

BGOとAPDを用いた
宇宙線検出器アクティブシールドの研究

浅野 哲也

広島大学理学部物理科学科

u1379001K

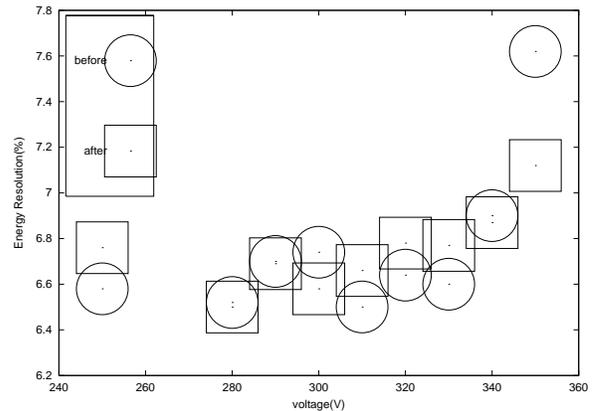
高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

2005年 2月10月

概要

線バースト、ブラックホールなどをターゲットとする X 線観測ミッション NeXT 衛星は 2011 年の打ち上げを目指しており、搭載予定の軟 X 線検出器 (SGD) は多重半導体コンプトンカメラを BGO の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する。このアクティブシールドの BGO 壁の光検出に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光電子増倍管やフォトダイオードに対して期待され、光電子増倍管に対しては検出器の小型化、軽量化が図られる。

本研究では APD の放射線耐性 (広大で X 線、放射線医学総合研究所で陽子を共に 10krad 照射) を調べ宇宙利用が可能であるか検証した。X 線照射前後の APD(5mm) のエネルギー分解能を図に示す。横軸はバイアス電圧である。さらにアクティブシールドを想定した板状 (大きいため光を読み出しづらい) の BGO(10cm × 4cm × 3mm) の発するシンチレーション光を、測定できるエネルギーの下限を示す threshold を低い値を保ちながらいかに効率良く読み出すかを APD のサイズや数を変えて調べた。



目次

第1章	序論	3
第2章	結晶シンチレータを用いた 線検出器	4
2.1	結晶シンチレータ	4
2.2	アバランシェフォトダイオード (APD)	4
2.3	シンチレーション検出器のノイズ	5
2.3.1	シンチレーション検出器の信号処理回路	5
2.3.2	信号処理回路におけるノイズ	6
2.3.3	一般的なノイズ評価の表式	8
2.3.4	シンチレータとアバランシェフォトダイオードの場合	8
2.4	NeXT 衛星とコンプトンカメラとアクティブシールド	8
2.5	研究目的	9
第3章	線、proton 照射による劣化の影響の検証	10
3.1	実験目的	10
3.2	放射線照射実験	10
3.2.1	放射線損傷について	10
3.2.2	照射方法	10
3.3	検証実験	14
3.3.1	照射前後の暗電流	14
3.3.2	暗電流の温度依存性	17
3.3.3	照射前後の分解能	19
3.3.4	proton 照射前後の threshold	22
第4章	APD + BGO プレートでの 線検出	27
4.1	実験目的	27
4.2	実験セットアップ	28
4.3	小型 BGO と BGO 板の光量比較	31
4.4	1APD と 3APD 読み出しの比較実験	31
4.4.1	APD1ch と 3ch との光量比較	31
4.4.2	エネルギー分解能の比較	33
4.5	再現性の検証	33
4.5.1	エネルギー分解能	33
4.5.2	threshold	34
第5章	ノイズの要因の検証	38
5.1	実験目的	38
5.2	APD の基礎特性	38
5.2.1	端子間容量の測定	38

5.2.2	暗電流の測定	38
5.2.3	APDのGAIN比	39
5.3	ノイズの検証	40
第6章	まとめ	45

第1章 序論

地球には、宇宙からエネルギーの高い放射線が絶えず降り注いでいる。その放射線は宇宙における高エネルギー現象が起源と考えられており、その高エネルギー現象を解明するために放射線の観測を行なう。放射線の中の粒子は電荷を持った陽子や原子核であり宇宙に存在する磁場によって曲げられてしまい、その起源の位置情報を失ってしまう。それに対して、 γ 線や X線は電磁波なので電荷をもたず、宇宙を伝搬している間にその進路を曲げられることはほとんどない。そのため、X線、 γ 線観測ではその到来方向を特定し、特定の天体の高エネルギー現象を観測することが可能になる。すなわち、X線、 γ 線を観測することは高エネルギーの天体現象を研究するもっとも手近な手段と言える。

天体現象の放射から観測的に得られる指標は、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、電離度などの物理量が得られ、輝線・吸収スペクトルからは温度、化学成分、活動性の高さを知ることができる。また、時間変動からは活動の周期、イメージからは空間的な情報が得られる。これらの情報の総合的な解析により様々な天体現象を解明することができる。

そして天体からの γ 線、X線は大気による吸収が大きいので、大気上層部または大気圏外でなければ観測は困難である。そのため、検出器を人工衛星に搭載して観測するのだが、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特性は厳しく、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。

近年、技術の向上により新たなタイプの検出器が開発されたことに伴い、 γ 線天文学は加速度的に発展しつつある。銀河団、ブラックホール、超新星残骸、 γ 線バーストなどのさまざまな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で、宇宙の新たな側面が見えてくる。

第2章 結晶シンチレータを用いた 線検出器

2.1 結晶シンチレータ

ある種の物質中で発生するシンチレーション光によって放射線を検出することは古くから行なわれてきた放射線測定法の一つである。結晶シンチレータを用いた 線検出器は、線が入射すると光を発生させる結晶シンチレータと、そのシンチレーション光を検出して電気信号に変換する光検出部で構成される。結晶シンチレータは放射線を吸収した際に、そのエネルギーにほぼ比例した数のシンチレーション光子を発生させるという特性を持つ。結晶シンチレータの持つ特徴として、阻止能が高いということが挙げられる。固体の密度は気体のそれと比べ約 1000 倍もの大きさなので、ガスをを用いた比例計数管などと比べ小さな体積で放射線を吸収することが長所である。

無機物質中のシンチレーション機構は材料の結晶格子で決まるエネルギー状態に依存する。電子は絶縁体あるいは半導体材料中では離散的なエネルギー状態しか持ちえない。線から電子がエネルギーを吸収すると価電子帯中の定常位置から禁止ギャップを越えて伝導帯へと移行する。そして純粋結晶中で電子が光子を放出して価電子帯へ戻るのがその際、ギャップの幅が大き過ぎて可視光にならない。光検出部が高感度を示すのは主に可視域においてである。そこで、可視光の放出率を高めるために、無機シンチレータには通常少量の不純物を添加する。その不純物は純粋結晶の正常なエネルギー帯の構造を少し変化させる。それはつまり、禁止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ということである。このエネルギーは全禁止エネルギーギャップよりも小さい。この遷移は可視光を発生するのでシンチレーション過程の基礎となる。

本研究において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。それにより市販のシンチレータ材料のどれよりも単位体積当たりの 線の光電吸収確率が高い。さらに BGO はシンチレーション過程を促進するために不純物を添加する必要がない。この場合蛍光は不純物の代りに結晶の主成分である Bi^{3+} イオンの光学的遷移を伴う。 Bi^{3+} の光吸収スペクトルと放出スペクトル間には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、大きな寸法の結晶でもその発光に対し透明度を保てるというのも魅力ある特徴である。各結晶シンチレータの特性を表 2.1 に示す。

2.2 アバランシェフォトダイオード (APD)

これまでの数 100keV から数 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) の組み合わせであった。また、GeV 領域の高エネルギー 線の観測では CsI とフォトダイオード (PD) を組み合わせたものであった。それ

表 2.1: 放射線検出のためのシンチレータ特性比較

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
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

それぞれ以下に述べるような一長一短の特徴を持っている。

PMT は体積がかさばり、動作させるためには 1000V を越えるような高い電圧が必要である。また、磁場の影響を受けやすいほか量子効率が約 20 % と高くない。一方で、PD は通常 100V 以下の電圧で動作し、磁場の影響を受けにくく、体積も小さく、量子効率も 80 % 以上の高い値を示す。しかしながら、素子の内部に増幅機能を持たないため、1 光子レベルの微弱な信号は、到底読み出すことができない。

アバランシェフォトダイオード (APD) は PD の仲間であるが、検出器内で生成された光電子を、半導体に高い電圧を印加することで、加速し衝突により新たな電子、正孔を作り出す。このなだれ現象によって内部増幅を可能にするため、読み出し回路系ノイズの影響を増幅率分の 1 にでき、通常はノイズに埋もれてしまうような微弱な光信号を高い量子効率を保ったまま読み出すことが可能である。つまり APD は PMT、PD 両者の長所を持つ光検出器であると言え、エネルギー分解能や threshold の性能の向上を期待できそうである。

2.3 シンチレーション検出器のノイズ

2.3.1 シンチレーション検出器の信号処理回路

シンチレータを用いた検出器では X 線、 γ 線がシンチレータに入射した際に発生する光子を光センサーで受けて電気信号に変換し、増幅整形を行って AD 変換して取り込む。一般的な信号処理について以下に述べる。

1. シンチレータ

一般に、 γ 線を観測するためには、シンチレータと入射 γ 線との相互作用で生じた自由電子がシンチレーター内電子を励起して、エネルギーに比例した量の光子を利用する。

2. 光センサーでのシンチレーション光読み出し

先に述べたように、シンチレーション光は入射 γ 線のエネルギーに比例する。ここでは、このシンチレーション光を読み出すのに PMT、PD、APD などの光センサーを用いる。

3. PreAmp, ShapingAmp による波形処理

と増幅を行うとともに後段の回路のためのインピーダンス変換を行う必要があり、これらの処理を一般的に PreAmp で行う。そして、ノイズ除去や波形の整形などの様々な処理は Shaping と呼ばれ正しいスペクトル情報を得るためには不可欠な処理である。

4. ADC によるデジタル処理

ここまでアナログ信号として処理してきた信号の波高値などは ADC(Analog to Digital Converters) によってデジタル処理をされ、ヒストグラム生成に用いられる。

2.3.2 信号処理回路におけるノイズ

1. ジョンソンノイズ

ジョンソンノイズとは電子回路内のキャリアが熱的に揺らぐ(ブラウン運動)ことによって生じるノイズである。それゆえ、このノイズは何らかのエネルギー消費が行なわれるところ、つまり外界と熱的な相互作用をおこすところ(抵抗の実数部)では必然的に発生し揺らぎに相当する電位差が生じる。ゆえに、理想的なコンデンサーやコイルでは発生しない。

このノイズのパワースペクトル $N_v(f)$ (f は周波数) を求めるには LCR 共鳴回路を考えればよい。抵抗内キャリアの熱的揺らぎは L 及び C で静電ポテンシャルとして蓄えられ、そのエネルギーは電流揺らぎを i 、電圧揺らぎを v とすると

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

で与えられる。これは一次元調和振動子の場合と等価であるから、第一項と第二項の平均エネルギーは

$$\frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}Cv^2 = \frac{1}{2}kT \quad (2.2)$$

となる(エネルギー等分配則)。また、抵抗に発生する熱雑音電圧とその結果コンデンサーの両端に現れる電圧との関係は

$$\begin{aligned} \overline{v^2} &= \int_0^\infty \frac{N_V(f)df}{1 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2 R^2} \quad (\omega \equiv 2\pi f) \\ &\simeq \frac{N_V(f_0)}{4CR} \end{aligned} \quad (2.3)$$

のように計算される。ここでは共鳴周波数を f_0 ($\equiv \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$) として、回路は f_0 で鋭く同調されているとしている。 L と C の値によって f_0 は任意の値をとり得るので、結局 $N_V(f)$ は式(2.1)と式(2.2)から

$$N_V(f) = 4kTR \quad [V^2/Hz] \quad (2.4)$$

時間)を τ_c として、キャリア速度の相関が $\exp\left(-\frac{|\tau|}{\tau_c}\right)$ のように有限時間の減衰を示すような場合、次節でも計算するが $\frac{1}{1+\omega^2\tau_c^2}$ なる周波数依存性が現れる。しかし、ほとんどの場合では τ_c は問題にならないくらい短いので(典型的な金属で $\sim 10^{-14}$)、ジョンソンノイズは白色雑音であると考えられる。なお、式(2.4)は抵抗に直列に存在する電圧ノイズパワーであるが、これを次式のように抵抗に並列に存在する電流ノイズパワーとして表しても等価である。

$$N_I(f) = \frac{N_V(f)}{R^2} = \frac{4kT}{R} \quad (2.5)$$

2. ショットノイズ

これは主に、真空管や半導体素子で問題になる電流性ノイズである。ジョンソンノイズがキャリア速度の揺らぎであったのに対してショットノイズはキャリア数の揺らぎによるものである。

数の揺らぎはキャリアの正味の流れが存在しなければノイズとして現れることはない。よって外部電界、キャリア密度勾配、温度勾配のいずれかが存在する場合に限りショットノイズは発生する。これは熱平衡状態であれば必ず発生するジョンソンノイズとは対照的である。そこで代表的な例として、半導体の両端に電極を付けて電圧をかけた場合に生ずるショットノイズを考える。流れる電流 $I(t)$ は半導体中のキャリア数 $N(t)$ に比例するはずであるから、電流揺らぎ $i(t) = I(t) - I$ の自己相関関数を計算すると

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

ここで、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すものである。よって、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 は前者によって指数関数的に減少し後者によって直線的に減少すると考えられるので、

$$\begin{aligned} R_N(\tau) &= \overline{N^2(t)} \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_d}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|\tau|}{\tau_l}\right) \quad (|\tau| \leq \tau_d) \\ &= 0 \quad (|\tau| > \tau_d) \end{aligned} \quad (2.7)$$

とおける。Wiener-Khinchineの公式より $i(t)$ のパワースペクトル $N_I(f)$ は

$$\begin{aligned} N_I(f) &= 2 \cdot \frac{I^2}{N^2} \int_{-\infty}^{\infty} R_N(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad [A^2/Hz] \\ &= 2eI \cdot \frac{\alpha}{\tau_d} \cdot \int_{-\tau_d}^{\tau_d} \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_d}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|\tau|}{\tau_l}\right) \exp(-i\omega\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2.8)$$

を計算することで求まる。ここで $I = \frac{eN}{\tau_d}$ と表せることを用い、また $\overline{N^2(t)} = \alpha N$ とおいた。そこで次の2つの場合を考える。

- $\tau_l \ll \tau_d$ の場合

$$N_I(f) \simeq 2\alpha eI \cdot \frac{2\tau_l/\tau_d}{1 + \omega^2\tau_l^2} \quad (2.9)$$

$$N_I(f) \simeq 2\alpha eI \cdot \frac{\sin^2(\omega\tau_d/2)}{(\omega\tau_d/2)^2} \quad (2.10)$$

例えば、典型的な半導体 p-n 接合で逆バイアスの場合は (2.10) 式が適用でき、高周波領域にならない限りノイズパワーは $N_I(f) \simeq 2\alpha eI$ と表せる。すなわち、ショットノイズは白色雑音として近似できる。

なお、この章と 3.3.2 は東京大学・金田氏の修士論文を参照した。

2.3.3 一般的なノイズ評価の表式

以上で述べたジョンソンノイズとショットノイズを組み合わせることで信号処理回路のノイズの評価は、Si 半導体での X 線を検出したときの場合に換算して、一般的に次のように書かれる。

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

ここで、 R_P はバイアス抵抗、 $\tau_s(\mu s)$ はシェーピングタイム、 $g_m(nS)$ はプリアンプ内の初段 FET の特性を示す量、 $C_{in}^2(pF)$ はプリアンプへの入力容量、 $I_n(nA)$ は半導体検出器の暗電流である。 $\delta_{他}^2$ は先に述べた二つ以外の要因によるノイズである。ここで I_n 以外の項はプリアンプの性能でほぼ決まり、 $f(C_{in})$ という容量曲線で与えられるので、プリアンプにいろいろな値のコンデンサーをつけて測定することができる。

2.3.4 シンチレータとアバランシェフォトダオードの場合

シンチレータとアバランシェフォトダオード (APD) を組み合わせた検出器のエネルギー分解能は以下の式で表される。

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = (\delta_{sc})^2 + 2.355^2 F/N + \left(\delta_{noise} \cdot \frac{1}{E_{gap}} \cdot \frac{10^3}{N_{ph} Q G} \cdot \frac{1}{E}\right)^2 \quad (2.12)$$

ここで E は線のエネルギー (keV)、 N は光電子の数であり、 F は APD の増幅の揺らぎによる過剰なノイズファクター、 δ_{sc} はシンチレータの特性によるエネルギー分解能 (%)、 δ_{noise} は電気雑音 (keV)、 $E_{gap} = 3.65(eV)$ はシリコンのエネルギーギャップ、 $N_{ph} = 9.8$ は 1keV 当たりの BGO のシンチレータの光子数、 $Q = 0.8$ は APD の量子効率、 G は APD のゲインを表す。また、ノイズがエネルギースペクトルに現れる上限を threshold といい、 $E_{th} \sim 3\delta_{noise} \cdot \frac{10^3}{E_{gap} N_{ph} Q G}$ と表される。

2.4 NeXT 衛星とコンプトンカメラとアクティブシールド

X 線天文学において日本は 1979 年の「はくちょう」以来、「てんま」、「ぎんが」、「あすか」と X 線観測衛星を用いて重要な役割を担ってきた。そして 2005 年に打ち上げ予定の Astro-E2 に続く日本で 6 番目の X 線天文衛星として NeXT の打ち上げが 2011 年頃を目標とされている。

その加速機構を調べ、非熱的な宇宙像に迫ることである。このような非熱的な宇宙は、熱的放射の影響が次第に薄れていく硬 X 線で初めて姿を表すと考えられる。しかしながら、従来の衛星では 10keV を超える硬 X 線の観測が難しく、未だ精度の良い観測は十分に行われていない。NeXT 衛星は 80keV までの硬 X 線領域において、世界で初めて撮像観測を行うとともに、数 100keV の 線領域を過去にない精度で観測することを目標としている。

NeXT 衛星には、高感度軟 線検出器 (Soft Gamma-ray Detector: SGD) を搭載する予定である。この検出器は、高いエネルギー分解能を持つシリコンやテルル化カドミウム半導体の撮像検出器を多層に積み重ねた半導体多層コンプトンカメラを中心としたものである。これを Astro-E2 衛星の HXD で実現した狭い視野を持つ BGO の井戸形シールドとを組み合わせることで、「狭い視野を持つコンプトンカメラ」という、これまでにない概念に基づく検出器を実現する。多層に積んだ薄い検出器を用い、コンプトン運動学を応用することで、これまでの軟 線検出器の感度向上の最後の壁となっていたアクティベーションによるバックグラウンドを大幅に低減することが可能である。BGO は単位体積当たりの阻止能が非常に高く、その信号の読み出しには従来の PMT ではなく APD を用いることで、検出器の小型化、軽量化が可能となり検出器設計の自由度が広がる。また、量子効率が上がるために threshold を下げることができる。SGD では BGO のアクティブシールドの中にもカメラを入れてさらに感度を高める。

2.5 研究目的

APD は近年 線検出において従来の PD や 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 での読みだしを行ない実用性を検証するものである。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。その際 BGO につける APD の数や大きさを変えて検出できる光量が変化するのかどうかを検証した。また APD に 線、陽子を照射して放射線耐性を調べ、宇宙利用が可能であるかどうかを検証した。

第3章 線、proton照射による劣化の 影響の検証

3.1 実験目的

線検出器は人工衛星に搭載される。上空において、検出器に使用される APD は宇宙線によって放射線劣化をおこす。その放射線劣化が検出器の性能にどのような影響を及ぼすのかを実際に 線、proton を照射して調べた。上空での Si の年間の吸収線量は 0.5krad なので五年間の観測を想定し、さらに安全 factor を 4 倍として 線、proton とも 10krad を APD に照射した。

3.2 放射線照射実験

3.2.1 放射線損傷について

放射線損傷による暗電流の増加は損傷によって禁制帯中にエネルギーレベルが形成され、それが暗電流の generation center として働くためと考えられる。

表面損傷

シリコンの表面は空気中では必ずシリコン酸化膜 (SiO_2) で覆われる。線が入射するとシリコン酸化膜中の電子が伝導帯まで励起され、シリコン酸化膜とシリコンの間、つまりシリコン表面で結合することにより新たなエネルギーレベルが作られ暗電流の増加につながる。

バルク損傷

バルクの損傷は結晶格子の原子が放射線との相互作用により力を受けて本来の位置から移動して原子の欠けた欠陥や格子間原子の状態を形成することによる結晶の乱れである。これを displacement damage という。その結果トラップレベルや再結合中心をつくり、その結果として暗電流の増加、信号荷電トラップによるパルス波高の低下等が主な損傷による影響として現れる。

3.2.2 照射方法

線照射方法

この照射実験は 11 月 13 日に広島大学大学院工学研究科放射線総合実験室で行った。図 3.1 のように台の真中にある筒の中に地下から 線源である ^{60}Co が上がってきて照射を

付の式に代入した。目標にある位置の幅の半分、すなわち 0.5mm 用と 10mm 用の APD が入っていて筒から 60cm の位置に置いた。線源の強度は 71TBq(2004 年 11 月 13 日現在) で照射時間は 3868 秒、約 10krad 照射した。



図 3.1: 線照射現場

線照射量の計算

線照射量を以下のように簡単に計算した。図 3.2 のような状況を想定して計算を行った。線は図の Si 素子の垂直方向に対して 60° の向きで入射するとした。 S は Si 素子の面積、 D はその厚さである。 S_{eff} 、 d_{eff} はそれぞれ有効面積、厚さである。

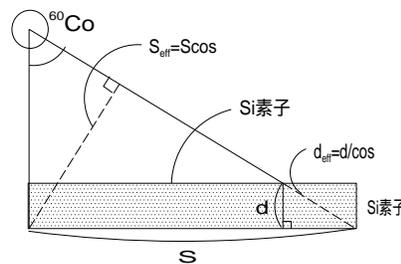


図 3.2:

次の式は APD のシリコン素子に入射した 線の数 N である。

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{L}{4\pi D^2} \cdot S_{eff} \cdot t \\
 &= 7.59 \times 10^{11} (\text{個})
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

$$L = 71(Tc/s)$$

$$\begin{aligned}
S_{eff} &= 1.25 \times 10^{-5} (m^2) \\
t &= 3868 (s)
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

L は線源である ^{60}Co の 1173(keV) の強度、 D は線源から APD までの距離、 S は APD の線源からの視線方向の面積、 t は照射時間をそれぞれ示す。

次に APD のシリコン素子に入射した 線の数 N から、シリコン素子が受けたトータルのエネルギーの量 E は以下の式のようにになる。

$$\begin{aligned}
E &= N(1 - e^{-\rho\kappa d_{eff}}) \times 1.173 \times 10^6 \\
&= 5.064 \times 10^{17} (eV)
\end{aligned}
\tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
\rho &= 2330 (kg/m^3) \\
\kappa &= 5.9 \times 10^{-3} (m^2/kg) \\
d_{eff} &= 600 (\mu m)
\end{aligned}
\tag{3.4}$$

ρ は Si の密度、 κ は Si のコンプトン散乱と光電吸収の反応係数を示す。そして $e^{-\rho\kappa d}$ は線が Si を透過する確率であるから、 $1 - e^{-\rho\kappa d}$ は線が、Si と反応してエネルギーを落す確率となる。

以下に吸収線量 $E/m[krad]$ を示す。

$$\begin{aligned}
\frac{E}{m} &= 4.18 \times 10^{20} (eV/kg) \\
&= 6.69 (krad)
\end{aligned}
\tag{3.5}$$

$$m = 1.75 \times 10^{-5} (kg)$$

m はシリコン素子の質量である。よって、ほぼ 10krad の線を当てていることになる。

proton 照射方法

この実験は 12 月 8 日、千葉の放射線医学総合研究所で JAXA の高島さんの協力を得て行った。図 3.3、図 3.4 のように、右側の APD を入れた箱に向かって左側の窓から proton を照射した。APD は新品の 5mm のものと線を照射した 10mm のものである。エネルギーが 350MeV の proton 約 3×10^{10} 個を、約 6000 秒照射した。ここでも 10krad 照射した。proton は線とは違い、狙いを定めて照射することができる。

proton 照射量の計算

照射した proton の数は以下のように計算する。

まず proton 一個が入射したときに物質中に落すエネルギー E を計算する。



図 3.3: proton 照射現場その一

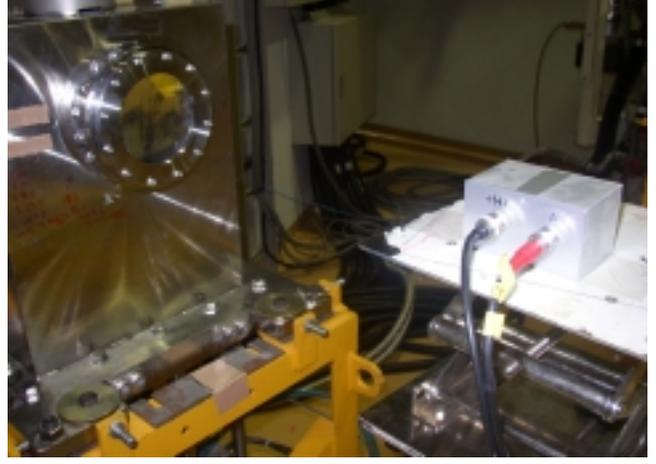


図 3.4: proton 照射現場その二 (左図 3.3 の拡大)

$$\begin{aligned}
 E &= \left| -\frac{dE}{dx} \cdot \rho \cdot d \right| \\
 &= 3.495 \times 10^5 (\text{eV})
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{dE}{dx} &= -0.5 (\text{MeV} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}) \\
 \rho &= 2330 (\text{kg} / \text{m}^3) \\
 d &= 3.0 \times 10^{-4} (\text{m})
 \end{aligned}$$

ここで、 $-\frac{dE}{dx}$ は吸収物質中 (Si) での荷電粒子の阻止能、 ρ は Si の密度、 d は Si の厚さを示す。阻止能とは物質中における飛跡の単位長さ当たりのエネルギー損失で定義されている。

よって proton 一個が入射した場合の吸収線量 E/m は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 \frac{E}{m} &= 1.997 \times 10^{10} (\text{eV} / \text{keV}) \\
 &= 3.2 \times 10^{-9} (\text{J} / \text{kg}) \\
 &= 3.2 \times 10^{-7} (\text{rad}) \\
 &= 3.2 \times 10^{-10} (\text{krad})
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

$$m = 1.75 \times 10^{-5} (\text{keV})$$

m は照射される Si の質量である。

式 (3.2) は proton 一個当たりの Si の吸収線量なので、10krad だと以下のようなわけである。

$$\begin{aligned}
 \frac{10(\text{krad})}{3.2 \times 10^{-10}(\text{krad})} &= 3.125 \times 10^{10} (\text{個}) \\
 &\simeq 3 \times 10^{10} (\text{個})
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

3.3.1 照射前後の暗電流

APD に逆バイアスで電圧を印加して 30V から 360V の間で常温で暗電流の測定を行った。測定に用いた回路系ブロックを図 3.5 に示す。使用したモジュールの詳細を表 3.1 に示す。

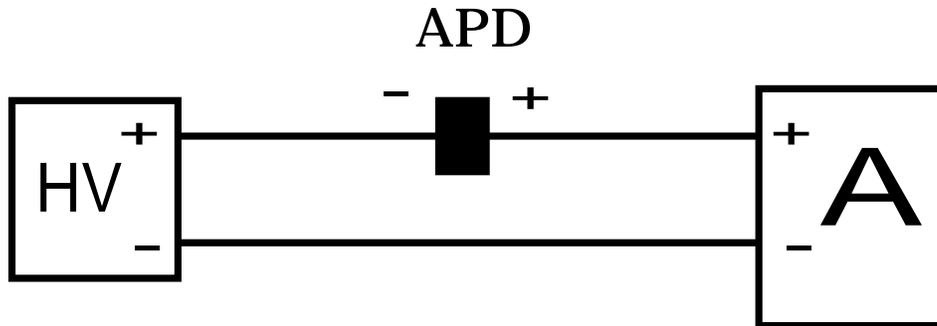


図 3.5: 暗電流測定のセットアップ

表 3.1: 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
電流計	Keithley Instruments 社 Model6517
APD(5mm)	浜松ホトニクス S8664-55
APD(10mm)	浜松ホトニクス S8664-1010 3261

測定結果

proton 照射中の暗電流のデータを図 3.6 に示す。照射中は 5mm と 10mm の APD を並列につないでいる。図 3.6 を見ると proton が APD に入射した瞬間電流が増し、さらに照射中も劣化が進み暗電流が大きくなっていく様子がわかる。図 3.7 に 線照射前後の 5mm と 10mm の APD の暗電流を横軸時間で示す。時間 0 の点が照射前のデータである。同じように proton 照射前後の 5mm と 10mm の APD の暗電流を図 3.8 に示す。これも時間 0 の点が照射前のデータである。それぞれの照射前と直後の具体的な値を表 3.2 に示す。5mm と 10mm の APD は照射前は、暗電流がほぼ同じであったのに対し、照射後は 10mm の方が約 4 倍多くなっている。これには受光面の面積の違いが関係している、つまり受光面が 5mm と比べ 4 倍の 10mm の APD の方が 線照射による劣化の暗電流に対する影響が大きかったと思われる。proton 照射でも同じようなことが言えるだろう。それぞれの図において値がばらついているのはおそらく外気温度の違いの影響を受けているためである。そして暗電流の値は照射後時間がたつとある程度下がるのだが、今回のデータではそれは顕著には見られなかった。

表 3.2: 測定結果 : 300V での照射前後の暗電流 (nA)

APD	線照射		proton 照射	
	前	直後	前	直後
5mm	2.62	11.81	1.36	26.7
10mm	1.45	43.96	32.06	92.14

線、proton 照射前と照射直後の暗電流の電圧依存性を図 3.9、図 3.10 に示す。proton を照射した 10mm の APD は 線を照射したものを流用したので、proton を照射する前から暗電流が大きい。これらの増加は、シリコンストリップセンサーなどで見られる放射線劣化と同程度である。(広島大学 増田修論 2002 年参照)

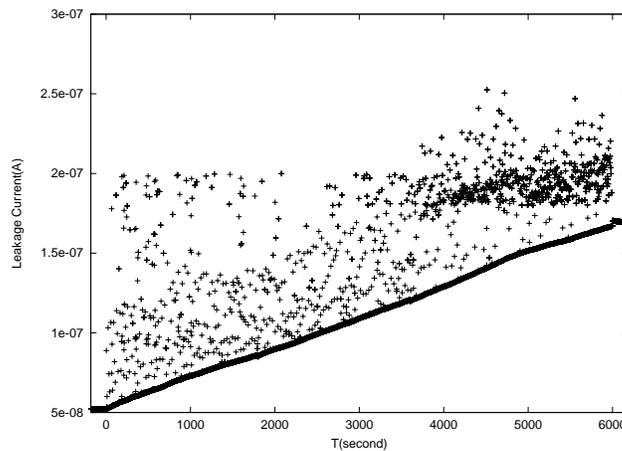


図 3.6: proton 照射中の暗電流 (5mm と 10mm の APD の和) : 横軸 : 時間 (second) : 縦軸 : 暗電流 (A)

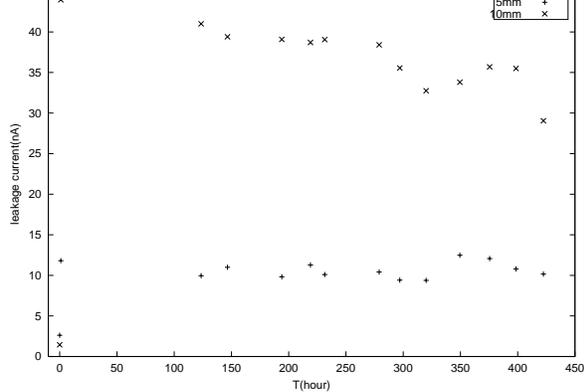


図 3.7: 300V での 線照射前後の暗電流 : 横軸 : 時間 (hour)

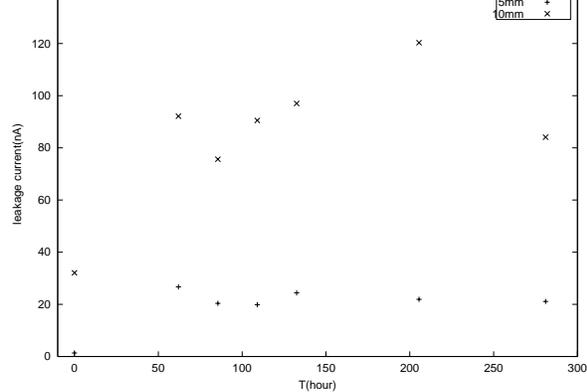


図 3.8: 300V での proton 照射前後の暗電流 : 横軸 : 時間 (hour)

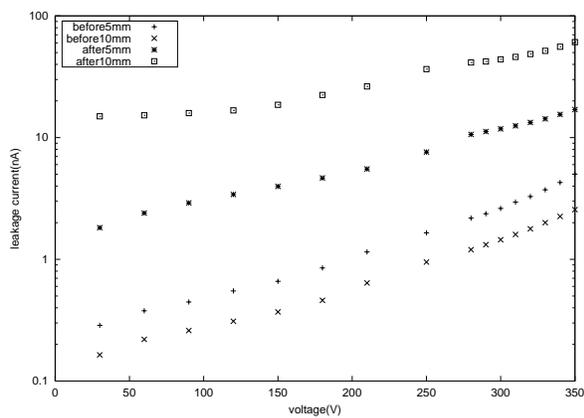


図 3.9: 線照射前後での暗電流

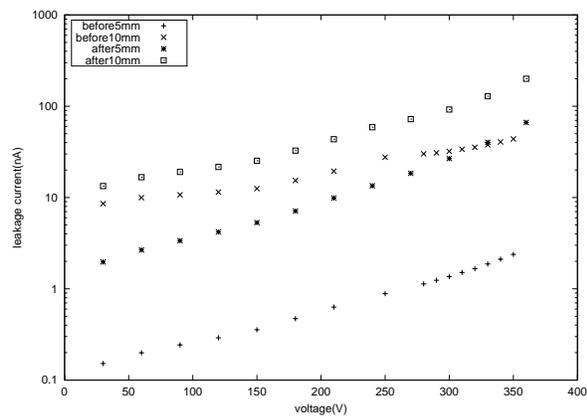


図 3.10: proton 照射前後での暗電流

半導体の暗電流は温度に対する依存性が高い。常温では7.5度で約2倍変化するので、常温から0度まで冷却すると一桁暗電流は小さくなることになる。恒温槽を用いて暗電流の値が温度によってどのように変化するかを実験により調べた。

測定は-30度から20度まで5度/1時間ずつ温度を変化させて行った。30V、150V、300V、360Vについての結果をそれぞれ図3.12、3.13、3.14、3.15に示す。

APDを恒温槽の中に入れて暗電流を測定した。以下にそのセットアップを示す。恒温槽の中と外をつなぐ穴は実際は一つであり、ケーブルはその穴を通っている。測定に用いたAPDはそれぞれ、新品(5mm)、線照射後(5mm)、proton照射後(5mm)、線とproton照射後(10mm)である。

回路のセットアップ

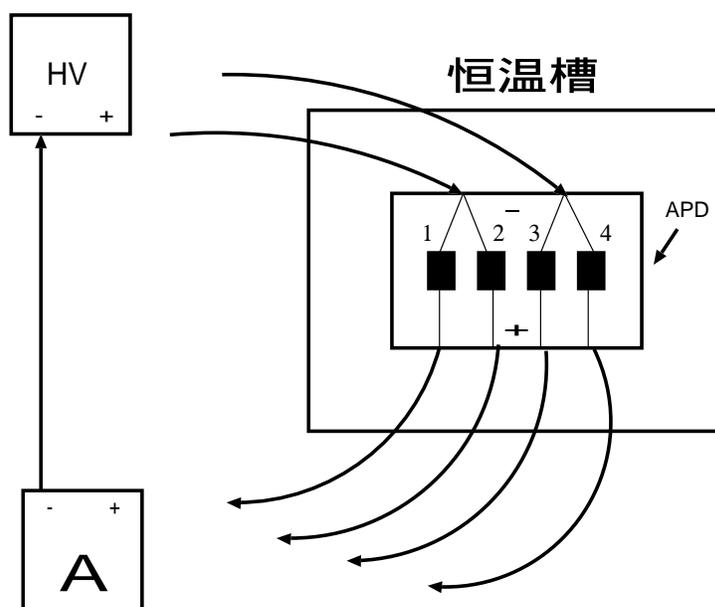


図 3.11: 恒温槽を用いた暗電流の測定のセットアップ

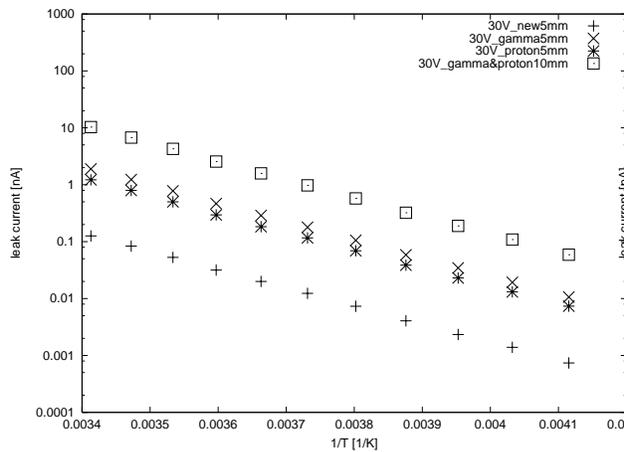


図 3.12: 照射後 30V での暗電流

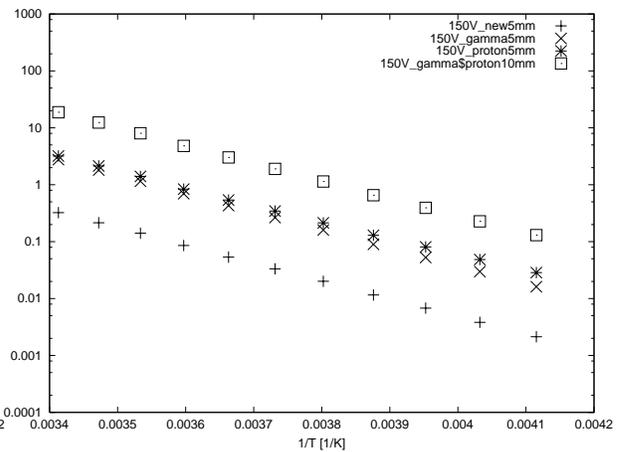


図 3.13: 照射後 150V での暗電流

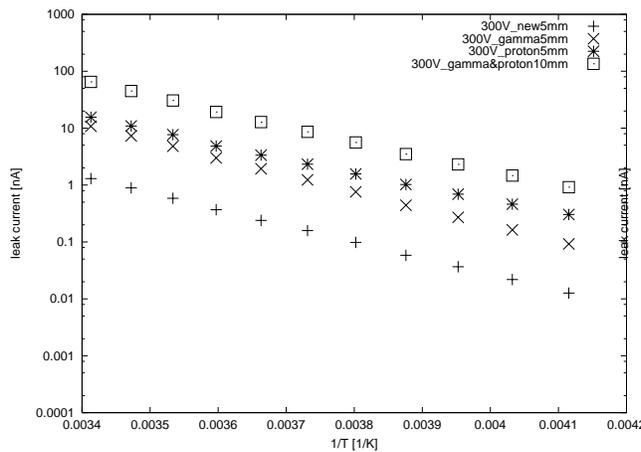


図 3.14: 照射後 300V での暗電流

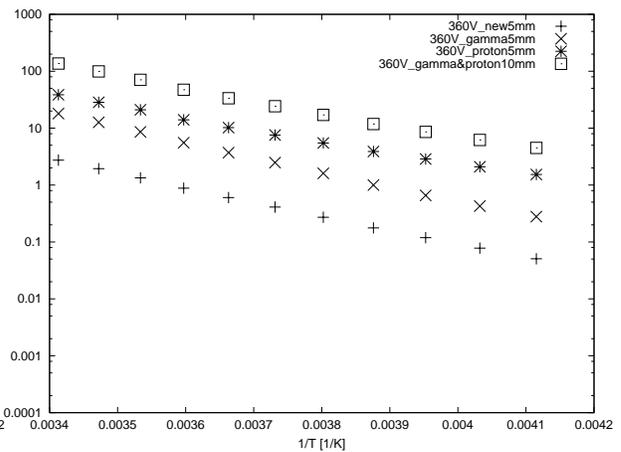


図 3.15: 照射後 360V での暗電流

電流の温度依存性は $\exp(-E/kT)$ という形で表されるので横軸を $1/T$ ，縦軸を対数で表示すると、そのとき傾きは $-E/k$ になる。

通常のダイオードでは、傾きは大きく分けて 3 種類存在するようであり (金田 1994)、定量的にはそれぞれ

1. $-E_g$
2. $-E_g/2$ の傾き
3. その中間の働き

に対応している (E_g は禁止帯エネルギーギャップ)。

よって、傾き $-E/k$ の E は電流の源である電子の励起エネルギーに関係する。グラフから傾きを求め、 E を求めた。

表 3.3: 傾き $-E/k$ と E

	電圧 (V)	新品 (5mm)	線 (5mm)	proton(5mm)	線と proton(10mm)
傾き	30	3125	3226	3125	3200
	360	2500	2564	2000	2193
E (eV)	30	0.26923	0.27799	0.26923	0.27575
	360	0.21581	0.22095	0.17235	0.18898

表を見ると、今回の結果から得られた傾きは、一般的な値 (例えば 0 度での暗電流が 0.9nA の PIN ダイオードでは約 0.85eV) と比べると、緩やかである。その原因は APD が内部増幅機能を持つためだと考えられる。つまり、増幅機能のない場合、低温になるにつれ、暗電流の値は小さくなってゆく。しかし APD の場合、低温にすると増幅率が大きくなってゆくの、結果として増幅機能を持たないものと比べると傾きは緩やかになったと考えられる。

-30 度での増幅率は 20 度に比べて約 4 倍大きいので (Nakamoto et al.2005)、上の傾きの 4 倍が実際の E の値に相当すると思われる。表を見ると、30V のときは、照射前後とも $E \sim 1\text{eV}$ となり、Si のギャップに相当するので熱励起による暗電流が見えていると思われるが、360V の E は新品と線照射 $\sim 0.9\text{eV}$ 、proton 照射で $\sim 0.7\text{eV}$ となっている。よって、これらは Si のギャップの中間のところにできた不純物トラップ準位に関係すると思われるが、proton の場合はそのエネルギーが低くなっている。

3.3.3 照射前後の分解能

放射線照射前後に分解能を測定し照射の分解能に及ぼす影響を調べた。APD に 5mm 角の BGO をつけて線を入射させ、APD からの信号を Pre Amp 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 ADC でデジタル信号に変換して MCA で値を取得した。APD と BGO の接着には光学グリース (応用光研工業株式会社 6262A) を用いた。測定に用いた回路系ブロックを図 3.16 に、モジュールの詳細を表 3.4 に示す。

表 3.4: 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
Pre Amp	
Shaping Amp	ORTEC MODEL 571
ADC	Labo 2201A

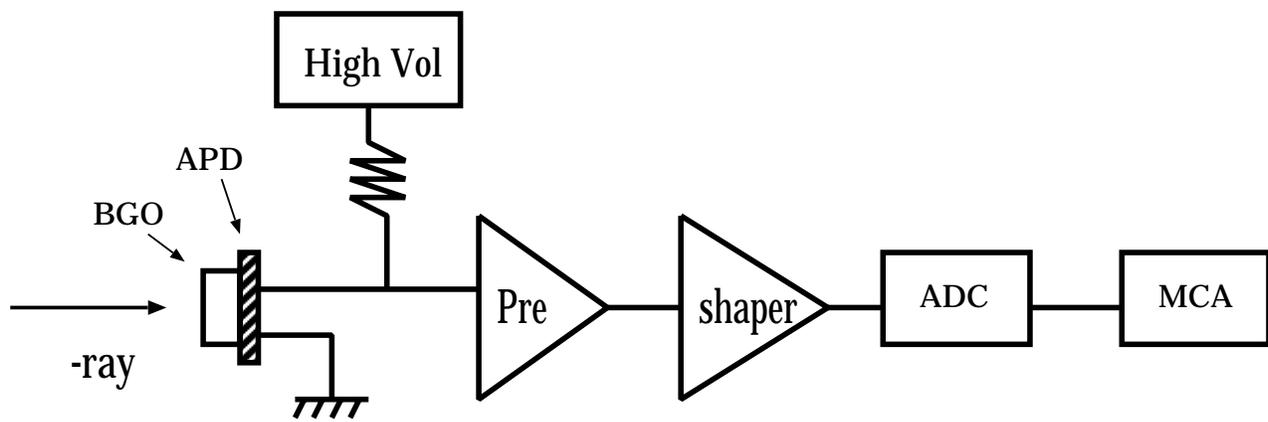


図 3.16: 分解能測定 : ブロック図

測定結果

線源には ^{137}Cs の 662keV を用い、バイアス電圧は 290V ~ 350V まで 10V 刻みで変化させて行った。測定は 3 回づつ行いその平均値を用いて解析を行った。-30 度の下での MCA によるスペクトルを図 3.17、3.18、3.19、3.20、3.21、3.22、3.23、3.24、3.25、3.26、3.27、3.28、測定値を表 3.5、3.6、3.7 に示す。

線照射前後は分解能の変化は APD5mm で $\pm 0.5\%$ 以内に、APD10mm で $\pm 0.78\%$ 以内に、proton 照射前後は APD5mm で $\pm 0.42\%$ 以内に収まっている。また、バイアス電圧ごとに照射前後の分解能の変化をみても、照射によるバイアス電圧に対する影響も見られない。全体的には放射線照射による、エネルギー分解能への影響はなかったと言える。

表 3.5: 測定結果 : 線照射前後の分解能 (5mm)

電圧 (V)	分解能 (%)	
	照射前	照射後
250	6.58	6.76
280	6.52	6.50
290	6.70	6.69
300	6.74	6.58
310	6.50	6.66
320	6.64	6.78
330	6.60	6.77
340	6.90	6.87
350	7.62	7.12

表 3.6: 測定結果 : 線照射前後の分解能 (10mm)

電圧 (V)	分解能 (%)	
	照射前	照射後
250	7.67	7.64
280	6.48	6.67
290	6.40	6.33
300	6.19	6.17
310	6.13	6.28
320	6.18	6.16
330	6.21	6.05
340	6.24	6.18
350	6.72	7.5

表 3.7: 測定結果 : proton 照射前後の分解能 (5mm)

電圧 (V)	分解能 (%)	
	照射前	照射後
250	6.81	6.83
280	6.83	6.75
300	6.86	7.18
310	6.40	6.82
320	6.91	6.75
330	6.88	6.79
340	6.66	6.81
350	6.79	6.88

ここでは測定できるエネルギーの下限である threshold に対する proton 照射の影響を調べた。セットアップは分解能の測定と同じ MCA を用いたもので、図 3.16 に示す通りである。実験に用いた APD は新品の 5mm と proton を照射した 5mm の 2 つで、両者を比較する形で行った。本来は同一の APD で proton 照射前後で調べるのが良いが、都合により行えなかったのがこのような形になったが、一般的に新品 5mm の APD の特性は良く揃っているので問題はないと思われる。

測定結果

線源には低エネルギーの線を出す ^{109}Cd の 22.2keV と 88keV を使い、バイアス電圧を 290V ~ 360V まで 10V 刻みで変えて調べた。-30 度でのスペクトルを図 3.30、3.31、3.32、3.33、測定値を表 3.8 と図 3.29 に示す。threshold の値は新品の APD は 8.61keV ~ 15.52keV であった。新品の APD の threshold の値は電圧が上がるほど低くなっている。これは電圧が高いほど S/N 比が良くなり、より低エネルギー側の検出が可能になるということである。一方、proton を照射した APD では 31.9keV ~ 39.75keV と threshold は高くなっている。変化の平均値は +24.03(keV) であった。図 3.30 と図 3.31、図 3.32 と図 3.33 をそれぞれ比較すると、照射前はどちらも 22.2keV のピークが見えているのに対し、照射後はどちらも 22.2keV のピークは見えない、つまり threshold の方が高くなってしまっている。そして proton 照射後は電圧を上げて、あまり threshold が下がらない。

表 3.8: 測定結果 : proton 照射前後の threshold

電圧 (V)	threshold(keV)	
	新品	照射後
290	15.52	35.2
300	12.96	32.4
310	11.73	36.4
320	11.08	34.5
330	10.3	39.75
340	9.24	32.8
350	8.62	37.4
357	8.61	31.9

ここでは理論式から proton 照射前後について、バイアス電圧 300V 時の threshold の理論値を簡単に算出した。

$$E_{th} \sim 3\delta_{noise} \cdot \frac{10^3}{E_{gap}N_{ph}QG}$$

$$\delta_{noise} = \sqrt{\delta_{noise,I}^2 + \delta_{noise,C}^2}$$

$$\delta_{noise,I}^2 = 0.65I_n\tau_s$$

$$\delta_{noise,C}^2 = (2.307)^2$$

上の式について、詳しくは 2.3.3、2.3.4 に載せてある。

バイアス電圧 300V 時は $G = 38.375$ 、300V 時の APD の容量は 90pF であるので、それに近い 100pF のコンデンサをプリアンプにつけて測定したノイズを $\delta_{noise,C}^2$ とした。代入する値で、proton 照射前後で異なるのは I_n のみである。 I_n は図 3.14 のデータを用いた。

- proton 照射前 ($I_n = 0.0127(nA)$ 、 -30 度のもとで 300V 印加時)

$$E_{th,before} \sim 3 \times \sqrt{(0.65 \times 0.0127 \times 2) + (2.307)^2} \cdot \frac{10^3}{3.65 \times 9.8 \times 0.8 \times 38.375}$$

$$= 6.31(keV)$$

- proton 照射後 ($I_n = 0.3035(nA)$ 、 -30 度のもとで 300V 印加時)

$$E_{th,after} \sim 3 \times \sqrt{(0.65 \times 0.3035 \times 2) + (2.307)^2} \cdot \frac{10^3}{3.65 \times 9.8 \times 0.8 \times 38.375}$$

$$= 6.53(keV)$$

よって、実験値に比べて低い値となって合わない。考えられる原因として、暗電流の式に通常のフォトダイオードのものを用いていることである。実際は、APD はその増幅機能をもつために、電子数に大きなゆらぎが生ずることが知られており、光信号に対して APD はフォトダイオードの約 30 倍の出力電子数のゆらぎを持つ。これを考慮し $\delta_{noise,I}^2$ を約 30 倍すると、proton 照射前後で

$$E_{th,before} \sim 6.59(keV)$$

$$E_{th,after} \sim 11.32(keV)$$

となる。この計算結果からすると、照射後の $E_{th,after}$ の値は、暗電流の増加により大きくなることが予想される。ただし、やはり実験値に比べ $E_{th,before}$ 、 $E_{th,after}$ 共々低い。 $E_{th,before}$ が実験値になるためには $\delta_{noise,I}^2$ を 1041 倍、 $E_{th,after}$ では 343 倍せねばならない。実験結果ではさらに別のノイズが影響しているようである。

まとめ

測定結果より放射線劣化による暗電流の増加が見られた。しかし分解能はあまり変化しなかったので暗電流の増加については問題はなかったと考えられる。proton を照射したとき threshold は 8keV から 35keV に上昇した。しかしこの結果には外乱のノイズが影響している事も考えられ、今後再測定していく必要がある。

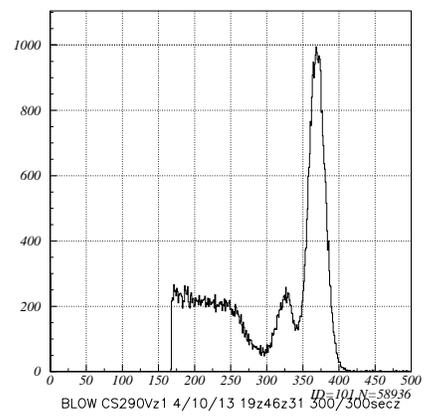
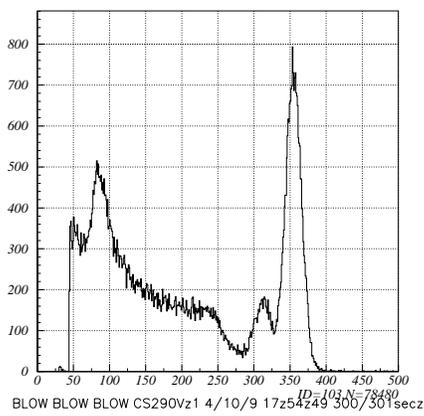


図 3.17: APD(5mm): 線照射前 290V での ^{137}Cs のスペクトル

図 3.18: APD(5mm): 線照射後 290V での ^{137}Cs のスペクトル

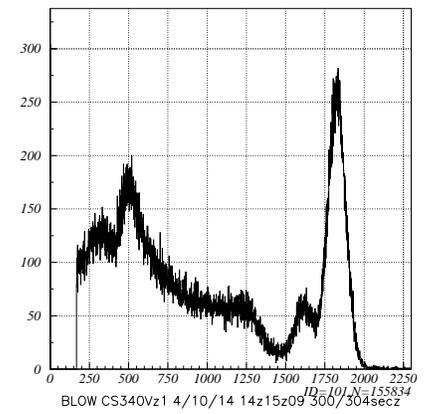
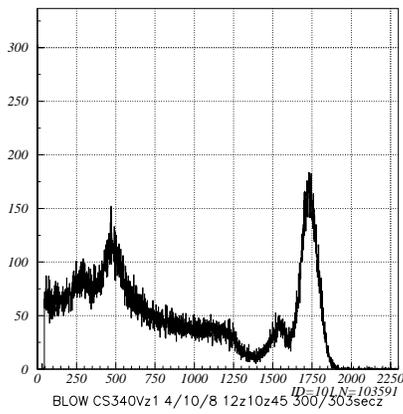


図 3.19: APD(5mm): 線照射前 340V での ^{137}Cs のスペクトル

図 3.20: APD(5mm): 線照射後 340V での ^{137}Cs のスペクトル

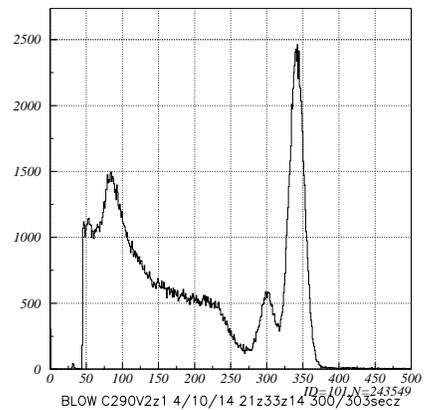
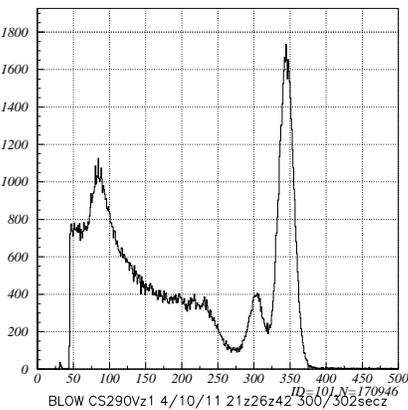


図 3.21: APD(10mm): 線照射前 290V での ^{137}Cs のスペクトル

図 3.22: APD(10mm): 線照射後 290V での ^{137}Cs のスペクトル

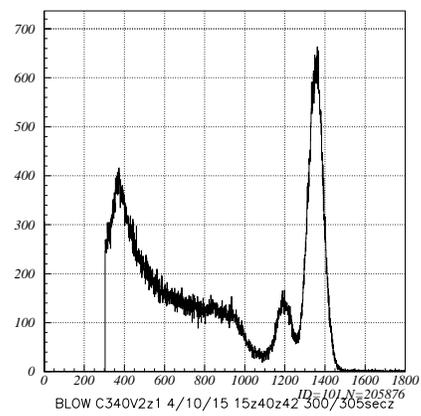
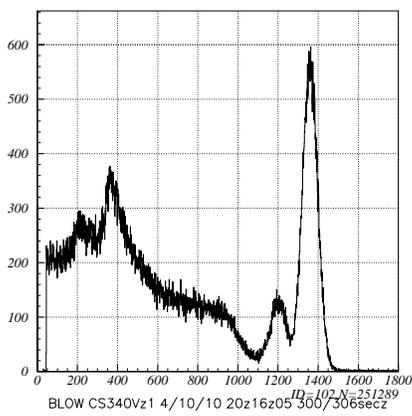


図 3.23: APD(10mm): 線照射前 340V での ^{137}Cs のスペクトル

図 3.24: APD(10mm): 線照射後 340V での ^{137}Cs のスペクトル

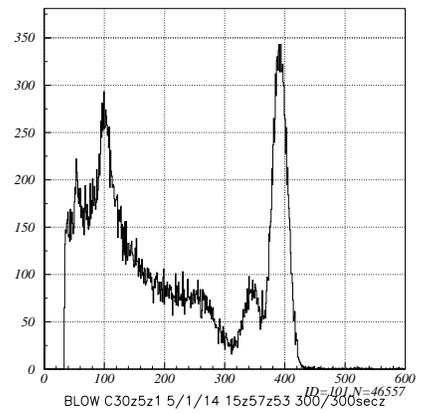
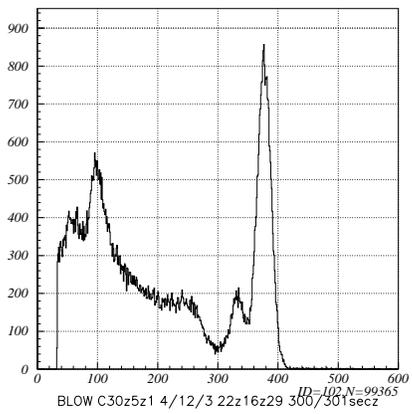


図 3.25: APD(5mm):proton 照射前 300V での ^{137}Cs のスペクトル

図 3.26: APD(5mm):proton 照射後 300V での ^{137}Cs のスペクトル

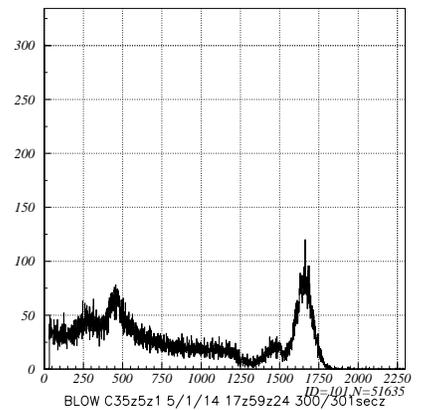
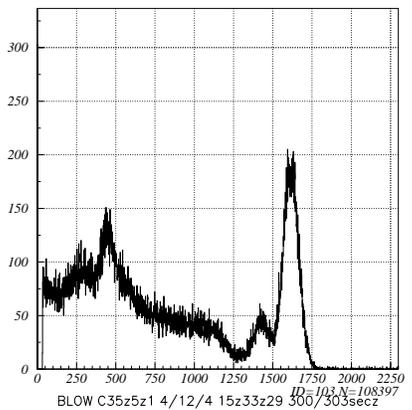


図 3.27: APD(5mm):proton 照射前 350V での ^{137}Cs のスペクトル

図 3.28: APD(5mm):proton 照射後 350V での ^{137}Cs のスペクトル

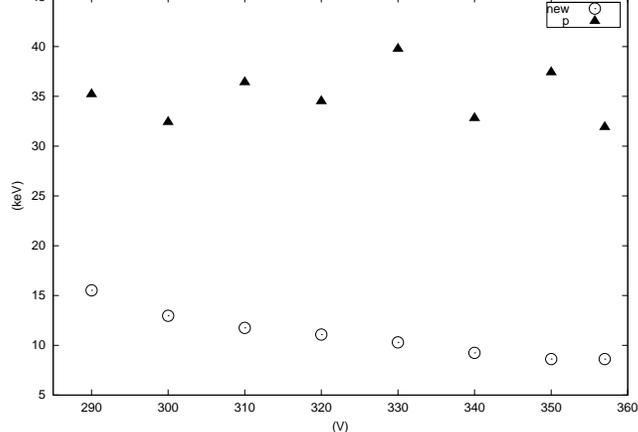


図 3.29: proton 照射前後の threshold : 横軸 : 電圧 (V) : 縦軸 : threshold (keV)

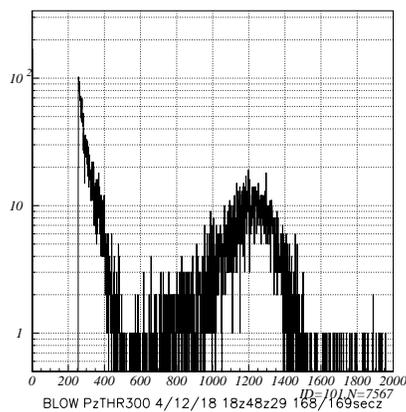
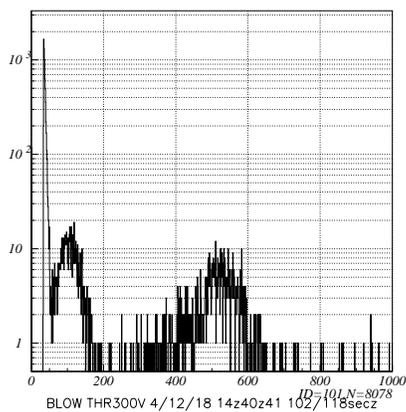


図 3.30: APD(5mm):proton 照射前 300V で 図 3.31: APD(5mm):proton 照射後 300V での ^{109}Cd のスペクトル

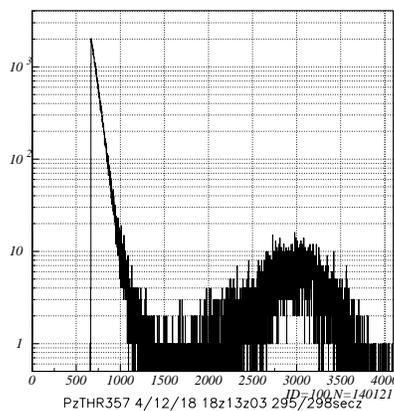
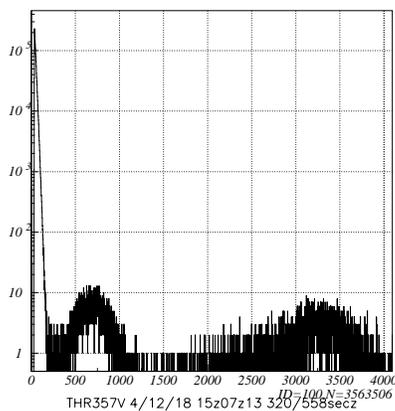


図 3.32: APD(5mm):proton 照射前 357V で 図 3.33: APD(5mm):proton 照射後 357V での ^{109}Cd のスペクトル

第4章 APD + BGO プレートでの線 検出

4.1 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バックグラウンド源となるものは、

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。

検出器の周りを囲むシールドによって、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、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、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 (1、2) にはアクティブシールドは必須条件である。SGD ではアクティブシールドの光検出部分に 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。本実験ではアクティブシールド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。

その検証のために以下の実験を行なう。

- BGO プレートの片側に装着する APD の数を変えて、光量と分解能を測定する
- BGO プレートと APD の装着に関する再現性の検証

4.2 実験セットアップ

APDとBGOのセットアップ

BGO プレートの片側に APD を装着する。APD が一つの場合 (1 channel) と三つの場合 (3 channel) で実験を行った (図 4.1)。BGO の APD をつける面以外の面はゴアテックス反射剤で覆った。BGO プレートに APD を装着する際、光学グリース (応用光研工業株式会社 6262A) を用いて接着した。APD の受光面は 5mm×5mm であり、BGO プレートの読み出し面全てを覆うことはできないので、APD をつけた部分以外はシンチレーション光の洩れを防ぐため、反射剤としてバルガータープで覆った。テープの巻き方を図 4.2、4.3 に示す。バルガータープを一重で覆っている所は、APD の受光面以外の部分に当たる所で、テープを重ね過ぎては APD の受光面と BGO の間にすき間が空いてしまい、光洩れの要因となるので、できるだけうすく巻いてある。

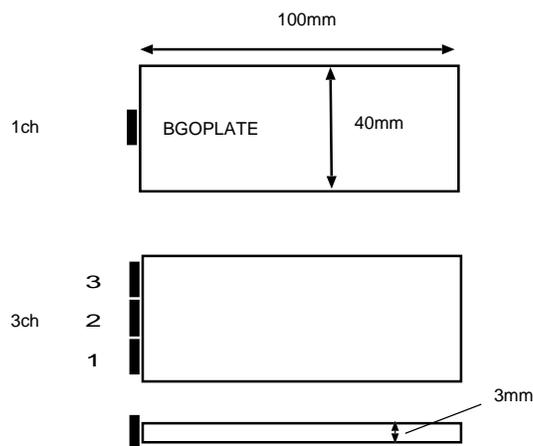


図 4.1: BGO プレートと装着した APD

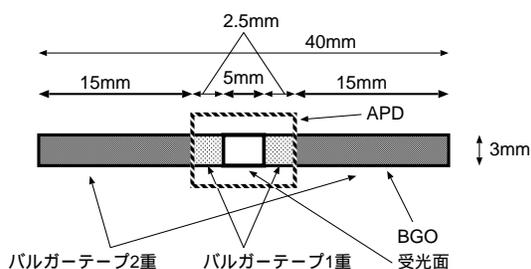


図 4.2: 1APD のバルガテープの巻き方

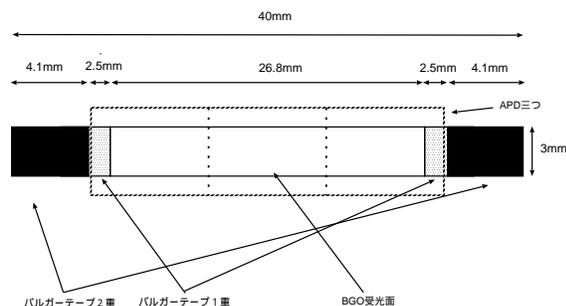


図 4.3: 3APD のバルガテープの巻き方

VME によるデータ処理回路のブロック図を図 4.5 に示す。モジュールの詳細は表 4.1 に示す。

APD から出力された信号は Pre Amp に入り、Shaping Amp が負入力専用のためプリアンプ出力を反転回路に通し、Shaping Amp(Shaping time:2 μ s) で整形され、Discr 回路へ入力する。この回路は、Discriminator の役割と、軽く Shaping Amp の役割を果たす。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、Discr 回路からの discr 信号を Level Adapter へ入力し、uni polar 出力を VME_ADC に入力する。ここまでの過程は 3ch 独立して行なわれる。Discr 回路 HU4715 の回路を図 4.4 に示す。

データ処理信号の生成は、Discr 回路から出力されたそれぞれの Trigger の or 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。

Shaping Amp からの信号は 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 4.6)。実際のタイミングチャートを図 4.7 に示す。

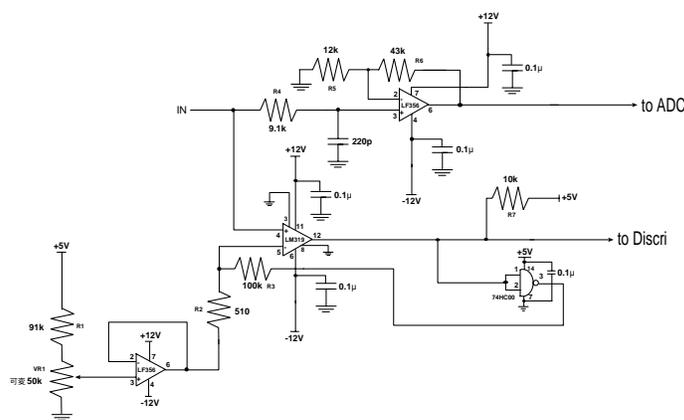


図 4.4: Discr 回路 HU4715 の回路図

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	浜松ホトニクス S8664-55
Pre Amp	クリアパルス株式会社 CP5102
Shaper	クリアパルス株式会社 CP2914
OR	LOGIC FAN_IN FAN_OUT
3ch 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

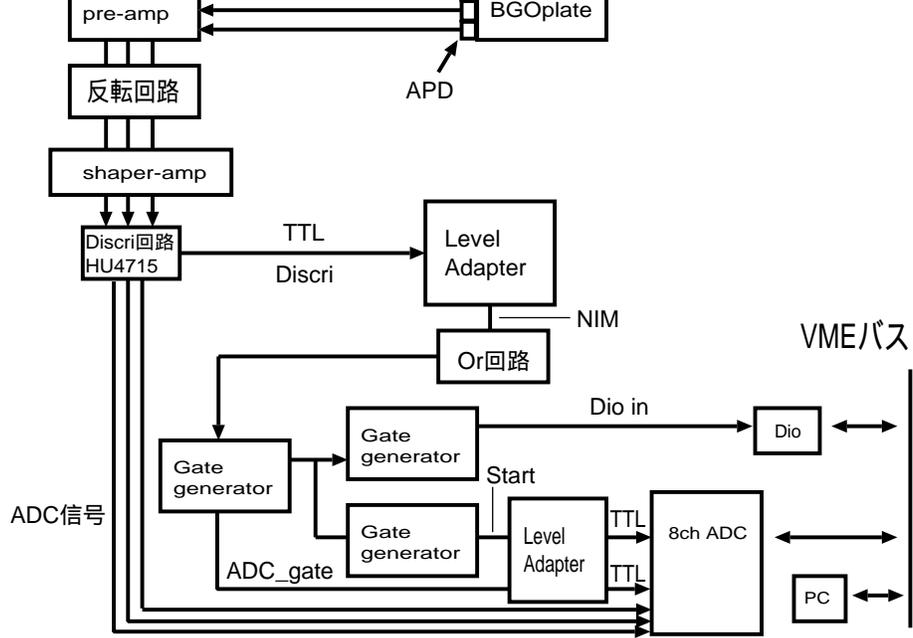


図 4.5: VME によるデータ処理回路のブロック図

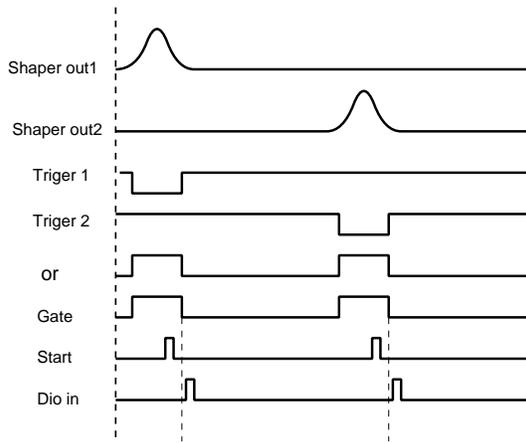


図 4.6: タイミングチャート

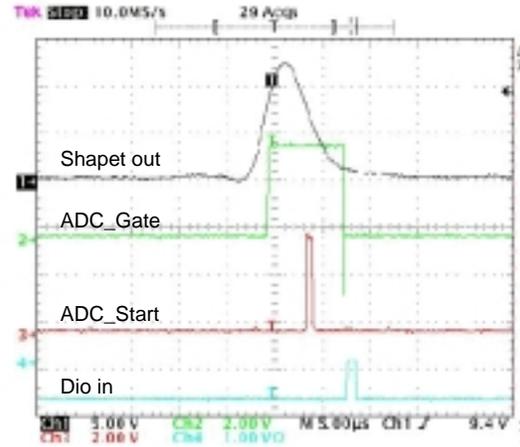


図 4.7: 実際の出力波形

4.3 小型BGOとBGO板の光量比較

5mm角の小型BGOとBGOプレートを用い、-30度、バイアス電圧290V、Shaper Gain MAX/2のもと、線源に ^{137}Cs の662keVを用いて測定を行い、光量の比較を行った。読み出しを行うAPDは同一のものを用いた。得られたスペクトルを図4.8、4.9に、ピークチャンネルの値を表4.2に示す。表4.2の値を見ると、小型BGOに比べ、BGOプレートでは光量が約0.236倍になってしまうことがわかる。アクティブシールドに用いられるBGOはプレート状である。そこで、BGOプレートの発する光を、いかに効率良く得るかが課題となる。

表 4.2: 二種類のBGO比較

ピークチャンネル	
BGOBLOCK	BGOPLATE
3375	795

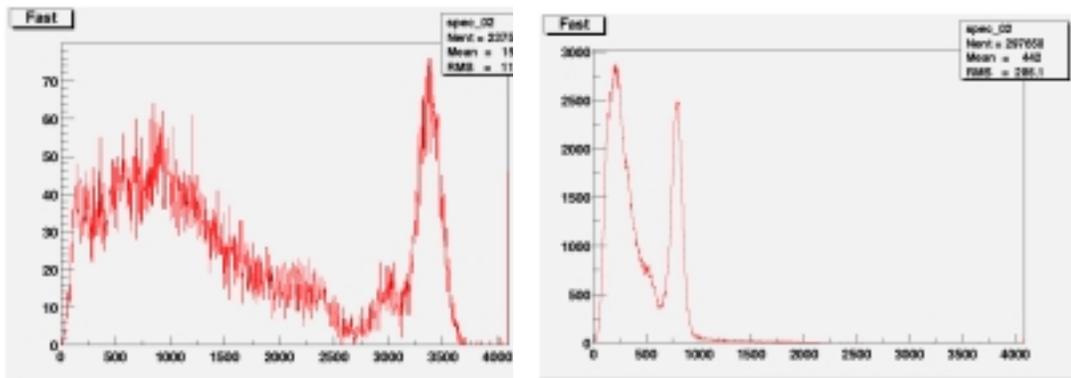


図 4.8: 小型BGO: 横軸チャンネル 図 4.9: BGOプレート: 横軸チャンネル

4.4 1APDと3APD読み出しの比較実験

ここでは、BGOプレートの光を読み出すAPDが、一つの場合(1ch)と三つの場合(3ch)での測定を、バイアス電圧290V、Shaperのgainはmax/2、-30度の下で行い、分解能、光量の比較を行った。1ch測定に用いたAPDは3ch測定時に真中に用いたものである。線源には ^{137}Cs の662keVを用いた。得られたスペクトルを図4.10、4.11に示す。

4.4.1 APD1chと3chとの光量比較

ここでは、BGOプレートの一つのAPDで読み出したときと、三つのAPDで読み出した場合について、APDが受ける光量を比較する。具体的には、3APD測定で三つ並べた

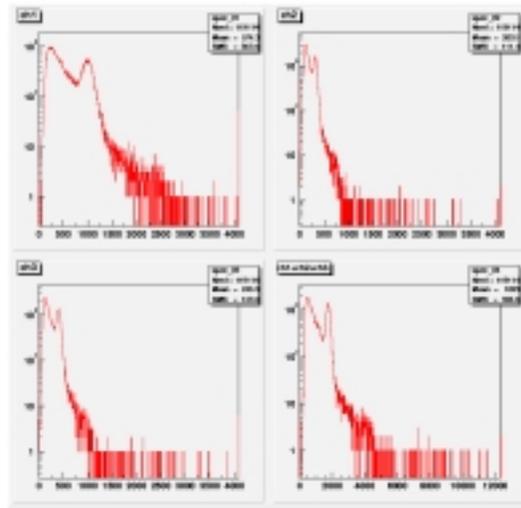
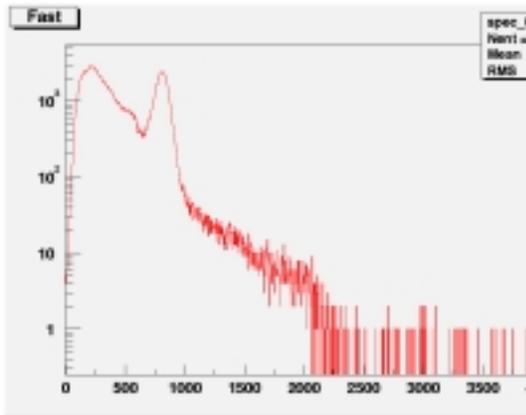


図 4.10: 1APD で測定したスペクトル: 横軸 channel
 図 4.11: 3APD で測定したスペクトル: 横軸 channel:ch1 と ch3 が両側、ch2 が真中、ch1+ch2+ch3 が三つの APD のパルスハイトの和

APD の内、真中においたものに対して、両側の二つの APD をつけたときと、外したときのスペクトルのピークの値を比べた。

表 4.3 にそれぞれのピークチャンネルを示す。

まず、一つの APD の光量について見ていく。表から真中につけた APD のピークは、1APD 測定では 807(ch)、3APD 測定では 327(ch) となった。よって、1APD での測定結果に対し、3APD での測定結果は 0.41 倍となった。これはエネルギー分解能が $\frac{1}{\sqrt{0.41}} = 1.56$ 倍になることを意味し、先ほどの結果と合う。

次に、三つの APD すべての光量について見ていきたいが、そのためには、事前に三つの APD の GAIN を測っておくべきであった。そこで、三つそれぞれにシンチレーション光が均等に入る、と考えるとすると、三つの APD のゲインを揃えれば、真中の APD と両端の二つの APD のピーク値が、同じになる。この真中の APD は先に述べたように、BGO に一つだけつけたときは 807ch であった。一方、APD を三つつけたときの同じ APD のピークは 327ch であるので、3ch トータルのピークの値は、327ch の三倍、つまり 981(ch) となり、1.22 倍ということになる。

表 4.3: 1ch と 3ch のピークチャンネル

線源	Peak ch			
	1ch	3ch		
		ch1	ch2	ch3
^{137}Cs 662keV	807	1023	327	413

その結果を表 4.4 に示す。ch1+ch2+ch3 は、同じタイミングで得られた 3ch 分の ch のパルス高さを GAIN をそろえて足し合わせて得られるスペクトルに対するエネルギー分解能を示す (*印)。1APD での結果 13.95 % と 3APD を合わせた結果 13.1 % を比較すると、ほぼ同じであった。3APD それぞれのエネルギー分解能の平均は 22.1 % で、1APD での結果に対して 1.58 倍となった。これは、APD を三つにした分、一つ一つで得られる光量が減少したためであろう。

表 4.4: 1ch、3ch 測定での分解能

電圧 (V)	分解能 (%)				
	1ch	3ch			
		ch1	ch2	ch3	ch1+ch2+ch3
290	13.95	20.6	24.2	21.5	13.1*

4.5 再現性の検証

一度 3ch で測定を行い、APD と BGO プレートを外し、再び同じセットアップで測定し、同じ結果が得られるかを検証した。その際、都合により図 4.12 に示すように、三つ用いた APD の並び順を変えて行った。

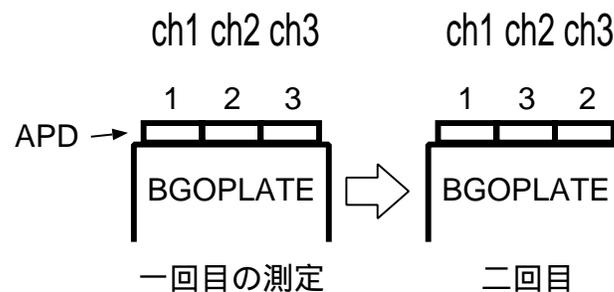


図 4.12: APD の並び順

4.5.1 エネルギー分解能

線源には ^{137}Cs の 662keV を用いた。セットアップは図 4.5 と同じで Shaper Gain は MAX/2、 -30 度の下で行った。

ch1 のピークチャンネルと分解能の値を、一回目と二回目と比較すると、同じような値が得られたと言える。一回目の ch2 と二回目の ch3 は、同じ APD で、BGO に接着した場所が違うのだが、同じような値が得られた。また、一回目の ch3 と二回目の ch2 も、同じ APD で、BGO に接着した場所が違うが同じような値が得られた。つまり、APD を並び

変化した影響はほとんどなく、特にエネルギーが低いチャンネルでの特性が結果に大きく現れている。この結果から、三つの APD にほぼ均等にシンチレーション光が入っていると考えられる。一回目と二回目の ch1+ch2+ch3 の分解能の変化は 0.9 % で大きな変化はなかった。得られたスペクトルを図 4.13、4.14 に示す。

表 4.5: エネルギー分解能

	APD の ch	Peak(ch)	σ (ch)	分解能 (%)
1 回目	ch1	1015	92.3	21.4
	ch2	405	35.4	20.6
	ch3	348	36.7	24.8
	ch1+ch2+ch3	-	-	12.2*
2 回目	ch1	1023	89.6	20.6
	ch2	327	33.6	24.2
	ch3	413	37.7	21.5
	ch1+ch2+ch3	-	-	13.1*

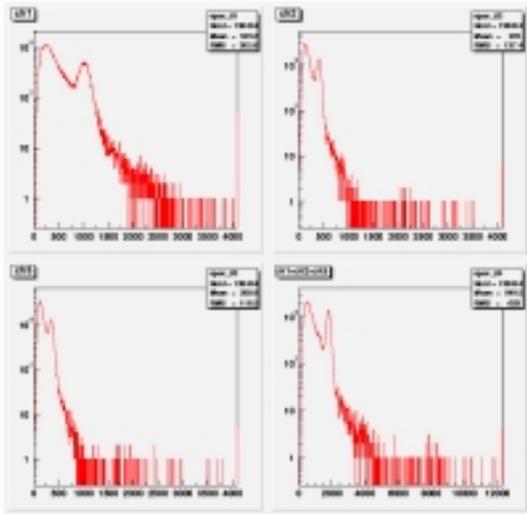


図 4.13: 一回目

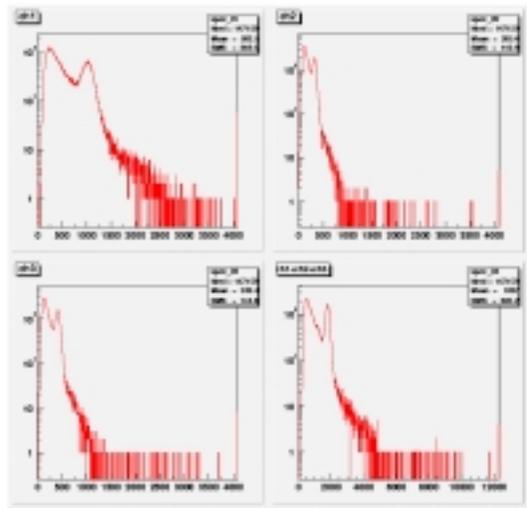


図 4.14: 二回目

4.5.2 threshold

線源には threshold のエネルギーに近い ^{57}Co の 122keV を用いた。セットアップは図 4.5 と同じで Shaper Gain は MAX、 -30 度の下で行った。得られたスペクトルを図 4.15、4.16、4.17、4.18 に、結果を 4.6 に示す。

アス電圧が高くなるにつれての増え方が大きく、最低で +14ch、最大で +581ch の変化となった。。threshold もそのためか、やや二回目の方が低く、変化は ± 30.3 となった。。一回目の ch2 と二回目の ch3 について見てみると、これもピークの値がバイアス電圧が高くなるにつれ、二回目の ch3 のほうが増え方が大きく、 ± 57.9 ch となった。threshold も二回目の ch3 の方が低く、 ± 41.3 keV となった。一回目の ch3 と二回目の ch2 については、ピークの値の変化は ± 7.7 keV 以内に収まっており大きな変化はなかった。threshold についての変化は ± 15.3 keV となった。以上の変化は、APD と BGO プレートの接着の仕方によるものだと考えられる。巻き方をもっと均一にすることで改善される余地はあるものと思われる。

表 4.6: threshold

電圧 (V)	APD の ch	1 回目			2 回目		
		Peak(ch)	$\Delta E/E(\%)$	thr(keV)	Peak(ch)	$\Delta E/E(\%)$	thr(keV)
290	ch1	305	60 超	88	319	60 超	76.4
	ch2	136.7	60 超	169.5	125	60 超	195.2
	ch3	126	60 超	183.9	144	60 超	152.5
	ch1+ch2+ch3	-	51.6*	91.8	-	55.9*	88.7
300	ch1	436	54.3	56	473	53.8	54.2
	ch2	172	60 超	141.8	154	60 超	158.4
	ch3	152	60 超	160.6	186	60 超	118
	ch1+ch2+ch3	-	45.6*	62	-	45.5*	60.3
310	ch1	612	52.3	47.76	728	51.1	38.6
	ch2	202	60 超	120.8	180	60 超	135.6
	ch3	179	60 超	122.8	230	60 超	79.5
	ch1+ch2+ch3	-	40.6*	53.6	-	40.1*	52
320	ch1	954	48.6	43.5	1182	50.4	36.1
	ch2	254	59.9	86.4	222	60 超	109.1
	ch3	221	60 超	93.8	282	56.7	86.6
	ch1+ch2+ch3	-	37.3*	42	-	37.2*	42
330	ch1	1728	53.2	56.8	2309	50.2	26.5
	ch2	307.1	54.1	91.3	280	46.7	109
	ch3	272.3	58.7	98.6	365	44	83.5
	ch1+ch2+ch3	-	34.1*	51	-	35.6*	51.3

まとめ

BGO プレートに装着する APD が、一つの場合と三つの場合での比較実験を行ったが、分解能についての変化は $\pm 0.85(\%)$ でほぼ変わらなかった。光量については 3ch にする

と、追加した。再現性については十分に改善は得られなかったが、APD と BGO プレートの接着の仕方、バルガーテープの巻き方など十分に改善の余地は残った。再現性を改善することでより精度の高い結果が得られると考えられる。

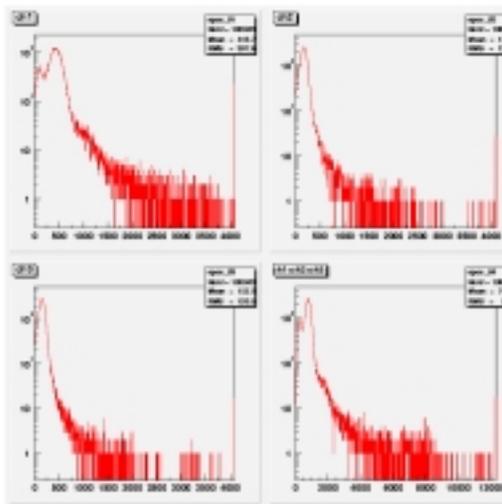


図 4.15: 一回目 290V

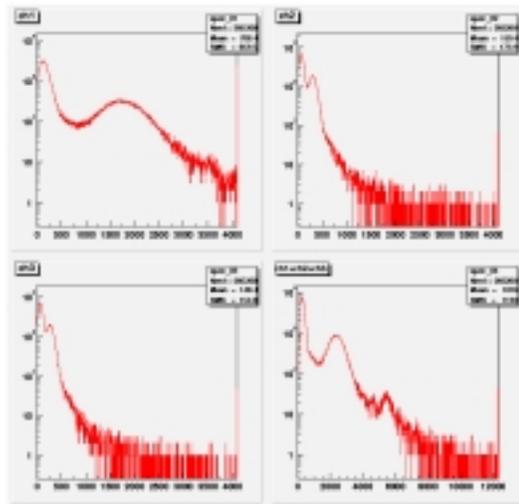


図 4.16: 一回目 330V

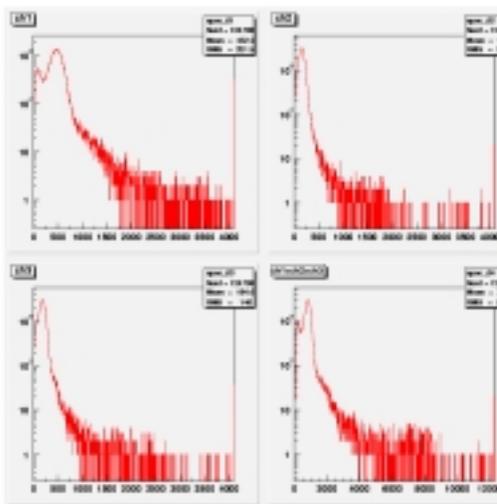


図 4.17: 二回目 290V

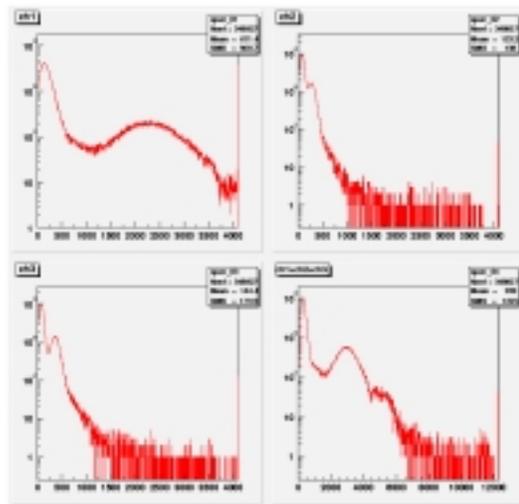


図 4.18: 二回目 330V

第5章 ノイズの要因の検証

5.1 実験目的

半導体検出器を用いた観測では、電子回路系雑音などによって、エネルギー分解能と threshold が決まっている。また、第3章でもあったようにシンチレータとAPDを用いた検出器では電流性ノイズの理解が進んでいない。そこで本研究ではノイズ除去の第一歩として、APDを用いた検出器のノイズの要因の特定を目的としての測定、考察を行う。

5.2 APDの基礎特性

APDのエネルギー分解能と threshold は、APDの基礎特性の一つである端子間容量と暗電流に大きな影響を受ける。そこで、APDの電気回路系雑音の原因となる端子間容量と暗電流を調べた。常温の下、測定を行った。

5.2.1 端子間容量の測定

端子間容量の測定にはヒューレット・パッカート社製のLCRメータ HP4284A と Model6517を用いた。3mm、5mm、10mmのAPDの端子間容量をバイアス電圧を30Vから360Vまで変化させ測定した。表5.1にその値を、図5.1にそのグラフを示す。グラフから空乏層が広がってゆく様子が見てとれる。概ね、三つとも280Vあたりで広がりが止まっている。

APDを平行板コンデンサと近似した場合、容量は以下の式で計算できる。

$$C = \varepsilon_{si}\varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (5.1)$$

ε_{si} はシリコンの比誘電率 (= 11.9)、 ε_0 は真空の誘電率 (= 8.85×10^{-12} [F/m])、 S はAPDの面積で、 d は全空乏層化していると考えた場合の、APDの空乏層の厚さである。このうち、三つのAPDで異なるのは面積 S であるが、実際に容量の比は面積比に近い。バイアス電圧が290Vの場合、APDの空乏層の厚さは測定された容量からそれぞれ、3mmは $27.48\mu\text{m}$ 、5mmは $28.49\mu\text{m}$ 、10mmは $33.52\mu\text{m}$ と算出できる。

5.2.2 暗電流の測定

図3.5に示したものと同様のセットアップで、3mm、5mm、10mmのAPDの暗電流を、バイアス電圧を30Vから350Vまで変化させ測定した。表5.2にその値を、図5.2にグラフを示す。興味深いことに、電流はAPDの面積に依らず、どれもほぼ同じ値となっている。3mmと5mmのAPDに比べ10mmだけ増加の様子が違う。

表 5.1: 端子間容量

電圧 (V)	capacitance(pF)		
	3mm	5mm	10mm
30	200.3	501.4	1645
60	137.8	374.1	1195
90	113.5	296.9	988.8
120	97.04	253.2	850.0
150	82.62	213.3	735.3
180	66.26	164.0	609.5
210	51.92	131.2	469.8
240	43.03	112.2	391.6
270	36.81	99.40	338.5
290	34.49	92.40	314.2
300	33.53	89.53	304.6
310	32.64	86.70	295.3
320	31.83	844.1	287.2
330	31.15	82.00	279.8
340	30.53	80.79	272.9
350	30.07	80.23	267.6
360	29.91	80.01	265.1

表 5.2: 暗電流

電圧 (V)	Leakage current(nA)		
	3mm	5mm	10mm
30	0.1554	0.2322	0.5054
60	0.5144	0.4223	0.5444
90	0.7458	0.6202	0.5726
120	0.9766	0.8134	0.6309
150	1.205	1.009	0.7498
180	1.454	1.183	0.9598
210	1.705	1.382	1.347
240	1.982	1.598	1.974
270	2.284	1.817	2.970
290	2.499	1.966	4.047
300	2.601	2.040	4.792
310	2.719	2.111	5.735
320	2.849	2.206	6.897
330	2.985	2.288	8.277
340	3.133	2.374	10.16
350	3.294	2.475	12.54

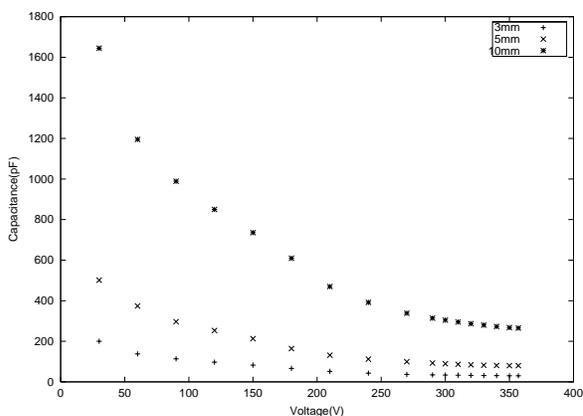


図 5.1: CV カーブ

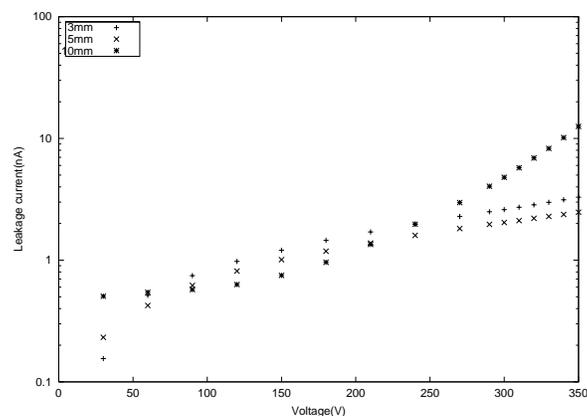


図 5.2: IV カーブ

5.2.3 APD の GAIN 比

三種類の APD について、後にエネルギー分解能と光量の議論をするために、ここでそれぞれの GAIN について考える。GAIN は 5mm の APD の値 $G=26$ (−30 度、290V 印加時) だけはわかっていたが、3mm と 10mm の APD の値はわかっていなかった。算出には、小型 BGO を用いて、三つの APD で同じセットアップ、バイアス電圧 290V で測定を行うことで、同じ光量に対する信号出力の比、つまり GAIN が得られるが 5mm 角以下の BGO がなかったので、今回は 3mm の APD の GAIN は 5mm の APD のものと同一とし、10mm

のAPDのGAINを算出した。図 4.5 の回路で測定を行い、線源には ^{137}Cs の 662keV を用いた。ピークチャンネルの値と GAIN を表 5.3 に示す。

表 5.3: 小型 BGO で得たピークチャンネルと GAIN

	Peak ch	GAIN
3mm	×	26
5mm	6750	26
10mm	11560	45

5.3 ノイズの検証

ノイズの評価にはプリアンプの容量勾配が必要である。そこで、まず図 3.16 に示す回路で、プリアンプ CP580K に対して 1pF から 220pF までのコンデンサーを用いて容量勾配を調べた。そのグラフを図 5.3 に、値を表 5.4 に示す。

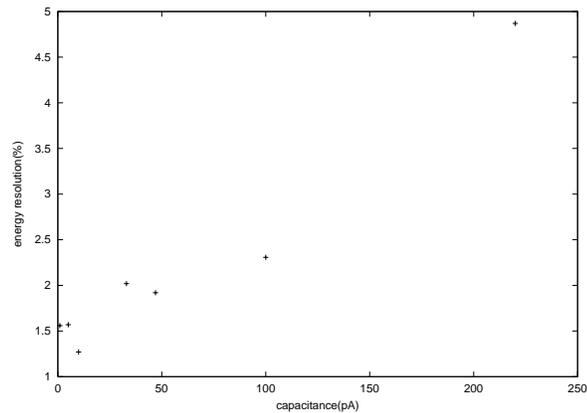


図 5.3: 容量勾配

表 5.4: 容量勾配の値

容量 (pF)	1	5	10	33	47	100	220
$\Delta E/E(\%)$	1.56	1.57	1.27	2.02	1.92	2.307	4.87

次に、図 4.5 に示す回路で、3mm と 5mm と 10mm の APD でスペクトルを取得した。線源には ^{137}Cs の 662keV と ^{57}Co の 122keV を用いた。-30 度の下、バイアス電圧 290V で、Shaper GAIN は max で行った。表 5.5 に ^{137}Cs の 662keV の測定で得られた分解能と、 ^{57}Co の 122keV の測定で得られた threshold を示す。得られたスペクトルを図 5.4、5.5、5.6、5.7、5.8、5.9 に示す。

表 5.5: 測定から得られた値

	peak(ch)	分解能 (%)	threshold(ch)	光量の比
3mm	1253	15.71	200	3.94
5mm	1590	14.22	180	5
10mm	3428	13.11	330	6.29

ここから結果についての考察を行う。

1. 光量が読み出し面積に比例するかどうか

光量 $\propto S$ となるか調べる。S は BGO プレートの読み出し面積である。今回は BGO プレートの厚さが 3mm なので、光量 $\propto l$ となる。l は APD の一辺の長さである。ピークの値はそれぞれ表 5.5 のようになった。それぞれのピークの値を、それぞれの APD の GAIN で割って、相対的な光量の比を求めた。表 5.5 にその値を示す。

厚さ 3mm の BGO プレートの読み出しを行う場合、読み出し面積は APD の一辺の長さに比例するので、光量は 3:5:10 と予想される。ところが、実験値から得た相対比は 3.94:5:6.29 となった。受光面積に対して、どれだけ効率良く光量を得られるかという点において、3mm の APD の場合が最も優れ、10mm の APD の場合が劣っていることになる。考えられる原因としては、APD に入る光の集まり方と思われる。先の 3APD と 1APD での実験でもそうだったが、BGO プレートを APD で読む場合、読み出しの APD の大きさが 3mm から 5mm もあれば、十分に 7、8 割の光を集めることができるので、たとえ APD の面積を増やしてもあまり得にならないのだろう。

2. エネルギー分解能が $\frac{1}{\sqrt{\text{光量}}}$ に比例するかどうか

$\Delta E/E \propto \frac{1}{\sqrt{\text{光量}}}$ となるか調べる。分解能の値はそれぞれ表 5.5 のようになり、相対比は 1.10: 1 : 0.922 である。一方、表 5.5 の相対光量を用いると、 $\frac{1}{\sqrt{\text{光量}}}$ の値の比は 1.13: 1 : 0.891 となる。よって、これは $\Delta E/E \propto \frac{1}{\sqrt{\text{光量}}}$ という関係がきれいに見えている。

3. threshold が δ_{noise} に比例するかどうか

$E_{th} \propto \delta_{noise}$ となるかどうか調べる。 δ_{noise} について詳しくは 2.3.3、3.3.4 に載せてあり、ここでは Si フォトダイオードに対するノイズ値に換算して見てみる。

$$\delta_{noise} = \sqrt{\delta_{noise,I}^2 + \delta_{noise,C}^2}$$

$$\delta_{noise,I}^2 = 0.65 I_n \tau_s$$

この値は、APD の GAIN や BGO の光量にはよらない値であり、threshold チャンネルに比例する。常温で得たバイアス電圧 300V 時の 3mm と 10mm の APD の暗電流の値を、 -30 度の値に換算した。換算には、実験で得た 5mm の APD のバイアス電圧 300V 時の、常温の時の値 2.04(nA) と -30 度の時の値 0.0127(nA) の比を用いた。

$$\begin{aligned} \delta_{noise,C} & \text{の値は、表 5.1 のパルス電圧 } 150\text{V} \text{ の時の各量の値と、各量の配分が示された。} \\ \delta_{noise,3mm} & = 2.00(keV) \quad (I_n = 0.016(nA) \times 30, C = 34.493(pF), \delta_{noise,C}^2 = 1.840(keV)) \\ \delta_{noise,5mm} & = 2.80(keV) \quad (I_n = 0.013(nA) \times 30, C = 92.398(pF), \delta_{noise,C}^2 = 2.712(keV)) \\ \delta_{noise,10mm} & = 6.13(keV) \quad (I_n = 0.030(nA) \times 30, C = 314.17(pF), \delta_{noise,C}^2 = 6.035(keV)) \end{aligned}$$

以上より得た δ_{noise} の相対比は 128:180:394 となる。一方、実験値は、表 5.5 のように ADC チャンネルで、200:180:330 である。5mm と 10mm の APD については、大まかには計算に近い比になっているが、3mm の APD は全く合っていない。

考えられる原因として、電流性ノイズに用いた excess noise factor = 30 というのが APD ごとに異なるのかも知れないが、実験時に外的起因のノイズを落しきれていないことも考えられる。

受光面の大きさは、概ね光量に比例するという結果が得られた。しかし、受光面積に対して、どれだけ効率良く光量を得られるかという点では、3mmのAPDの場合が最も優れていた。エネルギー分解能へのノイズの寄与について、電流性ノイズの寄与は小さく、主に容量性ノイズによる寄与が大きいようである。

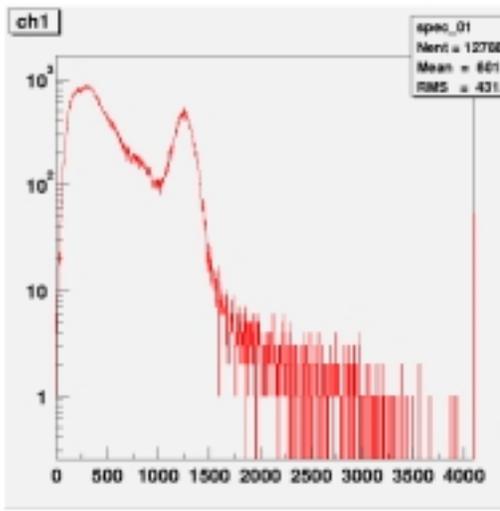


図 5.4: ^{137}Cs のスペクトル : 3mm の APD

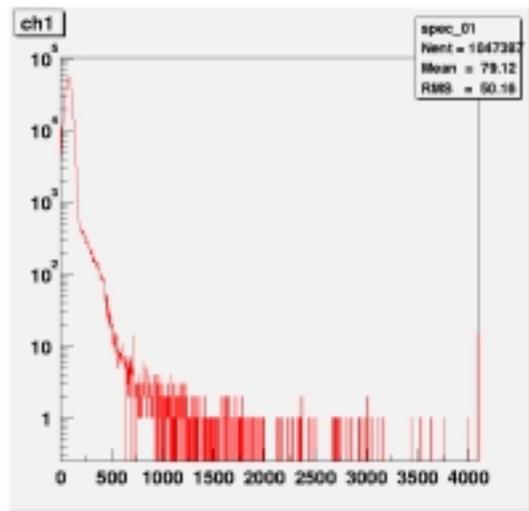


図 5.5: ^{57}Co のスペクトル : 3mm の APD

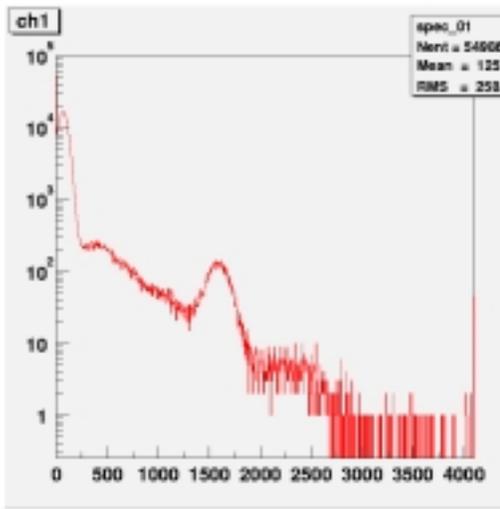


図 5.6: ^{137}Cs のスペクトル : 5mm の APD

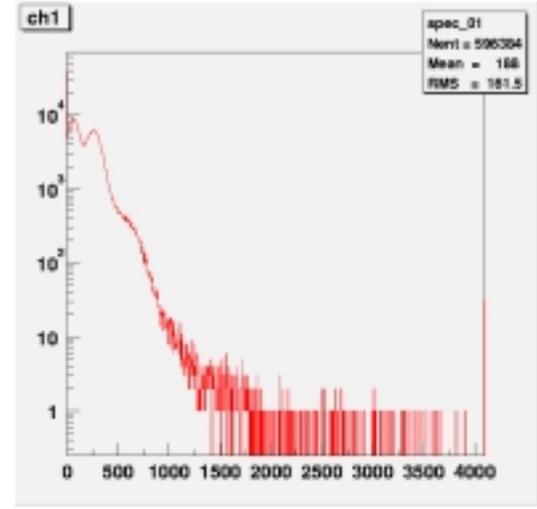


図 5.7: ^{57}Co のスペクトル : 5mm の APD

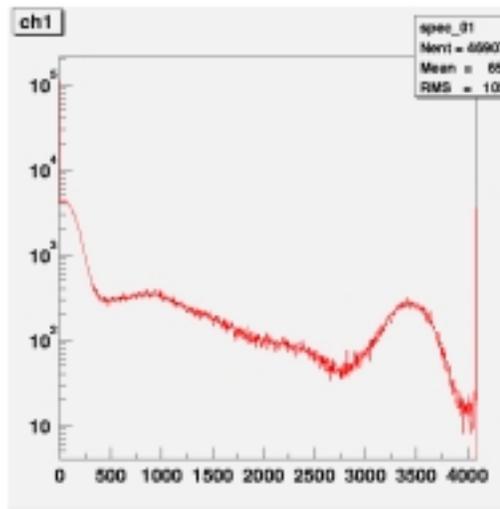


図 5.8: ^{137}Cs のスペクトル : 10mm の APD

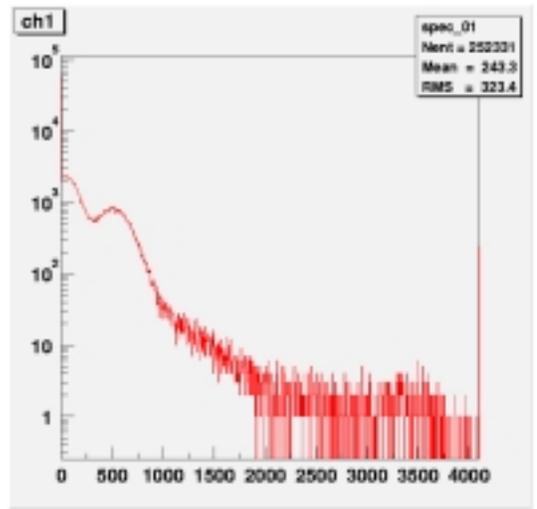


図 5.9: ^{57}Co のスペクトル : 10mm の APD

第6章 まとめ

本研究では、以下のように APD が宇宙線観測用として使えるかどうかの検証を行った。

1. 放射線劣化試験

線と proton を 10krad を APD に当てた。暗電流は数十倍に増加したが、エネルギー分解能は悪くならなかった。threshold は、ノイズの増加のため上昇した。

2. APD+BGO プレートでの検出

BGO プレートに一つの APD をつけたときに比べ、三つの APD をつけたときでは、光量は約 1.22 倍になると考えられ、エネルギー分解能はあまり変わらない。

3. 大きさの異なる三つの APD での実験について

三種類の APD で得られた光量比は、面積比にはならなかったが、BGO の読み出し面積が大きくなれば得られる光量も少し増えるようである。ノイズに関しては、電流性ノイズの寄与は小さく、主に容量性ノイズの影響が大きいようである。

よって、放射線劣化については、今後 threshold の増加が気になることであり、追試実験を行っていく予定である。ただし、実際の観測に比べて今回の照射量は 4 倍ほど大きいので、実際の threshold 上昇はもっと小さいものと思われる。BGO プレートを APD で読み出すときは、いかに光を多く集めて読み出すかが鍵となるが、今回の結果は、APD の数や接触面積を増やしても、それに比例して光量が増えるわけではなく、むしろノイズが増えてしまって、あまり得にならないことを示す。BGO に APD をつける場所を変えると状況が変わるかもしれないので、今後の課題である。

謝辞

本研究にあたり、さまざまな御指導頂きました大杉先生、深沢先生には深く感謝いたします。放射線医学総合研究所では、JAXAの高島さんには大変お世話になりました。また、一年間お茶部屋で一緒に過ごした河嶋さん、澤本さん、高橋さん、後藤君に感謝いたします。さらに、実験やその他の面におきまして、御協力と激励を頂きました広島大学高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室の皆様には感謝いたします。

参考文献

- [1] 中本 達也、高阻止能結晶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、広島大学 卒業論文、2001
- [2] 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線コンプトンカメラの開発、広島大学 修士論文、2003
- [3] 松浦 大介、APD+BGO プレートを用いた Anti 検出器の検証、広島大学 卒業論文、2003
- [4] 大野 雅功、Astro-E2 衛星搭載 HXD 検出器におけるガンマ線バースト検出装置の観測エネルギー領域拡大に向けた研究、広島大学 卒業論文、2002
- [5] 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
- [6] T.P.Ma and Paul V.Dressendorfer、IONIZING RADIATION EFFECTS IN MOS DEVICES AND CIRCUITS
- [7] NeXT 提案書