち 1 事象当たりから得られる情報量が多いからである。後に述べるが、エネルギー分解能には統計的限界があり、これを改善する唯一の手段が 1 事象当たりの情報量を増やすことなのである。情報の元になるのは半導体検出器の空乏層内に生成される電子正孔対である。これらを測定、解析することにより放射線のエネルギーや種類などを特定する。半導体検出器を利用するのに有利な点は、エネルギー分解能に優れる、比較的速いタイミング特性を示す、検出領域である空乏層を実験の必要性に応じある程度自由に換えられる、などである。一方で欠点として、小型に限られる(大面積が作れない)、放射線損傷による性能の劣化が起こりやすいなどがある。まずは放射線検出器を形成する、n 型半導体、p 型半導体の特徴を見ていく。

2.1.1 半導体検出器の型

n 型半導体

伝導電子(自由電子)の濃度が正孔の濃度より高くなるように価数の多い(V族元素)不純物原子を真性半導体に加えて作られる(表2.1)。V族元素の不純物が加わると、1個の電子が離れイオン化したドナーのみが残り、電子は電気的引力によりドナーイオンの近くに存在する(図2.1)。過剰な1個の電子は伝導体のすぐ下(エネルギー準位で考えた場合)に位置しているので、価電子帯から伝導体に励起されるよりはるかに小さなエネルギーで伝導体中に励起出来る。これをドナー準位をいう。またフェルミ準位(電子が存在することの出来る最大のエネルギー準位)は禁制帯から見て伝導体側にくる。

p 型半導体

正孔の濃度が自由電子の濃度より高くなるように価数の少ない(III族元素)不純物原子を加えて作られる(表2.1)。n型と同様に正孔は価電子帯のすぐ上に位置する(図2.1)。これをアクセプタ準位という。またフェルミ準位は禁制帯から見て価電子帯側にくる。

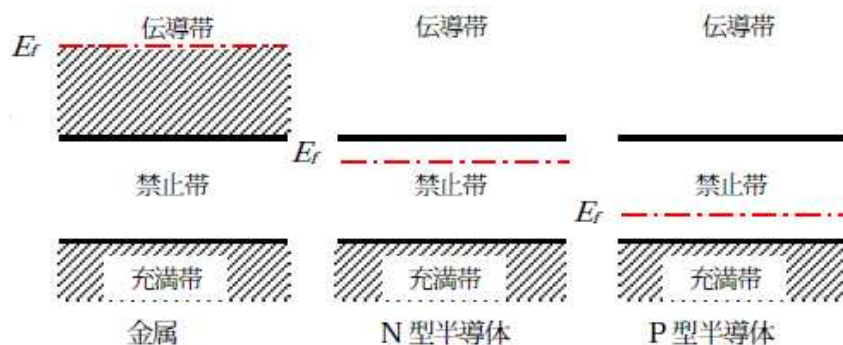


図 2.1: 金属、n 型半導体、p 型半導体のエネルギー準位の模式図

2.1.2 pn 型半導体

p 型半導体と n 型半導体を接触させることを pn 接合という。このとき、ある系が熱平衡状態にあるとフェルミ準位はどここの系でも一定である、という法則により pn 型半導体では p 型半導体と n 型半導体のフェルミ準位は一致している(図2.2)。またこの場合電子と正孔が互いに打ち消し合い消滅し(正孔は元々電子がいた場所であり、実際は消滅では

	混入する不純物	多数キャリア
n型半導体	ドナー (V 族元素)	自由電子
p型半導体	アクセプタ (III 族元素)	正孔

表 2.1: n型半導体、p型半導体を作成するため真性半導体に混入する不純物と、そのときの多数キャリア。

なく正孔に電子が落ち込んで自由に動けなくなっただけである。すなわち電子が自由電子でなくなっただけで、電子そのものが存在しなくなったのではない)、電氣的に中性の領域が出来る。

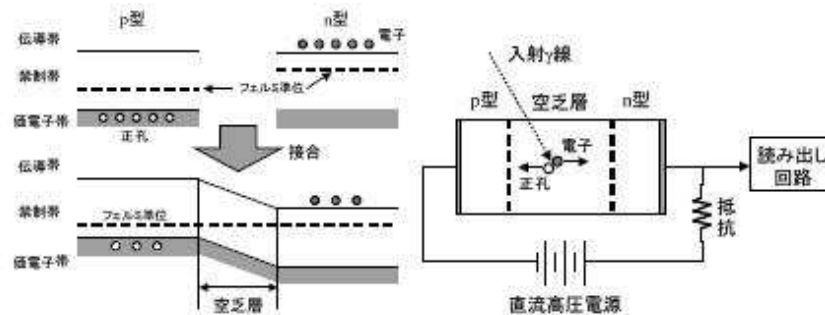


図 2.2: pn 半導体のフェルミ準位と空乏層に光子が入射したときの模式図 [15]。

n型半導体、p型半導体それぞれの境界面付近での電子、正孔の挙動に関してもう少し詳しく見てみる。n型半導体電子がp型半導体へと拡散する。すると電子が出ていってしまに残されたドナーが電子を失って正のイオンとして存在することになる。一方p型半導体は正孔がn型半導体へと拡散し、マイナスイオンとなったアクセプタが残る。

もし、イオン化されたドナーとアクセプタが残っていなかったら、電子と正孔の流れは密度差のある限り続くはずだが、ドナーイオンとアクセプタイオンが電気力によってその拡散を妨げる働きをする。そして、拡散と電気力が釣り合った状態が実現する。この状態の領域を空乏層とよぶ。

逆バイアスをかけると正孔、電荷はそれぞれ引っ張られ空乏層が広がり、そこに放射線や光が入射すると、入射線のエネルギーに比例した電子正孔対を生成する。空乏層内で生成された電子正孔対は内部電場により両極に移動し電流のパルス波として計測される。また、絶縁体はエネルギーギャップが5 eV以上あるが半導体は1 eV程度(本論文で用い

る半導体 APD は Si からなるが、Si のバンドギャップは 1.12eV) なのでわずかな入射エネルギーでも電流は流れる。本論文の実験で用いる BGO シンチレータの蛍光ピーク波長は 430 nm であるので λ [nm] \times E [eV] = 1240 [nm \cdot eV] に代入すると、おおよそ 3 eV 程度のエネルギーのシンチレーション光を出しており、これは半導体中の電子を励起させるには十分であることが分かる。

2.1.3 雑音と分解能

半導体検出器に起因する雑音源は大きく 3 つに分類できる。

1. バルクの漏れ電流のゆらぎ (ショット雑音)
2. 表面の漏れ電流のゆらぎ
3. キャリアのランダムな運動 (ブラウン運動) に由来するジョンソン雑音

1, 2 の雑音の原因は漏れ電流 (暗電流 : 第 2.2.4 項) なので、温度を下げることにより軽減出来る。3 のジョンソン雑音は一般に熱雑音として知られている。外界との熱的な相互作用を起こすところでは必ず発生し、揺らぎに相当する電位差が生じる。また、この雑音源はどこにでも存在するので、多くの電子回路で他の雑音より支配的になる。ジョンソン雑音電圧は式 (2.1) のように書ける。

$$V_{j\text{hanson}} = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (2.1)$$

但し、k はボルツマン定数、T は温度、R は抵抗、f は帯域幅をそれぞれ表している。上の 3 つのノイズ源を 2 乗して加算すると

$$(\Delta E_{\text{noise}})^2 = (\Delta E_{\text{shot}})^2 + (\Delta E_{\text{surface}})^2 + (\Delta E_{\text{jhanson}})^2 \quad (2.2)$$

と書ける。 ΔE_{noise} は各々の独立した機構による検出エネルギーの広がりを表す。これに電荷キャリア生成時の統計ゆらぎによる広がりを上記の式に上記と同様に加えてやると検出器自体の分解能が得られる。尚、統計ゆらぎによる分解能への影響に関しては第 5 章で改めて触れるためここでは触れない。

2.2 APD の種類と特徴

APD の特徴として内部増幅機能が備わっているが、これは半導体内部に高い電場勾配を持たせることによって、空乏層内に光や放射線が入射した際に生成された電子・正孔

対を両極に達するまでに十分に加速し、価電子帯の電子を伝導帯に叩き上げ信号を増幅するために生じる。信号を半導体内部で増幅することで回路の雑音を相対的に小さく抑えることが可能となり、APDはフォトダイオードに比べ優れたS/N比を実現する。またAPDは量子効率も高く、光電子増倍管とフォトダイオードの長所を兼ね備えた検出器と言える(表2.2)。APDを用いて γ 線やX線のスペクトルを取る際の分解能は、空乏層の厚さによってくる。空乏層が厚いと検出効率という点では有利であるが、電子正孔対の発生する位置で増幅率にバラツキが生じてしまい、結果的に分解能が悪くなってしまう。

APDは素子の内部構造によって種類があり、この種類によって増幅率や暗電流などのパラメータが異なる。代表的なものとして(a)beveled edge-type、(b)reach through-type、(c)reverse-typeがある(図2.3)。これらはその性質の違いにより用途も異なっている。以下で上記3種のAPDの特徴と性質について述べる。

	光電子増倍管	フォトダイオード	APD
量子効率	$\leq 25\%$	$\leq 80\%$	$\leq 80\%$
増幅機能	○($\sim 10^6$ 倍)	×(なし)	○($\sim 10^2$ 倍)
印加電圧	$\sim 1000\text{ V}$	$\leq 100\text{ V}$	$\sim 300\text{ V}$
磁場の影響	×(大)	○(小)	○(小)
回路雑音	○(小)	×(大)	△(中)
消費電力	×(大)	○(小)	○(小)
構造	×(複雑)	○(単純)	○(単純)

表 2.2: 光検出器の特徴

2.2.1 APDの種類

(a)beveled-edge type

このタイプのAPDは最も初期に開発されたものであり、n型の結晶の片面に不純物(III価の元素)をドーピングして p^+ (添字の+は相対的な高濃度不純物領域を示す。反対に-だと低濃度不純物領域を示している)領域を生成した p^+n 型のものである。 p^+ 型とn型の間に空乏層が形成される。そして高電圧($\sim 2000\text{V}$)を印加することで高い電場勾配が生じ、アバランシェ増幅が起きる。空乏層は $170\ \mu\text{m}$ と厚いため、ほぼ全てのX線が増幅領域の

手前で止まるが、どこでX線が反応したかにより増幅率にばらつきが出てしまう。そのため、増幅領域まで入射したイベントは十分な増幅が成されず、スペクトルが低エネルギー側に裾を引いてしまう。このタイプのAPDの欠点は、(i) 広い増幅領域で、熱励起による電子も増幅されるためノイズレベルが高い、(ii) 完全空乏層化のためには2000 Vもの高電圧を要する、などがある。

(b) reach-through type

中央に大きな高純度半導体があつて、受光面側に p^+ 型、その反対に p 型 n 型と並んでいる。これは完全空乏層化のために必要な印加電圧を低くするためであり、500 V程度で約130 μm にまで広げることが可能である。またドリフト領域(アバランシェを起こすまでには至らないが電子・正孔対を加速する領域)が広いので、広い領域で発生した電子・正孔対を完全増幅させるため、X線を直接入射した場合でも高い検出効率を得られる。このことから、beveled-edge typeのような裾は見られず、ピークが綺麗なスペクトルが得られる。欠点は、内部で発生する熱励起電子も信号とともに完全増幅するので、バルク暗電流を大きくしてしまうことである。そのため微弱なシンチレーション光の検出には適さない。

(c) reverse type

reach-through typeの増幅領域を受光面側に移動させて(表面から5 μm 程度の深さ)、シンチレーション光の検出用に特化させたものである。シンチレーション光は受光面から1~3 μm の領域で電子正孔対に変換されるので、シンチレータから発せられたほぼ全ての光は増幅領域の手前で電子に変換され増幅される。すなわち、受光面に近いためバルク暗電流を最小限に抑えることが可能な構造となっている。特徴としては、(1)他の2種に比べノイズレベルが低い(2)低エネルギー領域での性能が優れている、などが挙げられる。

2.2.2 増幅過程と増幅率

電圧を印加するとAPD内部に電場勾配が生じ電子が加速される。この際、正孔も加速されるので、増幅による信号は電子・正孔を組み合わせたもので考えなければならない。

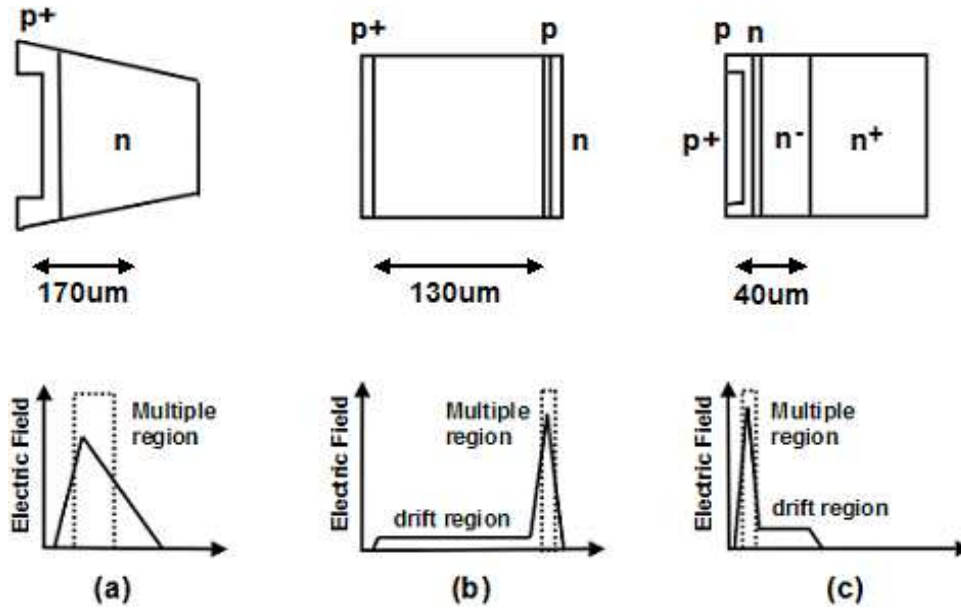


図 2.3: APD の種類別の内部構造と電場勾配の模式図。(a)beveled-edge type (b)reach-through type (c)reverse

また、電子・正孔が電離する確率は電場に依存する。すなわち電場が大きくなるとそれに従って衝突電離確率も大きくなる。電場は印加電圧に依存しているので、結局、衝突電離確率は印加電圧に依存する。電子と正孔の単位長さあたりの衝突電離係数を α 、 β とおき、光子の入射位置から距離 x での増幅率 $M(x)$ は正孔の電子に対する衝突電離確率 k_0 、衝突電離確率の重みつき平均 k_1 を用いて

$$M(x) = \frac{1 - k_1}{\exp(-\delta(1 - k_0) - k_1)} \quad (2.3)$$

と表せる。それぞれのパラメータは

$$k_0 = \frac{\int_0^x \beta dx}{\int_0^x \alpha dx} \quad (2.4)$$

$$k_1 = \frac{\int_0^x \beta M dx}{\int_0^x \alpha M dx} \quad (2.5)$$

$$\delta = \int_0^x \alpha dx \quad (2.6)$$

と書ける。仮に $\beta = 0$ ならば $M_e = [APD \text{ の増幅率}]$ が成り立つが、 $\beta > 0$ なので正孔により電離した電子が再び増幅される。このようなプロセスを経て、高電圧下では増幅率が際限なしに進んでしまう。そしてやがて絶縁破壊を起こしてしまう。正孔の増幅率 M_h は M_e と衝突電離確率の重み付き平均 k_1 を用いて

$$M_h = 1 + k_1(M_e - 1) \quad (2.7)$$

と表せる。正孔による衝突電離確率は電子による衝突電離確率よりも大分小さく、 $k_1 \sim 0.01$ の程度である。すなわち正孔はほとんど増幅されずほぼ電子のみが APD の増幅率に寄りしている。

2.2.3 過剰雑音係数

APD に固有な雑音として過剰雑音係数 (= F) が挙げられるが、これは APD の増幅率のゆらぎとして定義される。この係数は

$$F = \frac{\langle M^2 \rangle}{\langle M \rangle^2} \quad (2.8)$$

と表せる。増幅率 $M(x)$ 、衝突電離係数 α 、 β 、更に新たに衝突電離確率の重み付き平均 k_2 、有効衝突電離係数 k_{eff} を定義しこれを用いて更に具体的に書き下すと

$$F = k_{eff}M + \frac{2 - 1/M}{1 - k_{eff}} \quad (2.9)$$

と置ける。但し、

$$k_2 = \frac{\int_0^x \beta M^2 dx}{\int_0^x \alpha M^2 dx} \quad (2.10)$$

$$k_{eff} = \frac{k_2 - k_2^2}{1 - k_1} \quad (2.11)$$

これは APD の増幅過程が確率過程であることによる。そのため増幅率は一定とはならずにある程度のゆらぎを持つこととなり、 F の大きさとしてその値が示される。増幅のないフォトダイオードでは $F = 1$ となり、典型的な光電子増倍管では $F \simeq 1.2$ の程度となる。APD ではおよそ $F \simeq 2$ であり、これは正孔の増幅も関わってくるためである。正孔の衝突電離係数が大きいと F の値も大きくなってしまふ ([1]2.2.3)。

2.2.4 暗電流

光を遮断した状態でも発生する電荷により流れる nA 程度の電流を暗電流という。暗電流はその性質によって (1) 表面暗電流と (2) バルク暗電流とに分類出来る。表面暗電流は、検出器の封入方法、湿度、指紋、検出器表面の汚染など外的要因に依存して大きく変化する。バルク暗電流は、空乏層化領域の結晶中に熱的揺らぎによって生成された電子正孔対が電場により電極に集り流れてしまふ電流である。バルク暗電流の大きさは空乏層内で発生するため空乏層の厚さに依存する。また空乏層の厚みは印加電圧に依存しているため、

バルク暗電流は印加電圧に依存する。すなわち印加電圧が増加するとバルク暗電流もそれに応じて増加することになる。単位時間あたりに電子正孔対が熱励起される確率は

$$p(T) = CT^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (2.12)$$

と表される [8]。但し、 C は比例定数、 T は絶対温度、 E_g はバンドギャップエネルギー、 k はボルツマン定数である。指数関数項に表れていることから分かるように、熱励起の確率はバンドギャップの温度と絶対温度に大きく依存する。したがって低温度で暗電流は小さくなり APD の性能は良くなるはずである。

2.2.5 APD の基礎特性評価

本論文の実験では reverse type の APD を用いた (図 2.4、2.3)。増幅率は図 2.5、暗電流は図 2.6 のようになり、低温ほど APD の性能が良くなっているのが分かる。増幅率は、各温度での印加電圧 20V のときに APD から出力される電流値を増幅率 1 と定義して、相対的に決定した。また、図 2.7 を見ると印加電圧一定の場合、増幅率は低温ほど高くなっている。低温のときは半導体中の原子の熱運動が抑制され、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ためである。逆に降伏が起きやすいとも言える。

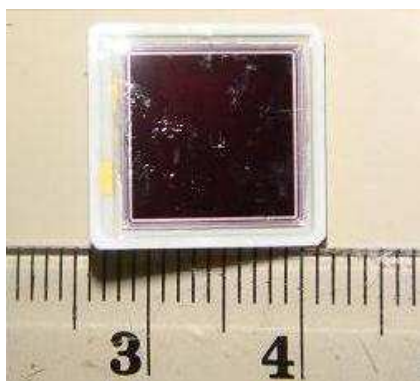


図 2.4: 実験で用いた 10mm × 10mm APD

ブレイクダウン電圧	434 (V)
逆電圧	386 (V)
暗電流	12.9 (nA)
端子間容量	257 (pF)

表 2.3: APD のパラメータ (@25 °C)

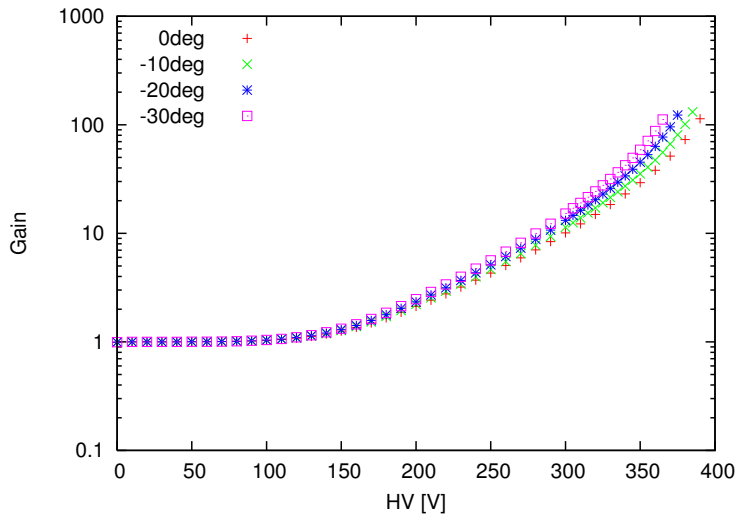


図 2.5: 温度一定での増幅率と印加電圧の関係

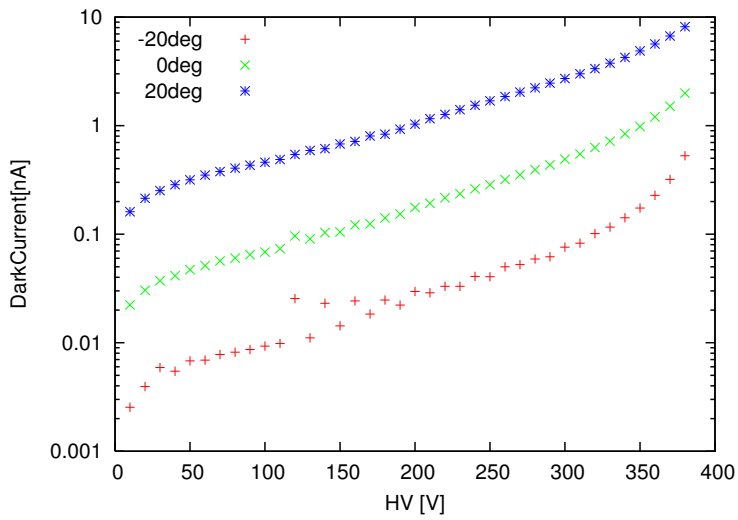


図 2.6: 実験に用いた APD の暗電流と印加電圧の関係

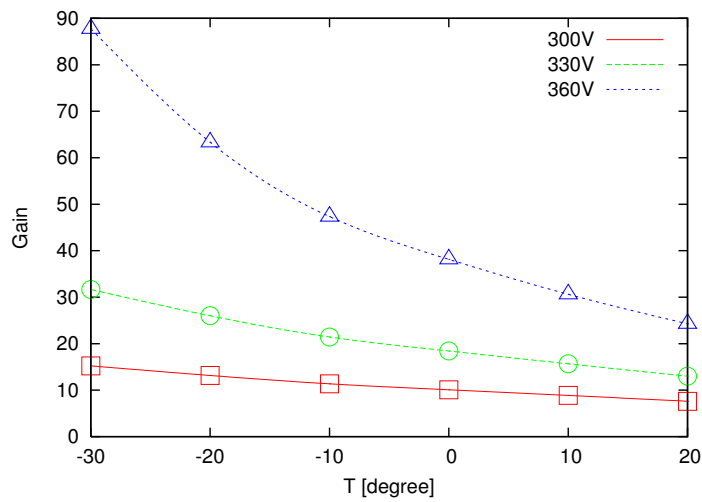


図 2.7: 印加電圧一定での温度と増幅率の関係

第3章 APD+小型BGOの基礎特性

次世代X線観測衛星ASTRO-HにアクティブシールドとしてAPD+BGO検出器が用いられるが、搭載されるのは30mm×50mm×100mmなどの大型のBGOである。大型BGOの前段階として小型BGO(10mm×10mm×10mm)を用いて、温度変化に応じて印加電圧値を変え増幅率を一定に保ち、自動制御できることを確かめる必要がある。

APDの増幅率は温度に依存し(図2.5)、BGOは発光量が温度に依存する(図3.1)。APD+小型BGO検出器での増幅率の温度と印加電圧に対する依存性を調べる。

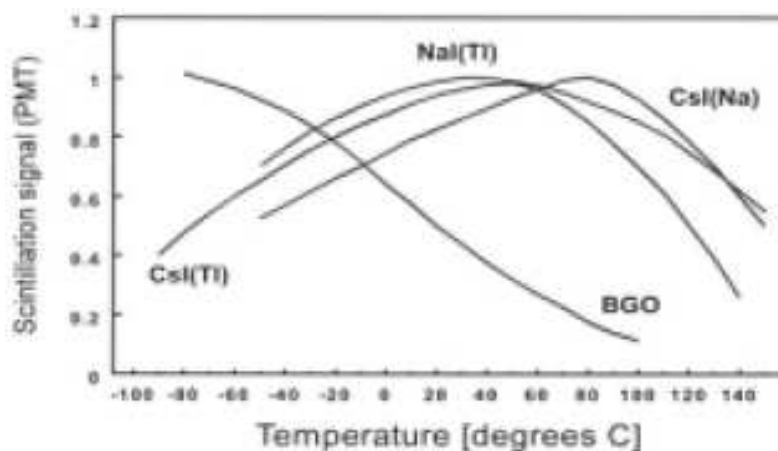


図 3.1: 代表的な無機シンチレータ発光量の温度依存性。BGOは低温になるほど発光量が増している。

3.1 アクティブシールドとしてのBGO

光子や荷電粒子は物質と相互作用し物質中の電子は励起する。その電子が基底状態に戻るときエネルギーの一部が光として放出される。このような作用を起こす物質をシンチレータといい、特に無機結晶から成るものを無機シンチレータという。無機シンチレータは構成物質の有効原子番号が大きいものも多く、BGOなどは高エネルギー光子を止める

のに適しており、硬 X 線や γ 線の検出器としてよく用いられる。主に用いられるシンチレータの特性を比較したものは表 3.1。

	BGO	NaI(Tl)	CsI(Tl)	GSO	PWO
有効原子番号	74	50	54	60	76
密度 (g/cm ³)	7.13	3.67	4.51	6.71	8.28
発光波長 (nm)	480	415	550	430	420
光量 NaI(Tl) = 100	12	100	40	20	10
減衰時定数 (ns)	300	230	1000	60	10
出力光子数 (個/keV)	8 - 10	38	61	10	
潮解性	なし	あり	あり	なし	なし
屈折率	2.15	1.85	1.83	1.85	2.2

表 3.1: BGO を始めとして主に用いられるシンチレータの特徴 [8]

ASTRO-H では光検出器と組み合わせるシンチレータとして BGO が用いられる。理由としては (i) 密度、原子番号が大きい (表 3.1)、(ii) 自己吸収が小さい、(iii) 放射化の影響を受け難い、(iv) 低温で発光量が高い (図 3.1)、などが挙げられる。

(i) 密度が大きいため荷電粒子を阻止しやすく、原子番号が大きいため X 線、 γ 線の吸収断面積が大きい。天体を観測するときには目的の天体からの γ 線は微少なので、感度の高い観測を行うためには、いかにバックグラウンドを落とせるか、ということが課題となる。光子の侵入を防ぐには原子番号の大きい物質でシールドしてやる必要があり、有効原子番号の大きい BGO は適している。(ii) 自己吸収が小さいためサイズを大きくしても検出器として十分機能する。(iii) 宇宙空間の陽子や中性子がシールドを構成している物質の原子核と衝突して核反応を起こす。そのとき γ 線を放出してシールド自体がバックグラウンド源となり得る。BGO は半減期が短いので影響を最小限に止めることができる。ただし放射化の影響を受けにくいとはいえ、バックグラウンド源にはなってしまう。シールドが放射化したこのような状況下でも効率良くバックグラウンドを減らすため、シールド自体を放射線検出器にする方法がとられている。こうすることで、シールド部で生じてしまった γ 線を独立に検出して取り除くことが可能になる。BGO の読み出しには APD を用いており、APD は BGO の発光波長域である 480nm 付近で量子効率が 80%(図 3.2) ほどあり相性が良い。(iv) -20 ± 2 °C 程度の温度に保たれる ASTRO-H においては、低温ほど発光量が大

きくなる BGO は最適である。

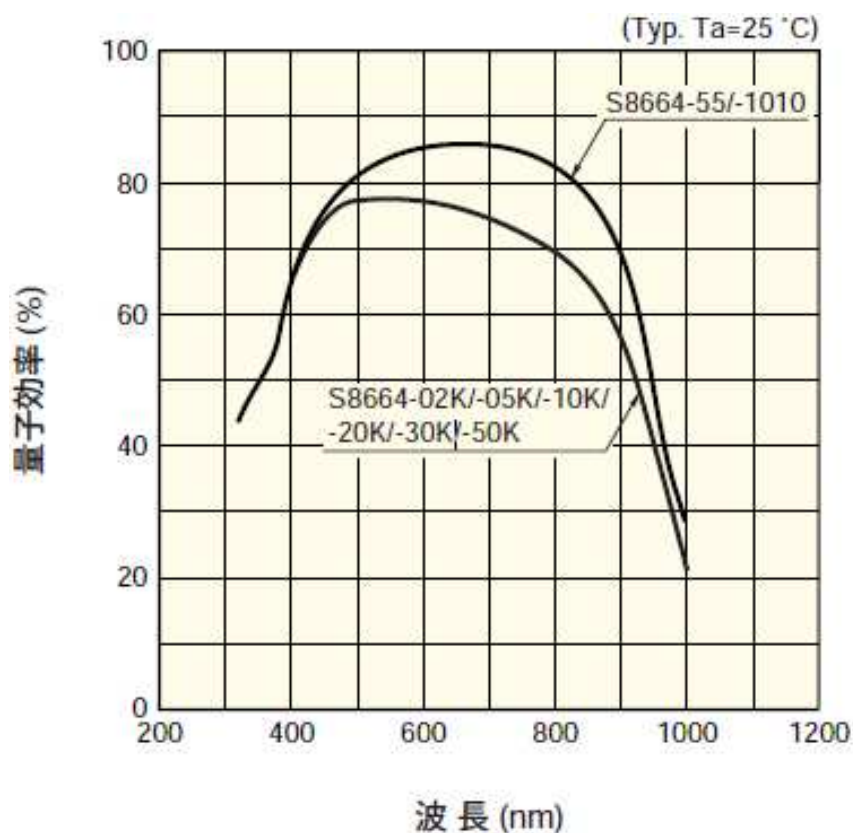


図 3.2: APD の各波長での量子効率 [4]

3.1.1 測定装置

前置増幅器と波形整形器が果たす役割を詳しく説明する。

前置増幅器

使用した前置増幅器はクリアパルス社の 581K 型電荷有感型前置増幅器である (図 3.3)。前置増幅器は検出器からの電流信号を積分して電圧に変換し、変換した際の波高 V_0 は入射光子数に比例する。前置増幅器と検出器の間には、検出器にかけた高電圧が前置増幅器に伝わらないようにカップリングコンデンサ C_c が挟まれている。 R_b 、 C_c には検出器で発生した全電荷が前置増幅器側に流れ込むように、それぞれ大きな抵抗、大きな容量のものを使う必要がある。また R_f 、 C_f は負帰還抵抗、負帰還容量と呼ばれるものであり、これらが時定数 τ を決定する。一般に素子の入力インピーダンスは高いため、検出器から流れ込んだ電荷は C_f を通して流れる。ここで電流を積分することで出力電圧が生じている。

APD やケーブルが持つ浮遊容量を C_{in} と置くと、入力と出力の関係は式 3.1-3.3 のように近似できる。

$$Q_{in} = C_{in} V_{in} \quad (3.1)$$

$$V_{out} = -A \times V_{in} \quad (3.2)$$

$$Q_f = C_f (1 + A) V_{in} \quad (3.3)$$

式 3.1 と 3.3 から次式 (3.4) が得られる。

$$Q = Q_f + Q_{in} = [C_{in} + (1 + A) C_f] V_{in} \quad (3.4)$$

一般にオペアンプの利得 A は十分大きいので、3.2 式に 3.4 式を代入すると

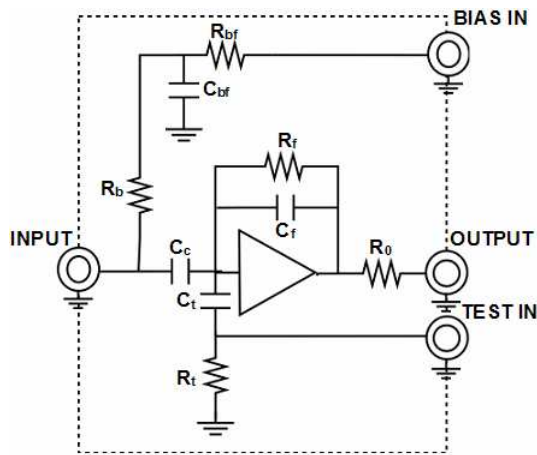
$$V_{out} = -A V_{in} = \frac{-AQ}{C_{in} + C_f (1 + A)} \simeq -\frac{Q}{C_f} \quad (3.5)$$

すなわち前置増幅器の出力電圧は検出器容量に依存しない。また、前置増幅器の出力電圧は検出器からの電流を積分して生成されるため、負帰還抵抗で放電しないとすぐに飽和してしまう。放電時の立ち下がりの時間は $\tau = C_f R_f$ の時定数で決定され、時刻 t では入力電圧は $\exp(-t/\tau)$ 倍に減衰している。検出器からの電荷を出力電圧に有効に変換するには、前置増幅器の減衰時定数は立ち上がり (電荷発生) 時定数より十分長く設定する必要がある。本実験ではシンチレータに BGO を使用しており、BGO の減衰時定数は 300ns である (表 3.1)。この 300ns が前置増幅器で立ち上がり時間として現れる。また前置増幅器の減衰時定数は 2.5ms が立ち下がりとして現れるはずである (表 3.2)。

しかし、本実験では前置増幅器からの信号をオシロスコープで読むと、立ち上がり $1 \sim 1.3 \mu\text{s}$ 、立ち下がり $100 \sim 130 \mu\text{s}$ 程度となって、それぞれ 300ns、2.5ms となっていない。これは 2.5ms と長過ぎる時定数のためパルスがひいてしまっているテイル部分を除去 (パルスのテイルを短く) するために前置増幅器内部に微分回路が挟まれているためである。この影響を立ち上がりも受けており、300ns に比べ長い立ち上がり時間になっているのではないかと考えられる。通常は微分回路は波形整形器に組み込まれるものだが、本論文で用いた 581K 前置増幅器では前置増幅器に組み込まれている。

波形整形器 (Shaping Amp)

使用したのは ORTEC 社の 570 リニアシェーピングアンプである。前置増幅器からの信号は速い立ち上がりと遅い立ち下がりの信号である。これを増幅回路、微分回路、積分回



R_b	$1G\Omega$
R_f	$5G\Omega$
C_f	$0.5pF$
C_c	$2.2nF$
R_t	50Ω
C_t	$1pF$
R_0	51Ω

図 3.3: 前置増幅器 581K の内部構造 [7]

表 3.2: 581K のパラメータ [7]

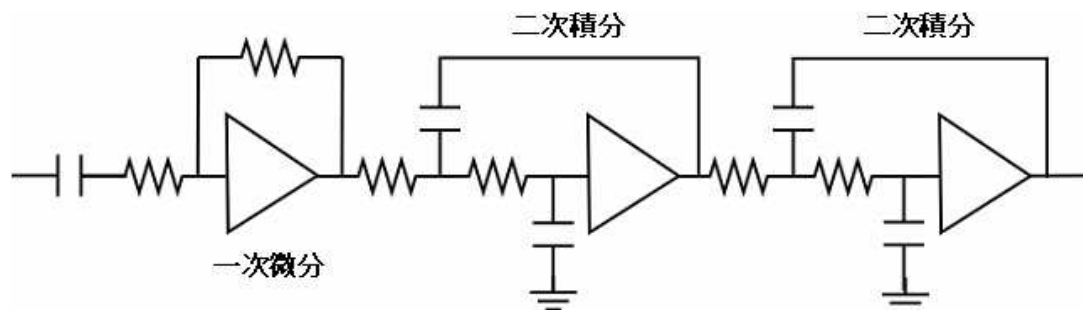


図 3.4: 一般的な波形整形器の等価回路 [16]

路を組み合わせた回路に通す。すると信号の最大値 (V_1) が、送られて来たパルスハイト (V_0) に比例し、尚且つ信号の幅が数 μsec ~ 数十 μsec の短い信号に変換される (図 3.5)。まず前置増幅器から送られて来た信号を微分回路に通すことで知りたい情報であるパルスハイトの部分だけを抽出する。これは立ち下りの傾斜が立ち上がりには比べ大分緩やかであるため、微分回路に通してやることで差別化できることによる。そして積分回路でピーク部分をなだらかにしてやり、増幅回路で増幅する。この一連の流れにより、パイルアップが生じている前置増幅器からの信号の波形を整形増幅し、確実に立ち上がりの部分だけを抽出することが出来る。

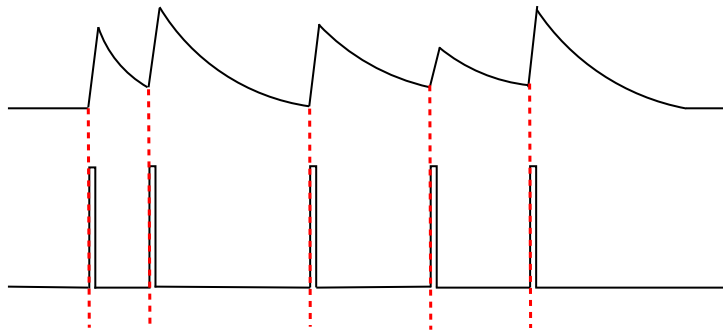


図 3.5: パイルアップの影響を整形することで立ち上がりの部分の情報のみを抽出している [8]

3.2 測定方法と実験

APD+BGO 検出器の増幅率は、温度に応じて印加電圧を変化させることで一定に保つことができる。そのような温度と印加電圧の関係を求め、データベースを作成しグラフを作る。セットアップを図 3.6 に示す。実験は以下の手順で行なう。(i)662keV(^{137}Cs)の γ 線スペクトルを -20°C で取る、(ii) 恒温槽で温度を $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ずつ変化させる、(iii) 温度変化によりずれてしまったスペクトルのピーク位置が (i) のピーク位置と一致するような印加電圧値を探す、(iv)(i) ~ (iii) を APD の増幅率が 30, 50, 70, 100 となるような印加電圧値で繰り返す。

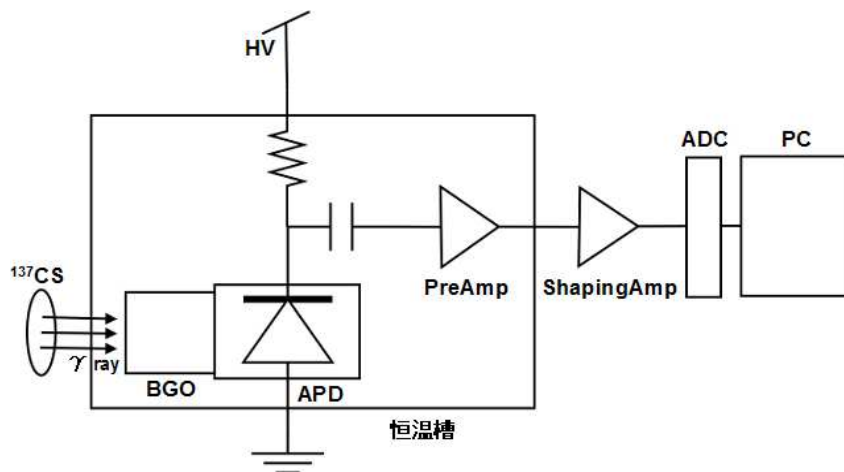


図 3.6: APD+小型 BGO のセットアップ

以上の作業により得られたデータを基に増幅率一定となる $T - HV$ 図を作る。尚 (ii) の手順では、温度を変化させてから 1 時間ほど置き、検出器と恒温槽が熱平衡になってから

測定を開始する (図 3.7)。データベース作成の際に高圧電源で印加電圧を与えたのだが、その精度は $\sim 1V$ であった。そのためまず (i) の光電ピークを、ch の大小の方向から挟み込むスペクトルを作るような印加電圧値を 2 つ決める。(ピーク位置, 印加電圧値) が (α, β) 、 (γ, δ) ($\alpha < \gamma$ $\beta < \delta$) となった場合に、この 2 点が線形の関係にありその直線上に (i) のピークが来ると考え、以下の計算を行う。

$$\text{印加電圧値} = \frac{\delta - \beta}{\gamma - \alpha} ([-20^\circ\text{Cのピーク ch}] - \alpha) + \beta \quad (3.6)$$

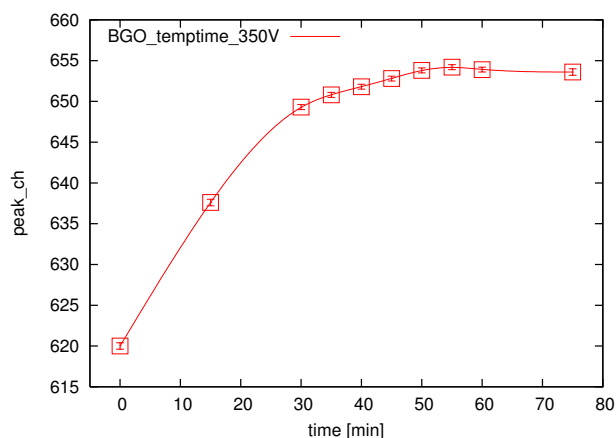


図 3.7: -20°C から -22°C に温度を変化させ、そのときを時間 0 とする。そこから最初は 15 分ごとにスペクトルをとって、位置が安定し始めたら 5 分ごとにスペクトルをとった。50 分過ぎたあたりでスペクトルの位置が安定している。

3.3 結果のまとめ

得られたデータから、APD+小型 BGO の増幅率を一定に保つための印加電圧と温度の関係は図 3.9 のようになった (APD 単体は図 3.8)。それぞれの場合での温度勾配は表 3.3 である。APD+小型 BGO の場合も APD 単体の時と同様に一次直線で近似したが、プロットした各点が近似直線に対して全てエラーの範囲内に存在している。そのため線形で十分モデル化できる。また APD 単体に比べ勾配 ($V/^\circ\text{C}$) が大きくなっている。これは BGO に温度依存性があり、低温ほど発光量が増すという性質のためと考えられる。低温では増幅率を保つための印加電圧値が小さくて済み、必然的に勾配は急になるはずである。

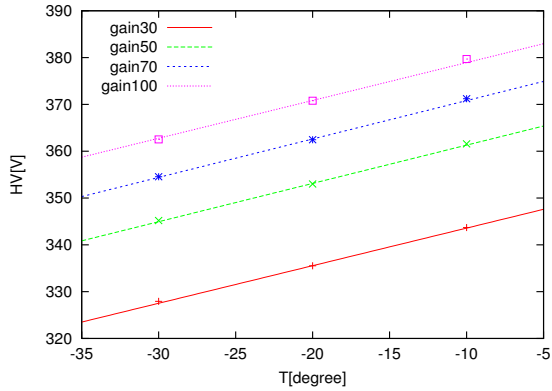


図 3.8: APD 単体で増幅率を一定に保つための印加電圧の温度依存性

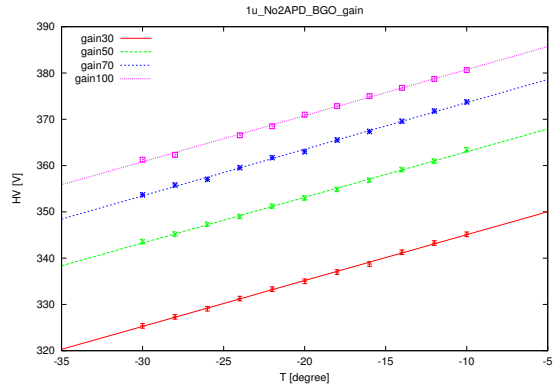


図 3.9: APD+BGO 検出器の増幅率を一定に保つための印加電圧の温度依存性

(V/°C)	gain 30	gain 50	gain 70	gain 100
APD 単体	0.81±0.02	0.82±0.01	0.82±0.01	0.80±0.02
APD+小型 BGO	0.99±0.01	0.99±0.01	1.02±0.02	1.00±0.01

表 3.3: APD 単体、APD+小型 BGO で増幅率を 30、50、70、100 で一定に保つための温度勾配 [V/°C]

第4章 APD+小型BGO検出器の増幅率自動制御

3章では増幅率制御の準備として、APD+小型BGO検出器の増幅率を一定に保つために必要な印加電圧との温度依存の関係を表すグラフを作った(図3.9)。3章で得られたデータを基にAPD+小型BGO検出器の増幅率の自動制御を行う。ここでは $-20 \pm 5^\circ\text{C}$ の範囲において、増幅率の変動を3%以内に抑えることを目標とした。またAPD($5 \times 5 \text{ mm}^2$)+CsI($5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$)をVMEを用いて制御する実験は成功している。そのときの恒温槽の温度センサーの温度変化は図4.1のようになった([1]8章)。

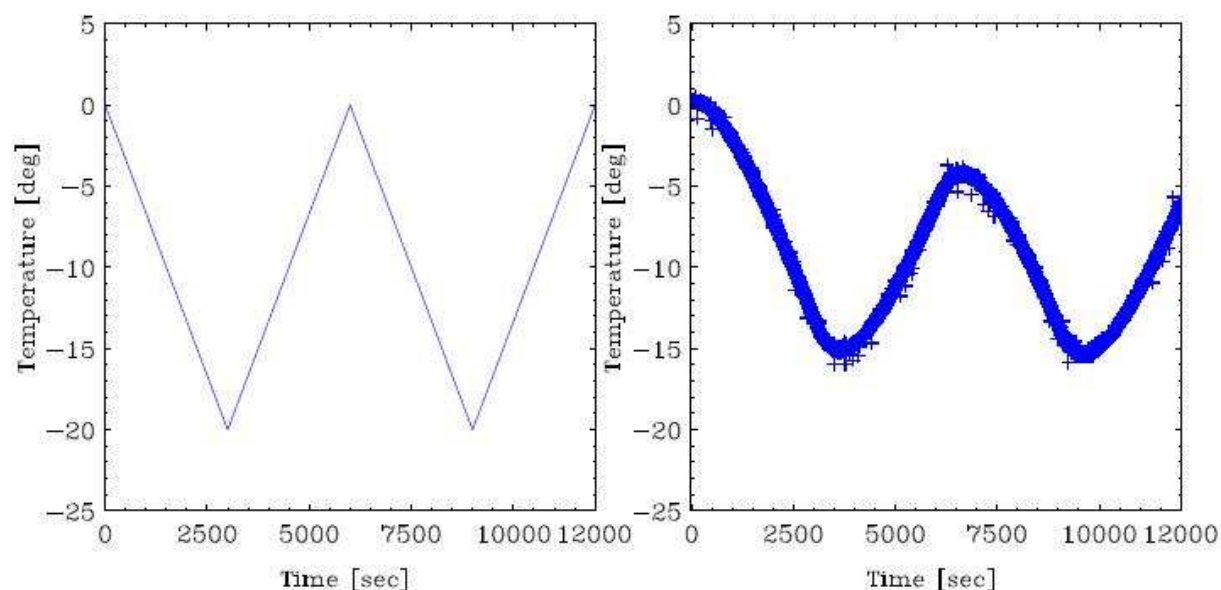


図 4.1: 恒温槽の設定温度と温度センサーの温度変化のようす ([1]8章)

4.1 装置と制御方法

温度制御の手段としてAD590温度センサー(表4.1)を用いる。ここから出力される $1 [\mu\text{A}/\text{K}]$ の絶対温度に比例した電流を電圧に変換したあと、DC/DCコンバータであるHEICO製MODEL 521A-5(以下DC/DC(図4.2))で120倍に増幅しAPDへの供給電圧と

する。APD+BGO と温度センサーの位置関係を図 4.3 に示した。温度センサーを APD と BGO に接着させることで3者の温度が共通になるようにする。DC/DC から出力される電圧 V_{HV} は、理論的には式 4.1 のように表せる。

$$V_{HV} = 120 \times ((V_{gain} + R_t) \times i_t + V_{off}) \quad (4.1)$$

ここで、 $R_t = 3.3 \text{ k}\Omega$ 、 $i_t = 1 \mu\text{A}/\text{K}$ であり、 V_{gain} は温度勾配 [$\text{V}/^\circ\text{C}$](V_{gain})、 V_{off} オフセット電圧であり、それぞれ可変抵抗で変えることができる。セットアップは3章の測定のものと同供給電圧源 (HV) が違う以外は同じである。



図 4.2: 実験に用いた DC/DC の写真。DC/DC に入力された電圧を 120 倍したものが APD の印加電圧となる。

詳細	パラメータ
Linear Current Output	$1 \mu\text{A}/\text{K}$
Thermal Range	$-55 \text{ to } 150 \text{ }^\circ\text{C}$
Power Supply Range	$+4 \text{ to } +30\text{V}$
Calibration Accuracy	$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$
Linearity	$\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ (full range)

表 4.1: 温度センサー AD590 の各パラメータ [6]

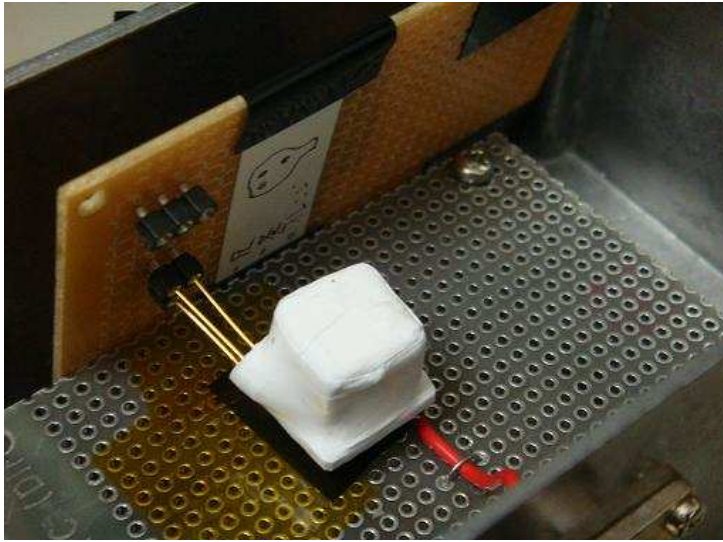


図 4.3: APD+小型 BGO と温度センサーの写真。手前が APD+小型 BGO をテフロンテープで巻いたもので、そこから足が 3 本出ているのが温度センサー AD590。温度センサーは APD+小型 BGO と接触するように配置した。

4.2 HVboard を用いての測定

4.2.1 測定の準備

まず、表 3.3 で得られた印加電圧の温度勾配 [V/°C] を元に HV board の各可変抵抗の値を変更する。HV board で自動制御するための、温度と印加電圧の値は APD+BGO 検出器の増幅率が 100 となるものを使用する。これは増幅率が大きい方が制御が難しい (印加電圧の変化量に対する増幅率の変化量大きい (図??)) からである。増幅率 100 で制御ができれば、増幅率 30, 50, 70 の場合でも制御できると考えて良い。尚、ASTRO-H では、APD の増幅率が 50 前後で用いられる予定である。

3 章で得られた結果 $HV = y = 0.996x + 390.7$ と等しくなるように可変抵抗を操作し、HV board のパラメータを調節したときの関数のグラフを図 4.4 に示す。図 4.5 は HV board のパラメータ調整後の 662keV (^{137}Cs) γ 線のスペクトルである。分解能とピーク ch は表 4.2 に示す。図 4.4 を見ると、パラメータ調整後の関数と、3 章で得られた関数はほぼ一致しているが、図 4.5 をみると、光電ピークの位置は 2.94% 程度ずれてしまっている。APD+小型 BGO 検出器の温度と印加電圧のテーブルを作る際に高圧電源 (REPIC RPH-022) から固定電圧を供給したのだが、その誤差が $\pm 1\text{V}$ 程度ある。APD の温度に対する増幅率の変化の割合は 3%/°C であり ([17])、APD+BGO 検出器の温度に対する電圧の変化は約 1V/°C である。すなわち 3%/V と考えられるので、1V 変わると増幅率が 3% 程度変わり、

2.94%程度のずれは許容範囲である。

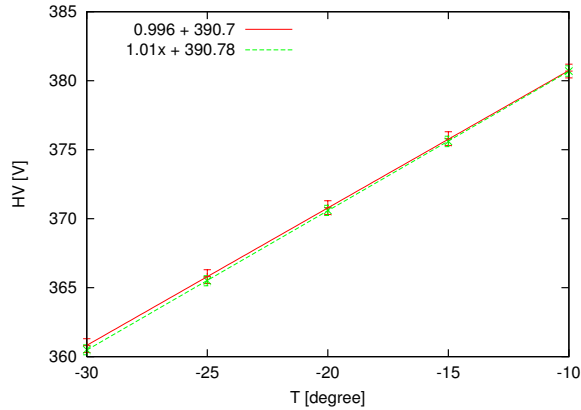


図 4.4: HV board からの出力値の温度勾配と、固定電源で印加電圧を与えた場合に得られた温度勾配。

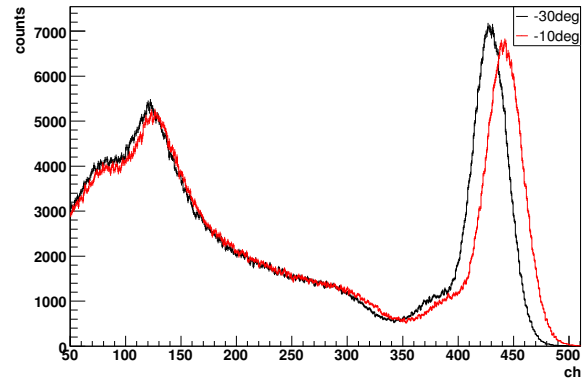


図 4.5: HV board で測定した ^{137}Cs の γ 線スペクトル。 -10°C 、 -30°C で温度固定した場合。

	FWHM[%]	ピーク ch
-10°C	9.18 ± 0.03	441.6 ± 0.1
-30°C	8.82 ± 0.04	428.8 ± 0.1

表 4.2: HV board で得られた温度固定スペクトル (図 4.5) の FWHM とピーク ch

4.2.2 温度を振った場合の測定結果と考察

固定温度の場合は HV board を用いても増幅率 100 で制御でき、期待通りの印加電圧値が出力されていることを確認した。次に得られた関数のパラメータを用い温度を振って制御できるか確認する。温度は $-10^\circ\text{C} \rightarrow -30^\circ\text{C} \rightarrow -10^\circ\text{C}$ を 1cycle 目、 $-30^\circ\text{C} \rightarrow -10^\circ\text{C} \rightarrow -30^\circ\text{C}$ を 2cycle 目として 1cycle/90min で変化させる。得られたスペクトルは図 4.6、スペクトルの分解能、ピーク ch、 -10°C 固定の場合との増幅率の差は表 4.3 に示す。図 4.1 から、温度センサーは -20°C を中心に変動していると考えられる。HV board からの出力は図 4.7 から -10°C 側が支配的となっている。そのため温度を振った場合に得られたスペクトルも -10°C 側に制御されている。また、増幅率の差は 1% を切っており、十分に

制御できていると言える。

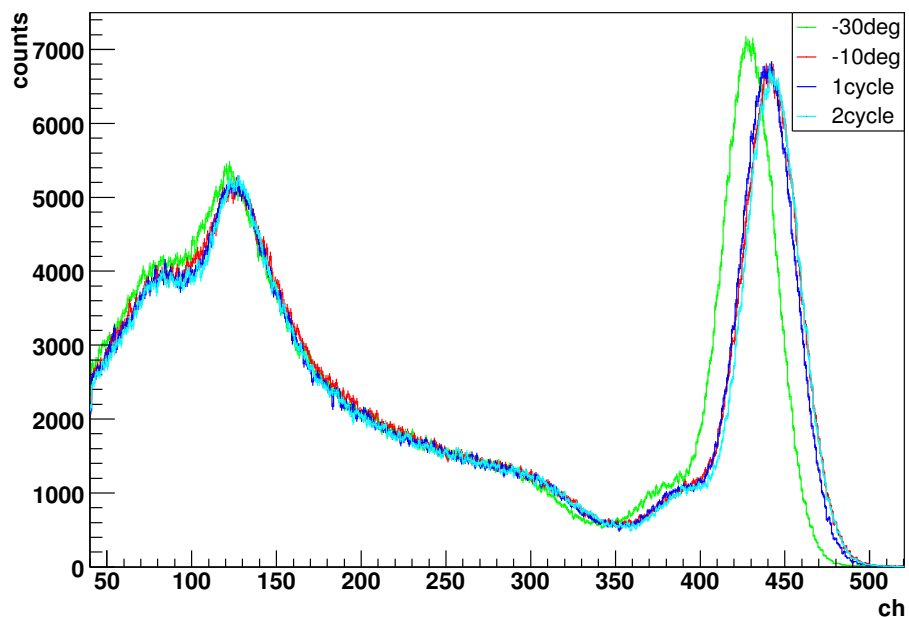


図 4.6: -10°C , -30°C で一定の場合と温度を振った場合を HVboard でとったスペクトル

	FWHM [%]	ピーク ch
1cycle	8.97 ± 0.0	439.7 ± 0.0
2cycle	8.83 ± 0.1	442.5 ± 0.1
増幅率の差 [%]		
1cycle	0.4	
2cycle	0.2	

表 4.3: 1cycle 目、2cycle 目の分解能とピーク ch、各温度との増幅率の差

制御の有無でのスペクトルの確認

制御の有無でスペクトルの形状にどの程度の差が生じるのかを確認する。測定は 1cycle 目に該当する方法で行った。印加電圧を 371V で固定し (-20°C で APD+BGO 検出器の増幅率が 100 となる印加電圧値) 温度を振ったとき、制御した場合の光電ピークを中心に両サイドに光電ピークができる (図 4.8)。このスペクトルの分解能、ピーク ch、そして -10

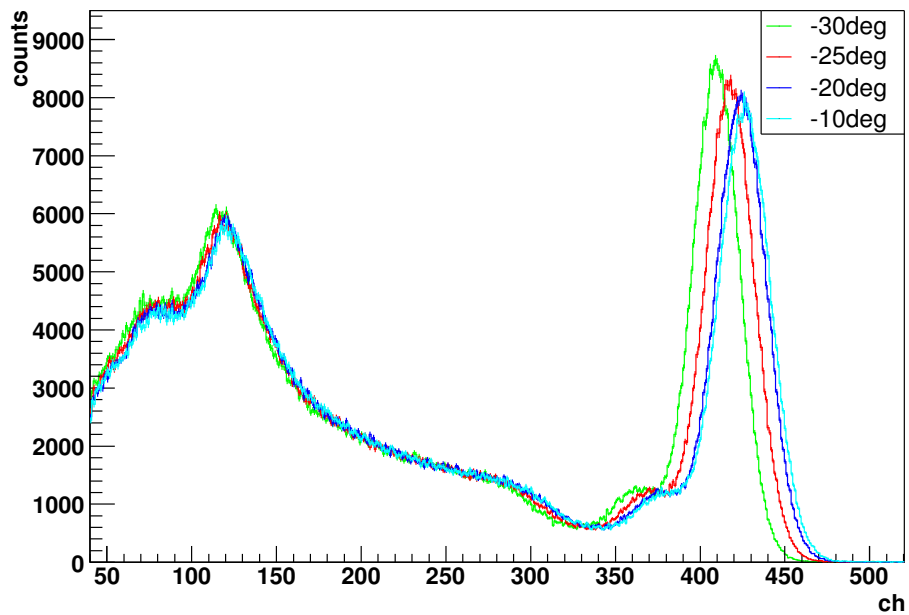


図 4.7: -10°C 、 -20°C 、 -25°C 、 -30°C で温度固定した場合に HV board で得られたスペクトル。 -10°C 、 -20°C がほぼ一致しており、 -25°C で少し左にずれ、 -30°C では更に左にずれている。

$^{\circ}\text{C}$ 662kwV(図 4.8 左) の光電ピーク A、 -30°C 662kwV(図 4.8 右) の光電ピーク B と温度制御したときの光電ピークの ch の差を表 4.4 に示す。増幅率と温度の関係は $3\%/^{\circ}\text{C}$ であるので、左と中央では約 11°C 、中央と右では約 7°C の差があることが分かる。このことから温度センサーの温度は -30°C まで下がりきらずに上昇し始めてることが分かる。

	FWHM [%]	ピーク ch
ピーク A	11.1 ± 0.2	308.2 ± 0.2
ピーク B	11.4 ± 0.2	538.1 ± 0.3
制御した場合の 662keV 光電ピークとの増幅率の差 [%]		
ピーク A		34.9
ピーク B		20.4

表 4.4: 印加電圧を固定し温度を振った場合の分解能、ピーク ch、増幅率の差。

温度センサーの位置による影響

この章の最後に温度センサーと APD+BGO 検出器の位置関係における影響を確認する。

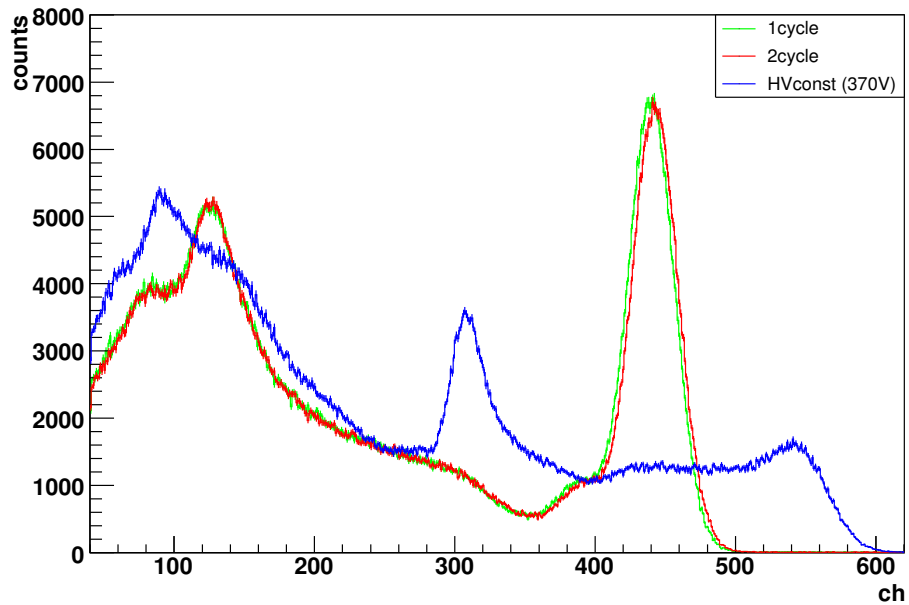


図 4.8: 371V で印加電圧を固定し温度を振った場合に得られたスペクトルと、HV board で制御した場合のスペクトル。

- 温度センサーを APD+BGO 検出器が入っている治具の外に置いた場合
- 治具の中に入れるが APD+BGO 検出器とは接触させない場合
- 温度センサーと APD+BGO 検出器を接触させた場合

それぞれでのスペクトルの変化の様子を測定した (図 4.9)。温度センサーを治具の外に置いた場合は、治具までの距離に関わらず、ピーク位置が期待されるものから大きくずれてしまい全く制御できなかった。一方、仮に接触させなくとも、治具の中に温度センサーを入れると、多少の分解能の劣化は生じてしまうものの、光電ピークの形状は維持できる。これは治具が箱状で、内部と外部が隔離されていて、さらに暗幕シートを巻いているので、治具の内側と外側では温度変化に大きな差があったためと考えられる。

小型 BGO での測定のまとめ

3章で作成した APD+小型 BGO の増幅率を一定に保つための関数を基に HV board のパラメータを決定した。 -10°C と -30°C で光電ピークの位置に差が生じたが、許容範囲内の差であったためそのまま制御実験に移行した。制御実験で目標に掲げた、温度を振った場合も増幅率 3% 以内にスペクトルを維持することを達成し、制御に成功したと

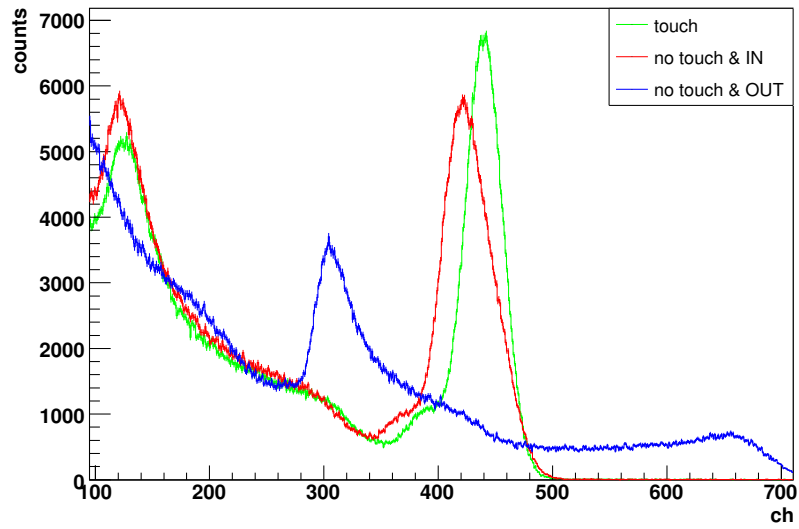


図 4.9: (i) 温度センサーを治具から出した場合、(ii) 治具に入れるが接触はさせない場合、(iii) APD に接触させた場合のスペクトル。

言える。また温度制御する場合には温度センサーと APD+BGO をきちんと接触させ、3 者の温度の統一をはかることが必須である。

第5章 APD+大型BGO検出器の増幅率自動制御

4章ではAPD+小型BGO検出器の増幅率をHV boardを用いて自動制御することに成功した。続いて $30 \times 50 \times 100$ [mm³]サイズのBGOで同様の実験を行う。本章の実験は、小型BGOを用いて行なった場合と同様に、cycleさせた場合のスペクトルが、基準スペクトルと増幅率で3%以内に収まることを目標とする。また恒温槽(ESPEC社, MODEL:SU-240)はセットアップの関係上[ESPEC社, MODEL:SU-641]に変更した。

5.1 セットアップ

恒温槽内部にはAPD+大型BGOと温度センサーが入った治具、前置増幅器、HV boardを入れる(図??)。治具の内部を図5.1、温度センサーとAPD+大型BGOの接着面は図5.2に示す。APDとBGOはシリコングリスを用いて接着し、治具内部でAPD+大型BGOのセットアップが動かないようにしっかりと固定する。治具外部のセットアップは小型BGOを用いて行った場合(第4章)と同様にHV boardを用いた。HV boardのパラメータは小型BGOで決定したものであるが、これはAPD+BGO検出器での増幅率が100の場合のものなので小型、大型問わずに利用できるはずである。試しに-20℃に恒温槽を冷却しその状態を6時間保ち、BGOの温度が-20℃で一様になるようにする。そこから12分かけて-22℃まで冷却し、冷却直後から5分間隔で間断なくスペクトルを取り続けた(図5.3)。ピークchを見ると、増幅率の変化の割合は0.4%程度であり、増幅率の温度依存度から約0.1℃の温度変化と同程度の差である。使用している恒温槽は±0.3℃の誤差がある([13])なので、増幅率.4%程度のずれは許容範囲である。よって、本章の実験もAPD+小型BGOで決定したパラメータのまま行なう。



図 5.1: APD+大型 BGO、温度センサーが入っている治具の内部。両側と後ろに綿を詰めて BGO が動かないように固定している。

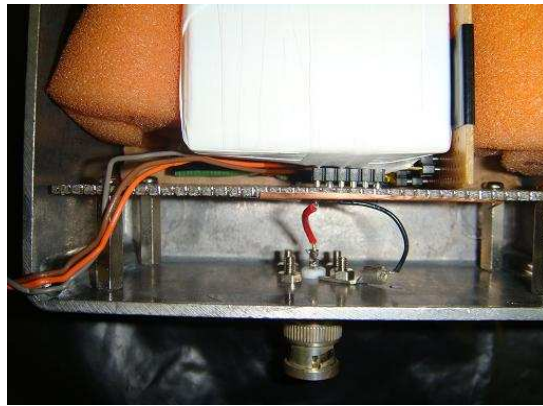


図 5.2: APD+大型 BGO と温度センサーの接着面。写真の右側から温度センサーを接触させている。

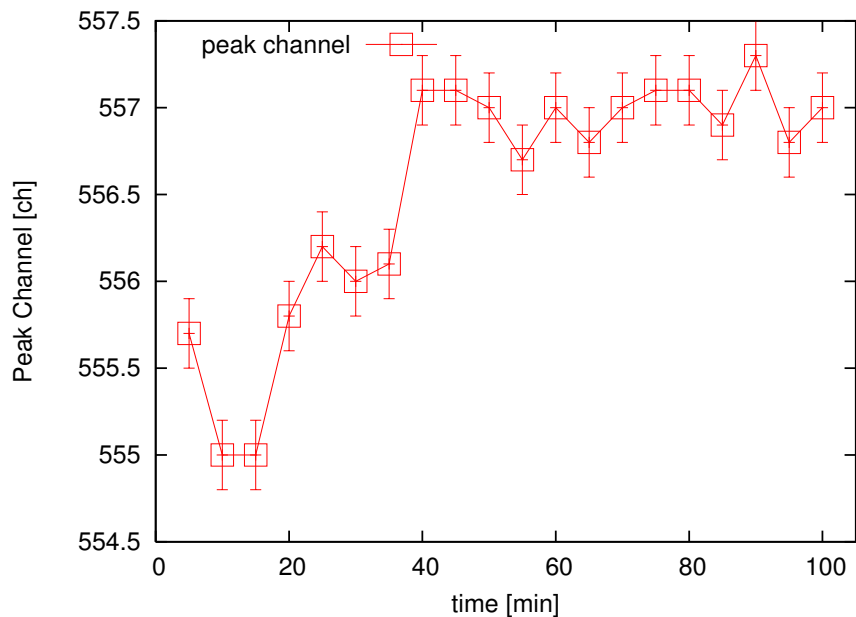


図 5.3: 大型 BGO で恒温槽を -20°C から -22°C に冷却した後のスペクトルのピーク ch の推移

5.2 温度センサー出力のモニタリング

恒温槽内の温度変化のようすを出力値に影響しないように、バッファを通してモニタリングし、恒温槽内部での検出器の状態を知る手がかりとする。モニタリングは (i) $-10^{\circ}\text{C} \rightarrow -30^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C}$ 、(ii) $-30^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C} \rightarrow -30^{\circ}\text{C}$ の 2 パターンで行なう。バッファを

温度センサーの直後につなぐと出力値が小さく測定が粗くなってしまい、DC/DCの入力直前だと出力値が大きく変動してしまう(5.1)。そのためスペクトル測定と温度測定はそれぞれ別々に行なうこととする。

モニタリング

BGOの温度が -10°C 、 -30°C それぞれの温度で一様になったあとに、 $-10^{\circ}\text{C} \rightarrow -30^{\circ}\text{C}$ を45分、 $-30^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C}$ を45分の往復90分で温度を振る。この動作を2cycle行う。 -30°C の場合も同様である。温度を振り始めてから1分ごとにテスターでバッファの出力を調べて記録し、cycle終了後も温度センサーからの出力が落ち着くまでモニターする。温度センサー、APD、BGOはそれぞれ接触しているので、温度センサーから読み取れる温度は、APD+BGOの温度変化のようすを表していると考えて良い。スタートを振り始め、ゴールを折り返しとし、 -10°C 、 -30°C のときの出力値をテスターで調べ基準値とする。その上で、以下の式で温度を決定した。

$$T = (\text{スタート温度}) + \frac{(\text{テスターのHV値}) - (\text{スタートの基準値})}{|(\text{スタートの基準値}) - (\text{ゴールの基準値})|} \times 20 [^{\circ}\text{C}] \quad (5.1)$$

-30°C のHV値	バッファ未接続	バッファ接続	
DC/DCの入力直前	2.779V	414V	387.8V
温度センサーの出力直後	0.821V	415V	413V

表 5.1: DC/DCの入力直前、温度センサー出力直後の値をそれぞれ出力値、バッファ接続の有無で比較した。DC/DCの入力直前では出力値は大きい但バッファの影響が大きくなってしまい、温度センサー入力直前では出力値が小さいがバッファの影響も小さい。

(i) -10°C スタートの場合

温度変化のようすをモニタリングした結果を図5.4に示す。1cycle目(0~90min)は温度変化の幅が $6\sim 7^{\circ}\text{C}$ 程度、2cycle(90~180min)目は $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 程度であり、温度センサーの温度と恒温槽内の表示温度とを見比べると変化の様子にかなり差違がある。

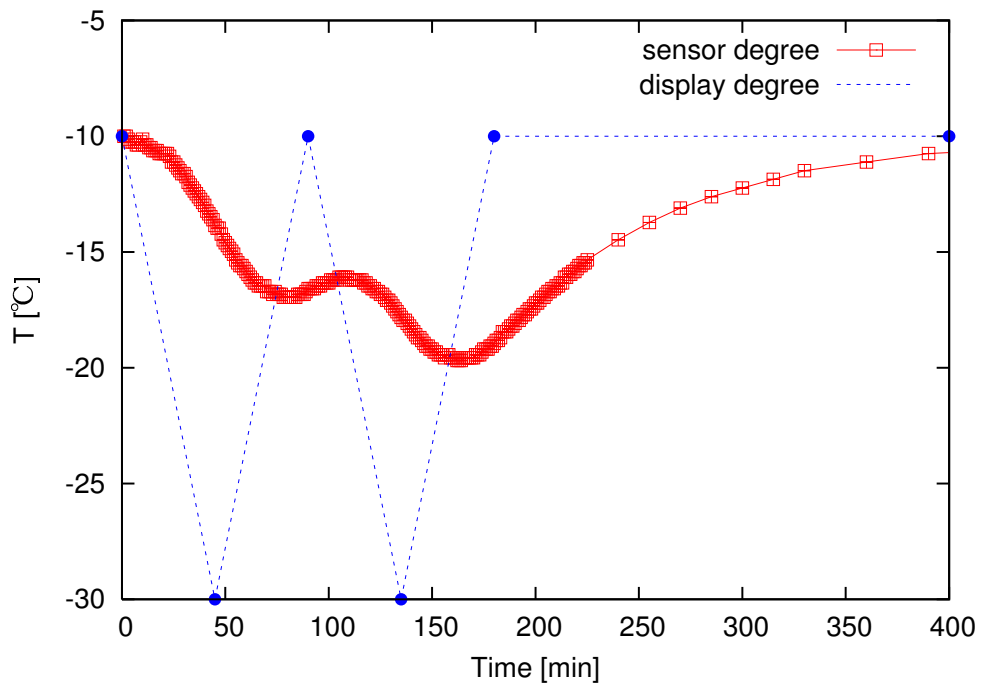


図 5.4: -10°C から温度を振りモニターした。直線は恒温槽の設定温度、曲線は温度センサーの温度変化の様子。

(ii) -30°C スタートの場合

温度変化の様子をモニターしたものを図 5.5 に示す。様子で、直線が恒温槽の温度設定を表す。1cycle目(0~90min)は温度変化の幅が 10°C 程度、2cycle(90~180min)目は 6°C 程度となった。

モニタリングの考察

-10°C から温度を振った場合の結果を反転させ -30°C から温度を振った場合の結果と比較すると、 -10°C から温度を振ったの場合の方が変化が緩いことが分かった(図 5.7)。よって温度を振って制御できているか確認する際、 -30°C スタートの方が条件が厳しくなるので、こちらを制御できればより確実であると言える。

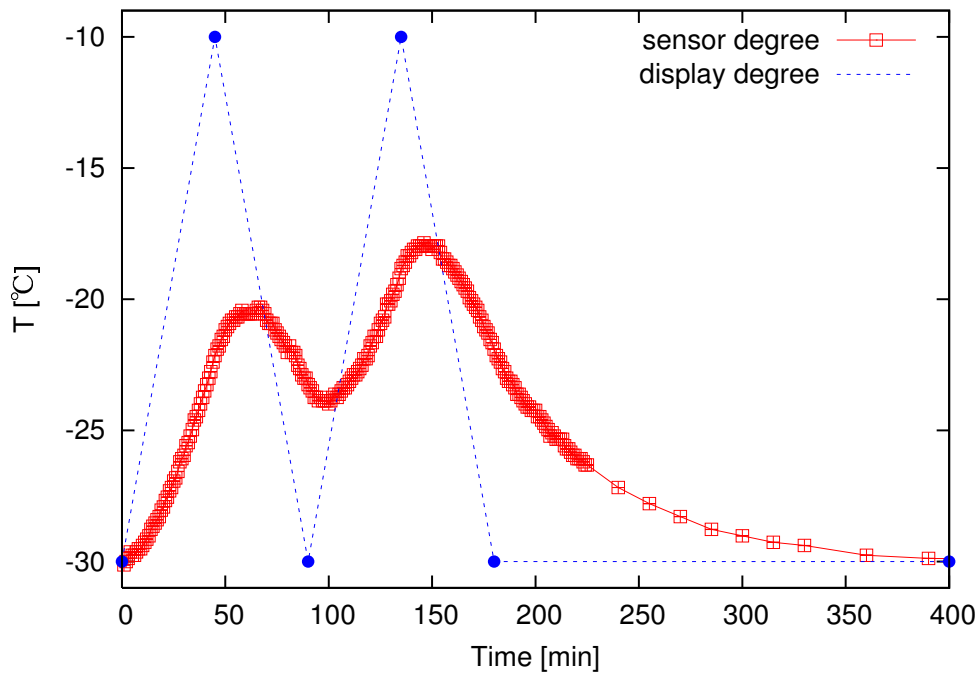


図 5.5: -30°C から温度を振った場合の温度センサーと恒温槽の温度変化の様子。直線は恒温槽の設定温度、曲線は温度センサーの温度変化の様子。

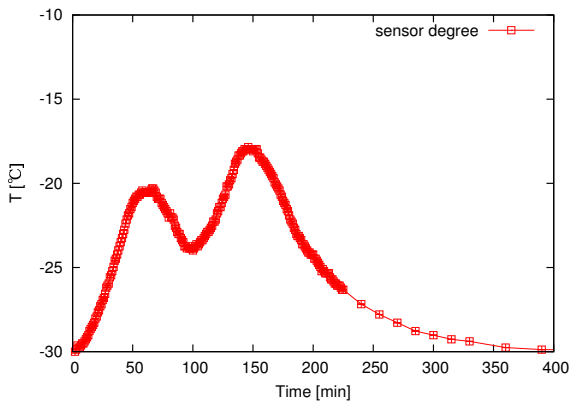


図 5.6: -30°C から温度変化させた時の温度センサーの変化のようす。

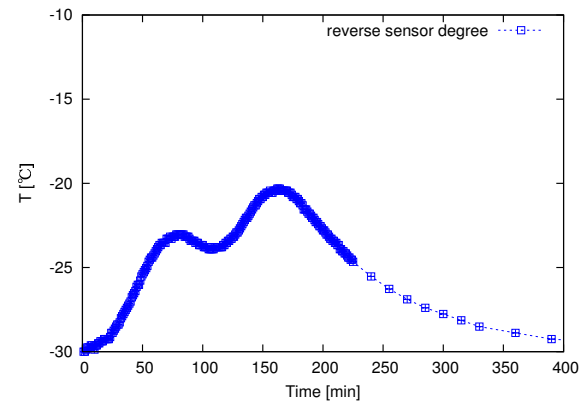


図 5.7: -10°C から温度変化させた時の温度センサーの変化を反転させ、 -30°C スタートとした場合の変化のようす。

5.3 大型BGOを用いたHVboardでの測定

大型BGOと小型BGOの違いはその光量(APDに入射するシンチレーション光量)にある。APD受光面に入射してくるシンチレーション光子数は分解能に直接関するパラメータであり、その影響について考える。測定の際に線源を近くに置くとBGOに入射する γ 線の数が多くなり、前置増幅器が飽和しパイルアップが生じてしまう。そのため本実験で

は恒温槽の外 1m くらいから BGO に向けて設置した。

5.3.1 エネルギー分解能

エネルギー分解能決めるものとして、統計揺らぎ、回路雑音、検出器応答の変動、測定期間中の動作パラメータの変動など様々ある。シンチレーターで γ 線のスペクトルを測定する場合、APD 受光面に到達するシンチレーション光子の統計揺らぎがもっとも効いてくる。スペクトルを見る際の ch は波高に比例しており、波高はシンチレーション光子数に比例する。今のように結晶内に 662keV γ 線を付与する事象が繰り返されるなら、各事象ごとに集められるシンチレーション光子の数が統計的に変化するためパルス波高は変動する。結晶が小さいと、 γ 線の 1 事象に対して集められるシンチレーション光子数はばらつきが小さくなるが、大きいとばらつきも大きくなってしまう

定量的に考える。BGO の入射エネルギーに対するシンチレーション効率は 2.1%([8]) である。シンチレータの中でシンチレーション光に変換される平均エネルギーは約 3eV なので、 ^{137}Cs で 662keV γ 線を付与すると、発生するシンチレーション光子数は

$$\frac{662 [\text{keV}] \times 0.021}{3 [\text{eV}]} \simeq 4600 [\text{個}] \quad (5.2)$$

である。APD 受光面に到達するのが $X(=4600 - \alpha)$ 個、APD の平均量子効率を約 80% とすると、 $0.8X$ 個の電子正孔対が生成される。ポアソン統計を仮定すると、電子正孔対の標準偏差は生成された電子正孔対の平均値の平方根となる。したがって光電子数の標準偏差は $\sqrt{0.8X}(=\sigma)$ であり、半値幅は 2.35σ と書けるので、統計揺らぎの分解能への寄与は

$$[\text{FWHM への寄与}] = \frac{2.35\sigma}{0.8X} \times 100 = \frac{235}{\sqrt{0.8X}} [\%] \quad (5.3)$$

で表される。統計的な広がり (スペクトルの広がり) は APD の受光面にシンチレーション光子がどれだけ到達できるかに依る。そして式からも明らかであるが、1 事象で到達する光子数が多いほど統計揺らぎによる分解能の低下は防げる。大型 BGO の場合は特に統計揺らぎを気にしなければならない。この統計揺らぎの効果を最小限に抑え光電子数を最大にするために反射材として ESR とゴアデックスを APD 接着部分以外に巻き付け集光する。

5.3.2 スペクトル測定

温度をモニタリングしたときと同様の cycle で、 -10°C スタート、 -30°C スタートそれぞれの場合でスペクトルを取った。スタート温度が違うそれぞれの場合で基準となるス

ペクトル (-10°C または -30°C で固定した場合のスペクトル) に対して、温度を振ったときのスペクトル変化の様子をようすを確認する。 -10°C 、 -30°C で温度固定の場合のスペクトルは図 5.8 に、そのときの分解能とピーク ch は表 5.2 に示す。光電ピークの差は 2.83% であり、小型 BGO を用いて HV board のパラメータを調整したときの差がそのまま現れている。小型 BGO に比べ分解能が悪くなっているのは、第 5.3.1 項で述べたように、1 事象当たりで APD 受光面に到達するシンチレーション光子数が少なくなっているためである。セットアップは BGO の大きさ以外同じなので、統計揺らぎのみが分解能に効いていると考えられる。その際の、APD+小型 BGO で統計揺らぎが分解能に占める割合と、APD 受光面に到達するシンチレーション光子数との関係は表 5.3 に示す。小型 BGO に比べ大型 BGO は APD 受光面に到達するシンチレーション光子数が $1/2 \sim 1/3$ 程度になっていることが分かり、分解能向上のための集光の重要さが伺える。

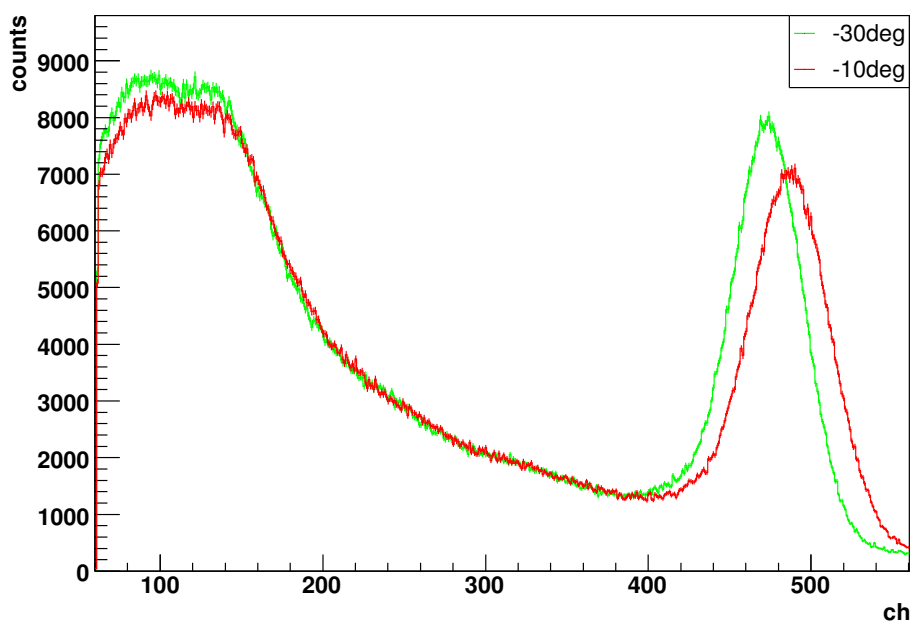


図 5.8: APD+大型 BGO での -10°C 、 -30°C 温度固定の場合のスペクトル

	FWHM [%]	ピーク [ch]
-10°C	12.3 ± 0.1	486.7 ± 0.1
-30°C	11.4 ± 0.1	473.1 ± 0.1

表 5.2: APD+大型 BGO での -10°C 、 -30°C 温度固定の場合の分解能とピーク ch

統計揺らぎの比率 [%]	光電子数 (小型 BGO)[個]	光電子数 (大型 BGO)[個]
45	4385	1609
55	2933	1250
65	2100	999
75	1557	816
85	1228	679

表 5.3: -30°C において APD+小型 BGO の統計揺らぎが分解能に占める比率と、APD+小型 BGO、APD+大型 BGO それぞれの場合で APD 受光面に到達するシンチレーション光子数との関係。大型 BGO を用いたときの分解能の低下が統計揺らぎによるものと仮定した場合。

- 10°C スタートの場合

1cycle 目、2cycle 目、 -10°C 固定を比較した場合のスペクトルは図 5.9 に、各 cycle での分解能とピーク ch、固定温度との増幅率の差は表 5.4 に示す。

-10°C から温度を cycle させると、光電ピークは温度を -10°C 固定で測定した場合より ch が小さい方 (増幅率が低い方) にずれる (図 5.9)。表 5.4 から 1cycle 目の方がずれは顕著である。これは BGO 内部の温度変化が BGO 表面の温度変化に追いついていないためと考えられる。温度センサーは BGO の表面に接触しているため、印加電圧値は表層温度で決定されており、そこと内部とで温度に差があると制御のようすも変わってくる。BGO の発光量は低温であるほど増すため、 -10°C から温度を振る場合、BGO 内部からの発光量は相対的に少なくなっていると考えられる。そのためスペクトルが増幅率の低い方へとずれてしまっている。

- 30°C スタートの場合

1cycle 目、2cycle 目、 -30°C 固定で比較した場合のスペクトルは図 5.10 に、各 cycle での分解能とピーク ch、固定温度との増幅率の差は表 5.5 のようになる。 -30°C スタートでは温度変化が -10°C スタートの場合より激しいため、分解能は -10°C スタートの場合より悪くなることが考えられる。しかし測定結果をみると、分解能が少し良くなっていることが分かる。 -10°C スタートの場合と同様に考えると、相対的な内部温度は低くなって

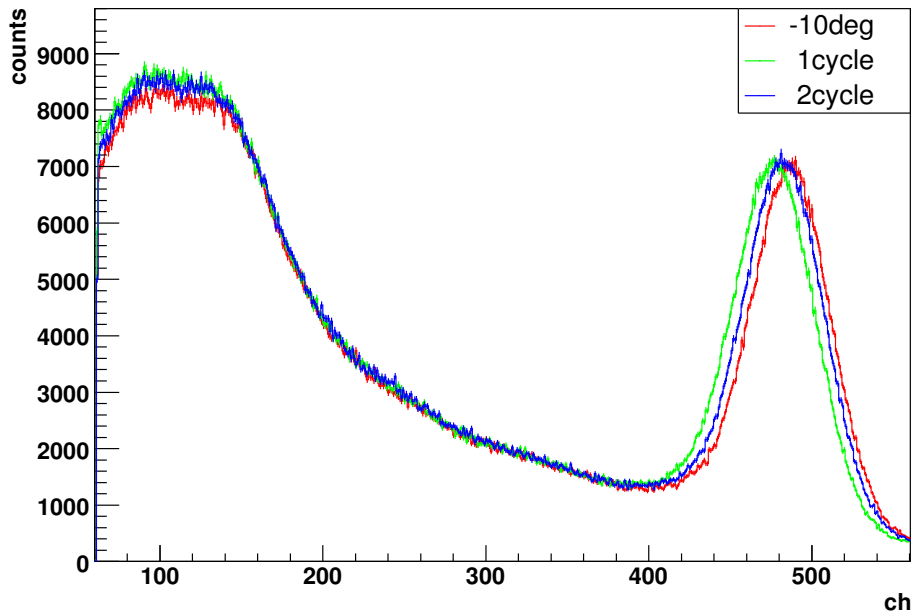


図 5.9: -10°C から振った場合と、 -10°C で温度固定の場合のスペクトルを比較したもの。

	FWHM [%]	ピーク [ch]
1cycle	13.1 ± 0.1	476.3 ± 0.1
2cycle	13.0 ± 0.1	482.1 ± 0.1
増幅率の差 [%]		
1cycle	2.2	
2cycle	0.95	

表 5.4: 上： -10°C から温度を振った時のスペクトル分解能とピーク ch。下： -10°C で温度固定した場合との増幅率の差

いるはずなので、固定温度の場合より増幅率の大きい方に光電ピークが出るはずである。また、APD+小型 BGO の場合 (図 4.6) を見ると、温度を振って制御した場合のスペクトルは -10°C 固定の方に近づく。これらの要因により、 -30°C スタートの方が変化が激しいにも関わらず、より制御が出来ていると考えられる。

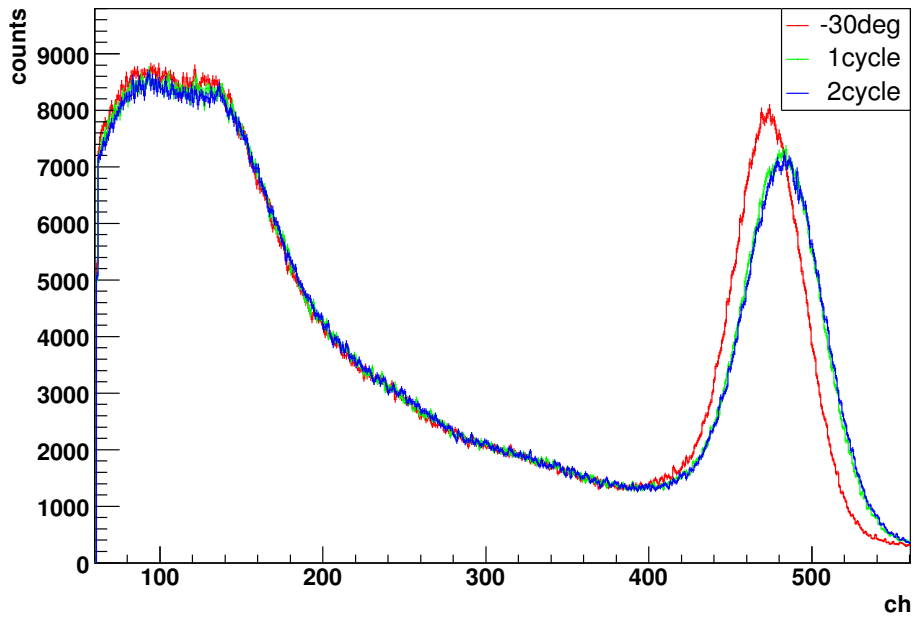


図 5.10: -30°C から振った場合と、 -30°C で温度固定の場合のスペクトルを比較したもの。

	FWHM [%]	ピーク [ch]
1cycle	12.5 ± 0.1	481.5 ± 0.1
2cycle	12.7 ± 0.1	482.6 ± 0.1
増幅率の差 [%]		
1cycle	1.8	
2cycle	1.9	

表 5.5: 上： -30°C から温度を振った時の分解能とピーク ch。下： -30°C で温度固定した場合との増幅率の差。

5.3.3 大型 BGO での測定のまとめ

-10°C 、 -30°C から温度を振り始めたいずれの場合でも、基準となる温度固定のスペクトルと温度を振った場合に得られたスペクトルの差が目標であった増幅率3%以内に収まった。このことから大型 BGO を用いた実験も誤差 3%以内での温度制御に成功したと言える。特に -30°C から振った場合の 1cycle 目は、衛星軌道上で予想される $-20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ の温度変化の 2 倍程度の温度変化をする。このような環境下でも制御に成功したことは収穫であった。

第6章 まとめ

APD+BGO 検出器の温度依存性の相殺

APD と BGO を組み合わせた検出器の増幅率を一定に保つための、印加電圧に対する温度依存度は線形でモデル化出来ることが分かった。得られたデータを元に、温度センサーで温度に応じた印加電圧を加え自動制御する実験を行ってきた。

1cm 角の小型 BGO で行った場合に $-10^{\circ}\text{C} \rightarrow -30^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C}$ を 1cycle とし 2cycle 測定を行った。その際に得られたスペクトルのピーク ch と -10°C で固定して得られたスペクトルのピーク ch を比べると、目標である増幅率の差 3%以内より大分精度精度良く制御でき、増幅率が 0.5%以内の差に収まった (表 4.3)。

大型 BGO でも小型 BGO と同様の実験を行ったのだが、大型 BGO は小型 BGO とは違い BGO 内部の冷え方に時間差が生じてしまっている。APD や温度センサーと接触している外部は温度センサーと同様の温度変化を示して行くと考えられるが、BGO 内部の冷え方にはタイムラグがあり、温度を下降させていっている状態であれば、BGO 内部では BGO 外部より温度が高くなると推測される。温度が上昇していった場合であれば逆に BGO の内部は BGO の外部より温度が低くなってしまっていると考えられる。BGO の冷え方に差が生じてしまっているため、温度を振る際には -10°C からと -30°C からの 2 パターンで行った。すると、図 5.9、図 5.10 と表 5.4、表 5.5 のような結果が得られ、温度を急激に上げた場合には増幅率が大きい方へ、温度を急激に下げた場合には増幅率が小さい方へとずれる。このことから BGO の内部温度の変化率は外部に比べ遅いということが分かる。しかし、 -10°C から温度を振った場合、 -30°C から温度を振った場合のどちらとも目標であった基準温度との増幅率の差 3%以内を達成することが出来た。

本論文の実験で単調に温度を振った場合では、温度変化が急激であっても十分対応できることが分かった。一方で、温度変化のさせ方は上げ下げの単調なものしか行っていないため、さらに多様な温度変化をさせて制御できるかの確認を行なうことが望ましいと考えられる。

関連図書

- [1] 五十川知子 修士論文 「宇宙利用に向けた X 線・ γ 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] 和田健介 卒業論文 「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」 東京工業大学 (2008)
- [3] 斎藤孝男 修士論文 「2次元 APD array と VLSI を用いた X 線・ γ 線用撮像検出器の開発」 東京工業大学 (2006)
- [4] 浜松ホトニクス株式会社ホームページ 「Si APD S8664 シリーズ」
(http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/pdf/s8664_series_kapd1012j03.pdf)
- [5] 三枝健二 「放射線基礎計測学」 医療科学社 2001
- [6] ANALOG DEVICE 社ホームページ 「AD590S」
(<http://www.analog.com/jp/other/militaryaerospace/ad590s/products/product.html#resources>)
- [7] クリアパルス社ホームページ 「581K 型 低雑音電荷有感型前置増幅器」
(http://www.clearpulse.co.jp/jpn/product/plist_B/plistB1.html)
- [8] グレン・F・ルノ著 木村逸朗、阪井英次訳 「放射線計測ハンドブック」 日本鉱業新聞社 2001
- [9] セイコー・インスツルメンツ株式会社ホームページ 「ORTEC 放射線測定モジュール 570 [アンプ]」
(http://speed.sii.co.jp/pub/segg/hp/prod_detail.jsp?mcatID=329&sbIcatID=432&prodID=1336#Pr)
- [10] REPIC 林栄精器株式会社ホームページ 「モジュール・電源」
(http://www.repic.co.jp/contents/products/pro_1.html)
- [11] 株式会社 FLUKE ホームページ 「80 シリーズ V デジタル・マルチメーター」
(<http://www.fluke.com/jp/IG/dmm5.html>)

- [12] 「National Semiconductor LM6261/LM6361 高速オペアンプ VIP」
(<http://www.national.com/JPN/ds/LM/LM6261.pdf>)
- [13] エスペック株式会社ホームページ 「小型環境試験器」
(<http://www.espec.co.jp/inquiry/pdf/shsu.pdf>)
- [14] 第26号科学衛星 (ASTRO-H) プロジェクトについて (2008年7月25日) 高橋忠幸
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
(http://astroh.isas.jaxa.jp/doc/080901_NeXT_SAC1.pdf)
- [15] <http://akita-nct.jp/tanaka/kougi/2008nen/4e/511junction.pdf>
- [16] クリアパルス社ホームページ 「波形整形増幅器」
(<http://www.clearpulse.co.jp/document/jpn/plistC.pdf>)
- [17] 河合研究室ホームページ APD 最新の成果より
(<http://www.hp.phys.titech.ac.jp/next/detector.html>)

謝辞

本論文が一応の完成を見るに当たって非常に多くの方々に支えられここに辿り着け感謝の気持ちでいっぱいです。河合先生には指導教官として、ゼミでご教授頂き英語の難しさ天文学の深さ面白さを教えて頂きました。また天文学のみならず日本語の難しさ表現の大切さも教えて頂きました。助教の片岡さんにはの ASTRO-H という大きなプロジェクトの一環に関われる課題を与えて頂き、実験の面白さを今更ながらに初めて実感させて頂きました。また同時に大変さ厳しさも教えて頂きました。要領と飲み込みの悪い私に対しても最後までご教授頂いたことは本当に感謝しています。

研究室の諸先輩方にも非常にお世話になりました。戸泉さんは知識のまったくなかった私に分かりやすく根気強く教えて下さいました。中森さんには物理はさることながら、いかに相手に分かりやすく伝えられるかというコミュニケーションの大切さを教わりました。小泉さんは自分がやってらっしゃることが忙しいときでも、質問するといつも優しく詳しく分かりやすく説明して下さいました。ずっとそんな小泉さんでいてほしいと密かに思っています。また、下川辺さん有元さんはDとは思えない明るさで盛り上げて下さり、また気にもかけて下さり本当に感謝しています。下川辺さんには人生を、有元さんにはお笑いを教えて頂いた気がします。金井さんには卒論でテンパっていたとき何度も助けて頂きました。唐突な質問を投げかけても、いつも詳しく教えて頂き心の寄どころでもありました。笑い声が素敵な工藤さんには gnuplot の使い方で戸惑ったとき何度も助けて頂きました。黙々と作業をこなしてらっしゃった美人の森さんにはプロフェッショナル精神を感じ尊敬の念を抱いていました。栗田さんには、卒論でセットアップをいかに書こうかで戸惑っていたとき、dia なる存在を教えて頂き大変助かりました。その後、dia は大活躍です。また同期の石橋くん、中嶋くんには大変なときなど愚痴を聞いてもらうこともあり精神面で何度も助けてもらいました。秘書の小永井さんにはその優しい笑顔で何度も癒されました。研究室のみなさん、本当にありがとうございました。

この場をお借りしまして、卒論で苦しいときなど精神的に何度も助けて下さった学外学内の友人のみなさんには本当に感謝しています。そして、この論文を書ける状況に私を導いて下さった両親には感謝の述べようもありません。私のことで途方に暮れたことも多々

あったかと思えます。それでも私をずっと信じて下さったおかげで、今ここでこうして論文を書くに至ることが出来ました。本当に本当にありがとうございます。