

ALICE 実験における
PHOS 検出器システムの
性能評価

M063793

久保武史

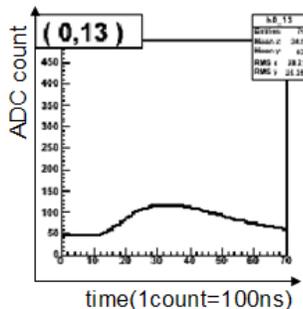
要旨

我々の研究グループではアバランシェフォトダイオード(APD)と鉛タンゲステン酸結晶(PWO)を組み合わせた電磁カロリメータを開発した。このカロリメータは欧州原子核研究機構(CERN)におけるALICE実験高性能光子測定器PHOS検出器の検出素子として使用する。

本研究では、PHOS 検出器システムをより深い理解のもとで技術開発を継続し、改善していくために、広島大学に PHOS 検出器のテストベンチを構築した。また、このテストベンチを用いた宇宙線測定により、PHOS 検出器システムの性能評価を行った。さらにビームテスト実験を行うためのセットアップの設計を考案する。

検出器素子は、PWO 結晶 (ALICE 実験に実装するロシア国ノースクリスタル社製、 $22 \times 22 \times 180\text{mm}^3$) に、受光面積 $5 \times 5\text{mm}^2$ の APD 素子 (浜松ホトニクス社) と前置増幅器を組み合わせ構成している。PWO 結晶は既存のシンチレーション材と比較して、密度が 8.2g/cm^3 と高いため、粒子を狭い範囲に閉じ込めることができるので、高エネルギー粒子の高精度測定に適している。また、APD 素子は一般的に用いられる光電子増倍管(PMT)に比べ、容積が小さく、動作電圧が低く、且つ、電磁場中で使用できる。

データ読み出し系においても、PHOS 検出器実機と全く同じシステムを導入した。PHOS 検出器と同じ FEE (Front-End Electronics) 機器を使用することにより、APD から ADC までの距離が短くなり、外部からのノイズを軽減できる。APD は同じ増幅率を与える電圧には個体差があり、さらに、その増幅率は数 V で数十倍変わることもある。使用する FEE 機器では APD に個々に電圧をかけることができるので、APD からの増幅率をより均一化することができる。また、データ収集ソフトウェアについても、PHOS 検出器実機と同じソフトウェア (DATE) を使用する。右上の図は LED の光をこの読み出し系で読み出したものである。縦軸を ADC count 数、横軸にサンプル数をとったものである。さらに、PWO の発光量増大、半導体のサーマルノイズの減少のために、特注の冷凍機を用いて温度を -25 度まで下げる。これにより、PHOS 検出器実機と全く同じセットアップにて実験を行なった。



目次

第1章 序論.....	6
1.1 ALICE 実験.....	6
1.2 エネルギー損失.....	7
1.2.1 電離損失.....	7
1.2.2 制動放射.....	8
1.2.3 光電効果.....	8
1.2.4 コンプトン散乱.....	9
1.2.5 対生成.....	9
1.2.6 宇宙線.....	9
1.3 検出器.....	10
1.3.1 シンチレーション検出器.....	10
1.3.2 PWO 結晶.....	10
1.3.3 アバランシェ・フォトダイオード(Avalanche photo diode , APD).....	11
1.3.4 光電子増倍管(PhotomultiplierTube , PMT).....	13
1.3.5 FEE 機器.....	14
第2章 目的.....	17
第3章 実験.....	18
3.1 LED の回路の作成.....	18
3.2 出力信号と APD 印加電圧依存性.....	19
3.3 常温での宇宙線測定.....	20
3.4 増倍率曲線の温度依存性の測定.....	21
3.5 - 25 度での宇宙線計測.....	22
第4章 結果.....	23
4.1 増倍率曲線の印加電圧依存性.....	23
4.2 増倍率曲線の温度依存性.....	25
4.3 常温での宇宙線測定.....	34
4.4 - 25 度での宇宙線測定.....	36
第5章 考察.....	37
5.1 増倍率曲線の印加電圧依存性.....	37
5.2 増倍率曲線の温度依存性.....	37

5.3	常温での宇宙線測定.....	37
5.4	- 25 度での宇宙線測定.....	38
第 6 章	結論・展望.....	40
第 7 章	謝辞.....	40

図表目次

図 1-1	ALICE 実験 PHOS 検出器.....	6
1-2	エネルギー損失.....	8
図 1-3	エネルギー損失.....	8
図 1-4	コンプトン散乱.....	9
図 1-5	PWO 結晶.....	11
図 1-6	APD 模式図.....	12
図 1-7	APD と前置増幅器.....エラー! ブックマークが定義されていません。	
図 1-8	光電子増倍管.....エラー! ブックマークが定義されていません。	
図 1-9	FEE ブロック図.....	14
図 1-10	DAQ Run Control の画面.....	15
図 1-11	FEE を使って LED を計測した出力波形(縦軸:ADC.ch 横軸 sample 数)	15
図 1-12	FEE 機器と DAQ マシン.....	16
図 3-1	使用した LED.....	18
図 3-2	E1S03-AB1A7 の I_F - V_F 曲線.....	18
図 3-3	LED 発光(左下).....	18
図 3-4	LED 回路図(下).....	18
図 3-5	PWO 結晶.....	19
図 3-6	.....	20
図 3-7	セットアップ図.....	22
図 3-8	セットアップ図.....	22
図 4-1	LED の光を FEE 機器で見た波形.....	23
図 4-2	縦軸 event 数・横軸 ADC.ch のヒストグラム.....	23
図 4-3	APD Bias Voltage-ADC.ch.....	24
図 4-4	.....	25
図 4-5	.....	25
図 4-6	.....	26
図 4-7	.....	26
図 4-8	.....	27
図 4-9	.....	28

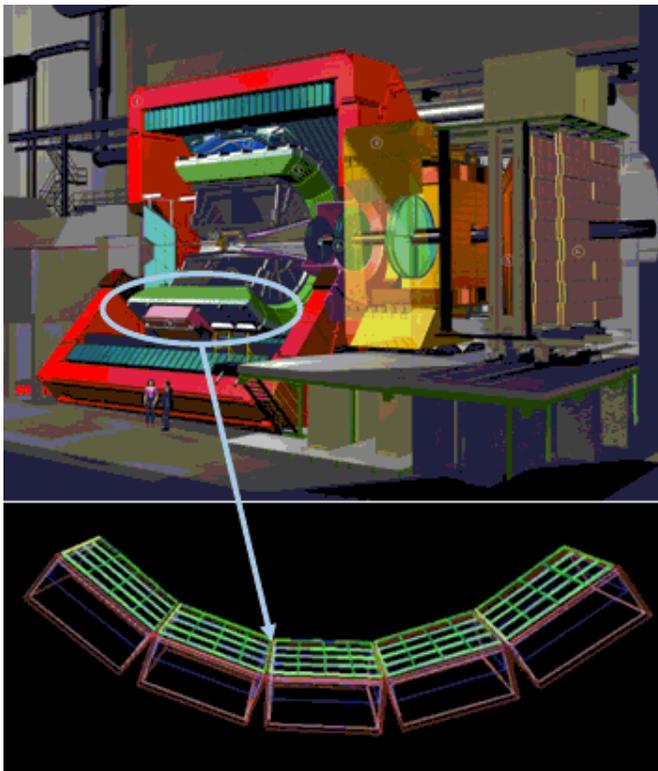
☒ 4-10.....	29
☒ 4-11.....	30
☒ 4-12 APD ~ の S/N.....	31
☒ 4-13 APD ~ の S/N.....	32
☒ 4-14 APD ~ の S/N.....	33
☒ 4-15 Run716.....	34
☒ 4-16 Run716(拡大図).....	34
☒ 4-17.....	35
☒ 4-18.....	36
☒ 5-1 APD に 0~5ch の出力信号が測定されたとき.....	38
☒ 5-2 APD に 5~20ch の出力信号が測定されたとき.....	38
☒ 5-3 APD に 20ch 以上の出力信号が測定されたとき.....	39

第1章 序論

1.1 ALICE 実験

CERN 研究所では、世界最高エネルギーの電子陽電子衝突実験プログラムを 2000 年に終了し、その加速器トンネルに二極電磁石 1232 台から構成する 2 リング型の大型衝突型ハドロン加速器(LHC)を建設した。LHC 加速器では素粒子物理実験に主題を置き、ヒッグス粒子発見を目標とした ATLAS 実験と CMS 実験、CP 非保存の素粒子物理現象を解明することを目的とした LHCb 実験、そして、ALICE 実験では鉛+鉛原子核衝突による現象を主題とし、理想的な高温・高密度のクォーク物質を長時間形成し、クォーク物質相で引き起こされる現象を明確に調べることを目的としている。

図 1-1 ALICE 実験 PHOS 検出器



この ALICE 実験では PHOS 検出器が用いられている。PHOS 検出器は合計 1920 個の検出素子を 5 基の同期モジュールに分散し構成する。ひとつのモジュールは 3584 個の検出素子を 64×56 列に配置する。APD 素子および前置増幅器底面に張り付けた PWO 結晶を -25 度の低温層に設置する。PHOS 検出器はビームラインの中心から 4.6m 離れた、ALICE の検出器の中で底の位置に設置され、擬ラピディティ $|\eta| < 0.12$ の範囲をカバーし、5 モジュールで方向 100° をカバーする。

1.2 エネルギー損失

1.2.1 電離損失

荷電粒子が物質中を通過する際には電磁相互作用により物質を構成する原子あるいは、分子中との電子との非弾性衝突をする。この過程において原子や分子中の電子が荷電粒子からエネルギーを受け取る。受け取ったエネルギーが電子の束縛エネルギーよりも大きい場合には、電子は原子・分子から弾き飛ばされる。これをイオン化という。受け取るエネルギーが小さい場合には、原子・分子がエネルギーの高い状態になる。これを原子・分子の励起という。これらの過程により、荷電粒子はエネルギーを失う。

荷電粒子が失うエネルギーは下のベーテ・ブロッホの式で表すことができる。

$$-\frac{dE}{dx} = nZz^2 \frac{4\pi\alpha^2 (\hbar c)^2}{m_e c^2 \beta^2} \left(\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 \right)$$

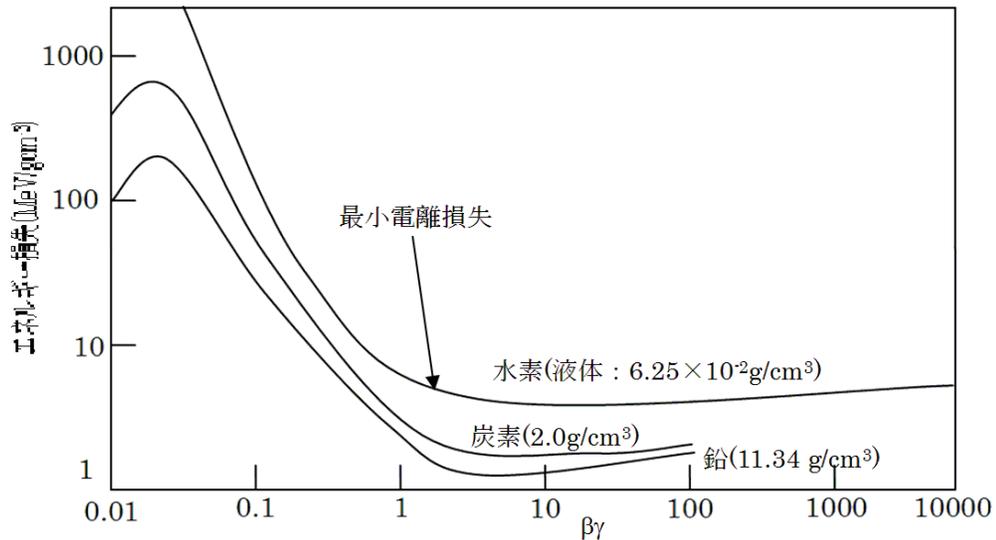
$$\left\{ \begin{array}{l} -dE : \text{距離 } dx \text{ を進む間に失うエネルギー} \\ n : \text{物質中の原子の密度 (cm}^3\text{)} \\ Ze : \text{物質原子の電荷} \\ m_e : \text{電子の質量} \\ c : \text{光速} \\ \beta : \text{入射粒子の速度} / c \\ z : \text{入射粒子の電荷} \\ e : \text{電子の電荷} \\ I : \text{物質原子の平均電離ポテンシャル} \end{array} \right.$$

I は物質ごとに測定値から求められる量であり、 $Z > 1$ の場合、 $I = 16Z^{0.9}$ eV となる。このベーテ・ブロッホの式の特徴は、エネルギー損失の大きさが質量にはよらず、電荷の 2 乗に比例し、その速度 β について β^{-2} の形を持つことである。また、物質中の密度 $nZ = \rho Z / A$ に比例する。したがって、 $-dE/d(\rho x) = -(1/\rho)(dE/dx)$ という量を考えると、 Z/A および $-\ln I$ という量が物質による違いが少ないことを考えると、標的物質の個性によらない量となる。さらに、粒子の速度 β が大きくなって $\beta \approx 0.96$ 程度になるとエネルギー損失はほぼ一定の値をとる。このような粒子を minimum ionizing particle と呼ぶ。電荷 1 の粒子(陽子、 π 中間子、ミューオンなど)では

$$-\frac{dE}{d(\rho x)_{\min}} \approx 2 \text{MeV} / \text{gcm}^{-2} \quad \text{となる。}$$

1-2 エネルギー損失

図 1-3 エネルギー損失



1.2.2 制動放射

電子や陽電子のような質量の小さい荷電粒子の場合、制動放射によるエネルギー損失が大きな役割をもつ。制動放射は、入射粒子が原子半径より短い距離で核の近くを通るとき、原子核の電場によりその軌道が曲げられ運動エネルギーを失う。その失ったエネルギーが電磁波として放出される現象である。

制動放射の断面積は、 $\propto Z^2 m_e^2 c^4$ である。このため、質量の大きな粒子ではほとんど無視できる。この断面積を使って単位長さ当りのエネルギー損失を求めると、

$-dT/dx \propto T$ であることが導かれる。したがって $T = T_0 e^{-Ax}$ というように、電子のエネルギーは物質の厚さに対して指数関数的に減少する。エネルギーが $1/e$ に減衰する長さ($1/A$)を放射長と呼ぶ。

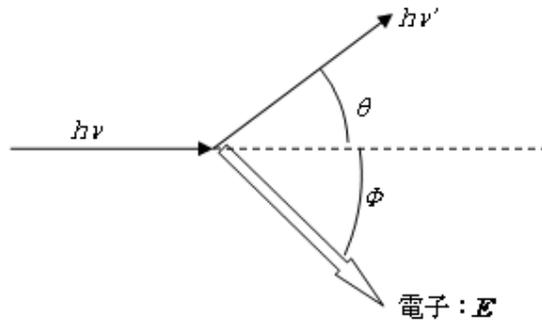
1.2.3 光電効果

光電効果はエネルギー $h\nu$ の光子が原子に吸収されて電子を放出する現象で、その電子の原子中での束縛エネルギー $B.E.$ のぶんだけ小さくなったエネルギー $E = h\nu - B.E.$ の電子が放出される。自由な電子は、運動量保存則のために光子を吸収することはできないが、原子に束縛された電子の場合には残りの電子が反跳運動量を担ってくれるので可能となる。

1.2.4 コンプトン散乱

コンプトン散乱は、光子と自由な電子との散乱である。

図 1-4 コンプトン散乱



この過程は運動量とエネルギーの保存より

$$\left\{ \begin{array}{l} h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \\ E = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\gamma(1 - \cos\theta)}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \\ \cot\Phi = (1 + \gamma) \tan \frac{\theta}{2} \\ \gamma = \frac{h\nu}{m_e c^2} \end{array} \right. \quad \text{と表される。}$$

1.2.5 対生成

対生成は、光子が電子と陽電子の対に転換される反応である。この反応はエネルギーと運動量の保存則により真空中では禁止されるが、原子核のクーロン場のおかげでこれが起こりうる。光子のエネルギーが電子と陽電子の質量の和 $2m_e c^2$ を超えると対生成が可能となる。

1.2.6 宇宙線

宇宙線は隕石と同様に宇宙の物質が地球に飛来したものである。地球の外からの宇宙線を一次宇宙線と呼び、約 90% が陽子である。そして一次宇宙線が地球に入ってくるときに上層の大気や空気中の窒素や酸素の原子核に衝突して発生するものを二次宇宙線という。発生した二次宇宙線は□中間子、中性子陽子など多数あり中でも□中間子は大気中の原子と反応しやすいため、すぐに崩壊してミューオンを生じる。

ミューオンは二次宇宙線の中の荷電粒子の約10%を占め、物質との相互作用が弱い
ため、そのほとんどが地下深くまで貫通する。

1.3 検出器

1.3.1 シンチレーション検出器

シンチレーション検出器は放射線検出器の一種で放射線と物質の相互作用を利用した検出器である。シンチレータは荷電粒子が物質中を通過するとき、その粒子が失うエネルギーを光に変換する物質である。シンチレータには有機シンチレータ、無機シンチレータ、などがある。下に有機シンチレータであるプラスチックシンチレータと無機シンチレータである NaI, PWO の性質を示した。プラスチックシンチレータはポリスチレン等プラスチックの中に有機発光物質が溶かし込まれたもので形状の加工が容易であり、値段も安価である。さらに応答が数 ns のオーダーであり、シグナルの立ち上がり時間、立下り時間がともに早い。しかし、NaI に比べて発光量が小さい。エネルギーが同じ粒子に対する発光量にばらつきがある。これをエネルギー分解能が低いという。

	プラスチック	NaI	PWO
相対発光量 (NaI を 100 とする)	30	100	1
モリエール半径 [cm]	42.5	2.59	0.89
減衰時間 [ns]	2~4	230	3~40
密度 [g/cm ³]	1.032	3.67	8.28
発光波長 [nm]	350~450	413	430

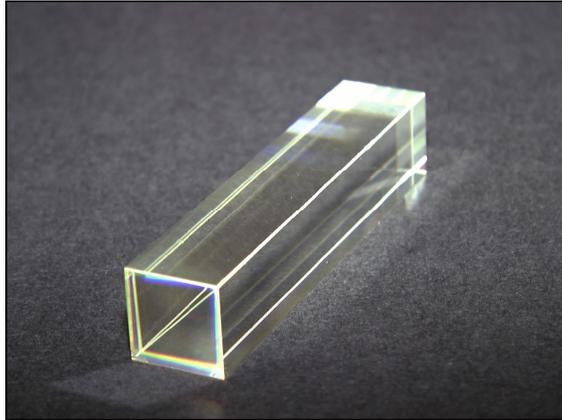
一方、NaI、PWO などの無機シンチレータは高密度のため放射長、モリエール半径が小さいので検出効率が高い。特に PWO は減衰時間(光が入射して結晶中の電子が励起してから基底状態に戻るまでの時間)が短い。そして、NaI は発光量がとても高い。しかし、無機シンチレータは値段も高く取り扱いに注意が必要である。中には潮解性(空気中に置いておくと水分を吸って自然に溶ける性質)を持つものもある。シンチレータに光が入射されると粒子のエネルギーに応じて発光し、その光を様々な光検出器で検出する。

1.3.2 PWO 結晶

今回の実験で使用する鉛タンゲステン酸結晶 (PWO 結晶)は無機シンチレータの一つである。PWO 結晶は無色透明な結晶であり、密度 8.28g/cm³ で前述のシンチレー

タと比較して、モリエール半径が小さく、電磁シャワーを狭い範囲に閉じ込めることが可能である。しかし、発光量は NaI の 1/100 程度と小さくこの光を検出するためには、この光の信号を増幅させて検出する装置が必要である。

図 1-5 PWO 結晶



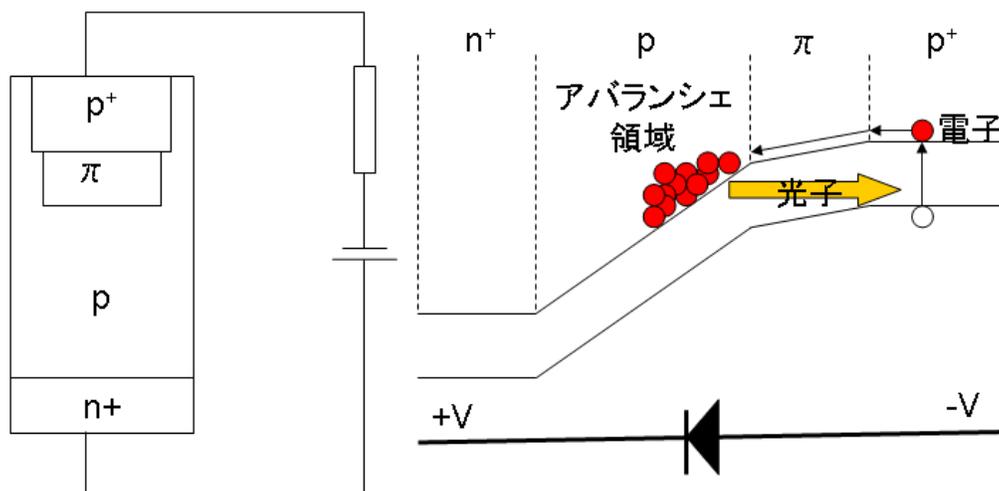
1.3.3 アバランシェ・フォトダイオード(Avalanche photo diode , APD)

フォトダイオードは PMT と違い、コンパクトで磁場中でも使えるが逆電圧をかけるために暗電流が存在し、自己増幅機能を持たないので微弱な信号を読み出すには適さない。そこで、自己増幅機能を持つフォトダイオードであるアバランシェ・フォトダイオードについて説明する。

APD は光の入射面側から $n^+p\pi p^+$ という構造となっている。(図 2.2.4)薄い $n+p$ 領域は高電圧となっている。この領域(アバランシェ領域)は高エネルギーの電子が次々に衝突し、なだれ的にキャリアの増大を起こす。比較的厚い領域(ドリフト領域)は大きい逆方向バイアス電圧のために完全に空乏化した高電界領域である。この領域では生成された電子が加速される。

APD に光子が入射されると n^+p 結合領域は非常に薄いので光子の吸収は少なく、比較的厚い領域で光子は吸収されホールと電子の対を生成する。領域で生成された電子は電界により加速され n^+p 結合領域に入る。 $n+p$ 領域は高電圧なのでこの領域に入った電子は衝突電離を繰り返しホールと電子の対を生成する。そして、生成された電子も加速され衝突電離を起こす。このようになだれ的にキャリアを増幅し、電気信号として外部に取り出す。このようにして増幅され増幅率は 10~100 倍である。しかし、APD は逆方向バイアス電圧をかけるために暗電流が存在し、その暗電流が電気信号を読み取る際のノイズとなる。APD を使用するには常にノイズを少なくすることが条件である。

図 1-6 APD 模式図



APD には増倍率 50 を与える印加電圧値 V_R , ブレイクダウンする印加電圧値 V_B が決まっている。本実験で使用した APD の V_R , V_B を図にまとめる。

表 1

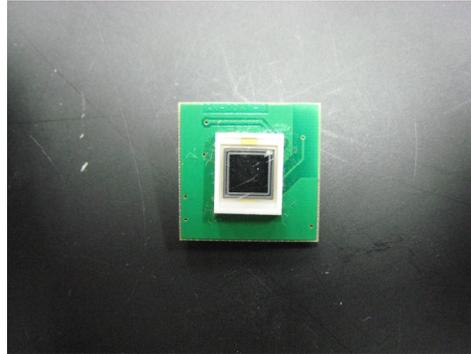
	APD Number	APD Serial Number	V_R (V)	V_B (V)
	013	530	392.9	438
	113	537	396.9	441
	213	不明		
	313	547	398.1	442
	413	不明		
	513	524	392.4	437
	613	545	398.6	443
	713	546	398.6	443
	012	538	398.6	443

本実験では APD の後ろに前置増幅器(プリアンプ)を取り付けて使用する。

このプリアンプは以下の点に留意して設計・開発された。

- ・ APD 素子の動作利得を $M=50$ と設定し、出力感度を $1V/pC$ 、最大 $5V$ とする。
- ・ $100pF$ の APD 素子取り付け時、回路雑音を $500ENC$ とする。
- ・ 環境温度 -25 度で使用するため、消費電力を $100mW$ 以下に抑える。
- ・ 2 万個の量産を念頭に製造コスト及び回路部品供給の安定性を重視する。

図 1-7 APD と前置増幅器

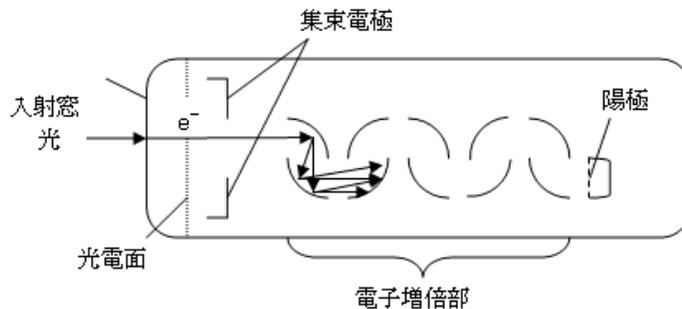


1.3.4 光電子増倍管(Photomultiplier Tube, PMT)

PMT は光センサの中でも極めて高感度、高速応答できる光検出器であり、光を電子に変換する陰極(光電面)、集束電極、電子増倍部、電子を集める陽極を真空の容器に収めたものである。

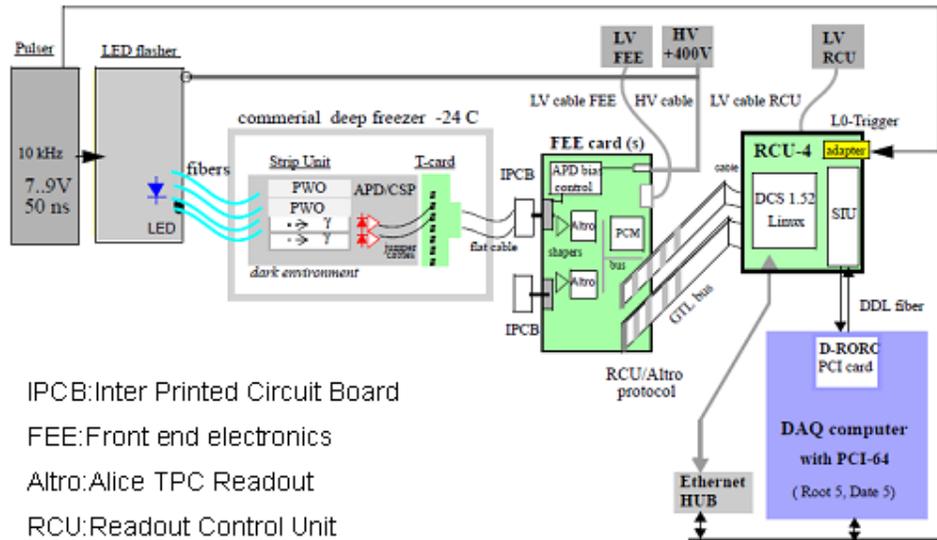
光が光電面に入射すると光電効果により光電面から真空中に光電子が放出される。その電子は集束電極によって向かいの電子増倍部に導かれる。電子増倍部に導かれた電子は電子増倍部をたたき多数の電子を放出する。さらに電子増倍部でたたき出された電子は次の増倍部をたたき電子をたたき出す。このようにして電子増倍部で増倍された電子は陽極に入り出力信号として陽極に収束される。

図 1-8 光電子増倍管



1.3.5 FEE 機器

図 1-9 FEE ブロック図



IPCB: Inter Printed Circuit Board

FEE: Front end electronics

Altro: Alice TPC Readout

RCU: Readout Control Unit

DCS: Detector Control System

SIU: Source Interface Unit

DDL: Detector Data Link

D-RORC: DAQ ReadOut Receiver Card

PWO 結晶に粒子が入射すると PWO から光が出る。その光は前述の APD 素子で電気信号に変換され、増幅され、更に、CSP でも増幅される。この信号が IPCB を介して FEE カードに入る。その後、シグナルはシェイパーで波形整形され Altro chip でアナログ信号からデジタル信号へとデジタル化され、データが貯められる。RCU にトリガーシグナルが入ると、Altro chip に貯められたデータが D-RORC を介して DAQ コンピュータに蓄積される。この FEE 機器は APD の電圧を個々で変えることが可能である。すなわち、全 APD の増倍率を一定にすることができる。図 1-10 のように DAQ の画面上で計測のスタート・ストップ、APD の電圧の変更などの操作が可能である。

図 1-10 DAQ Run Control の画面

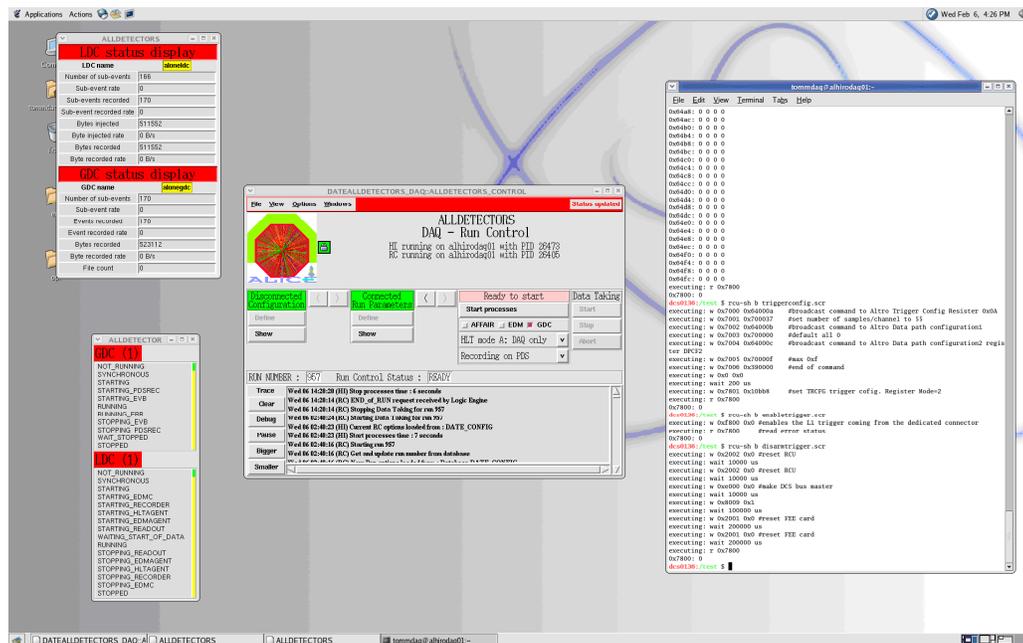


図 1-11 FEE を使って LED を計測した出力波形(縦軸:ADC.ch 横軸 sample 数)

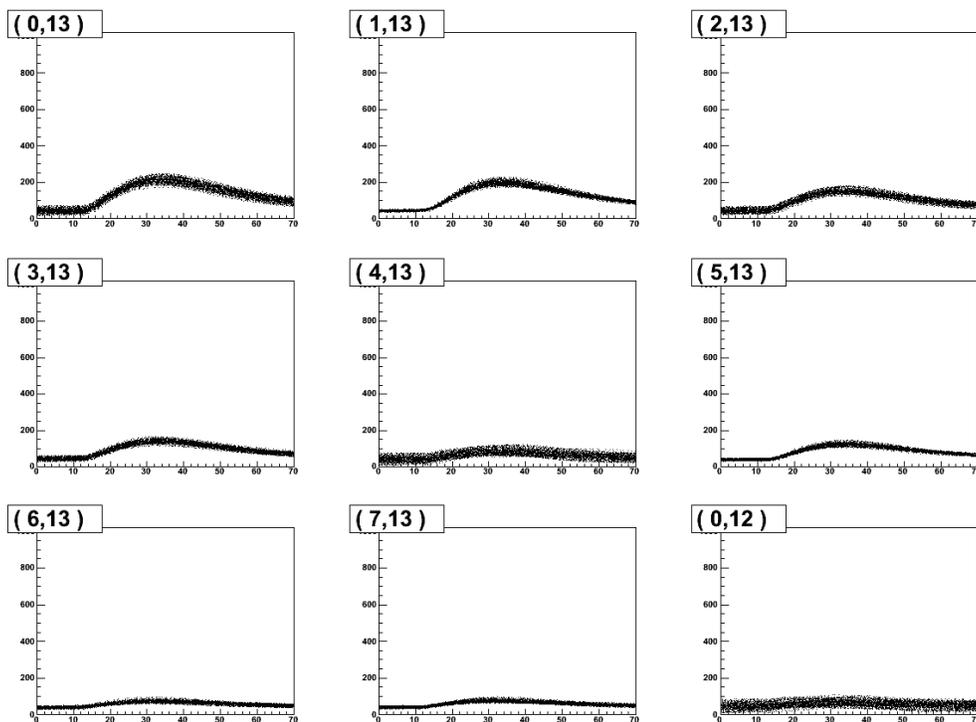
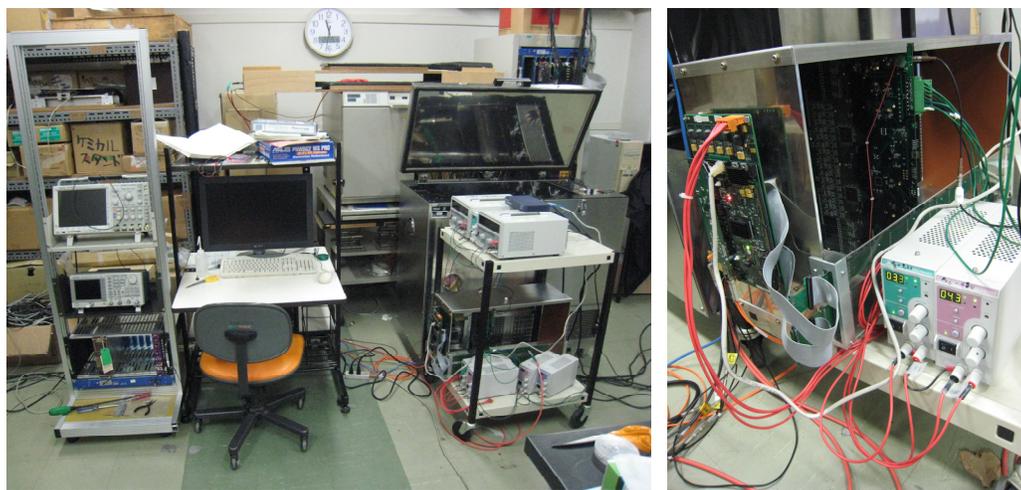


図 1-12 FEE 機器と DAQ マシン



第2章 目的

本実験の目的

クォーク物質の基本的物性を特定する最も理想的な信号は、熱輻射による熱光子を捉えることである。LHC 加速器 ALICE 実験では多量の熱光子の放出が期待され、そのエネルギー分布からクォーク物質の熱力学統計状態を記述する重要な情報が得られると期待されている。

しかし、原子核衝突実験において、熱光子以外に中性中間子の崩壊に伴う崩壊光子、衝突瞬間に起こる摂動的クォーク散乱が放出する直接光子が生成される。これらの雑音光子をエネルギー分布から差し引き、熱光子エネルギー分布を求めるために、光子検出器に入射する一つ一つの粒子を一つ一つ分離して検出することが重要である。電磁シャワー形成を測定手段とする電磁カロリメータでは如何にして電磁シャワーの横広がりを抑え、ふたつの粒子を区別することが必要である。そのためにシンチレータ素材として鉛タンゲステン酸結晶が用いられる。

本実験では ALICE 実験、PHOS 検出器で使用される、短い放射長を持つ鉛タンゲステン酸結晶、自己増幅機能を持ち、磁場の影響を受けないアバランシェ光半導体素子、一つの数値化回路で波高数値化と時間数値化を行うことのできる FEE 機器を用いて実験を行い、環境温度を-25 度にするにより、PHOS 検出器と同条件のセットアップで実験を行い、PHOS 検出器システムの性能を評価する。

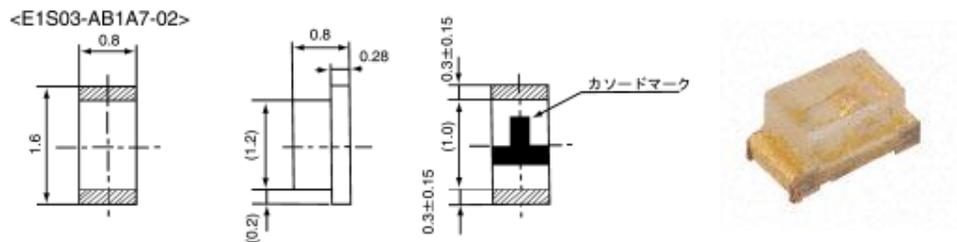
第3章 実験

3.1 LEDの回路の作成

本実験では大きさ・発光波長がPWOの発光波長430nmに近いという理由からLEDは豊田合成製面実装型LED E1S03-AB1A7を使用した。このLEDの主な値を下の表に示した。

外形寸法 (mm)	波長(最大) (nm)	発光高度 (mcd)	許容損失 (MW)	順方向電流 (A)
1.6×0.8×0.8	475	44	80	20

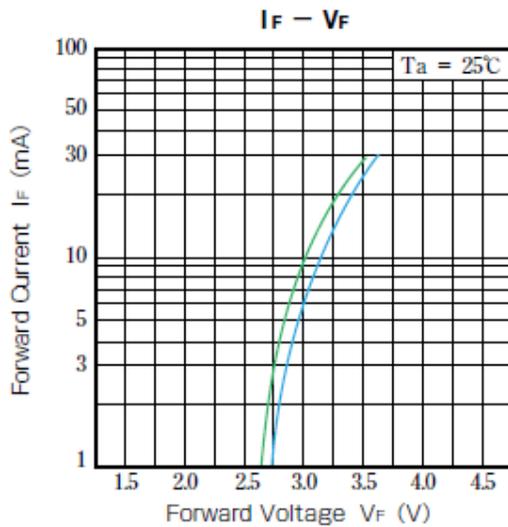
図 3-1 使用したLED



LEDは電圧に応じて光が変化する。

本実験では、9つのLEDが同時に光らなければならない。

図 3-2 E1S03-AB1A7の I_F - V_F 曲線

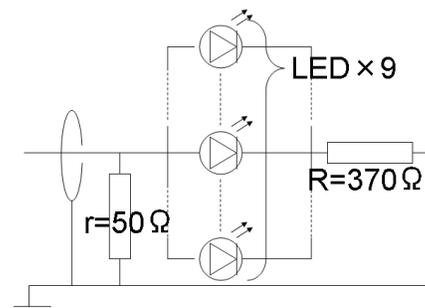
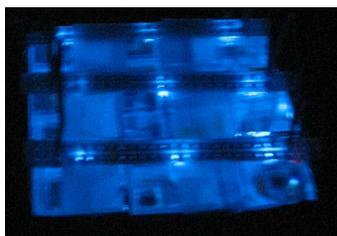


LEDの回路の作成では

1. 電圧 V_F を決める
 2. 図より電流 I_F を電圧 V_F から求める
 3. 起電力より R を求める
 4. インピーダンスより r を決定する
- その結果、本実験では図のような回路を使用する。この回路でLED3つずつを基板に実装し、使用した。

図 3-3 LED発光(左下)

図 3-4 LED回路図(下)



3.2 出力信号と APD 印加電圧依存性

APD は印加電圧を上げるほど増倍率が增大する。なぜなら、印加電圧を高くするとドリフト領域での運動エネルギーが増大するので高いエネルギーで衝突し、より大きななだれを引き起こすからである。

APD には個体差があり、一定の印加電圧ではそれぞれで増倍率はバラバラである。ここでは本実験に使用する APD 9 本全ての印加電圧依存性を測定した。

図 3-5 PWO 結晶



図 3-5 セットアップ図

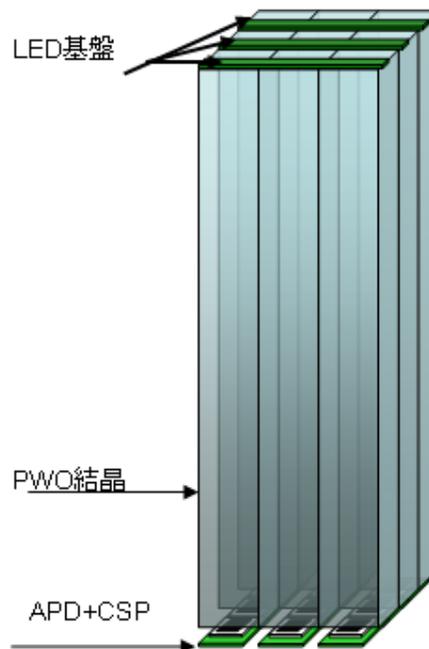
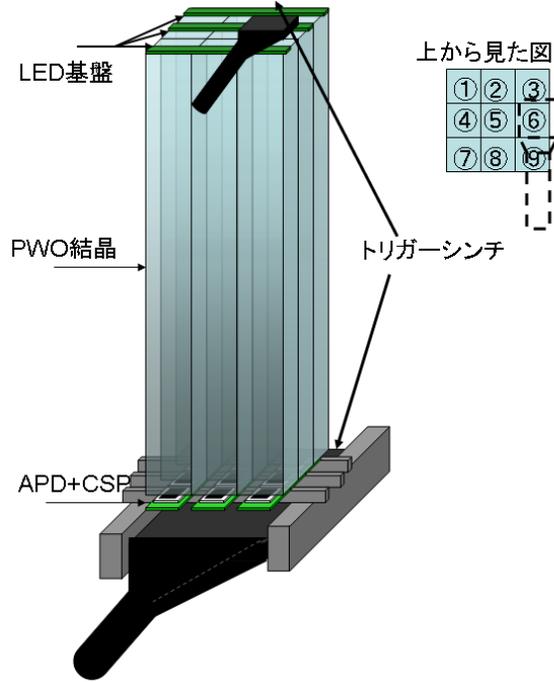


図 3-6

3.3 常温での宇宙線測定

本実験ではPWO結晶を縦に配置することで宇宙線がより大きなエネルギーを落とすと考えた。ここでは常温での宇宙線測定を行った。ある1本に確実に入ることを確認するために、図のようにセットアップした。上に $20 \times 20 \times 1 \text{mm}^3$ のプラスチックシンチレータ、下に $100 \times 100 \times 5 \text{mm}^3$ のプラスチックシンチレータを配置し、これをPMTで読み出す。そしてこの信号が同時に来たときをトリガーとしている。これによりAPD番に入った宇宙線でトリガーを形成することができる。

全てのAPD素子の V_R 値に近い印加電圧395Vを与え測定を開始した。



3.4 増倍率曲線の温度依存性の測定

APD は温度を下げると増倍率が増加する。なぜなら、APD は正孔と格子原子との衝突により、増幅するものであるので、温度が高いと格子原子が熱振動し、十分な運動エネルギーを得ることができなくなるからである。環境温度が低いと格子原子の熱振動が小さくなり、正孔は十分に加速し、より大きなエネルギーを持ってなだれを起こすことができる。

ここでは、検出器の環境温度を変化させることにより、印加電圧への依存の変化を測定した。

本実験では、冷凍機を用いて検出器の環境温度が+15 度、+5 度、-5 度、-15 度、-25 度の場合で測定した。

測定では宇宙線実験と同じセットアップにするため PWO 結晶を縦に配置し、9 本の PWO 結晶それぞれに LED を取りつけ行った。LED に 5V, 175ns のパルスを入力し、その光を APD で読み出した。

各 APD からの出力をできるかぎり一定にするため、各 APD の V_R 値を基準とし、 $V_R-50 \sim V_R+50$ の範囲で測定を行った。

3.5 - 25 度での宇宙線計測

上に $20 \times 20 \times 1 \text{mm}^3$ のプラスチックシンチレータ、下に $100 \times 100 \times 5 \text{mm}^3$ のプラスチックシンチレータを配置し、その間に電磁カロリメータを配置した。今回は 1 本のシンチレータに確実に通過したことがわかるように上のプラスチックシンチレータは小さいものを使用した。

これにより、上下のプラスチックシンチレータが同時に反応した場合、カロリメータにも宇宙線が通過したと考えられる。この 2 つのプラスチックシンチレータが同時に反応した場合をトリガーとし、測定を行った。

この実験では APD の真上に小さいシンチレータを設置した。3.4 の実験で得られたデータより各 APD に V_{R-5} の印加電圧を与えて測定した。

図 3-7 セットアップ図

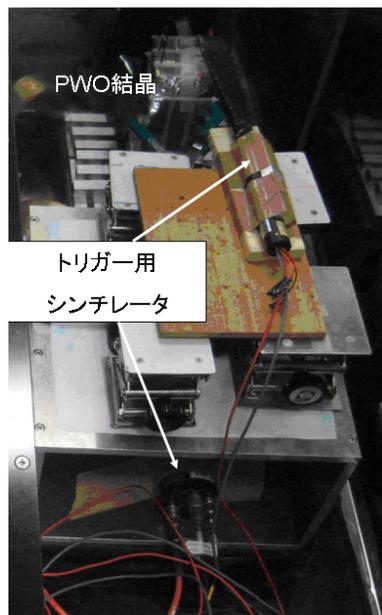
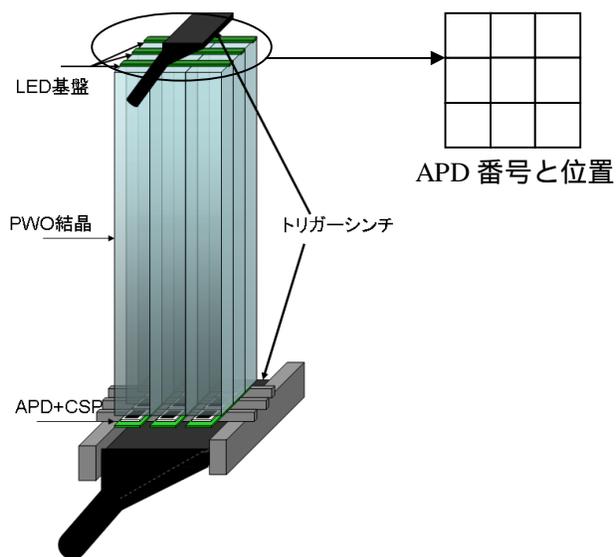


図 3-8 セットアップ図



第4章 結果

4.1 増倍率曲線の印加電圧依存性

図は縦軸 ADC.ch 横軸 sample 数である APD に入った 100 シグナルを重ね合わせて描いたものである。1sample=100ns である。

図のように最初の 10sample の平均を Pedestal、波形の最高値を Max とし、Pedestal の値を Max の値から引くことにより波形の高さ Pulse Height(P.H)が求められる。これにより、シグナルの揺れ以外のノイズは差し引くことができる。そうすれば、この P.H が LED からの信号となる。

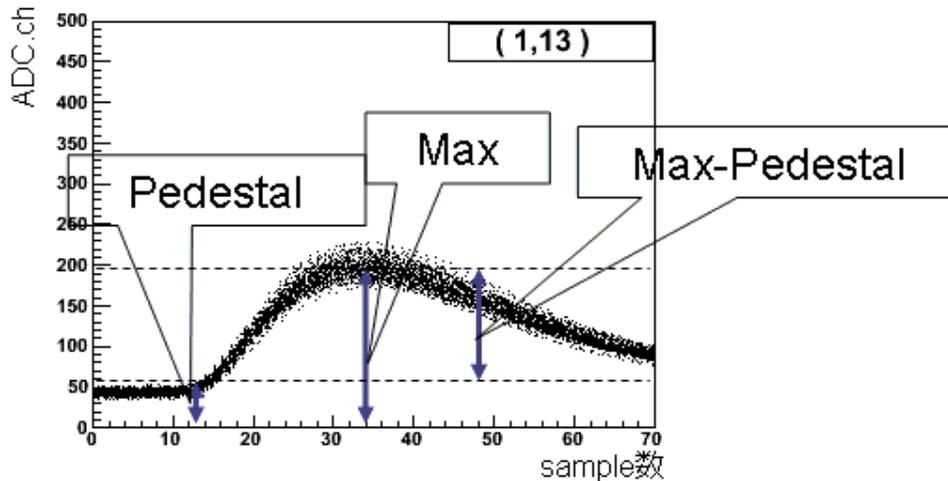
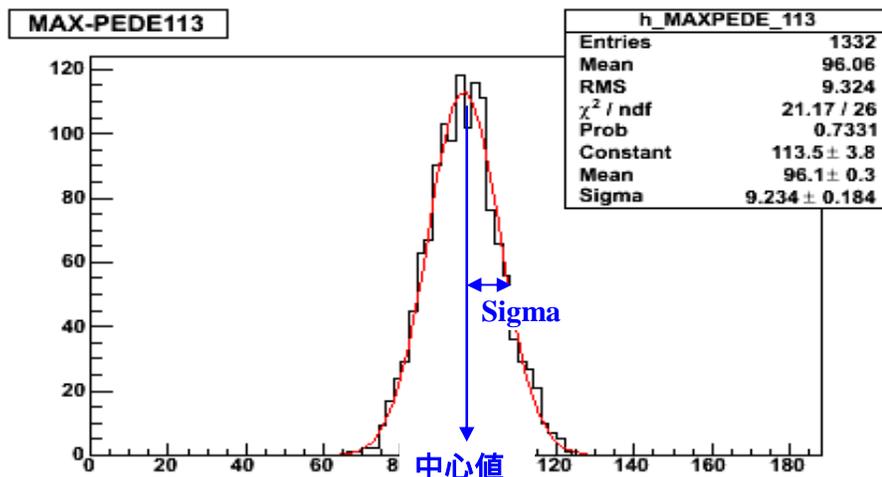


図 4-1 LED の光を FEE 機器で見た波形

この Pulse Height をヒストグラムにし、ガウス関数でフィットをした。

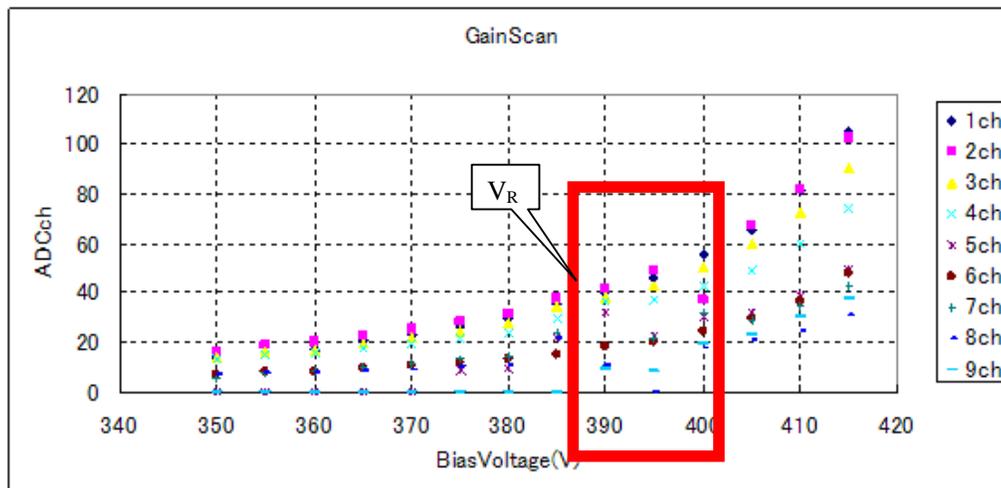
この関数の中心値を求め、この中心値が P.H の平均値(Signal)、このヒストグラムの Sigma が Signal の Noise となる

図 4-2 縦軸 event 数・横軸 ADC.ch のヒストグラム



中心値の ADC.ch と APD 印加電圧(Bias Voltage)との関係を図に示す。

図 4 -3 APD Bias Voltage-ADC.ch



全 APD は印加電圧が高くなると、ADC.ch が増加する。ADC.ch の増加は APD の増倍率の増加に相当する。ここでは、全 APD の増倍率曲線を求め、全ての APD は V_R 値(図の赤い枠)付近で急激に増倍することがわかる

4.2 増倍率曲線の温度依存性

図 4-3,4 に冷凍機内の環境温度-25 度、 V_R -50V から V_R +5V までのある 1 ch の APD 出力信号の波形 100 個の重ね合わせを載せた。

図 4-4

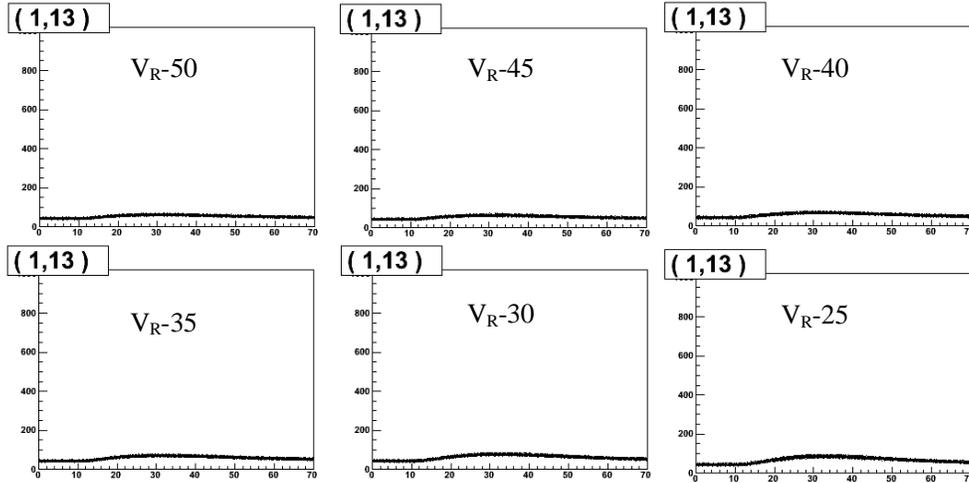
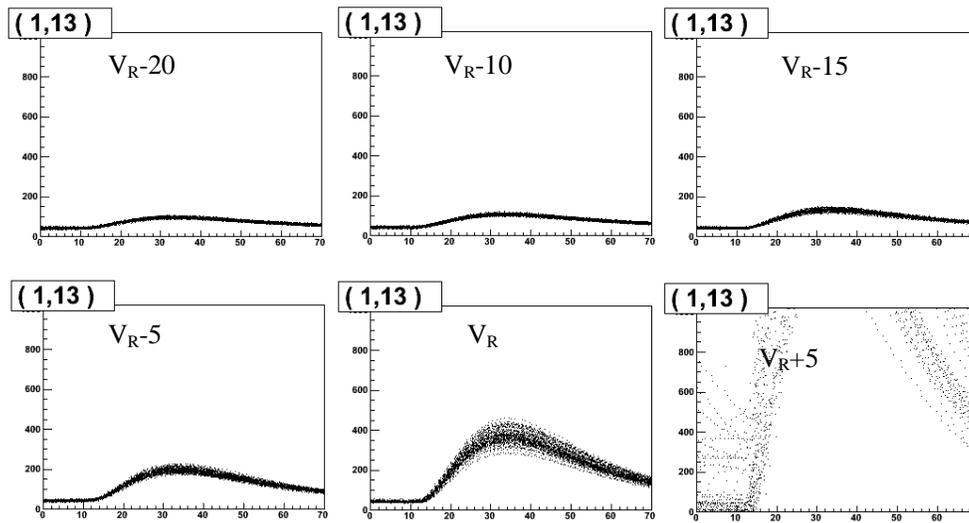


図 4-5



これからわかるように印加電圧の低い範囲では変化は小さいが、印加電圧が高い範囲では急激に増幅する。

次に、冷凍機内の環境温度-25 度、 V_R -50V から V_R +5V までのある 1 ch の APD の ADC.ch とその ADC.ch でのイベント数のヒストグラムを載せた。

図 4-6

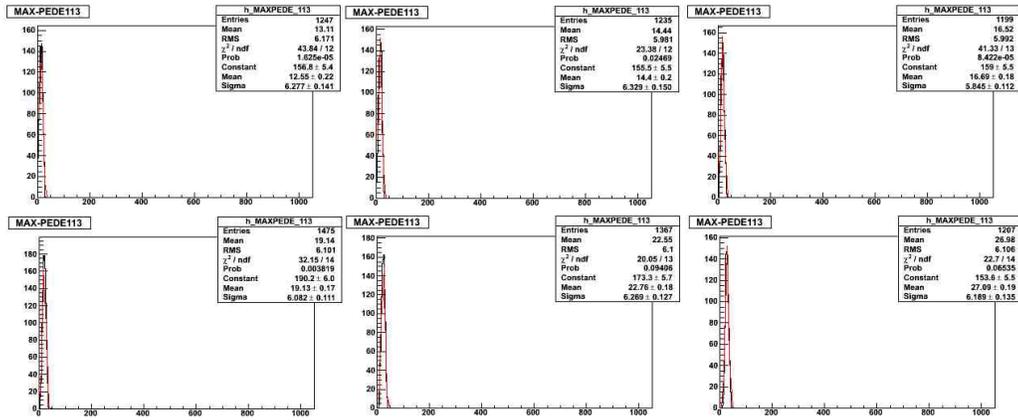


図 4-7

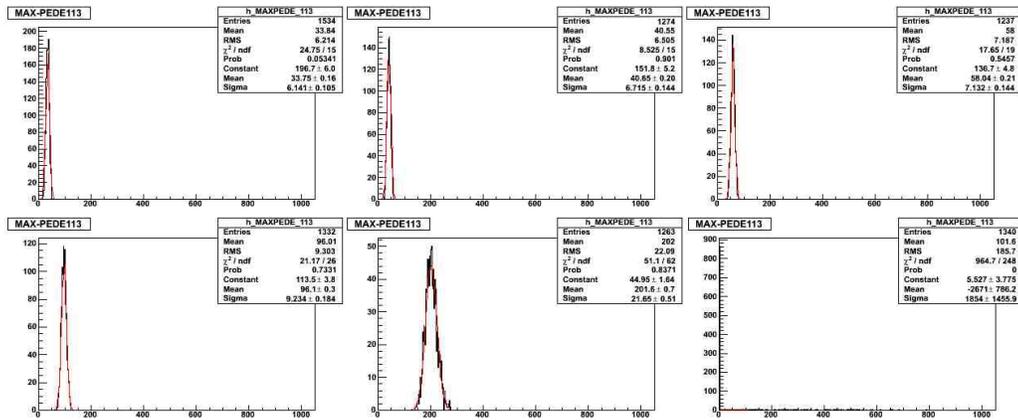


図 4-5,6 からわかるように、ヒストグラムの中心値は印加電圧を上げていくにつれて ADC.ch の高いほうへシフトしていくことがわかる。さらにヒストグラムの幅も広がっていることがわかる。これは、印加電圧を上げていくにつれて出力信号が大きくなり、かつその信号の揺らぎも大きくなるということである。

波形は徐々に PH が大きくなっていることを確認することができた。そして、印加電圧を上げていくとブレイクダウン(ノイズが大きくなって信号が見えなくなる)することも確認することができた。(図 4-4 右下)

次に各温度の各々の APD の増倍率曲線を図に示す。

図 4-8

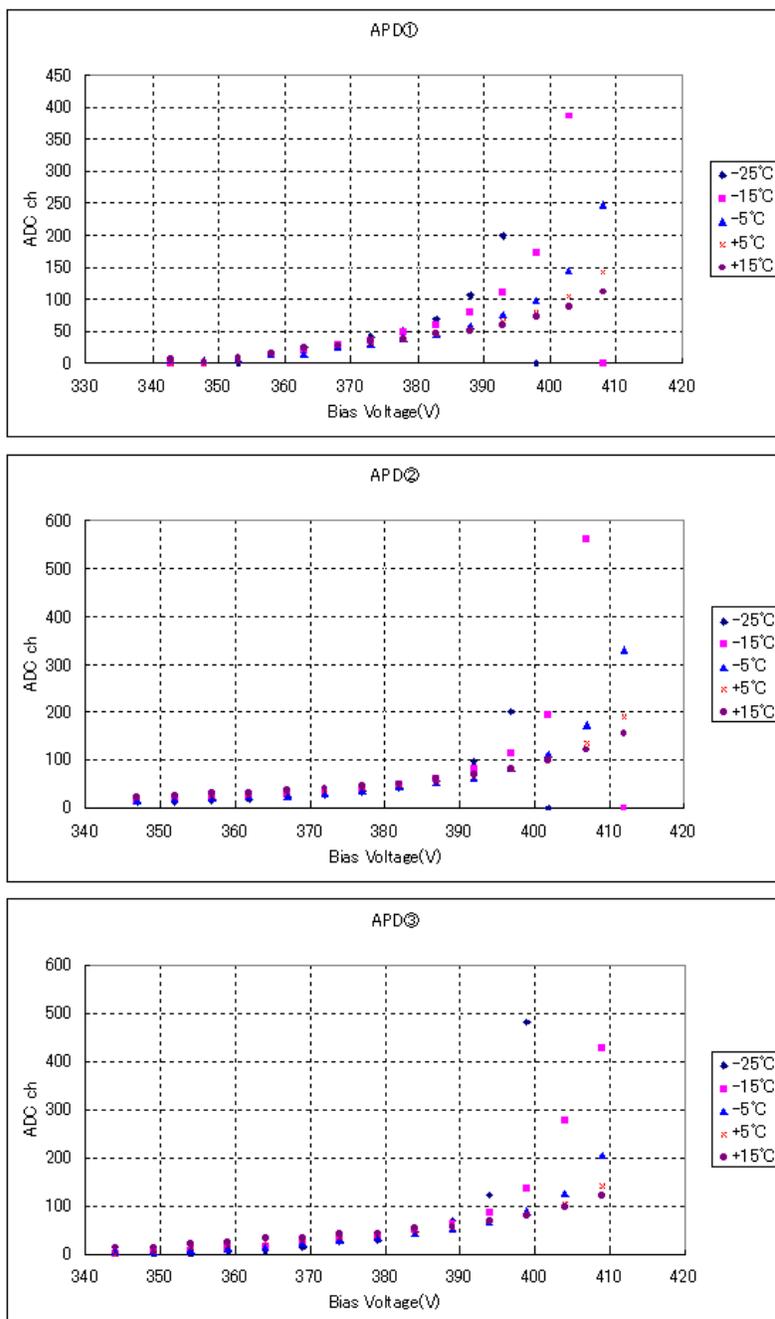
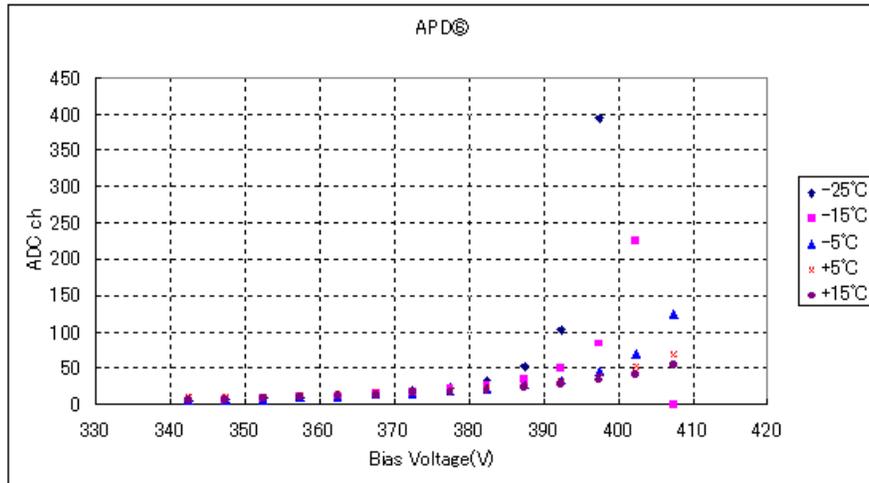
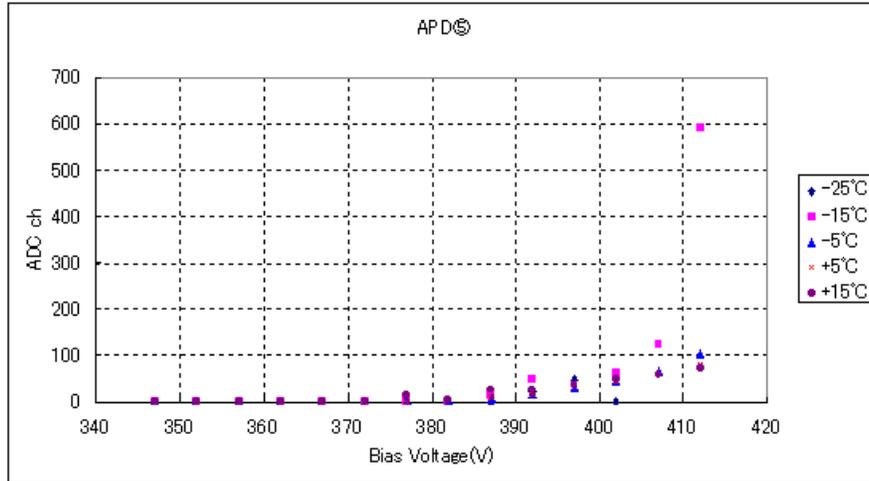
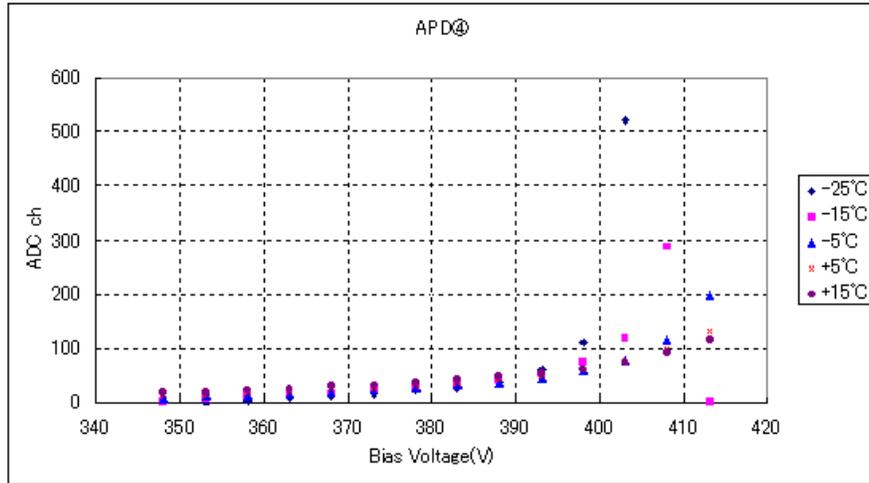


图 4-9



4-10

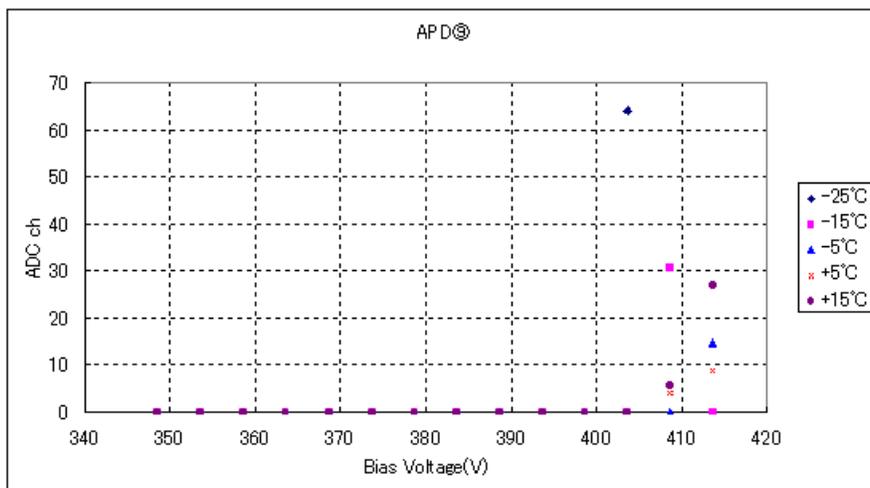
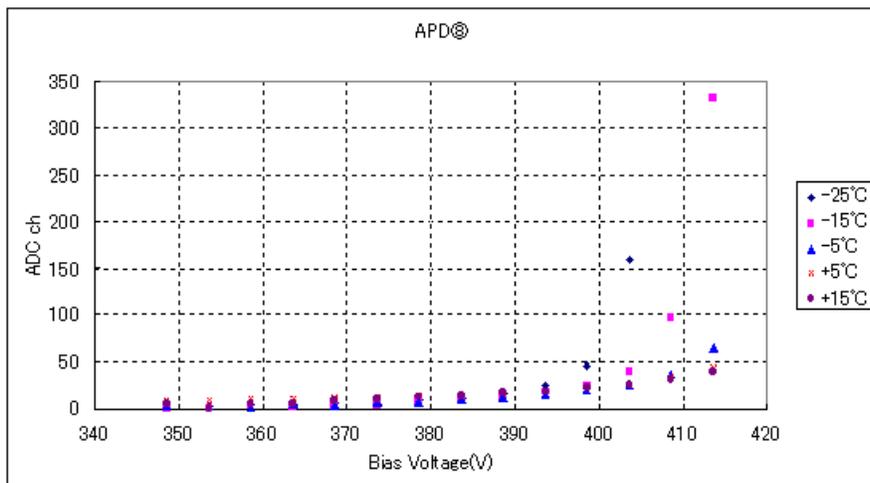
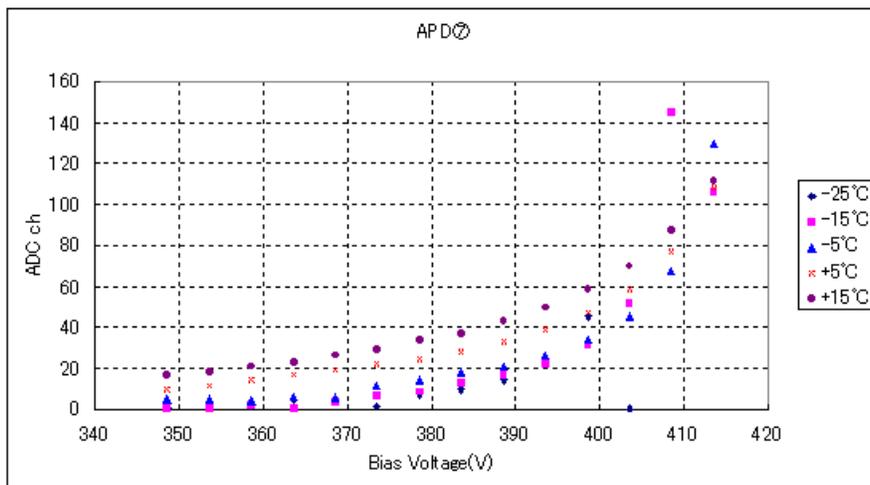
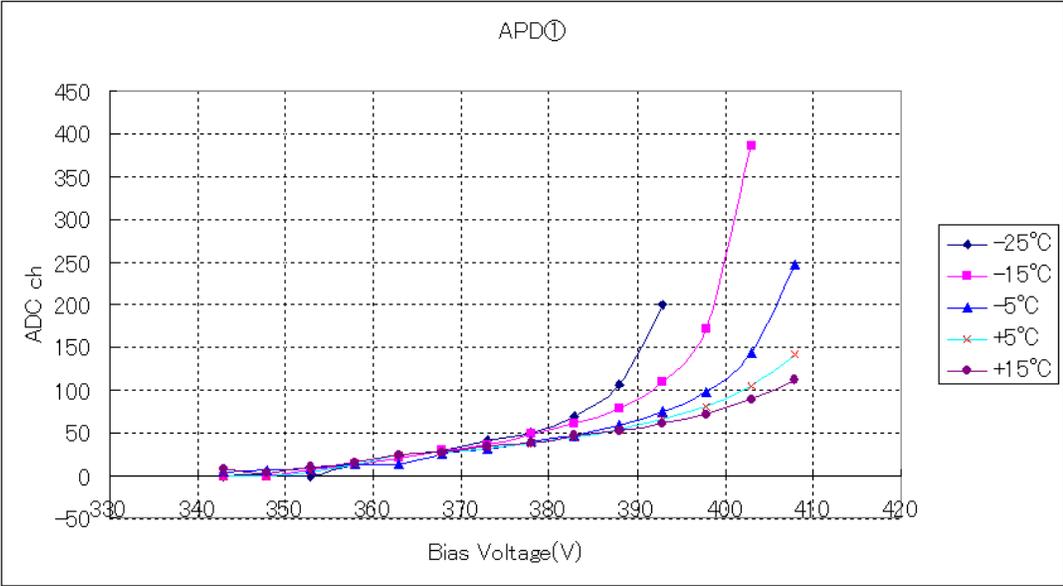


図 4-10 では、図の点を線で結んでいる。APD の増倍率曲線は環境温度を下げるごとに、印加電圧の低いほうへシフトしていることがわかる。これは、APD は温度を下げると、急激に増倍率が増加する印加電圧が低くなるということである。すなわち、 V_R 値が下がるのである。

図 4-11



次に各 APD 素子の Signal/Noise(S/N)を求めた。

この値は各環境温度での最も効率よく (Signal が大きく Noise が小さい) 作動する APD の印加電圧を示している。

図 4-12 APD ~ の S/N

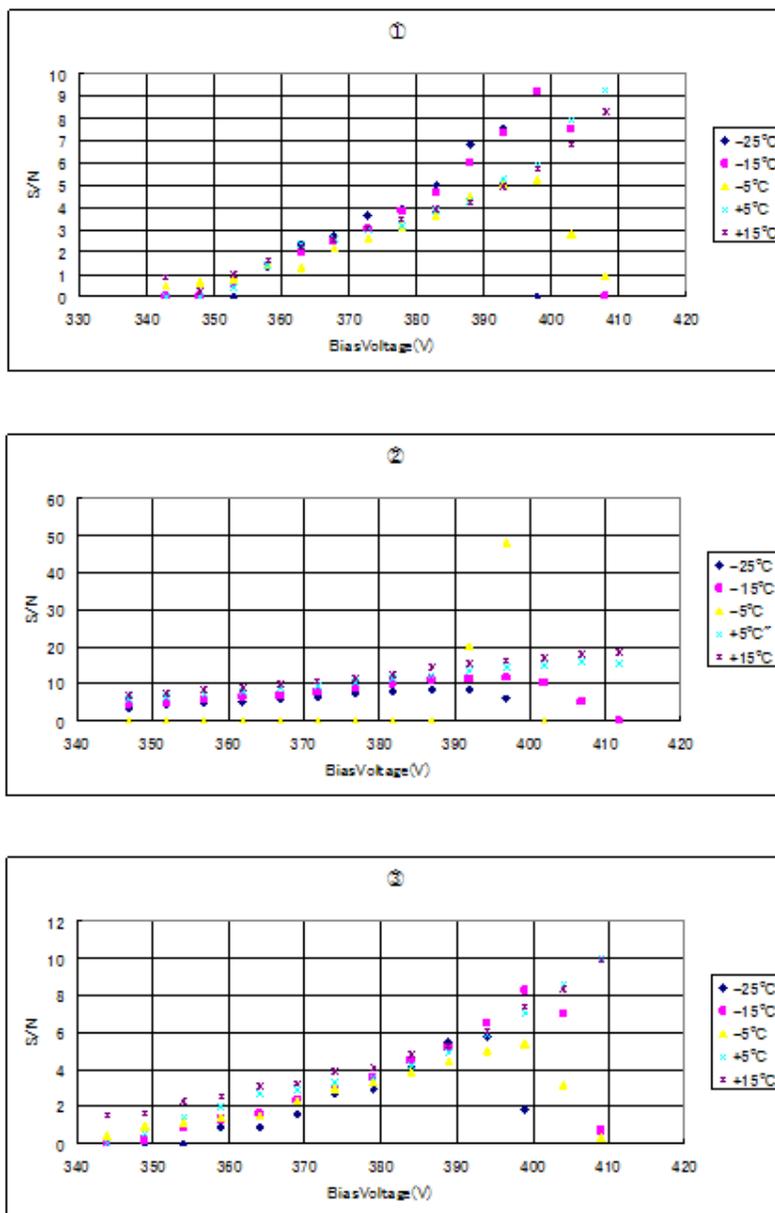


图 4-13 APD ~ Φ S/N

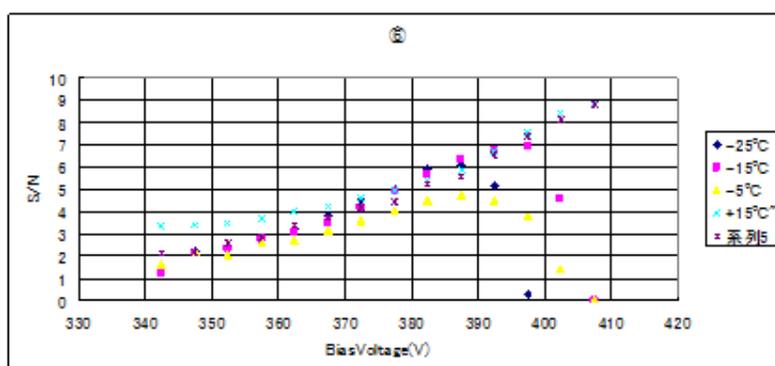
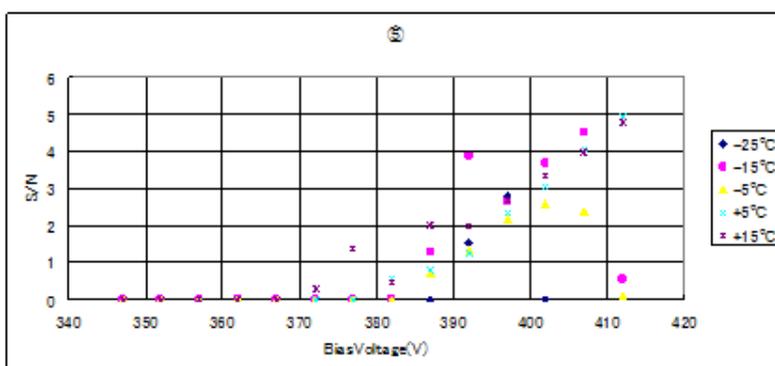
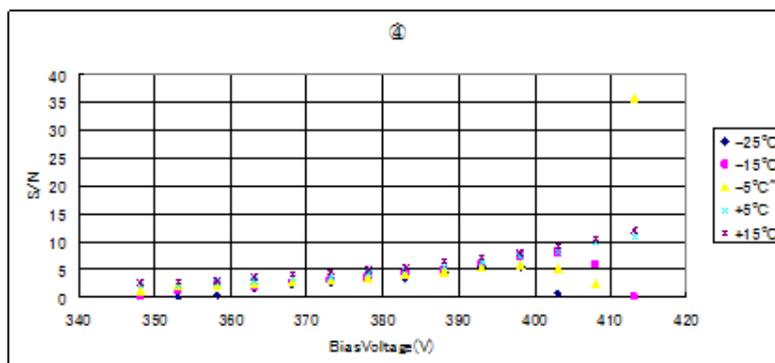
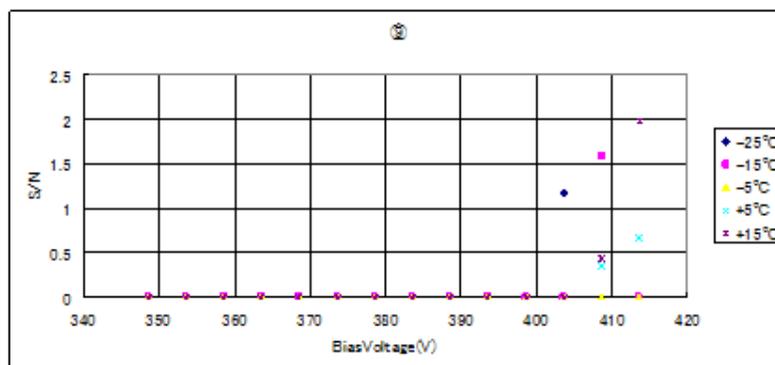
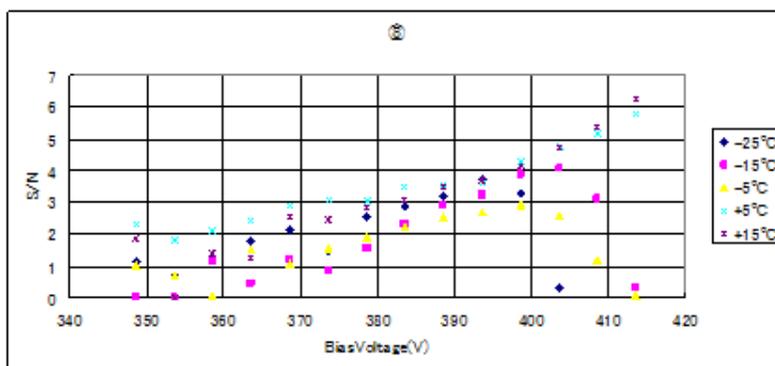
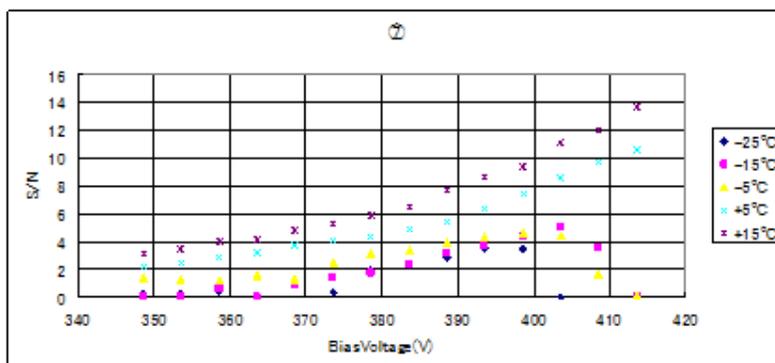


図 4-14 APD ~ の S/N



図からわかるように S/N 値は温度が下がっても高い値にはならない。どの温度の場合でも印加電圧値が低すぎると、S/N 値は低くなり、印加電圧が高すぎる場合でも S/N 値は低くなることわかる。

環境温度-25 では VR-5[V]の印加電圧が最も S/N が高いことがわかる。

4.3 常温での宇宙線測定

宇宙線のシグナルを 31 イベント測定した。全イベントを重ね合わせた結果を図に示す。

図 4-4 は図 4-3 の縦軸を拡大したものである。

図 4-15 Run716

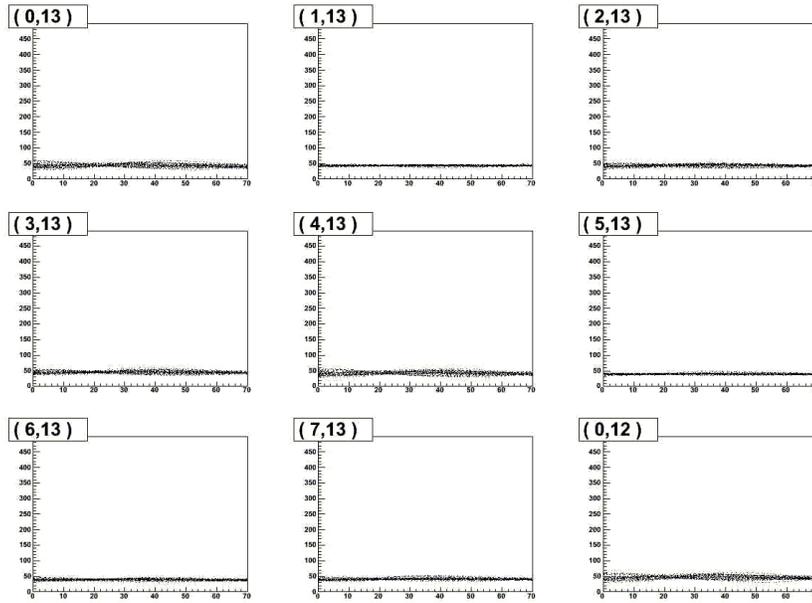
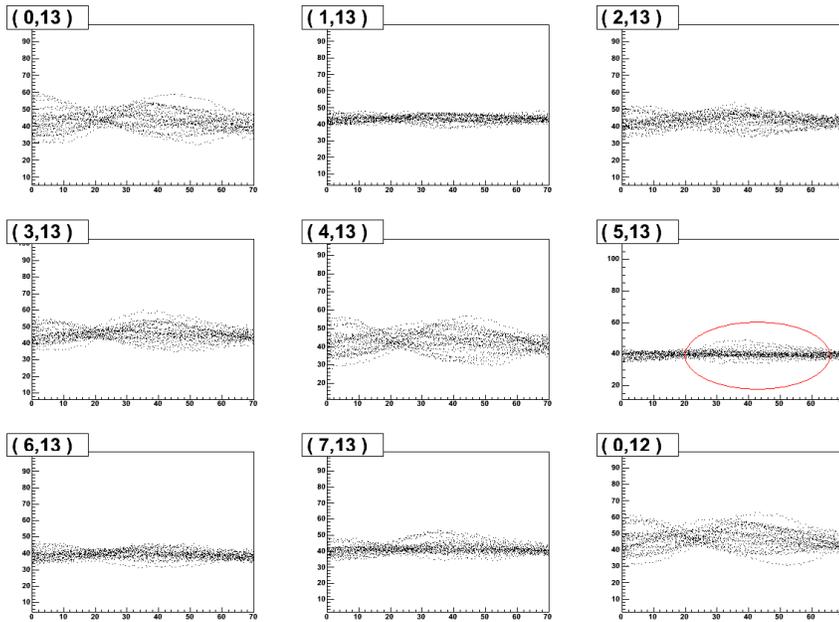
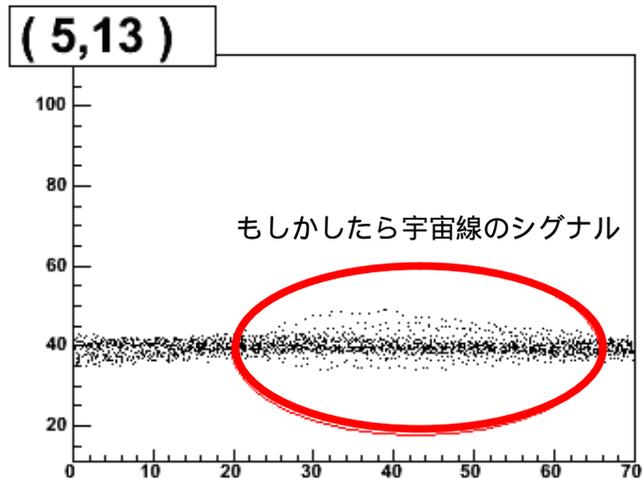


図 4-16 Run716(拡大図)



ここで、トリガーの真下である APD を注目してしてみる。

図 4-17



図の赤丸に宇宙線と思われる波形が見えている。

しかし、Pulse Height も小さく、周りの結晶との関係も見えては来ない。

4.4 -25度での宇宙線測定

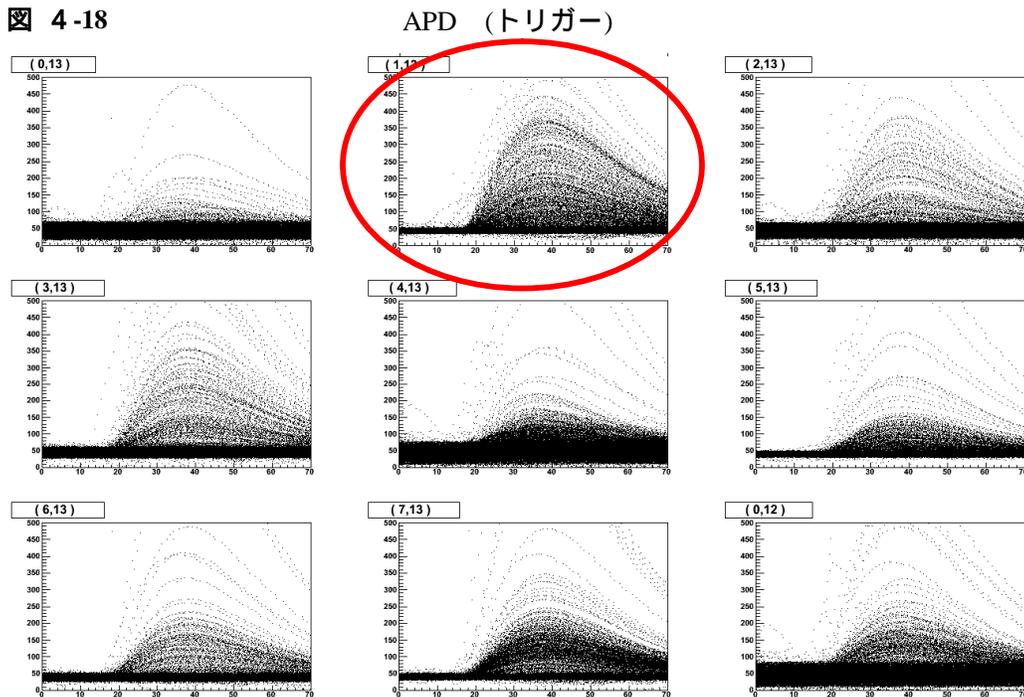
4.3で触れたように常温では宇宙線のSignalはPulse Heightが小さく確定はできなかった。そこで、環境温度-25度にし、再び宇宙線計測をした。

ここではAPDへの印加電圧はトリガーであるAPDの-25度でのS/N値が最も高い $V_R=5V$ を選択した。

その波形を縦軸ADCch 横軸sample数で図に示した。赤丸の部分がトリガーの真下にあるAPDである。このトリガーに宇宙線が入った場合、全APDでイベントの計測を始める。

宇宙線は常にまっすぐ入ってくるわけではなく普通は斜めに入射する。斜めの入射によりトリガー部分だけでなく周りのPWOにも入射し、その結果、そのPWO結晶に設置されているAPDからもシグナルが検出される。

図 4-18



トリガーの真下のAPDに多くのシグナルが見えていること、そして、他のAPDに関してすべてのシグナルが同じタイミングで検出されていることからこのシグナルはAPDで測定された宇宙線であることがわかる。

第5章 考察

5.1 増倍率曲線の印加電圧依存性

全ての APD で増倍率曲線を求めることができた。しかし、その増倍率には差があり、全ての APD で一定の P.H を見ることはできなかった。この原因の一つには各 LED の光量は一定でなくばらつきがある。この光量の揺らぎが全ての APD に増倍率 50 すなわち印加電圧 V_R をかけても一定のシグナルの大きさにならない原因だと考えられる。

5.2 増倍率曲線の温度依存性

全ての APD で環境温度を下げると増倍率曲線が低い印加電圧の方向へシフトすることが確認できた。(下図)

しかし、4.3 で見たように S/N の値は温度が下がってもよくなるという答には達していない。温度を下げるとサーマルノイズが減少し、且つ第 1 章でも触れたように増倍率は増加するはずである。結果、S/N 値は高くなる。増倍率は増加しているがノイズは減少しているとは言えない。

5.3 常温での宇宙線測定

常温での宇宙線シグナルは確認することはできなかった。

5.4 - 25 度での宇宙線測定

図は、宇宙線のヒストグラムを APD (トリガーの真下)に入ったイベントをチャンネル別に区別し、そのときの他の APD のヒストグラムを載せた。

図 5-1 APD に 0~5ch の出力信号が測定されたとき

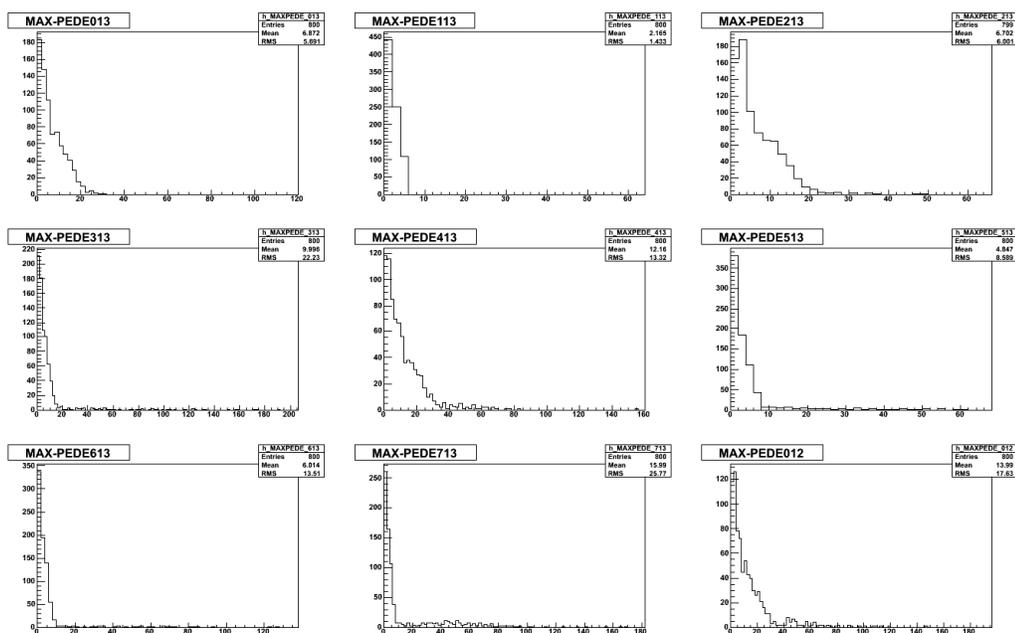


図 5-2 APD に 5~20ch の出力信号が測定されたとき

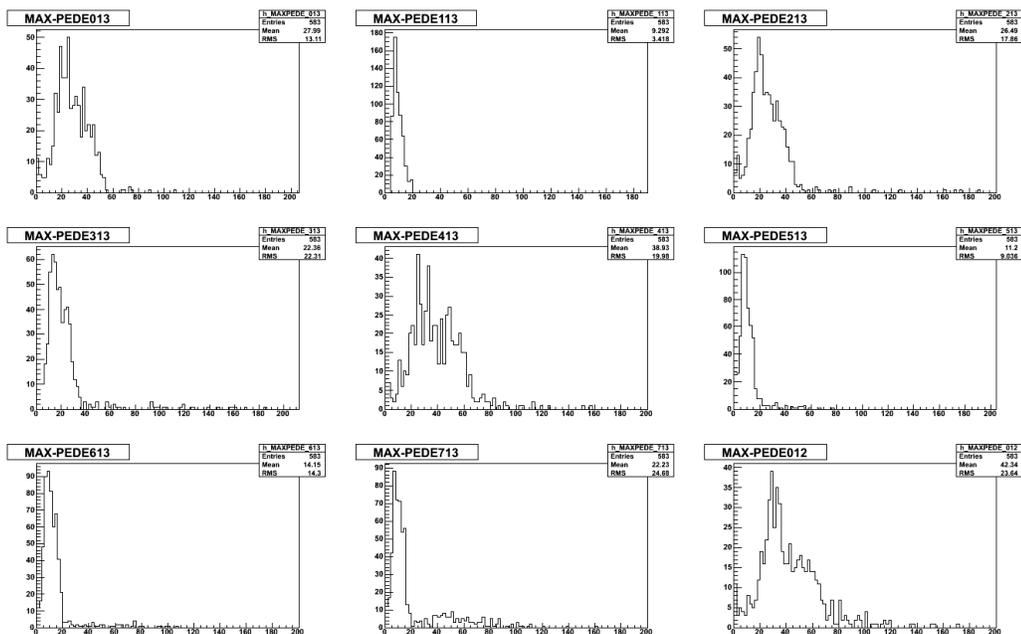


図 5-3 APD に 20ch 以上の出力信号が測定されたとき

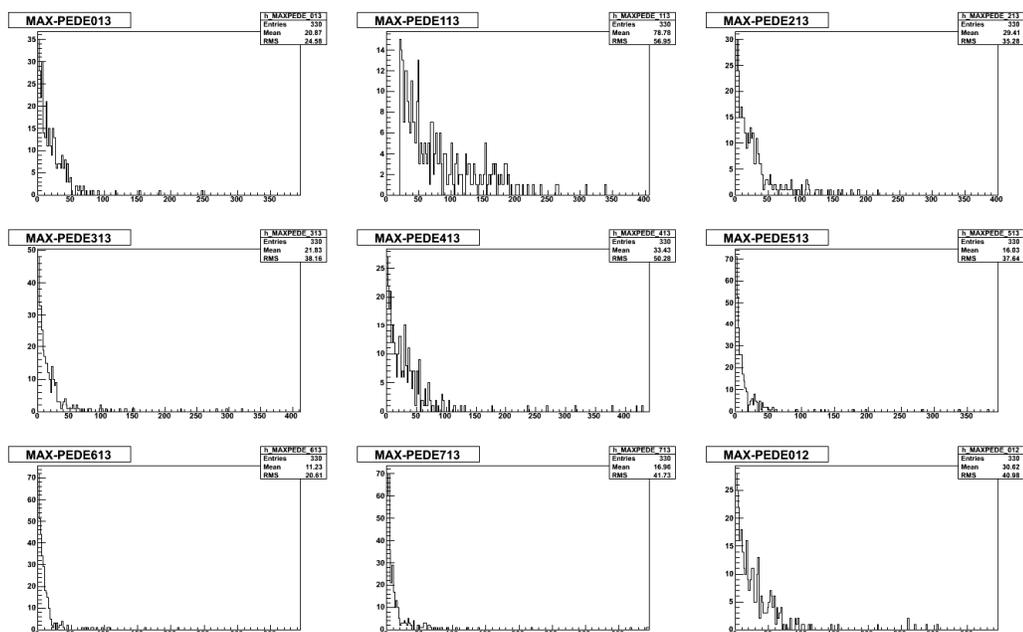


図 5-1,3 から確認できることは、他の APD ではノイズと思われる出力信号のヒストグラムが形成されている。しかし、図 4-15 ではノイズと思われるヒストグラムではなく、ある ch にピークを持つヒストグラムが形成されている。さらに、一番の APD の出力信号以外では、トリガーである の APD の周り(,)では高い ch でのピークを確認することができ、それ以外では、低い ch でのピークを確認することができる。よって、APD について 5~20.ch 付近で宇宙線が入射していると考えることができる。

第6章 結論・展望

本実験では、各 APD の増倍率の印加電圧依存性の測定、その温度依存性、宇宙線測定を行った。そして、これらの実験は全て、ALICE 実験 PHOS 検出器と同様の環境温度、検出器、読み出し系で行うことができた。印加電圧測定では増倍率曲線を求めることができ、印加電圧が V_R 値付近で急激に増幅することが確認できた。増倍率曲線の温度依存性の測定では、各 APD の増倍率曲線は温度が下がるにつれて、印加電圧の低いほうへシフトすることがわかった。宇宙線測定では、温度を下げると宇宙線のシグナルを確認することができた。しかし、宇宙線のピークを完全に確認することはできなかった。より多くの統計が求められている。より多くの宇宙線の統計で APD のエネルギー較正を行うことができ、ビームテストにつなげていけるだろう。本来、この実験はビームテストを行えば更に性能を評価できる。なぜなら、宇宙線は他の物質と相互作用をしにくいいため、結晶内では電磁シャワーを起こしにくいからである。一定のエネルギーでのビームテストを行い、エネルギー分解能を求めて性能を評価していく。

第7章 謝辞

始めに、指導教官である杉立先生に心から感謝します。私への適切な指導だけでなく、実験を行うのによい環境を作ってくださいました。そして、何度も私のことを気にかけていただき、何度も的確な方向修正をしていただきました。そして、研究室のスタッフの皆様には時に厳しく時に冗談交じりに指導していただきました。本当にありがとうございます。そして、色々な作業を分担して受け持ってくれた研究室のみなさん、本当にありがとうございます。特に丸山君、溝口君は夜間、早朝、年末、年始にかかわらず手伝ってくれて本当に感謝しております。この論文は一人では絶対にできませんでした。私を支えてくださった全ての人に感謝します。

参考文献

- [1] 杉立徹 LHC-ALICE 実験 PWO 結晶電磁カロリメータ読み出し系の開発
- [2] 袁華房 原子核物理学
- [3] 溝口謙太 2007 年広島大学卒業論文
- [4] 丸山悠 2007 年卒業論文