

APD + BGO プレートを用いた Anti 検出器の検証

松浦大介

広島大学 理学部 物理科学科

u1279059

高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

2004年 2月 10日

概要

ガンマ線観測ミッション NeXT 衛星は 2010 年に打ち上げが予定されており、搭載予定の軟ガンマ線検出器 (SGD) は多重半導体コンプトンカメラを BGO のコリメート・アクティブシールドで覆うことで、低バックグラウンドを実現している。この Anti 検出器の BGO 壁の光検出としてアバランシェフォトダイオード (APD) が用いられる。APD は量子効率が高いうえ、内部増幅機能によって threshold やエネルギー分解能の向上が期待されている。

本研究では以前問題の一つであった APD の受光面における増幅率の揺らぎを調べ、分解能への寄与は小さいものであることを確認した。また、SGD のシールド素材を想定した BGO プレート (10cm×4cm×3mm) によるシンチレーション光の APD を用いた読みだしを試み、マイナス 32 度に冷却して ^{137}Cs の 662keV に対してエネルギー分解能 10.86%、低エネルギー側では ^{241}Am の 59.5keV のピークがはっきりと測定され十分に使用可能であることを確認した。さらに BGO プレートの両側に APD をつけて光を読みガンマ線の入射位置の検出を試みたが、本実験のセットアップでの検出は難しそうであることがわかった。

目次

第1章	序論	5
第2章	結晶シンチレーターを用いた 線検出器	6
2.1	結晶シンチレータ	6
2.2	アバランシェフォトダイオード (APD)	7
2.3	NeXT 衛星とコンプトンカメラ	9
2.4	研究目的	10
第3章	LED を用いた APD の一様性の検証	11
3.1	実験目的	11
3.2	実験セットアップ	12
3.3	LED の照射方法	13
3.4	測定結果	14
第4章	APD + BGO プレートのガンマ線入射位置の検出	16
4.1	実験目的	16
4.2	実験セットアップ	17
4.3	データ処理回路	18
4.4	VME 測定回路の検証	21
4.5	ガンマ線の入射位置による違い	23
第5章	APD + BGO プレートの低エネルギー検出の限界の測定	30
5.1	実験目的	30
5.2	ライトガイドの集光性	31
5.3	実験セットアップ	32
5.4	測定結果	32
5.4.1	BGO プレートを2枚にした場合の測定	36
第6章	まとめとこれからの課題	40

4.17	上側から spot1,spot3,spot5 にガンマ線が入射した場合に得られた上側の 1ch、下側が 2ch のスペクトル	26
4.18	上 2 段の左側から順に spot0,spot1,spot5 にガンマ線が入射した場合に得られた上側が 1ch、下側が 2ch のスペクトルで、下 2 段が spot9 と spot10 の同様のスペクトル	27
4.19	得られたデータから 1ch のパルス高さを横軸に、2ch を縦軸とした場合の相関の 2 次元プロット：右下の図がガンマ線の入射位置と名称の関係	28
5.1	PMT によるライトガイドの集光性の検証実験セットアップの模式図：左側がライトガイドを装着した場合、右側が装着しない場合	31
5.2	ライトガイドを装着しない場合の片側読み出しのセットアップ	32
5.3	ライトガイドを装着しないでの測定結果：左側がリニアリティー、右側がエネルギー分解能	33
5.4	ライトガイドを装着せず測定し得られたスペクトル：Na,Cs と Co,Cd,Am の横軸スケールは異なる	33
5.5	上側が ch1 側、下側が ch2 側の測定結果：左側はリニアリティー、右側はエネルギー分解能	34
5.6	両側に APD を装着した測定で得られたスペクトル（上側の 4 つが ch1 側）：Na,Cs と Co,Cd の横軸スケールは異なる	35
5.7	両側に APD を装着した測定で得られたスペクトル（下側の 3 つが ch2 側）：Na と Co,Cd の横軸スケールは異なる	35
5.8	BGO2 枚組み合わせたのセットアップと入射位置と名称	36
5.9	BGO1 に APD を装着しての測定で得られたスペクトル	38
5.10	BGO2 に APD を装着しての測定で得られたスペクトル	38

表 目 次

2.1	シンチレータの特性比較	7
3.1	LED 発光回路で用いたモジュールの詳細	12
3.2	データ処理回路で用いたモジュールの詳細	13
4.1	VME によるデータ処理回路で用いたモジュール詳細	19
4.2	VME による測定結果	21
4.3	測定結果 : 入射位置と 511keV のパルスハイト、エネルギー分解能	23
5.1	PMT による常温 (20 度) での測定結果 : 相対比は No_guide/Lightguide	31
5.2	測定結果 : 下側はガイドを装着した場合	33
5.3	BGO プレートの両側に APD を装着した場合の測定結果	34
5.4	BGO プレートを 2 枚繋ぎ合わせての測定値 (線源 ^{137}Cs : 662keV)	37

第1章 序論

X線、ガンマ線は地上においては大気の影響によって直接観測することが難しいために人工衛星により観測される。搭載される検出器は小型化、低重量、耐久性など地上での検出器と比べ求められるものは多く、その上で優れた感度を持ち合わせていなくてはならないという厳しい規格をクリアーしなくてはならない。近年、半導体や回路技術などの進歩や新しいアイデアによって従来にない優れた検出器が開発されガンマ線天文学は急速に発展しつつある。

ガンマ線での観測はX線よりも高エネルギー現象を観測対象とでき、透過率が強いために今までX線では隠れていて観測不可能であったターゲットからの放射を観測することが可能になるため新たな発見が期待される。それに加え、超新星爆発、銀河団それにブラックホールからのジェットなどさまざま環境下で加速される高エネルギー粒子の引き起こすシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱などの非熱的放射を観測することは高エネルギー現象をきちんと説明するには不可欠なものであり、新たな宇宙像を描き出してくれるであろう。

第2章 結晶シンチレーターを用いた 線 検出器

2.1 結晶シンチレータ

シンチレーション検出器はガンマ線と相互作用を担うシンチレータと、シンチレーション光を検出する光検出部に分けられる。シンチレータは入射したガンマ線と相互作用し、落したエネルギーに比例した数の光子を放出する。これをシンチレーション光と呼び、光検出部に検出され電気信号となる。シンチレーション光はシンチレータに入射したガンマ線の起こす相互作用によって生じた高速電子がシンチレータ内のその他の軌道電子を励起し、その電子が基底状態へ戻る時に一定波長の光子をだすものである。

ガンマ線計測に用いられるシンチレータにはガンマ線に対して阻止能が大きいこと、光量が大きいこと、シンチレーション光に対して透明度が高いことなどが求められる。さらに衛星搭載の検出器にはコンパクト性も要求され無機シンチレータが広く使われている。

無気物質中のシンチレーション機構は材料の結晶格子でできるエネルギー状態に依存する。結晶中の電子は離散的なエネルギー帯しか持ちえない。格子上に位置束縛された電子は下方のエネルギー帯である価電子帯に、結晶内を自由に移動できるエネルギーを持った電子は伝導帯に位置する。このエネルギー帯の間には純粋な結晶では電子は存在しえない禁止帯というエネルギーギャップがある。エネルギーを吸収すると価電子帯中の定常位置から電子はギャップを越えて伝導帯へと励起する。そして、電子が価電子帯に戻る時にギャップに応じたエネルギーの光子を放出するのだが、純結晶ではギャップの幅が大き過ぎて可視光にならない。そこでこのような遷移過程を介した可視光の放出率を高めるために、活性化物質と呼ばれる少量の不純物を添加する。これらは純結晶格子中のエネルギー帯を変形させ、禁止ギャップ内に中間準位を作り電子励起を容易にし可視光の発生を高める。

今回の実験で主に使用したのは無機シンチレータの $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) である。BGO の主な特徴はビスマスの大きな原子番号 (83) と大きな比重 ($7.3\text{g}/\text{cm}^3$) である。これによって市販されているシンチレータの中では単位体積当たりのガンマ線の光電吸収率は最も大きくなっている。また、機械的、化学的性質により取扱いは容易であり検出器は頑丈に作ることができる。このことは衛星搭載の検出器として優位である。

BGO はシンチレーション過程を促進するための活性化物質を添加する必要のない純粋な無機シンチレーターである。蛍光は結晶の主成分である Bi^{+3} イオンの光学的遷移を伴っていて、 Bi^{+3} の光吸収スペクトルと放出スペクトルの間にストークスシフトと呼ばれる相当大きなシフトがあ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ずに大きな結晶でも透明度を保つことができる。光量はヨウ化ナトリウム (NaI) と比べて 10 ~ 20 % と比較的低い、温度を下げることで幾らかの向上は期待できる。主なシンチレータの特性を表 2.1 にまとめた。

表 2.1: シンチレータの特性比較

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
エネルギー分解能 (¹³⁷ Cs662keV : %)	9	7.5	11	10
蛍光減衰時間 (ns)	230	1000	300	60
吸収係数 (511keV : cm ⁻¹)	0.34	0.41	0.955	0.674

2.2 アバランシェフォトダイオード (APD)

今までの数 100keV ~ 数 MeV のエネルギー領域における一般的な検出器は結晶シンチレータと光電子増倍管 (PMT) を組み合わせたものであった。一般的に光電子増倍管 (PMT) は入射した光子を電子に変換し、増倍部分によって大幅に増幅して検出するのに十分な信号にする。量子効率¹は 20 ~ 30 % と低いが増幅率が大きいためにエネルギー分解能への寄与はシンチレーション光のポアソン揺らぎの成分になる。

一方、GeV 領域の高エネルギーガンマ線のエネルギー測定には CsI とフォトダイオード (PD) を組み合わせた検出器が用いられてきた。PD は p 型と n 型半導体を接合させて、p 型に負、n 型に正の逆電圧をかけることで接合面にはキャリアの存在しない空乏層と呼ばれる領域が広がる。この空乏層に可視光が入射すると相互作用により電子正孔対が発生し、それらが電極に集められて信号となる。内部増幅がないので信号が小さいままであるが量子効率はおよそ 80 % であるためにエネルギー分解能への寄与は電気回路系ノイズの成分となる。また、PD は PMT と比べて消費電力が少なく、サイズが小さい上に磁場の影響を受けにくいといった衛星搭載の検出器としての長所を持つ。しかし、GeV 領域のガンマ線の場合はシンチレーション光が多くノイズは気にならないが、数 MeV 以下ではエネルギー分解能を PMT より悪くしてしまう。

アバランシェフォトダイオード (APD) は PD の長所を持ち、さらに検出器内で生成される少量の電荷を半導体に高い電圧を印加することで、衝突と衝突の間で電荷キャリアを十分に加速して電荷収集方向に沿って新たな電子正孔を作り出す。このなだれ現象 (avalanche process) によって内部増幅を可能にするため、信号を雑音レベルから引き上げ、読みだし回路系ノイズの寄与を増幅率分の 1 にでき、原理的には PMT や PD よりも threshold とエネルギー分解能の向上が考えられる。また、これまでは面積を大きくするとノイズや安定性が悪くなるために、なかなかシンチレーション光の読みだし部分として使われてこなかったが、新たな技術によって改善されたため、最近になってシンチレータとの組み合わせで優れたスペクトル測定が可能になってきた。

今回の測定では浜松ホトニクス株式会社製の SiAPD.Type-No.S8664-55 の Serial-No.140 と 141 を使用した。この APD の図面を図 2.1、波長による分光感度特性を図 4.1 に、波長による量子効率を図 2.3 に、逆電圧による暗電流を図 2.4 に、逆電圧による増幅率を図 2.5 に、逆電圧による端子間容量を図 2.6 に示す。

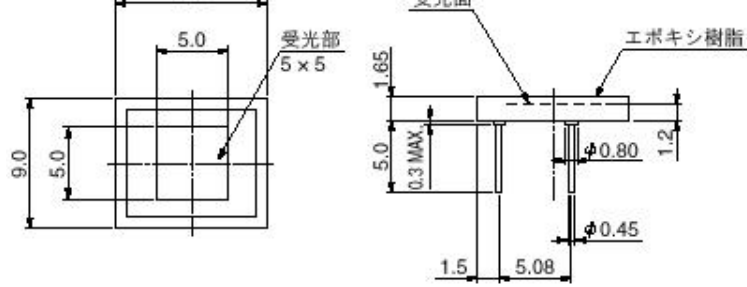


図 2.1: SiAPD S8664-55 の図面

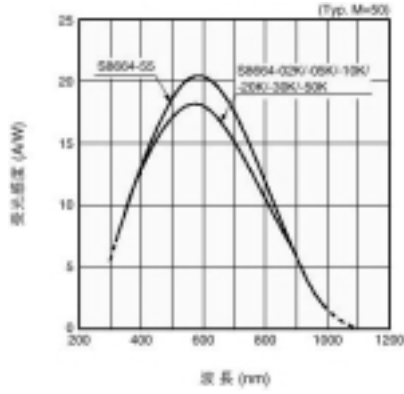


図 2.2: SiAPD S8664-55 の波長による分光感度特性

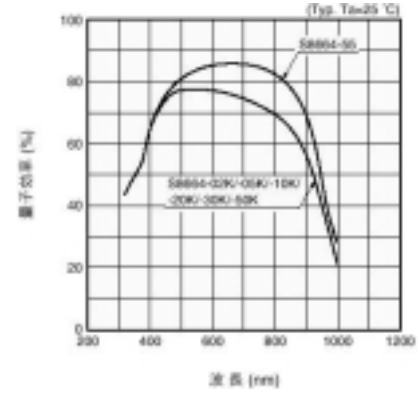


図 2.3: SiAPD S8664-55 の量子効率の波長依存性

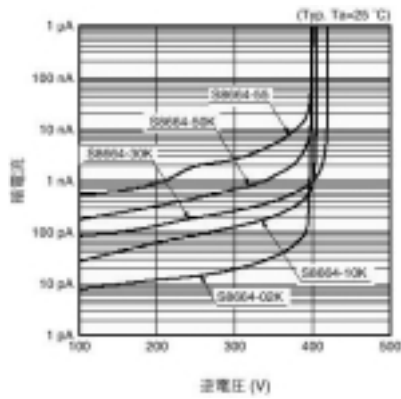


図 2.4: SiAPD S8664-55 の逆電圧による暗電流

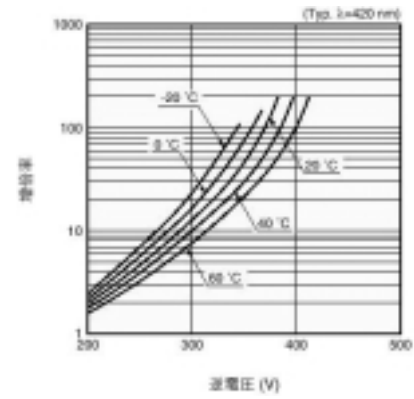


図 2.5: SiAPD S8664-55 の逆電圧による増幅率

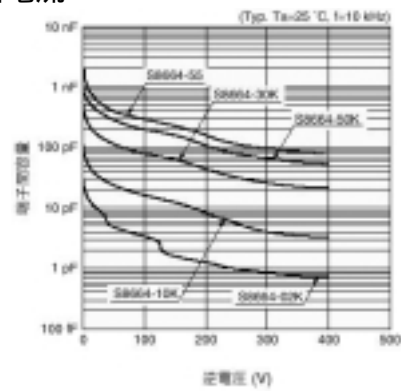


図 2.6: SiAPD S8664-55 の逆電圧による端子管容量

今日までに様々な国により X 線観測衛星が打ち上げられ X 線天文学の発展に多大な貢献をしてきた。日本においても目覚ましい技術の発達により、従来にない優れた性能をもった検出器を搭載した衛星を打ち上げる計画が提案され、2005 年に打ち上げ予定の Astro-E2 の後継機として検討されているのが NeXT 衛星である。この衛星はエネルギー範囲、有効面積、エネルギー分解能においてこれまでにない性能を目指している。宇宙のいたるところに存在するほぼ光の速さまで加速された荷電粒子による、非熱的宇宙の観測を可能にするミッションとして期待されている。

100keV ~ 数 MeV のガンマ線の到来方向を知るためによく用いられるのがガンマ線である。CGRO(Compton Gamma-Ray Observatory) に搭載された COMPTEL 衛星 (1991 年、米国) がコンプトン散乱の運動学を利用した最初の検出器である。これによってさまざまな高エネルギー現象を観測されたが、散乱した光子を吸収するための立体角が小さいために検出効率が低く、エネルギー、位置決定精度が低かったため角度分解能も不十分で、感度も低かった。さらなる性能を持つ次世代検出器の開発が求められ、その一つの候補としてあげられているのが多層半導体コンプトンガンマ線カメラである。これは 1987 年釜江 (T.Kamae et al,1987) らによって提案され、今日もなお様々な検出器構成が提案、試作されている。

NeXT 衛星搭載の軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector:SGD) がその一つであり、軟ガンマ線領域での高感度観測を行なう Astro-E2 の HXD の後継器である (図 2.7)。SGD は半導体多層コンプトンカメラとアクティブのコリメータ・シールドである BGO シンチレータを組み合わせた検出器であり、80KeV 以上のエネルギー領域で主な反応となるコンプトン散乱を積極的に利用して低バックグラウンドを実現させようとするものである。

SGD 検出部の基本となる半導体多層コンプトンカメラは高いエネルギー分解能を持つシリコンストリップ検出器とテルル化カドミウム (CdTe) ピクセル検出器から構成される。散乱体にシリコンストリップを使用する利点はシンチレータと比べて位置決定精度が高く、エネルギー分解能がよく、また、低エネルギー側でのコンプトン散乱の頻度が大きいためである。コンプトンカメラを用いることで従来の検出器よりも性能が向上するが、SGD の場合は BGO のアクティブシンチレータ・シールドの中にカメラを入れることでさらに感度を高めている。SGD の場合は BGO のアクティブシンチレータ・シールドの中にカメラを入れることでさらに感度を高めている。

アクティブシールドに用いられる BGO は単位体積当たりのガンマ線の阻止能が非常に高い。それに付け加えて、その信号を読み出すのには従来用いられてきた光電子増倍管 (PMT) に変わり、アバランシェフォトダイオード (APD) を用いることで検出器のサイズのコンパクト化がはかれ、しかも量子効率上がるために、threshold を下げることができアクティブシールドとしての性能の向上も期待できる。

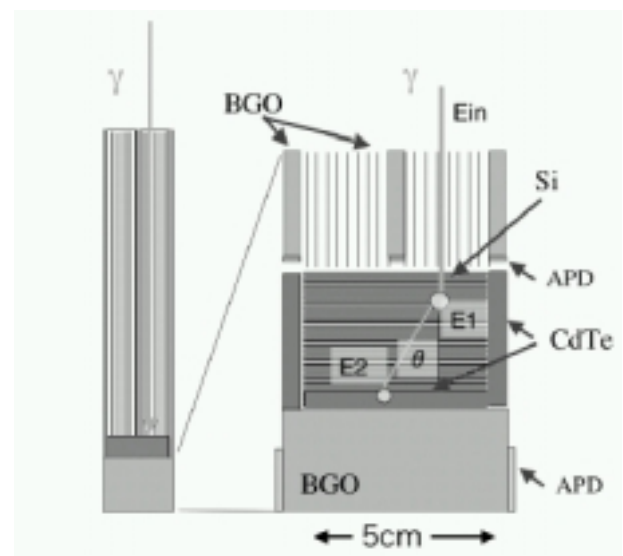


図 2.7: SGD の 1 ユニットの概念図

以前は受光面の位置による増幅率の揺らぎなども問題とされていた APD だが、その問題は改善され、近年ガンマ線検出において従来のフォトダイオード (FD) や光電子増倍管 (PMT) と比べて優れた成果をあげ、実用化に向けて盛んに研究されている。NeXT ではコンプトンカメラなどの検出器を取り囲むアクティブシールドの検出部分として使用が検討されている。本研究の目的はシールド素材として用いられる BGO プレートによるシンチレーション光の APD での読みだし実験を行ない実用性を検討するものである。BGO プレート (10cm×4cm×3mm) をシールドと想定して温度を下げて低エネルギー検出の限界を測定した。また、BGO プレートの両側に APD をつけ、ガンマ線の入射位置を変化させた時の光量の分配値から位置検出が可能であるかを試み、さらなる応用の拡大を目指した。

第3章 LEDを用いたAPDの一様性の 検証

3.1 実験目的

半導体検出器での X 線対応には入射場所によりサブピーク成分や空乏層の厚さ、増幅率の非均一性などによりパルスハイトが異なるなどの位置依存性が生じる。

サブピーク成分は APD の受光面を囲むガードリング付近に X 線が入射すると反応により生じた電荷の一部がガードリング電極に吸収されることによりメインピークのおよそ $2/3$ の値として現れる。半導体検出器は p、n 型半導体を接合して作られている。接合面ではそれぞれのキャリアが移動し、それらが互いに再結合し残されたアクセプターイオンとドナーイオンが作り出す電場によって接合面近傍はキャリアの存在しない空乏層と呼ばれる有感領域となる。これに逆バイアスをつけることでキャリアは接合面のポテンシャルを越えて再結合する。これによって n,p 型半導体は帯電し、逆バイアスと釣り合うまでキャリアの再結合は続き空乏層が広げられる。そのために空乏層の厚さは逆バイアスや半導体の不純物濃度に依存することとなり非一様性を持つことになる。空乏層の厚さが変化すると検出効率が変化して信号の大きさに影響を及ぼす。また、内部増幅は高い電場による雪崩現象によるものなので増幅率は入射位置での電場の大きさに依存してくる。

先述したように以前までの APD には受光面の位置による増幅率の非均一性という問題点があり、APD 全面に光が照射された場合、エネルギー分解能の低下の原因の一つとなっていた。

近年中性子核転換注入 (neutron transmutation doping NTD) を施すことによって非常に均一性のよいドーピングしたシリコンを用いることで問題点は改善されてきている。本実験の目的は実際に測定してそれらを確認するものである。

測定では、絞った青色 LED を APD の受光面 25 箇所照射した。LED は Si 表面で止まり表面付近の一様性を測定できる。一方、LED ではなく X 線を使用すれば奥行きの一様性を測定できる。青色 LED を用いるのは、本研究の扱うシンチレータの BGO は青色光を発光するため、青色 LED を用いた測定値が最も有効であると思われるためである。

LED 発光系

Clock Generator によりトリガーを発生させる。ここで LED の発光や光量を調節するため Gate Generator を用いてトリガー幅を調整し、Level Adapter によって NIM 信号から TTL 信号に変換して LED を発光させる。発行の回路ブロックを図 3.1 に示す。トリガー周期は 100Hz、幅は $20\mu\text{s}$ である。また、LED の強さは $50\text{k}\Omega$ の可変抵抗によって変化させることができる。使用したモジュールの詳細を表 3.1 に示す。

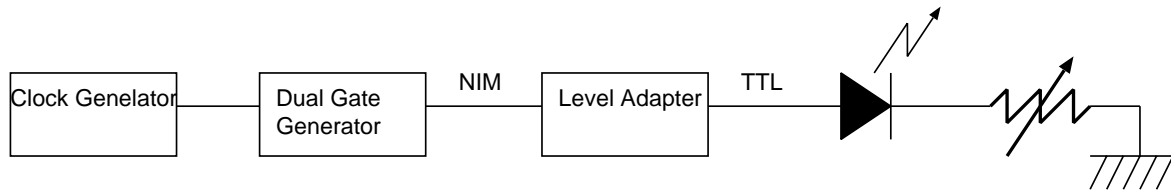


図 3.1: LED 発光のブロック図

表 3.1: LED 発光回路で用いたモジュールの詳細

モジュール	形式
100MHz Clock Generator	TECHNOLAND CORP. N-TM 203
Gate Generator	(株) 海津製作所 N0290-1127
Level Adapter	

LED 照射装置

この装置を用いる利点は照射する LED のビームのサイズを 2 次元の絞りによって自在にコリメートさせることができることである。特に小さい径が必要とされる場合は、光ファイバーやコリメーターを用いた場合より確実に小さく絞って受光面の目的の領域にピンポイントで照射可能ということである。しかし、照射位置の移動は手動でハンドルを回して移動させるものであるため位置再現性は十分ではない。APD は IC ソケットにセットし、電気的な遮蔽のために受光面以外はアルミボックスで覆い、動かないようしっかりと固定した。模式図を図 3.2 に示す。

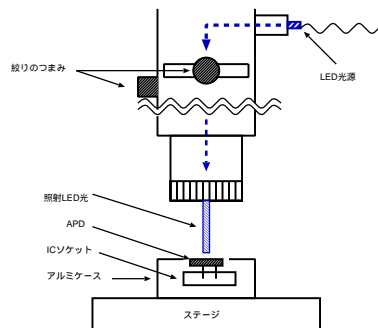


図 3.2: 照射装置の模式図

APD からの信号を電荷有感型前置増幅器 (Charge Sensitive Amnplifier:CSA) で受け、Shaping Amp(Shaping time: $2\mu\text{s}$ 設定) で整形増幅した入力パルスをアナログデジタル変換器 (Analogu Digital Convector:ADC) でデジタル信号に変換して MCA で値を取得する。測定に用いた回路系ブロックを図 4.9 に、モジュールの詳細を表 3.2 に示す。

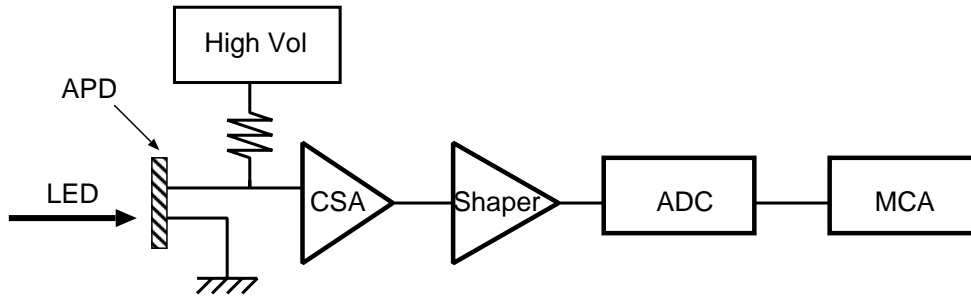


図 3.3: データ処理の回路系ブロック図

表 3.2: データ処理回路で用いたモジュールの詳細

	形式
High Vol	(株) サトウ電気 MODEL HV-02W
APD	浜松ホトニクス S8664-55
CSA	クリアパルス CP582K
Shaping Amp	ORTEC MODEL 571
ADC	Labo 2201A

3.3 LEDの照射方法

APDの受光面 ($5\text{mm}\times 5\text{mm}$) を 25 等分し (図 3.4), それぞれの領域の中心におよそ $0.1\text{mm}\times 0.1\text{mm}$ に絞った LED 光を入射する。測定方法はすべての位置での測定の前に毎回 No.1 の位置に戻して No.1 を測定し、その値をその位置での規格化の基準とした。測定した位置の順番は図 3.4 に示す。

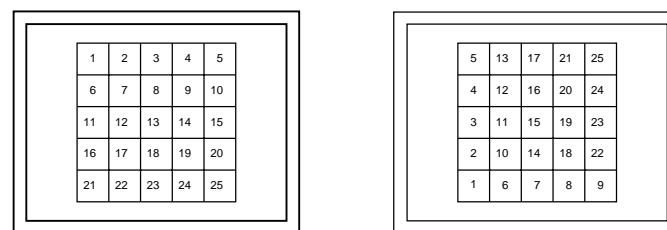


図 3.4: 位置と番号 (左) と測定した順番の対応 (右)

APD 受光面上の LED 照射位置とピーク値のスペクトルを図 3.5, 分布を図 3.6 に示す。図 3.7 は位置 No.1 を基準としてそれぞれのピーク値から No.1 のピーク値を引いたもので、図 3.8 はその値を 3 次元プロットしたものであり、値が小さいほどその位置の増幅率が小さいことを示している。結果から増幅率は端の方で大きく、中心部分、特に No.12,14 が最も小さくなるというものであった。ここでばらつき指数として以下の式を用いる。

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum(x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \times 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

n は測定位置の個数、 x_i はそれぞれの位置でのパルスハイト、 \bar{x} は平均パルスハイトを示していて、標準偏差を平均パルスハイトで割ったものである。その結果ばらつき指数は 3.09% であり、APD の入射場所での増幅率の揺らぎのみによる分解能への寄与はばらつき指数に 2.355 を掛けた約 7.3% となり、全面照射した場合のエネルギー分解能低下への寄与はこの実験からは考えていた値より大きいと思われる。しかし、シンチレータを用いた実験からは、これほどのエネルギー分解能の劣化は測定されていないために、これは過大評価である可能性は十分に大きい。

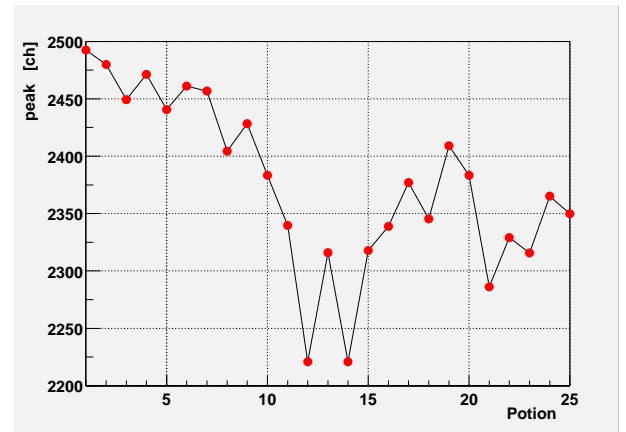
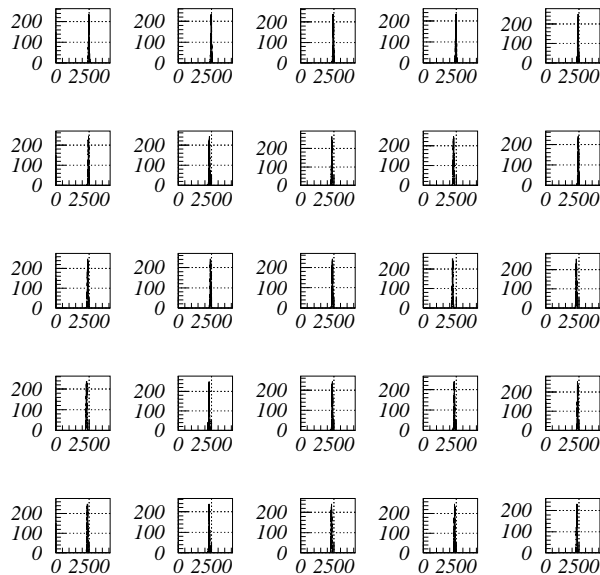


図 3.6: LED 照射位置とピーク値の分布

図 3.5: それぞれの位置に対するスペクトル (並び順は図 3.4 左) に対応

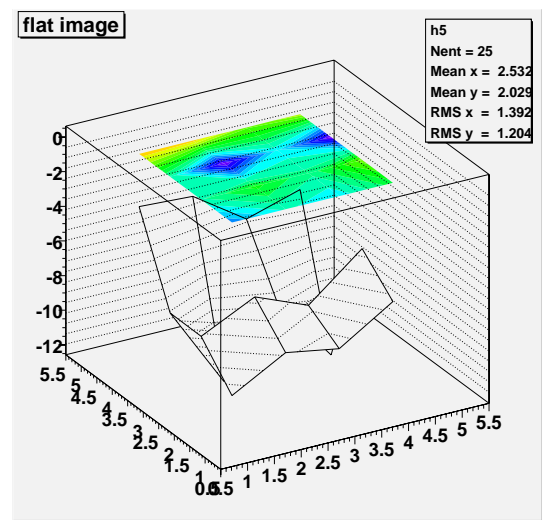
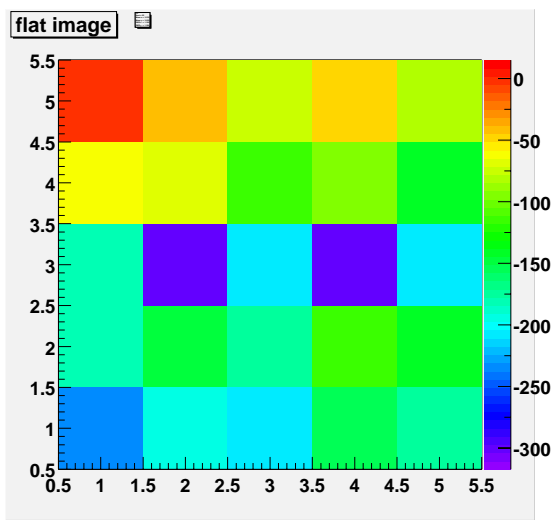


図 3.7: パルスハイトのばらつきの2次元プロット 図 3.8: パルスハイトのばらつきの3次元プロット

第4章 APD + BGO プレーートのガンマ線 入射位置の検出

4.1 実験目的

コンプトンカメラとはコンプトン散乱の運動学を利用して入射ガンマ線の到来方向を決定していくものである。その原理は、

$$\cos\theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right) \quad (4.1)$$

を基にしている。 E_1 はコンプトン散乱における反跳電子のエネルギーで、 E_2 は散乱されたガンマ線のエネルギーである。これより入射ガンマ線の反応位置とそこで落したエネルギーが得られれば、入射してきた1つの光子に対して到来方向を角度 θ のコーン上に制限できる。さらに散乱した電子の方向が検出可能であれば、ガンマ線の到来方向はコーン上で1点、または弧として求まる。これらの交点よりガンマ線源の位置が求められる。

角分解能は式(4.1)より検出器のエネルギー分解能で決まるために、コンプトンカメラには位置、エネルギー分解能に優れた検出器が求められる。SGDは主検出部の上層をシリコンストリップ(DSSD)、下層にテルル化カドミウムを用いることで構成されている。シリコンストリップ(DSSD)は元素番号($Z=14$)が小さいため低エネルギー側では検出、高エネルギー側では散乱体の役割を果たし、テルル化カドミウム(CdTe)は元素番号($Z=48,52$)が大きいために散乱光の検出を行なう。両検出器とも位置、エネルギー分解能に優れている。

広大においても1つのGSOシンチレータと多チャンネルPMTを用いた位置検出型検出器研究が行なわれ ^{137}Cs の662keVのガンマ線に対して約2mmの位置分解能を有することを確かめている。この種の検出器は非常に小型でシンプルであり、実用性も高い。これとは別に本実験ではBGOプレート(10cm×4cm×3mm)の両側からAPDを用いてシンチレーション光を読みだし、入射ガンマ線の1次元位置測定を試みる。

APDとBGOプレートのセットアップ

BGOプレートの両側にライトガイドを介してAPDを装着する(図4.2)。ライトガイドはシーアイ工業にシンチレーション光検出用として製作を依頼した(図4.1)。BGOのライトガイドの装着面以外は反射剤を巻き、ライトガイドはBGOとAPDの装着面以外は銀紙を巻き光の流出を防いだ。BGOとライトガイドはKE-108、ライトガイドとAPDは光学グリ-ス(応用光研工業株式会社 6262A)を用いて接着した。また、ライトガイドを使用せずBGOから直接APDで読み出す時は、APDの受光面は5mm×5mmであり、BGOプレートの読み出し面すべてを覆うことは無理であるので、中心部分にAPDをつけて受光面以外はシンチレーション光の洩れを防ぐ目的で反射剤としてバルガーテープで覆った。テープの覆い方を図4.3に示す。バルガーテープを1重で覆っている所はAPDの受光面以外の部分にあたる所で、テープを重ね過ぎるとAPDの受光面とBGOの間にすき間が合ってしまうため、光洩れをしないように、できるだけ薄く巻いた。

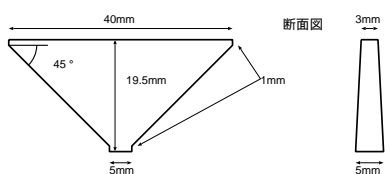


図 4.1: 使用したライトガイド

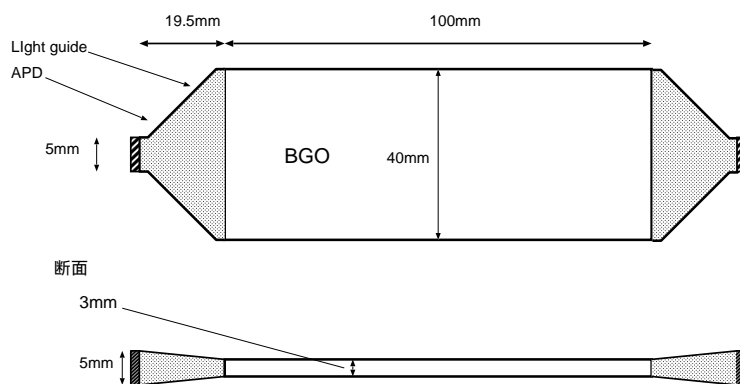


図 4.2: ライトガイドを使用したセットアップ

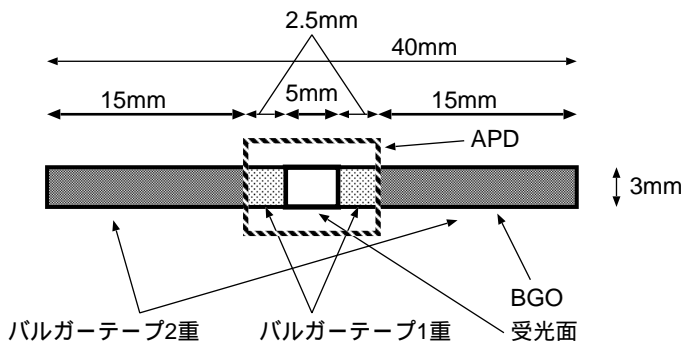


図 4.3: バルガーテープの巻方

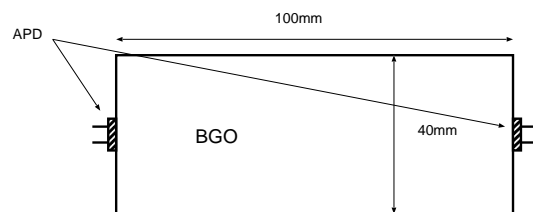


図 4.4: ライトガイドを使用しない セットアップ

コリメータとして 5cm 厚の鉛に $\phi 5\text{mm}$ の穴を開けて使用した。図 4.5 に 100keV ~ 2MeV のエネルギー領域における鉛の阻止率を示す。本実験で用いた線源 ^{22}Na は 511、1275keV のガンマ線を放出する。図 4.5 より 511keV に関しては十分にコリメート可能である。BGO と APD の入ったアルミボックスの上よりガンマ線を照射し、全体を鉛ブロックと遮光のために黒いビニールで覆い測定した (図 4.6)。ガンマ線の照射位置と名称の関係を図 4.7 に示す。

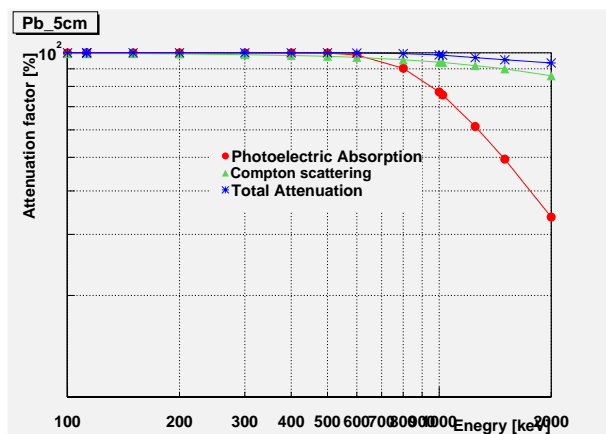


図 4.5: 5cm の鉛のガンマ線阻止率
横軸：エネルギー、縦軸：阻止率

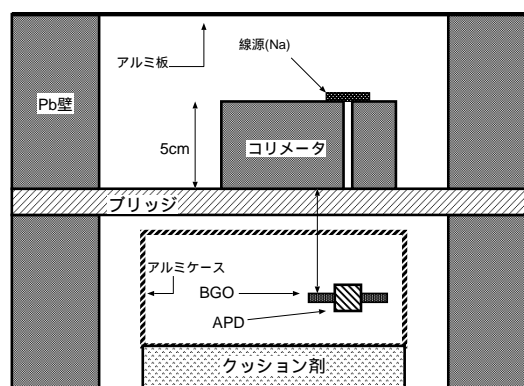


図 4.6: コリメートと照射方法の模式図

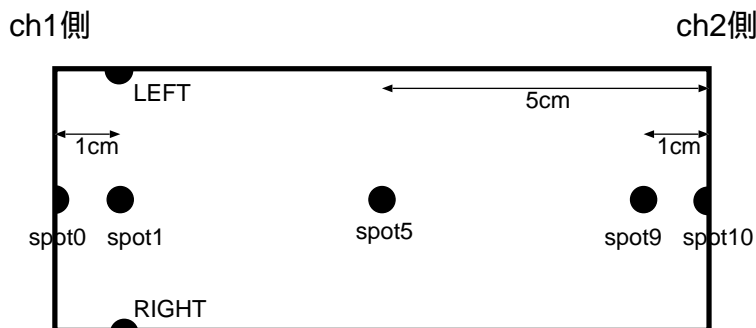


図 4.7: 照射位置と番号の対応

4.3 データ処理回路

APD から出力された信号は Pre Amp に入り電荷電圧変換されて Shaping Amp (Shaping time: $2\mu\text{s}$) で整形される。データ処理の際に必要な Gate、Start、Dio の 3 つの信号を作成するための Trigger 信号は Shaping Amp の uni polar 出力を T 字型コネクタによって 1 つは VME_ADC 信号とし、もう 1 つを簡易 discriminator に入力して生成する。ここまでの過程は 2ch 独立して行なわれる。discriminator の回路を図 4.8 に示す。

データ処理回路の構成は、モジュールの discriminator から出力された trigger の信号を Gate Generator に入力し、1 つ目は ADC_Gate 信号として出力され、2 つ目、3 つ目は再び Gate Generator に入力され ADC_Start 信号と Dio 信号として出力される。Dio 信号は NIM のままで Dio モジュールに入力され、Gate, Start 信号は Level Adapter を用いて NIM から TTL に変換されて VME_ADC モジュールに入力される。モジュールの詳細は表 4.1、データ処理のブロックは図 4.9 に示す。

Shaping Amp からの ADC 信号は Gate 信号が発生してピークがホールドされている間に、AD 変換の Start 信号が発生しデジタル変換される。変換されたデータは Dio 信号発生と共に PC に読みだされ、Dio モジュールよりリセット信号が発生してモジュールは初期状態に戻る（図 4.10）。実際のタイミングチャートを図 4.11 に示す。

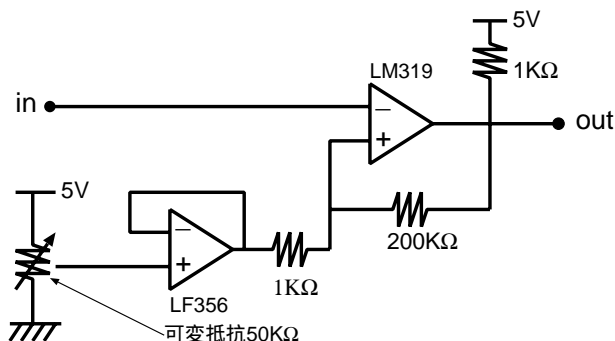


図 4.8: discriminator 回路図

表 4.1: VME によるデータ処理回路で用いたモジュール詳細

モジュール	
APD	ch1⇒Serial_No.141 ch2⇒No.140
Pre Amp	ch1⇒CP 580K ch2⇒CP 582k
Shaper	ORTEC 571
OR	LOGIC FAN_IN FAN_OUT
2ch Gate Generator	KEK_N1113-51 DEGITEX , N-TM 207
VME バス	
VME_ADC	クリアパルス株式会社 1113A 型
DIO	クリアパルス株式会社 CP-2610

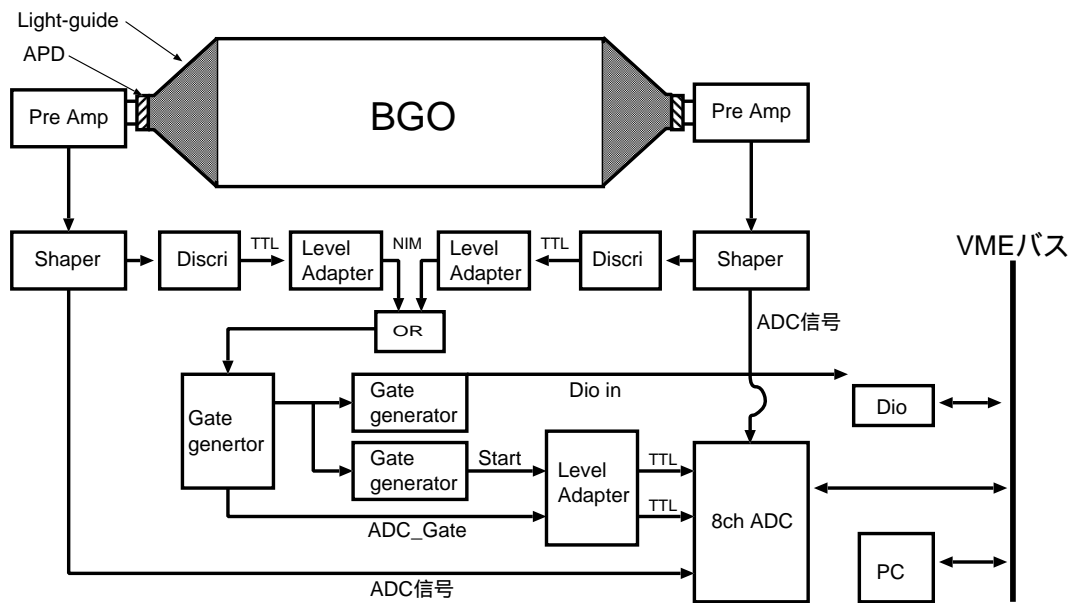


図 4.9: VME によるデータ処理回路のブロック図

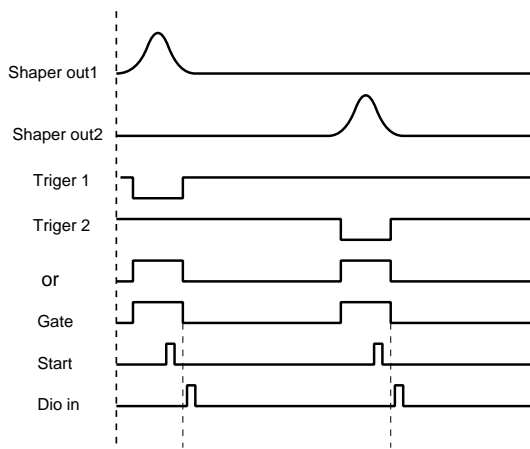


図 4.10: タイミングチャート

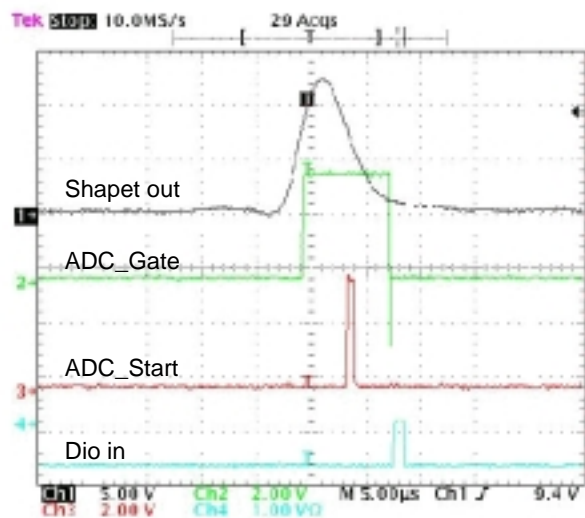


図 4.11: 実際の出力波形

本実験で立ち上げたVME回路にはアナログ回路とデジタル回路が混じり合い、データ処理が複雑であるために測定値の信頼性を検証する必要がある。そこで、比較的簡単な回路で信頼性の高いMCAでの測定値を比較材料として用いる。MCAでの測定結果は5章参照。

検証結果

マイナス32度に冷却し、Shaper Gain20倍の設定でのVMEによる測定値を表4.2に示す。図4.12はエネルギーとパルスハイトをプロットしたものである。グラフより線形性は十分であるといえる。また、図4.13はエネルギーと分解能を対数表示したものである。分解能は $1/\sqrt{E}$ に十分に比例する。また、表5.2と表4.2からMCAとVMEでの測定値の比較をすると、エネルギー分解能はほぼ同じ値をとっている。以上のことよりVMEでの測定は十分信頼できるものであるといえる。

得られたスペクトルは図4.14に示す。

表 4.2: VME による測定結果

線源	エネルギー (keV)	ピーク値 (ch)	(ch)	エネルギー分解能 (%)
Am	59.5	175	15.7	37.2
Cd	88	223	19.3	30.9
Co	122	279	23.2	26.8
Na	511	937	45.1	12.4
Cs	662	1185	50.9	10.8
Na	1275	2203	72.5	8.0

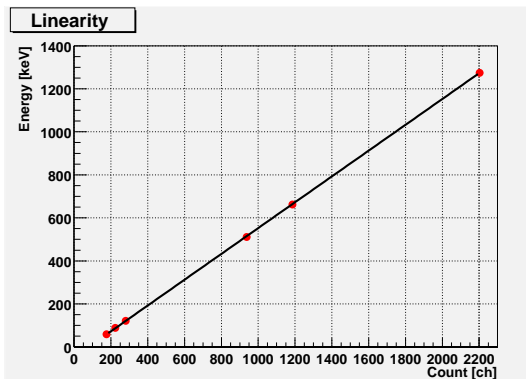


図 4.12: リニアリティー

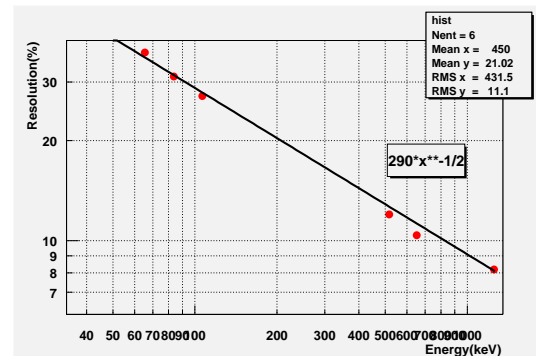


図 4.13: エネルギー分解能

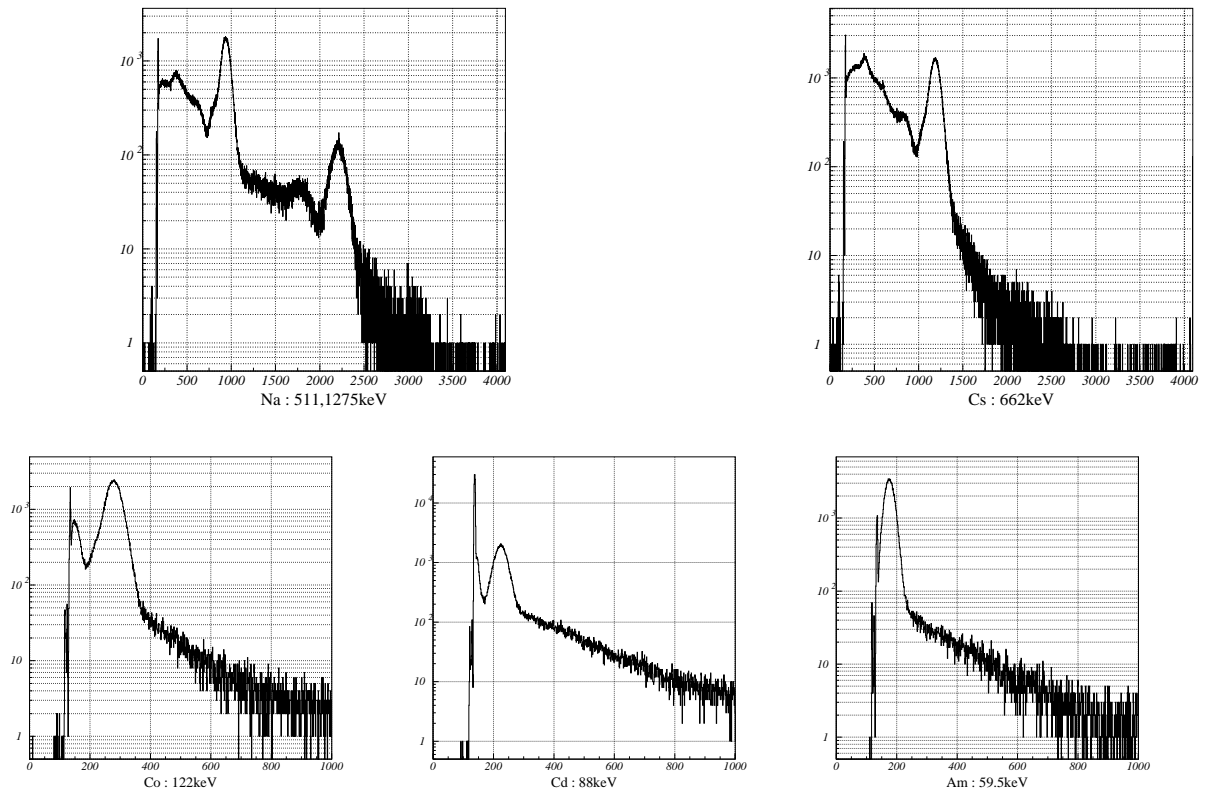


図 4.14: VME 測定により得られたスペクトル : Na,Cs と Co,Cd,Am の横軸スケールは異なる

4.3 ガンマ線の入射位置による違い

ライトガイドを装着した場合、しない場合のそれぞれの入射位置でのパルスハイト、エネルギー分解能を表 4.3 に示す。

表 4.3: 測定結果 : 入射位置と 511keV のパルスハイト、エネルギー分解能

入射位置	ガイド有り (Shaper Gain 200)			ガイドなし (Shaper Gain 100)		
	spot1	spot5	spot9	spot1	spot5	spot9
1ch パルスハイト (ch)	639	663	699	413	388	351
2ch パルスハイト (ch)	530	529	556	468	496	512
1ch エネルギー分解能 (%)	26.1	26.0	26.2	26.0	18.6	21.7
2ch エネルギー分解能 (%)	22.5	24.7	23.5	19.0	18.2	20.5

ガイド有無のそれぞれの値を比べると、使用しないことで光量は 1.2 ~ 1.9 倍になり分解能は最高で 0.7 倍改善されることが分かる。ライトガイド有無の違いは詳しくは 5 章で扱う。

一般的にシンチレータにガンマ線が入射した場合、入射位置が検出器から離れるほど光はシンチレータ内部で吸収されパルスハイトは小さくなる傾向がある。シンチレータを用いた位置検出器はこの原理を利用して位置を検出する。表 4.3 の値からも入射位置の違いによるパルスハイトの変化は数 % であるが確認される。測定されたデータを横軸に 1ch、縦軸に 2ch のパルスハイトとして相関を 2 次元プロットしたものが図 4.15 ~ 図 4.16 である。スペクトルを図 4.17, 4.18 に示す。

図 4.16 からは入射位置がシンチレータのどちらかの端に寄るほど (検出器に近くなるほど) 相関に違いが生じることがわかる。この変化は中心でガンマ線が入射した場合を基準とすると、入射位置が変化した時、入射位置から近い検出器側のパルスハイトが大きくなり、逆側が小さくなることにより基準からずれるために生じる。ガンマ線が BGO のどこに入射した時に相関の様子が最も変化するのかを調べるために、ガンマ線の入射位置の違いが見られた APD 付近に限定し、図 4.19 のような場所で調べた。すなわち、APD の正面、あるいは APD の正面からずれた場所での比較を行なった。その結果、APD の付近であっても APD の正面から大きく外れるとプロットには違いが生じないことがわかった。よって、APD の正面にガンマ線が入射した場合に相関が最も変化するようである。

ライトガイドを使用しない場合に、上のようなガンマ線の入射位置による違いが 2 次元プロットにおいて若干見られるようになった。これはライトガイドを使用しないことで分解能が改善されたことや、シンチレーション光が直接 APD に入射しやすくなったためと考えられる。(表 4.3、または 5 章より)

ライトガイドを装着しての測定により得られた2次元プロット

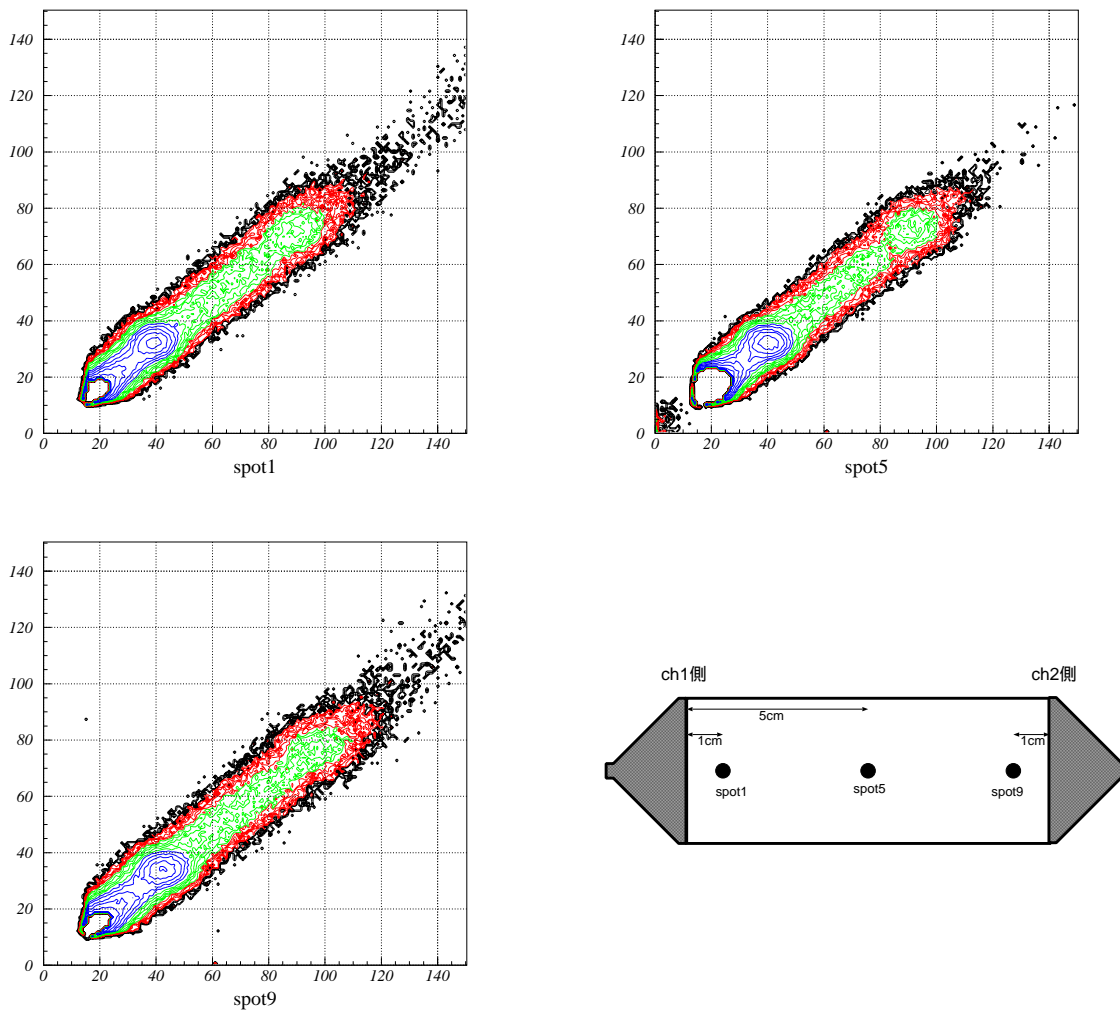


図 4.15: 得られたデータから 1ch のパルス高さを横軸に、2ch を縦軸とした場合の相関の 2 次元プロット : 右下の図がガンマ線の入射位置と名称の関係

ライトガイドを装着しないでの測定により得られた2次元プロット

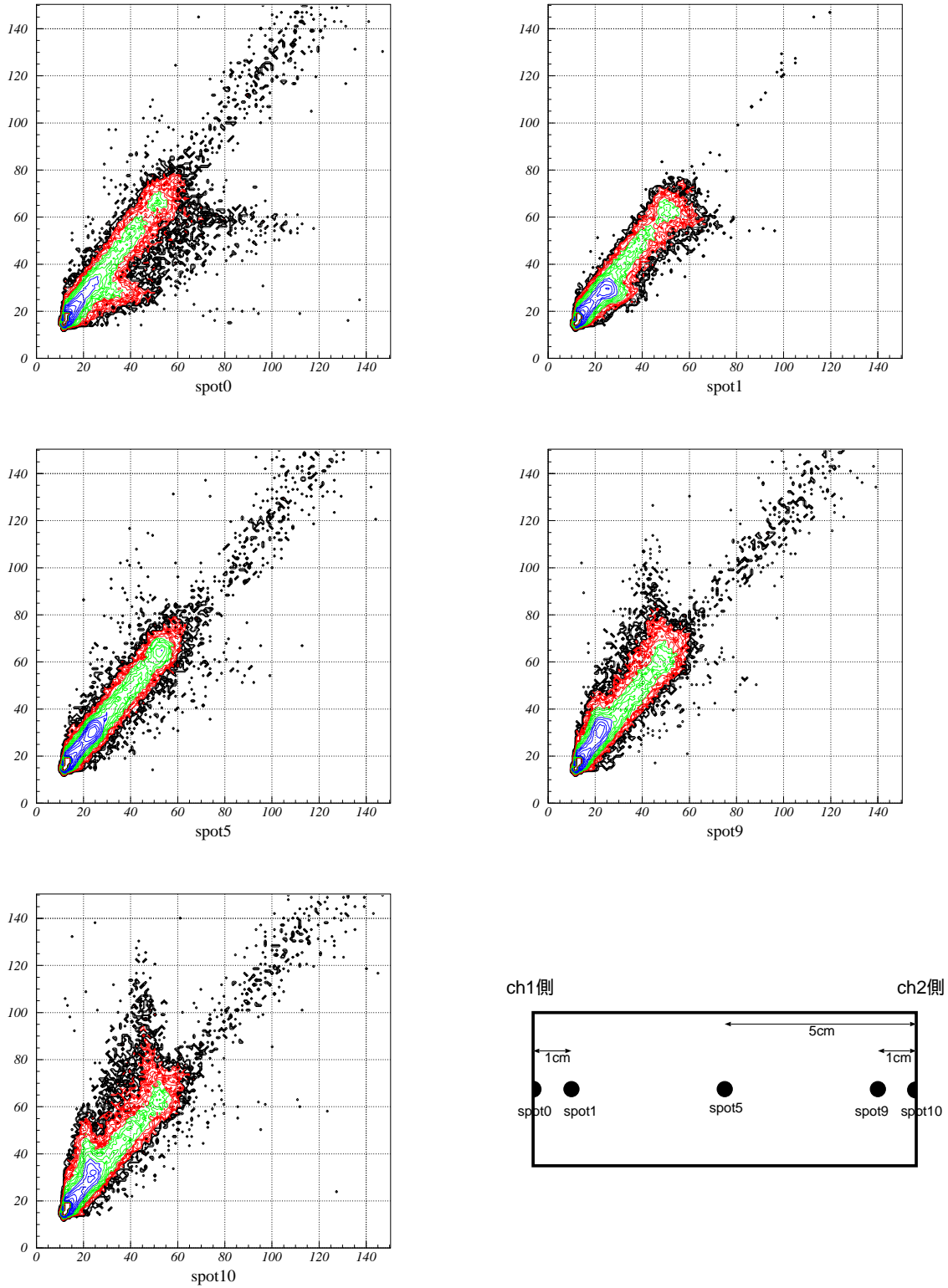


図 4.16: 得られたデータから 1ch のパルス高さを横軸に、2ch を縦軸とした場合の相関の 2次元プロット : 右下の図がガンマ線の入射位置と名称の関係

ライトガイドを装着しての測定により得られたスペクトル

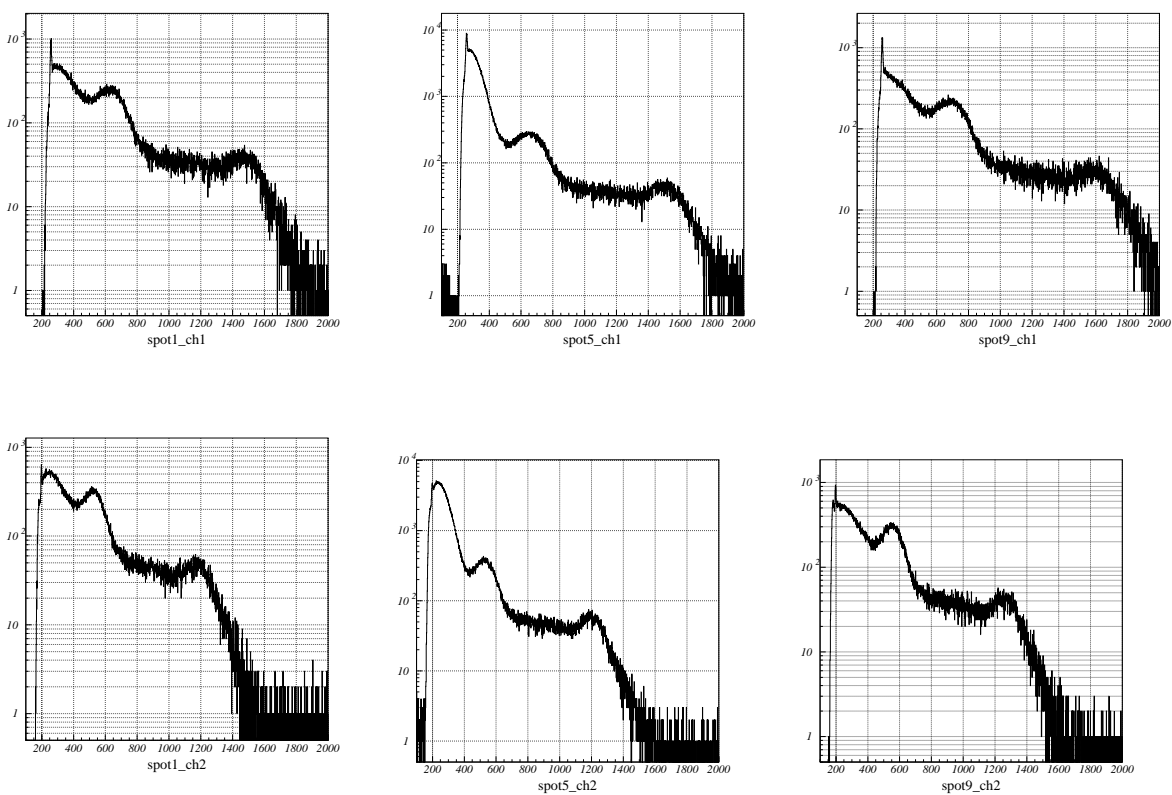


図 4.17: 左側から spot1,spot5,spot9 にガンマ線が入射した場合に得られた上側が 1ch、下側が 2ch のスペクトル

ライトガイドを装着しないでの測定により得られたスペクトル

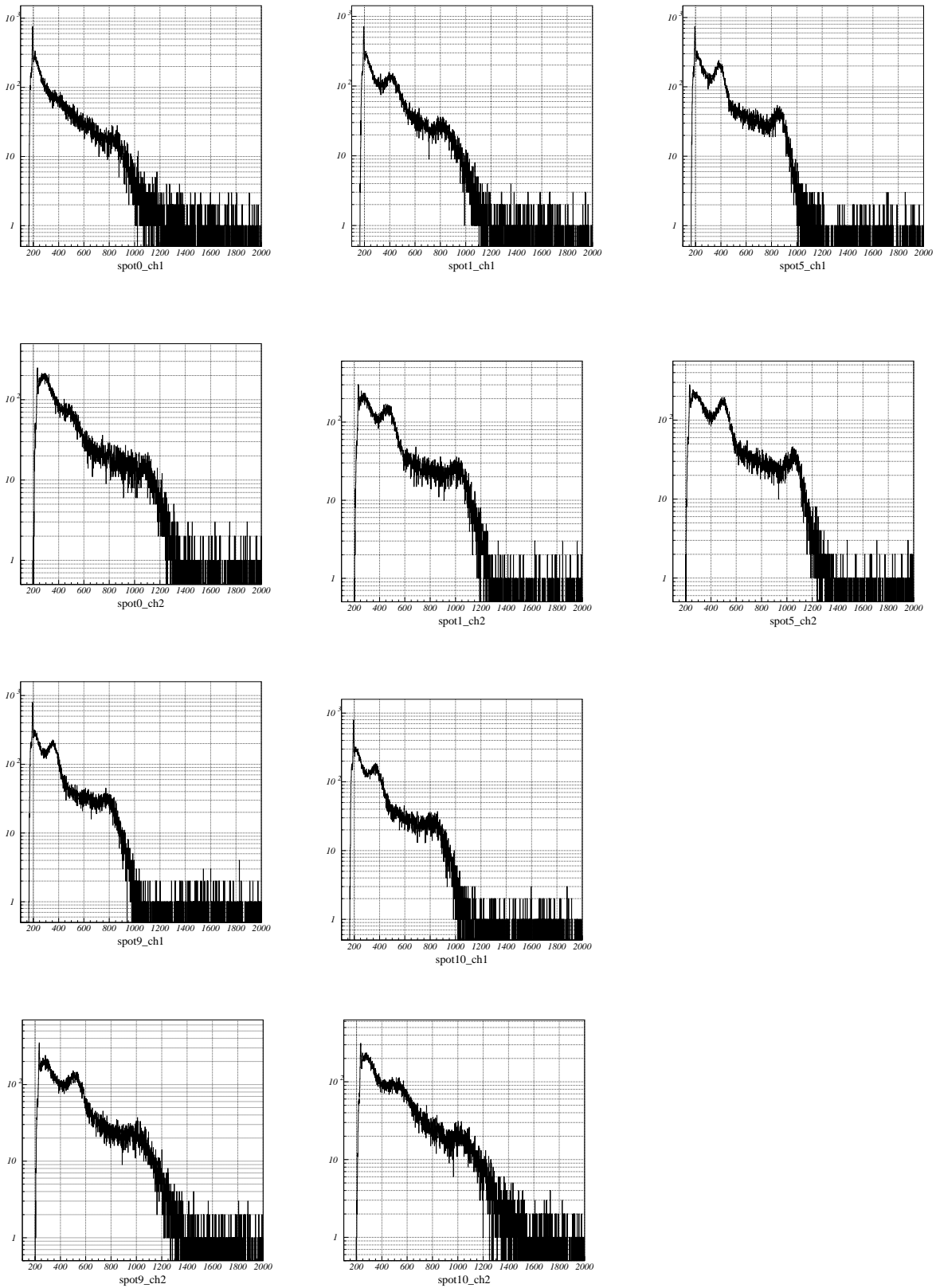


図 4.18: 上 2 段の左側から順に spot0,spot1,spot5 にガンマ線が入射した場合に得られた上側が 1ch、下側が 2ch のスペクトルで、下 2 段が spot9 と spot10 の同様のスペクトル

ガンマ線を APD 付近に入射した場合の測定により得られた 2 次元プロット

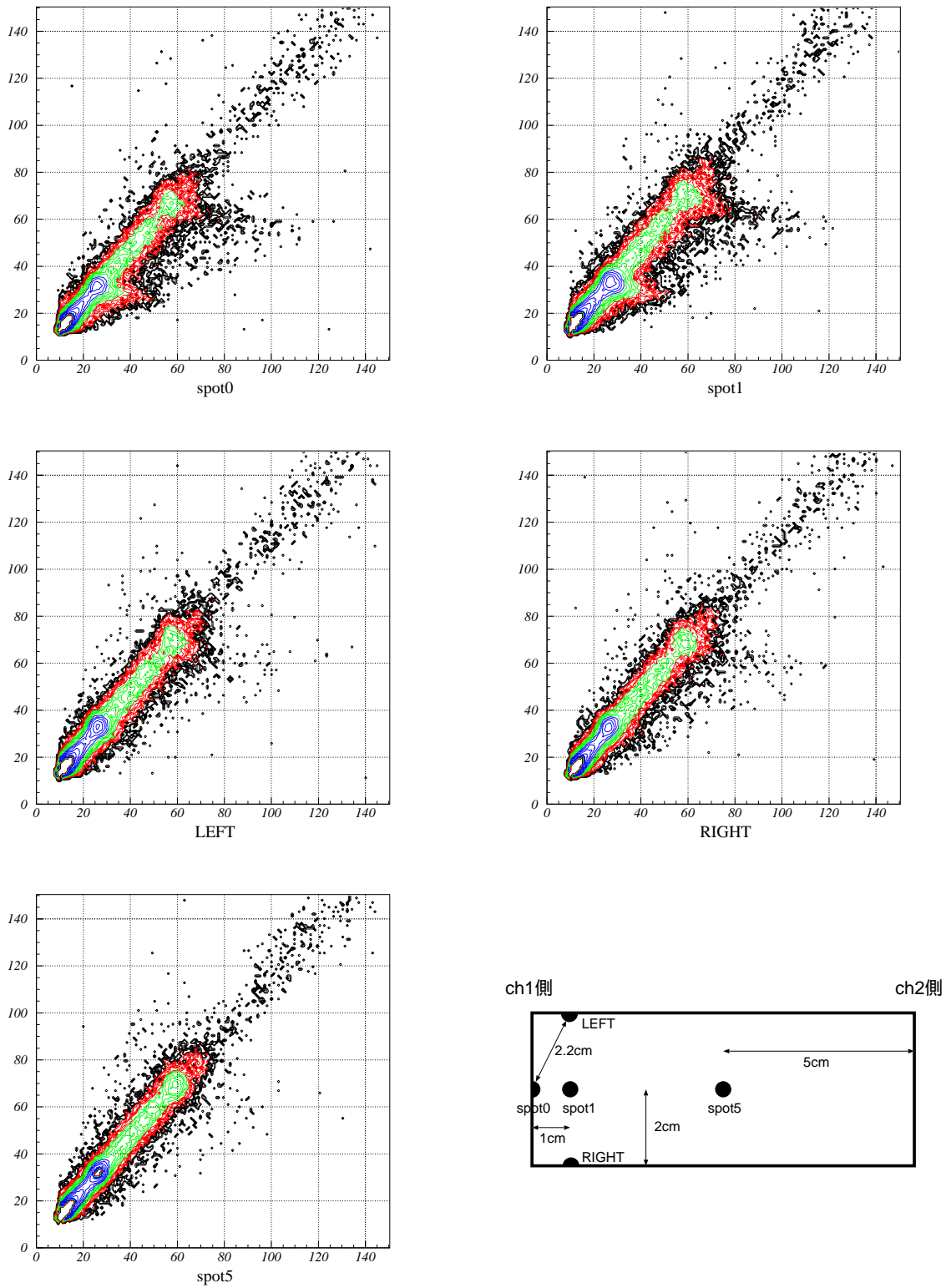


図 4.19: 得られたデータから 1ch のパルス高さを横軸に、2ch を縦軸とした場合の相関の 2 次元プロット : 右下の図がガンマ線の入射位置と名称の関係

測定結果（図 4.3）からはシンチレーション光の BGO プレート内での減衰がわずかであるが見られ、位置検出が可能であると考えられるが、同様の実験を何回か行なったが再現性は低かった。このことは、本実験では使用した BGO の読み出し面と APD の受光面の関係から APD に効率よくシンチレーション光が集まらなかったためと考えられる。実際、実験結果においてもガンマ線の入射位置が APD 付近でありながら APD の正面からずれた場合には光が集まりにくくなるためか変化が見られなかったが、光が検出器に集まりやすそうな APD 正面で近い場所に入射した場合 (spot0,spot10) には、2次元プロットに変化が見られた。これより、位置検出と集光性は非常に関係し、シンチレータの読み出し面が検出器の受光面と等しい面積であった場合には本実験より良い結果が期待できそうである。

第5章 APD + BGO プレートの低エネルギー検出の限界の測定

5.1 実験目的

SGD はHXD を基に構成されたアクティブにコリメートされた狭視野半導体多層コンプトンカメラを 5×5 の複眼型に配置した日本独自の検出器である。硬 X、軟ガンマ線領域での観測において検出のノイズ源となるものは、

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

が上げられる。

SGD では検出対象となるイベントを、多層の半導体において 2 層で同時に検出されたイベントのみとしている。この選択によって検出器の周りを囲むシールドと反応したイベントの除去により上の 1,2 のノイズを効果的に取り除き、また、コンプトン再合成から HXD では困難であった 3,4,5 の除去をも可能にしている。

効果的なバックグラウンドの除去には Anti 検出器は不可欠である。NeXT 衛星では Anti 検出器の光検出部分に APD を用いることで threshold やエネルギー分解能の向上を目指している。加えて、コンパクトな APD を用いることにより検出器設計に自由度が広がる。本実験では Anti 検出器のシンチレータ部を想定した BGO プレート (10cm×4cm×3mm) のシンチレーション光の APD を用いた読み出し実験を行ない、BGO と APD による検出器の性能を理解し実現性を検証するものである。また、Anti 検出器のシンチレータの長さは 30cm を考えているため、10cm の BGO プレートを 2 枚繋ぎ合わせて長くした場合に光量の減少が起こるのかを調べた。

その検証のために以下の実験を行なう。

- ライトガイド有無による集光効率の測定
- BGO プレートに APD を直接装着しマイナス 32 度に冷却した場合の threshold の測定
- 位置検出のために BGO プレートの両側に APD を直接装着した場合の光量の減少の測定
- BGO プレートを 2 枚にした場合の測定

5.2 ライトガイドの集光性

一般的にシンチレータの読み出し断面が検出器の受光面よりも大きな場合、シンチレーション光をライトガイドを用いて集光し検出する。しかし、測定よりシンチレータに検出器を直接つけた場合の方が分解能が向上するという結果が出ている。そこで参考のために以前に同研究室の中本、永江らによって行なわれた実験で、BGO プレートの読み出し面より受光面が広い光電子増倍管 (PMT) を用いて、ライトガイドを使用して測定された値と使用しないで常温 (20 度) で測定された値の比較を試みる (表 5.1)。PMT を使用した場合のセットアップの模式図を図 5.1 に示す。

分解能はライトガイドを使用しないことでおよそ 0.5 ~ 0.6 倍近く改善され、光量はおおよそ 3.7 倍に増加した。光量のエネルギー分解能への寄与は $1/\sqrt{N}$ に比例するので値を当てはめると分解能はおおよそ 0.52 倍に改善されることがわかり、結果とよく一致する。このことから、シンチレータの読み出し面より受光面が大きな場合はライトガイドを使用しない方が光量の減少に伴う分解能の低下を防げることがわかる。

本実験では APD を BGO プレートに直接装着し測定を試みる。APD の場合は受光面が PMT と比べて小さいため直接つける場合には BGO プレートの一部分しか覆うことができない。そのために、ライトガイドを用いた時の値と比較することは非常に興味深い。

表 5.1: PMT による常温 (20 度) での測定結果：相対比は No_guide/Lightguide

	No_guide	Lightguide	相対比
ピーク値 (ch) : Na 511keV	896	486	3.68
Na 1275keV	2257	1217	3.70
エネルギー分解能 (%) : Na 511keV	15.9	29.3	0.54
Na 1275keV	9.9	17.1	0.57
Shaper ゲイン	100	200	0.5



図 5.1: PMT によるライトガイドの集光性の検証実験セットアップの模式図：左側がライトガイドを装着した場合、右側が装着しない場合

BGO プレートの片側にライトガイドを使用せず直接 APD を装着し、セットアップをアルミケースで覆いマイナス 32 度に冷却し MCA を用いて測定した。線源は高エネルギーから低エネルギーまで測れるように ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{57}Co , ^{109}Cd , ^{241}Am を用いてプレートの 10cm×4cm の面の中心部分から高さ 10cm ぐらいの所より全面照射した。BGO の両側に APD をライトガイドなしで直接装着し冷却しての測定では、線源は ^{241}Am 以外は上と同様である。APD の装着方法 (図 5.2) やデータ処理回路はこれまでの実験と同様である。使用した APD は片側付けの実験では Serial-No.141, 後の両側付けでは 1ch に No.140、2ch に No.141 を用いた。

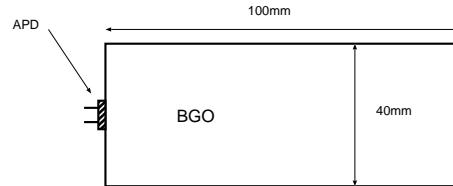


図 5.2: ライトガイドを装着しない場合の片側読み出しのセットアップ

5.4 測定結果

測定はそれぞれ 3 回ずつ行ない平均値を用いて解析した。エネルギー分解能は以下の式より求めた。 α はエネルギーとパルスハイトの相関から求めた直線の傾きである。

$$\frac{\Delta E}{E} [\%] = \frac{\alpha \times 2.355 \times \sigma(ch)}{\text{エネルギー (keV)}} \times 100 \quad (5.1)$$

マイナス 32 度に冷却し、Shaper Gain20 倍の設定での MCA による測定値を表 5.2 に示し、得られたスペクトルは図 5.4 に示す。図 5.3 の左側はエネルギーとパルスハイトをプロットしたものである。グラフより線形性は十分であるといえる。また、図 5.3 の右側は縦軸をエネルギーで横軸を分解能として対数表示したものである。グラフより分解能は $1/\sqrt{E}$ に比例していると言える。

表 5.2 からライトガイド有無による違いを比べると光量はガイドを装着した方がしない場合の約 1.3 倍になりエネルギー分解能に関しては約 0.7 倍に改善された。光量の増加による分解能の改善は 0.88 倍であり、測定値と若干の違いがある。ライトガイドを装着しない場合、低エネルギー側は ^{241}Am : 59.5keV のピークがはっきりと見られ、threshold は約 28keV でありこれは大変に優れた結果である。

表 5.2: 測定結果 : 下側はガイドを装着した場合

	線源	エネルギー (keV)	ピーク値 (ch)	(ch)	エネルギー分解能 (%)
ガイドなし	Am	59.5	96.4	16.8	36.09
	Cd	88	148.24	21.06	30.46
	Co	122	210.89	25.4	26.49
	Na	511	931.57	49.02	12.21
	Cs	662	1206.41	56.01	10.77
	Na	1275	2346.41	82.42	8.23
ガイドあり	Na	511	725	53.2	17.2
	Na	1275	1813	87.8	11.4

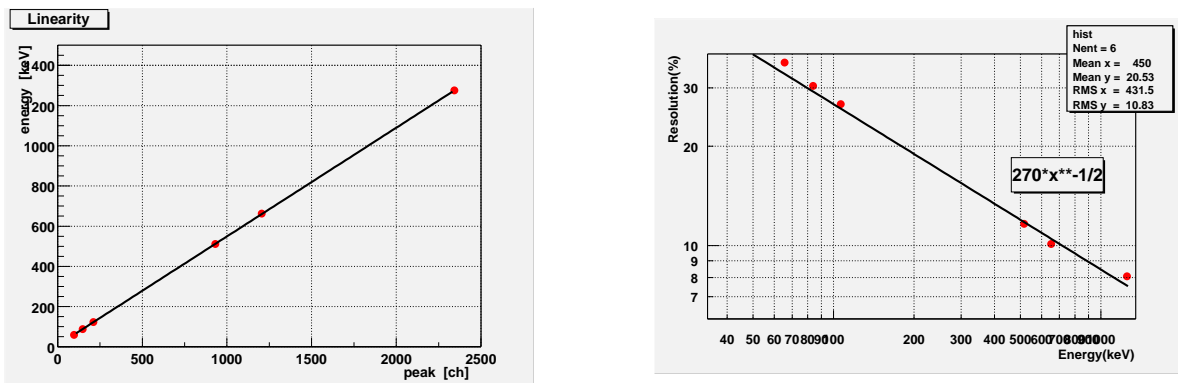


図 5.3: ライトガイドを装着しないでの測定結果 : 左側がリニアリティ、右側がエネルギー分解能

ライトガイドを装着しないでの測定により得られたスペクトル

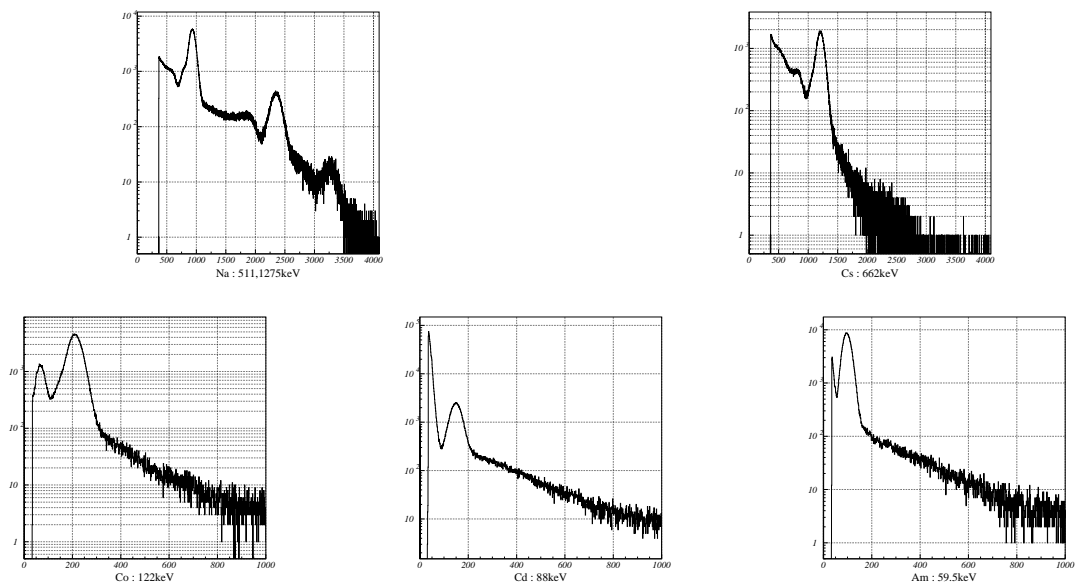


図 5.4: ライトガイドを装着せず測定し得られたスペクトル : Na,Cs と Co,Cd,Am の横軸スケールは異なる

4章実験のように位置検出のために両側に APD を装着した場合の光量の減少がどの程度のものかを理解するために APD を片側しか装着していない図 5.2 の実験値と比較した。

マイナス 32 度に冷却し、Shaper Gain20 倍の設定での MCA による測定値を表 5.3 に示し、得られたスペクトルを図 5.6 と図 5.7 に示す。図 5.5 の左側はエネルギーとパルスハイトをプロットしたものである。グラフより線形性は十分であるといえる。また、図 5.5 の右側はエネルギーと分解能を対数表示したものである。分解能は $1/\sqrt{(E)}$ に十分に比例する。

片側測定と同じ Serial_No.141 の APD を用いた 2ch 側の測定値を比べる。表 5.2 と表 5.3 の ^{22}Na のピーク値とエネルギー分解能の値を比べると両側に APD を装着した場合の光量は片側装着の場合と比べ 0.56 倍に減少し、エネルギー分解能は約 1.4 倍に低下することがわかる。光量のエネルギー分解能への寄与は $1/\sqrt{(N)}$ に比例するので測定結果とほぼ一致する。APD を両側に装着した場合、光量の減少によりエネルギー分解能が低下すると考えられる。

表 5.3: BGO プレートの両側に APD を装着した場合の測定結果

線源	エネルギー (keV)	ch1		ch2	
		ピーク値 (ch)	エネルギー分解能 (%)	ピーク値 (ch)	エネルギー分解能 (%)
Cd	88	93	37.5	74	44.1
Co	122	128	33.3	105	38.1
Na	511	606	15.5	502	17.6
Cs	662	771	14.0	-	-
Na	1275	1527	10.6	1270	11.7

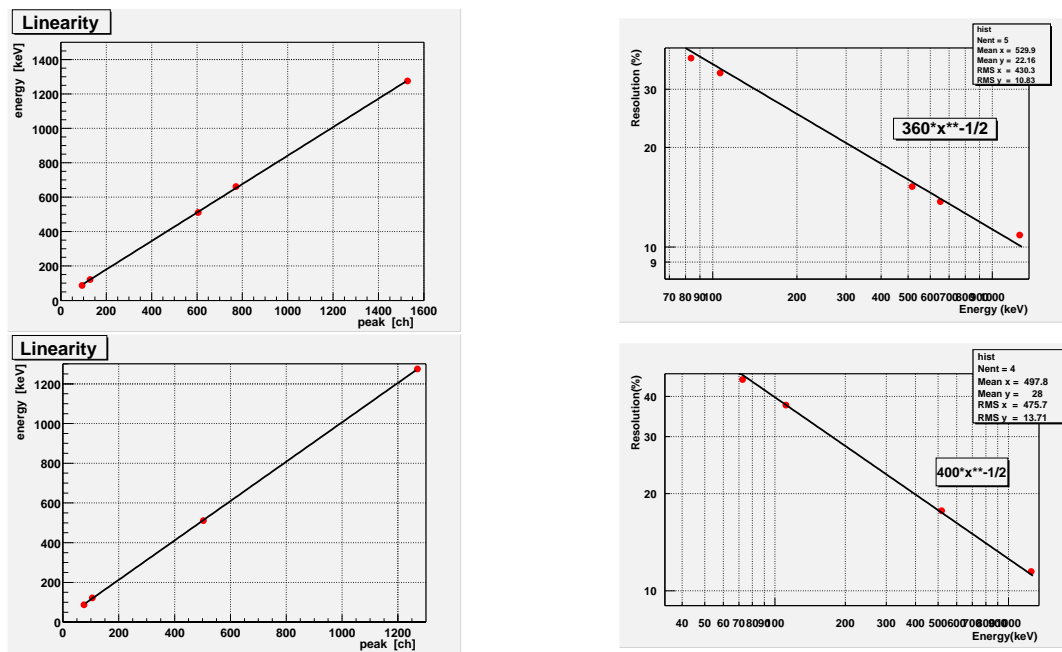


図 5.5: 上側が ch1 側、下側が ch2 側の測定結果 : 左側はリニアリティー、右側はエネルギー分解能

APDをBGOプレートの両側に装着しての測定により得られたスペクトル

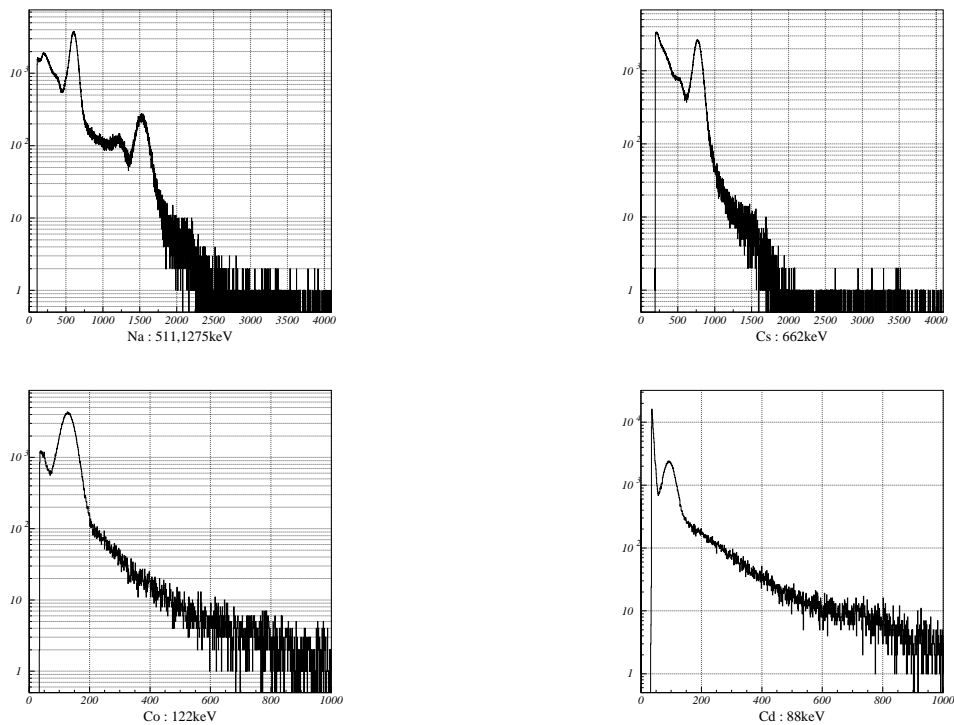


図 5.6: 両側に APD を装着した測定で得られたスペクトル(上側の4つが ch1 側) : Na,Cs と Co,Cd の横軸スケールは異なる

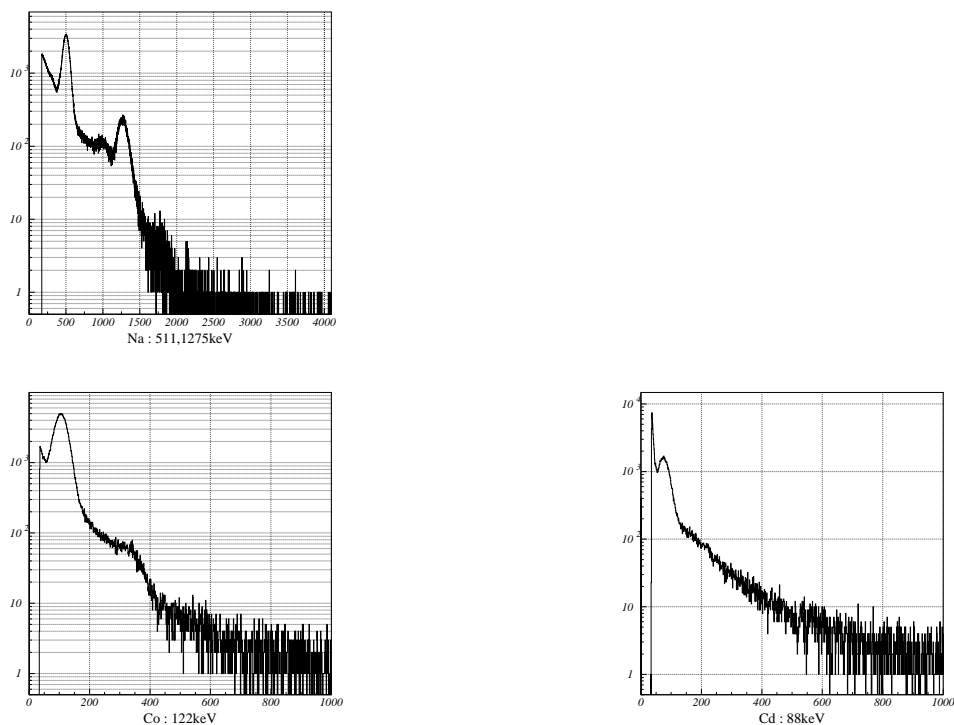


図 5.7: 両側に APD を装着した測定で得られたスペクトル(下側の3つが ch2 側) : Na と Co,Cd の横軸スケールは異なる

これまで使用してきたBGOプレートと同じ形のBGOプレート2つを接合面に光学グリース（応用光研工業株式会社）を用いて繋ぎ合わせて測定を試みる。この実験はAnti検出器の30cmのシンチレータを想定し、BGO1枚の場合とプレートを2枚繋ぎ合わせた場合のパルスハイトの変化などからシンチレータが大きくなった場合の光量の減少を理解するものである。APDはSerial_No.141を使用しBGO1側とBGO2側に交互に装着し測定を行なった。ガンマ線照射の仕方はBGOの繋目にコリメートせず線源を置き全面照射した場合とそれぞれのBGOの中心部分（spot5,spot15）に $\phi 7\text{mm}$ のコリメータを通して照射した場合である。また、2枚を組み合わせたことによる光量の減少の比較材料としてはBGO2を取り外し、BGO1を1枚だけ用いてガンマ線を同様にコリメートしspot5に照射した時の値を用いることにする。データ処理はMCAを使用し、回路はこれまでと同様である。プレートを繋ぎ合わせ、APDをBGO1側に装着した場合のセットアップと入射位置と名称の相関を図5.8に示す。

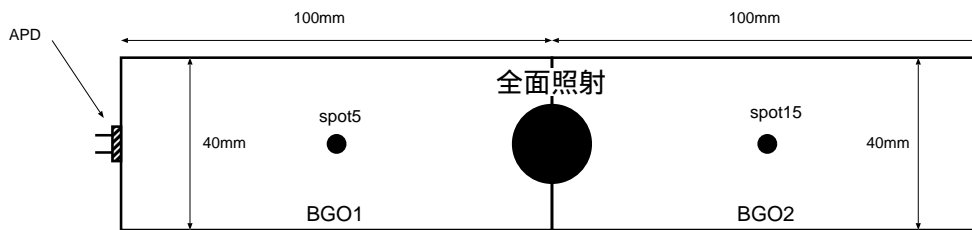


図 5.8: BGO2 枚組み合わせたときのセットアップと入射位置と名称

測定結果

測定結果を表5.4、スペクトルは図5.9、図5.10に示す。

表5.4の値を考える時に考慮すべきことは、BGO1とBGO2の光量の違い、そしてAPDとBGOの接着状態の違いに起因する集効率の違いであり、前者は(1),(3)と(2),(4)の違いとして現れ、後者は(1),(2)と(3),(4)の違いとして現れる。

BGO1とBGO2の光量の違いがあるという仮定をすると、表5.4上段の値(1)と(4)から、BGO2の方がBGO1と比べ1.05倍光量大きいことを意味している。そこで、(2),(4)の値を1.05で割り、光量の補正を行なったものが表5.4の中段である。この表の値を用いて考察を行なった場合、値(1)'とAPDをBGO2側に装着しガンマ線がBGO1のspot5に入射した値(3)'を比較した場合の光量の減少（BGO1でシンチレーションを起こした光のBGO2の結晶内や繋ぎ目での減衰率）は0.97倍、これとは逆の場合（BGO2でシンチレーションを起こした光のBGO1の結晶内や繋ぎ目での減衰率）は(4),(2)の値より0.85倍となりあまりに差が大き過ぎ、つじつまがあわない。

そこで、BGO1とBGO2の光量が同じであると仮定し、それぞれの場合のAPDへの集光率が違っていると仮定して、その比を(1)と(4)より求めると、BGO2側にAPDを装着した方がBGO1側より1.05倍大きいことを意味する。そこで、(3),(4)の値を1.05で割って集光率の補正を行なったものが表5.4の下段である。以下、この表の値を用いて解析を行なう。

先と同様に比較を行なうと、APDをBGO1側に装着しガンマ線をBGO1側のspot5に入射した場合の(1)''とAPDをBGO2側に装着しガンマ線をBGO1のspot5に入射した

値(5)と比較した場合の光量の減少は、BGO1のゲイン(ゲインの減少率)は0.66倍であり、これとは逆の場合の値は0.89倍となる。この結果からはBGOプレートの繋ぎ目での光量の減少は約1割と考えられ、考えていたより小さな値である。

また、BGO一枚での値(5)とAPDをBGO1に装着しガンマ線がspot5に入射した時の値(1)''を比較して見ると、2枚組み合わせることで光量は0.66倍、分解能は1.23倍となる。光量の減少からの分解能の低下は $1/\sqrt{N}$ の計算より1.23倍と考えられ結果と良く一致する。

表 5.4: BGO プレートを 2 枚繋ぎ合わせての測定値 (線源 ^{137}Cs : 662keV)

APD 位置	\ 入射位置	全面照射	spot5(BGO1 側)	spot15(BGO2 側)
BGO1	パルスハイト (ch)	658	706... (1)	632... (2)
	エネルギー分解能 (%)	25.8	16.6	18.2
BGO2	パルスハイト (ch)	719	686... (3)	740... (4)
	エネルギー分解能 (%)	21.9	18.8	18.0
BGO1 (一枚)	パルスハイト (ch)	-	1071... (5)	-
	エネルギー分解能 (%)	-	13.3	-

BGO1 と BGO2 の光量の補正後の値

BGO1	パルスハイト (ch)	-	706... (1)'	601... (2)'
BGO2	パルスハイト (ch)	-	686... (3)'	704... (4)'

APD を BGO1 側、または BGO2 側に装着した場合の APD への集光率補正後の値

BGO1	パルスハイト (ch)	-	706... (1)''	632... (2)''
BGO2	パルスハイト (ch)	-	653... (3)''	704... (4)''

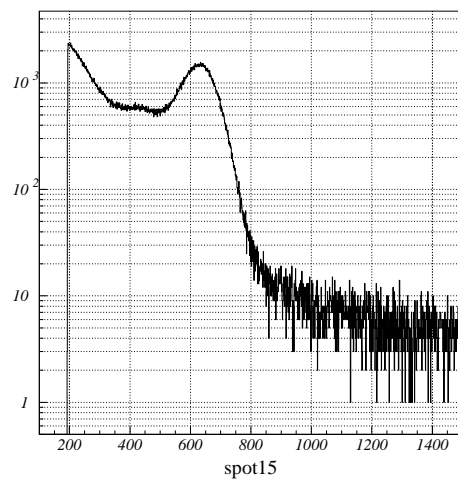
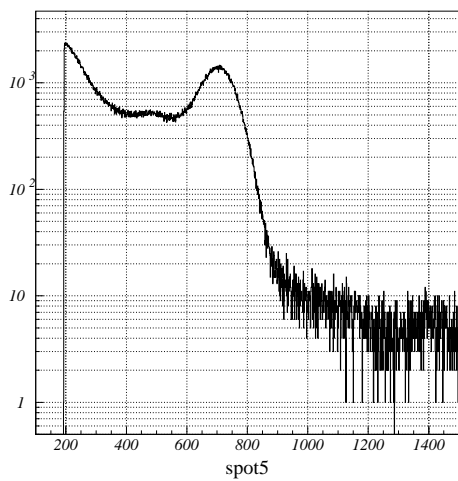


図 5.9: BGO1 に APD を装着しての測定で得られたスペクトル

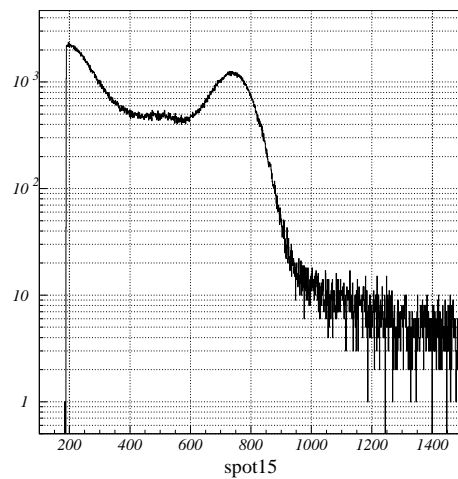
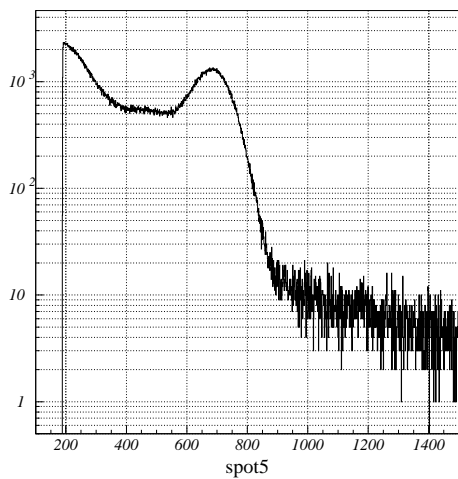


図 5.10: BGO2 に APD を装着しての測定で得られたスペクトル

よこの
ライトガイドを装着した時の光量はしない時と比べ 0.77 倍小さくなり、分解能は 1.4 倍に増加してしまう。ライトガイドを装着している場合シンチレーション光が BGO とガイドの境界面で影響を受け分解能が低下するためではないかと考えられる。ライトガイドを装着しない場合、低エネルギー側は ^{241}Am の 59.5keV がはっきりと測定され、threshold は 28keV と非常に良い結果であり、ガイドを使用しない場合の方が十分に良い値が得られることがわかった。これは、APD の受光面が小さく BGO プレートの読み出し面を 2 割しか覆うことができないことを考えると、APD で BGO を覆う面積を大きくすることでさらに threshold が下がることを期待させる。

位置検出のために APD を両側につけた場合、光量の減少は約 0.6 倍で、分解能の低下は $1/\sqrt{(N)}$ の計算通りの約 1.4 倍であった。

長い BGO を仮定しての BGO を 2 つ繋げた場合は、BGO 結晶内や繋ぎ目での光量の減衰は約 9 割で思っていたより小さな値であった。これは BGO の光透過率が 400mm と十分に長いことを反映しており、BGO を長くしても threshold はあまり下がらないことを意味する。

第6章 まとめとこれからの課題

本実験より APD の増幅率のばらつきは十分議論できる結果は得られなかったものの APD と BGO を組み合わせた検出では PMT や FD より良い結果を出していることから分解能への寄与は比較的小さいものであると考えられる。これについては後日再び測定をし確かめたい。BGO プレートを Anti 検出器のシンチレータと仮定しての実験では、BGO プレートを長くした場合でも threshold がほとんど下がらないこと、ライトガイドを使用しない場合の方が、シンチレータの読み出し面積の 2 割の受光面であっても光量や分解能が向上しライトガイドを使用していたこれまで以上に低エネルギー側まで測定可能となることが分かった。

これからの主な課題は $1.6\text{mm} \times 1.6\text{mm}$ の受光面を 8×4 面持つ Array APD を用いての検出を行なうことである。Array 型を使用することにより、BGO プレートによる位置検出では 4 章まとめで述べたように APD の受光面積とシンチレータの読み出し面積を近づけることができ、シンチレーション光が検出器に入射しやすくなり、ガンマ線の入射位置による違いが検出されやすくなると期待される。また、受光面が広がることで光量の増加、分解能の向上によりさらなる低エネルギー側の測定が可能になると思われる。

本論文の作成にあたり、ご多忙の中面倒を見て頂いた研究室の大杉先生、深沢先生には心から感謝しております。大杉先生には実験を始めたばかりの APD の増幅率の揺らぎの測定ではたくさんのアドバイスをして頂きました。深沢先生には卒論実験ばかりではなく、宇宙についての様々な講義をして頂いたり、最先端研究の一端を覗かせてもらうなど、宇宙観測を実現させる研究者の情熱を教えてくださいました。

研究室の中本さんには半導体検出器について基礎から熱心に教えて頂いたり、卒論実験ではたくさんのアドバイスをして頂きました。子部屋の富永さんにはパソコンに実験、また、研究室内外を問わず雰囲気盛り上げて頂き、大変楽しく過ごすことができました。M1の皆様には卒論直前のお弁当やポスター作りをしてもらいありがとうございます。そして、4年生のみなさん、4月までは話することもほとんどなかった人達の集まりでしたが研究熱心でのりもよく、大変いい同僚にめぐまれたことを感謝しています。

最後に研究室のみなさま大変お世話になりました。この研究室に配属され、研究できたことに感謝し、今後もさらにながらんでいきたいと思っております。

2月10日 松浦大介

- (1) G.F.Knoll(木村逸朗、阪井英次 訳) 放射線計測学ハンドブック (第2版)、日刊工業新聞社
- (2) 中本達也 2001 年度 広島大学 卒業論文
'高阻止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'
- (3) 川本和弘 2003 年度 広島大学 修士論文
'GSO、BGO を用いた小型の位置検出型宇宙線用シンチレーション検出器の開発'
- (4) 中本達也 2002 年度 広島大学 実験レポート
'BGO シンチレータとアバランシェフォトダイオード S8664-55 の組み合わせの性能評価'
- (5) 右田雄二 2003 年度 広島大学 卒業論文
'自動精密ステージを用いた半導体検出器の光子応答の位置依存性の測定'
- (6) 谷津陽一、五十川知子、片岡淳、河合誠乏(東工大)、森國城(クリアパルス株式会社)
'軟 X 線検出器としてのアバランシェ・フォトダイオード'
- (7) NeXT 提案書