

2010年度 卒業論文
MPPC読み出しによる
シンチレーションカウンターを用いた荷電粒子検出

奈良女子大学理学部物理科学科 高エネルギー物理学研究室
木原理美・脇田紗弥佳

2011年3月

目次

第 1 章 概要	6
第 2 章 実験装置	7
2.1 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)	7
2.1.1 APD(アバランシェ・フォトダイオード)	7
2.1.2 APD の動作原理	8
2.1.3 ガイガーモード	8
2.2 MPPC の動作原理	9
2.3 MPPC の仕様	11
2.4 MPPC の基本特性	12
2.4.1 ダークカウント	12
2.4.2 アフターパルス	12
2.4.3 クロストーク	12
2.4.4 MPPC の温度特性	13
2.4.5 MPPC の逆バイアス特性	13
2.5 MPPC 単体の基本接続回路	13
2.6 シンチレータ	14
2.7 シンチレーションカウンター	14
第 3 章 エレクトロニクス	15
3.1 NIM 規格	15
3.2 モジュール	15
3.2.1 Clock generator	15
3.2.2 Discriminator	15
3.2.3 PMT Amplifier (AMP)	15
3.2.4 Coincidence	16
3.2.5 FAN IN / FAN OUT	16
3.3 データ収集・解析の概要	16
3.3.1 camdrv	16
3.3.2 CAMAC	16
3.3.3 クレートコントローラー	16
3.3.4 ADC	16
第 4 章 LED 点灯による MPPC の特性測定	18
4.1 LED	18
4.2 Block Diagram	19

4.3	結果・考察	20
4.3.1	測定結果	20
4.3.2	増幅率	22
4.3.3	ペDESTAL事象の割合	23
第5章	MPPC付きプラスチックシンチレーターのアレイによる宇宙線の測定	24
5.1	宇宙線について	24
5.2	実験セットアップ	25
5.3	ペDESTAL事象の測定・結果	27
5.4	宇宙線の測定・結果	28
5.5	解析・考察	29
5.5.1	雑音の除去と入射パターンの選別	29
5.5.2	検出効率	34
5.5.3	宇宙線通過時の平均光電子数の計算	37
第6章	まとめ・今後の課題	38
	謝辞	39
	参考文献	40

目 次

2.1	MPPC	7
2.2	APD の動作原理	8
2.3	クエンチング抵抗を接続したガイガーモード APD(左) とフォトン入射時の信号形成サイクル(右)	9
2.4	MPPC の等価回路	10
2.5	MPPC の外寸図	11
2.6	ダークカウント	12
2.7	MPPC の基本接続回路	13
2.8	MPPC 読み出しシンチレーションカウンターの概観図	14
3.1	Q モード	17
4.1	LED の寸法	18
4.2	LED 点灯時の Block Diagram	19
4.3	LED 点灯による MPPC 特性測定のためのアルミ Box 内のセットアップ	20
4.4	サンプルナンバー 609 に 70V の電圧をかけた場合	21
4.5	サンプルナンバー 606 に 70V の電圧をかけた場合	21
4.6	MPPC 毎の各電圧での増幅率	22
4.7	MPPC の個体毎の各電圧でのペDESTAL 事象の割合	23
5.1	宇宙線	24
5.2	宇宙線測定のためのアルミ Box 内のセットアップ	25
5.3	宇宙線測定のためのアルミ Box 内のセットアップ	26
5.4	MPPC の読み出し番号の付け方	26
5.5	ペDESTAL 事象の ADC 分布	27
5.6	宇宙線の ADC 分布	28
5.7	1 番に入射した場合の分布	29
5.8	4 番に入射した場合の分布	30
5.9	7 番に入射した場合の分布	30
5.10	2 番に入射した場合の分布	31
5.11	5 番に入射した場合の分布	31
5.12	8 番に入射した場合の分布	32
5.13	3 番に入射した場合の分布	32
5.14	6 番に入射した場合の分布	33
5.15	9 番に入射した場合の分布	33
5.16	1・7 番の threshold に対する検出効率の変化	34

5.17 1 番の threshold を 40 に固定した場合	35
5.18 1 番の threshold を 45 に固定場合	35
5.19 7 番の threshold を 40 に固定した場合	36
5.20 7 番の threshold を 45 に固定した場合	36

表 目 次

2.1	MPPC の仕様	11
3.1	ADC:LeCroy 社 2249W	17
4.1	LED の規格	18
5.1	プラスチックシンチレーターと MPPC の対応	26
5.2	平均光電子数の計算結果	37

第1章 概要

高エネルギー物理学は、素粒子と呼ばれる物質の究極的な構成要素とそれらの間に働く相互作用の性質を実験的に明らかにする学問である。そのため生成した粒子の様々な物理量を精度よく測定する必要がある。生成された粒子を検出するものとして、入射粒子のエネルギー損失を光に変えるシンチレーターと、その光を電気信号に変換する光検出器を組み合わせたシンチレーションカウンターは非常に広く使われている。MPPC (Multi Pixel Photon Counter) は、浜松ホトニクス社が開発した新しいタイプの半導体光検出器である。優れたフォトカウンティング能力、コンパクト、常温・低バイアスで作動するなどの性能の良さから将来的に様々な分野において光電子増倍管などの従来の光検出器に代わる存在になると注目を浴びている。本研究では MPPC とプラスチックシンチレーターのバー (棒) を組み合わせたカウンターが荷電粒子を検出する性能について試験した結果について報告する。

本論文では、まず MPPC の原理や仕様を述べる。その後実験装置を説明し、さらに実験方法及び結果について記し、まとめる。

第2章 実験装置

2.1 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

Multi Pixel Photon Counter (MPPC) は浜松ホトニクス社が開発した PPD(Pixelated Photon Detector) の商品名である。PPD とは、ピクセル化された APD をガイガーモードで動作させ、互いに並列つなぎになった各ピクセルの信号のアナログ和を読み出すタイプの半導体光検出器のことを言う。図 2.1 に本研究で使用した MPPC の画像を示す。受光面積 1mm^2 でセラミックパッケージのものである。特長は、ガイガーモードのため $10^5 \sim 10^6$ におよぶ高い増幅率を持ち、室温で 100V 以下の比較的低い印加電圧で動作することである。この結果、高いフォトンカウンティング能力を持っている。個々のピクセルは十分小さいため、信号パルスの形成にかかる時間が短く、時間分解能がよい。また、半導体であるため、磁場の影響を受けない。



図 2.1: MPPC

2.1.1 APD(アバランシェ・フォトダイオード)

微弱な光の検出はフォトン単位で光電子や電子 - 正孔対を得ることになる。半導体光検出器では通常、フォトン 1 個に対して電子 - 正孔対を 1 個得る。APD は内部構造を工夫して、逆バイアスを印加した際に、強い電場が形成される領域を設けることにより、光電子の数を増やすことが出来るフォトダイオードである。

2.1.2 APD の動作原理

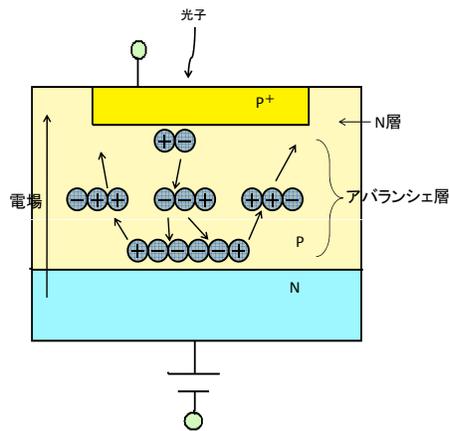


図 2.2: APD の動作原理

半導体中に大きな電場があると、入射フォトンにより発生した電子が加速され、ほかの半導体原子と衝突して複数の電子をはじき出す。ここで、はじき出された電子もまた電場によって加速され、次の衝突でさらに電子をはじき出す。この連鎖によって、移動する電子が指数関数的に増える現象をアバランシェ増倍と言う。APD は、このアバランシェ増倍を利用して受光感度を上げたフォトダイオードである。

2.1.3 ガイガーモード

降伏電圧を超えた動作電圧で動作できる APD の場合、そこまで印加電圧を上げるとアバランシェの形成がデバイス全面に広がり、増幅された電子の数は入射粒子の数と比例しなくなる。この状態をガイガーモードと言う。ガイガーモードでは、例えば同時に入射したフォトンの数が 1 個、2 個、10 個のいずれの場合も信号として得る電子の数の平均が 100 万個という動作になる。このガイガーモードにおける増幅率は、降伏電圧未満のノーマルモードでの数 10～数 100 倍に対し $10^5 \sim 10^6$ 倍と非常に大きくなる。

2.2 MPPCの動作原理

MPPCはガイガーモードAPDピクセルを並列接続した構造になっている。ガイガーモードAPDのクエンチング抵抗を接続した時の動作について述べる。ガイガーモードにおいて、APDに光子が入射して励起すると、入射した光子数に関係なく同一の信号Qが出力される。この信号Qは式(2.1)で与えられる。信号によりクエンチング抵抗に電流が流れると、逆バイアスは V_{BR} まで電圧降下して、ガイガーモードのアバランシェ形成が停止する。その後、再充電され逆バイアスが V_R まで戻ると、再び入射光子に対しガイガーモードのアバランシェ形成が可能な状態になる。この信号パルス形成のサイクルを図2.3に示す。

$$Q = C \times (V_R - V_{BR}) \quad (2.1)$$

C : 各ピクセルの容量

V_R : 逆バイアス

V_{BR} : 降伏電圧

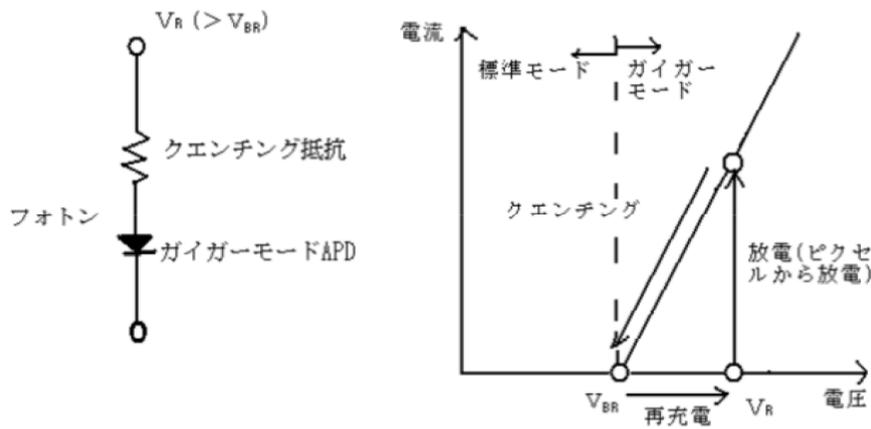


図 2.3: クエンチング抵抗を接続したガイガーモード APD(左) と光子入射時の信号形成サイクル (右)

MPPC の等価回路は図 2.4 に示す様になる。MPPC の各 APD ピクセルはガイガーモードで動作し、MPPC 全体の出力は各ピクセルの出力パルスを重ね合わせたものになるので、パルスの高さ (電荷量) から MPPC が検出したフォトン数を見積もることができる。したがって、MPPC 全体の出力電荷は式 (2.2) で表される。

$$Q_{out} = C \times (V_R - V_{BR}) \times N_{fired} \quad (2.2)$$

N_{fired} : フォトンを検出した APD ピクセル数

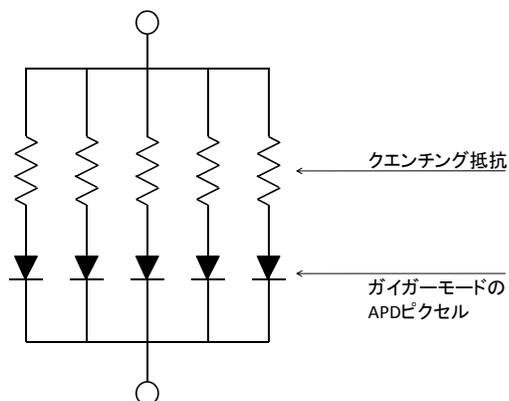


図 2.4: MPPC の等価回路

2.3 MPPC の仕様

今回使用した MPPC は、受光部の面積 1mm^2 、ピクセル数 400 のセラミックタイプ (S10362-11-050C) である。表 2.1 にその仕様を、図 2.5 に外寸図を示す。

表 2.1: MPPC の仕様

項目		単位
チップサイズ	1.5×1.5	mm × mm
有効受光面サイズ	1×1	mm × mm
ピクセル数	400	—
ピクセルサイズ	50×50	$\mu\text{m} \times \mu\text{m}$
開口率	61.5	%
感度波長範囲 (λ)	270~900	nm
最大感度波長 (λ_p)	400	nm
量子効率 (QE)	70	%
検出効率 (PDE)	50	%
動作電圧	70 ± 10	V
ダークカウント	270	kcps
端子間容量	35	pF
時間分解能 (FWHM)	220	ps
逆バイアスの温度係数	50	mV/ C°
増幅率	7.5×10^5	—

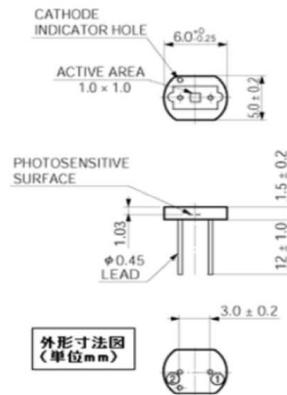


図 2.5: MPPC の外寸図

2.4 MPPCの基本特性

2.4.1 ダークカウント

MPPCは固体素子であるため、電子-正孔対は入射光子によるものだけでなく、熱的励起によっても発生する。熱的励起で発生した電子-正孔対の場合もガイガーモードにより、光子入射時と同様の信号パルス形成が起こる。このパルス形成をダークカウントと呼ぶ。ダークカウントは、温度が低いほどそのレートが小さくなる。

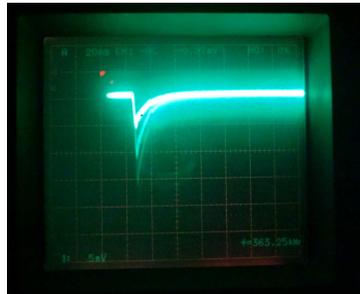


図 2.6: ダークカウント

光を遮断し、暗黒下で MPPC に 70V の電圧を印加し、オシロスコープによって観測されたパルスを図 2.6 に示す。このダークカウントのパルスの波高も離散的であることが、MPPC がガイガーモードで動作し、光子カウンティングが可能なデバイスであることの反映である。

2.4.2 アフターパルス

MPPC の各ピクセルは光子が入射されるとアバランシェを生成して一定の大きさのパルスを出力するが、発生したキャリアが半導体内の結晶欠陥にトラップされ、それが遅れて解放されたときに異なる大きさのパルスを出力することがある。これをアフターパルスと言う。温度が低いほどキャリアが結晶欠陥にトラップされる確率が高くなるため、アフターパルスは増加する。

2.4.3 クロストーク

APD ピクセルにおいて、アバランシェの過程では、光子が発生する。この光子が別の APD ピクセルで検出された場合、そこで新たにアバランシェが形成され、MPPC の出力パルスは、実際に入射した光子数に対応するものよりも大きくなる。この現象を MPPC のクロストークという。

2.4.4 MPPC の温度特性

MPPC の増幅率は温度に依存する。固体は、温度が上がると結晶の格子振動が激しくなり、発生したキャリアが十分エネルギーを得られないうちに結晶と衝突する確率が高くなる。そのため、衝突の際にキャリアのエネルギーが小さいと、結晶のイオン化が起こりにくくなる。よって、MPPC の温度が高いほど増幅率は低くなる。

2.4.5 MPPC の逆バイアス特性

MPPC の増幅率は逆バイアス、電圧と降伏電圧の差すなわち $V_R - V_{BR}$ にほぼ比例する。したがって逆バイアスを上げていくと、増幅率も大きくなる。このことと、増幅率の温度特性をあわせて考えると、増幅率を長期にわたって一定にするには、MPPC の温度を一定にするか、温度変化に対応して、印加する逆バイアス電圧を変化するか、のいずれかを行えばよいと言える。

ただし、本研究では、長期にわたるデータ収集の必要がなかったことと、荷電粒子のシンチレーターへの入射が雑音と分離しているか否かというバイナリー検出を基本としたデータ解析を行ったので、空調のある室内中で動作させる以外に特に温度を管理する仕組みは導入していない。

2.5 MPPC 単体の基本接続回路

MPPC の基本接続回路を図 2.7 に示す。

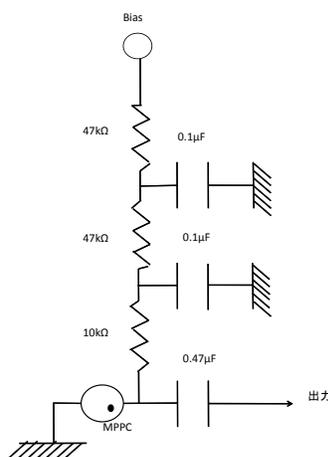


図 2.7: MPPC の基本接続回路

47kΩ の抵抗と 0.1μF のコンデンサーのローパスフィルター 2 段で、電源からくるノイズを除去する。読み出し側は 0.47μF のコンデンサーで電源からくる直流成分を除去する。シンチレーションカウンターとして動作させ、宇宙線の検出を行う際には +70.3V の逆バイアス電圧を印加した。

2.6 シンチレーター

荷電粒子が通過したときに蛍光を発する物質をシンチレーターと言う。これは無機物質の結晶と有機物質に大別されており、その発光機構は両者でかなり異なっている。無機シンチレーターで、特に発光に寄与する物質がドーピング(添加)されている場合には、結晶格子内にドーピングした物質によって発光中心が作られている。荷電粒子が結晶に入ると結晶中の電子が基底状態から伝導体に上げられ、自由電子と正孔が形成される。これらが結晶内を動き回り、発光中心に達して脱励起すると発光する。このシンチレーション光の減衰時間は励起状態の寿命によって決まり、結晶の温度に依存することも少なくない。

一方、有機シンチレーターは結晶格子と関係なく、放射線によって分子内の電子が励起され、励起状態から基底状態に落ちるときに蛍光を発する。光の減衰時間は約 10^{-9} 秒まで短く出来る。最近では蛍光体として、残光時間の短いパラフェニールなどをプラスチックに混ぜたものを用いて、入射粒子の通過時刻を 10^{-11} 秒の精度で測定出来るものもある。

本実験では、NE102A と呼ばれる材質のプラスチックシンチレーターを使用した。NE102A の発光の減衰時間は 10ns であり、長さ 8.1cm、幅 1cm、厚さ 1cm の棒状に加工し、表面を鏡面研磨したものを用いた。

2.7 シンチレーションカウンター

蛍光を光電効果によって電子に変え、その数を増幅して電気的に取り出す検出器をシンチレーションカウンターと呼ぶ。荷電粒子の検出にプラスチックシンチレーターを用いる場合、今までは光検出器として光電子増倍管が一般的であったが、本研究では新型半導体検出器である MPPC を用いて、図 2.8 に示すシンチレーションカウンターを製作した。プラスチックシンチレーター内で発生した光を効率よく収集するために、シンチレーターをアルミ箔で包み、その外側に黒の遮光テープを巻いた。また、図 2.8 に示すように MPPC は端面に光学グリースで粘着した後、輪ゴムで外れないように粘着した。

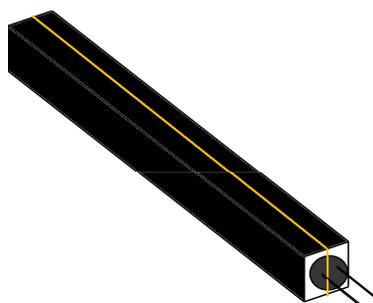


図 2.8: MPPC 読み出しシンチレーションカウンターの概観図

第3章 エレクトロニクス

本研究で使用したエレクトロニクスについて述べる。

3.1 NIM規格

実験で使用されるエレクトロニクスで、コンピューター制御の必要がないものには NIM 規格が使われており、モジュールの形で構成される。NIM 規格 (Nuclear Instrument Modules) とは米国原子力委員会によって制定された「放射線測定モジュール標準規格 TID-20893」を指す。回路モジュールの機械的・電氣的の仕様を定めている規格で、素粒子・原子核等の幅広い分野の実験に使われている。標準的な NIM ビンはモジュールが 12 個挿入できる形になっている。

3.2 モジュール

3.2.1 Clock generator

N-TM203 100MHz Clock Generator は、最高で 100MHz のパルスジェネレーターと、クロックジェネレーターを 1 幅の NIM モジュールに納めた製品である。パルスジェネレーター部は、Fast NIM 信号の 100MHz、50MHz の固定出力と 12 種類の周波数を発生する出力から構成されている。この 12 種類の周波数は、10Hz、100Hz、500Hz、1KHz、5KHz、10KHz、50KHz、100KHz、500KHz、1MHz、5MHz、10MHz であり、ロータリースイッチにより選択できる。又、出力パルス幅を可変でき、Fast NIM 信号と TTL 信号 (50 Ω ドライバー) を出力する。そして、これらの出力部は、パルスジェネレーター部と同様に、Fast NIM 信号と TTL 信号 (50 Ω ドライバー) を出力するので、様々なモジュールに対応可能である。

3.2.2 Discriminator

入力信号が設定した threshold(しきい値) を超えた時にパルスを出力する装置。LED 点灯による MPPC 単体の特性実験では、threshold 電圧と出力パルス幅は、各チャンネル独立して調整することが出来るものを使用した。9 本のシンチレーションカウンターのアレイで宇宙線を検出する実験では、全てのチャンネルを一律に調整する 8 チャンネルのものを使用した。threshold 電圧は、-21mV から -1V まで設定できる。また、出力パルス幅は、約 3ns~100ns まで、フロントパネルのポテンシオメーターで調整することが出来る。

3.2.3 PMT Amplifier (AMP)

光電子増倍管や MPPC のように応答が速い光検出器の入力信号を線型増幅する。約 10 倍の増幅率を持つ。

3.2.4 Coincidence

複数の NIM 入力信号の AND をとるモジュール。1 チャンネルに 4 入力あり、AND 論理に入れる信号をトグルスイッチにより選択できる。

3.2.5 FAN IN / FAN OUT

複数の NIM 入力信号の OR を作るモジュールである。

3.3 データ収集・解析の概要

3.3.1 camdrv

データ収集システム用 Kinoko プロジェクトのソフトウェアとして開発された CAMAC 向けの Linux デバイスドライバが camdrv である。PC は OS に Redhat Linux9 を搭載しているので、2.4 カーネル対応の CC-7700 用ドライバを使用した。

3.3.2 CAMAC

CAMAC(Computer Automated Measurement and Control) とは検出器から得られたアナログ電気信号をデジタル量に数値化するエレクトロニクスの規格名である。計測や制御を目的とする装置を作成するのに、独立の単位機能を持つモジュール・ユニットを適当に組み合わせて構成する。このような複雑な装置を比較的単純なユニットの組み合わせで実現できる利点を持っている。

3.3.3 クレートコントローラー

本実験で使用したクレートコントローラーは東陽テクニカの CC-7700 型で CAMAC 規格に対応した A2 タイプの製品である。CC/ISA(16 ビット) または CC/PCI(24 ビット) と組み合わせて各種のワークステーションや PC と CAMAC システムをインターフェイス出来る。

3.3.4 ADC

ADC とは、Analogue Digital Converter の略で、アナログからデジタルへの変換器である。今回使用した ADC は LeCroy 社の 2249W 型で、その仕様の概略を表 3.1 に示す。この ADC は「電荷積分型」と呼ばれるタイプで、ゲートパルスの幅の中に入って来た信号電荷の総和つまり、信号の電流を積分した結果を、対応する整数に変換する(図 3.1)。このメカニズムをもう少し詳しく説明すると、ゲートパルスが持続している間に入力された電荷をコンデンサーに蓄積する。ゲートパルスが終了したら、別のコンデンサーに内部クロックでパルスを送って段階的に充電しつつ、コンパレーターでこの二つのコンデンサーの電位を比較し、同じになったら停止する。停止するまでにクロックから送ったパルスの数で信号電荷に対応する整数を得る。表 3.1 に示すように $1 \text{ count} = 0.25 \text{ pC}$ より電荷 (pC) に対して ADCcount は傾き 4.0 の比例関係がある。

表 3.1: ADC:LeCroy 社 2249W

Model	2249W
No.of Channels	12
No.of Bit	11
CAMAC size	2
Charge(Q) or Voltage(A)	Q
Full scale	-512pC \pm 5 %
Maximum Resolution	-0.25pC
Analog Inputs	AC-coupled(50 Ω)
Conversion Time	106 λ sec

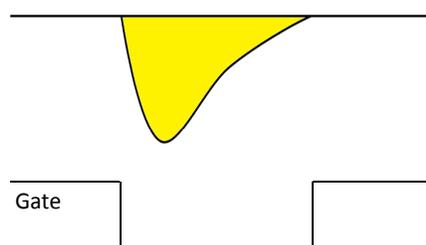


図 3.1: Q モード

第4章 LED点灯によるMPPCの特性測定

LEDを発光させて、微弱な光をMPPCに入射させ、増幅率や光の検出効率を測定した。

4.1 LED

MPPCを試験するための光源として、日亜化学製の青色LED(NSPB320BS)を使用した。LEDの規格を表4.1、LEDの寸法を図4.1に示す。LEDの動作回路では、Clock generator間に100Ωの抵抗を入れた。

表 4.1: LED の規格

項目	記号	最大定格	単位
順電流	I	30	mA
パルス順電流	I	100	mA
逆電圧	V		V
許容損失	P	120	mW
動作温度	T_o	-30~	mV/C°
保存温度	T_t	-0~100	mV/C°

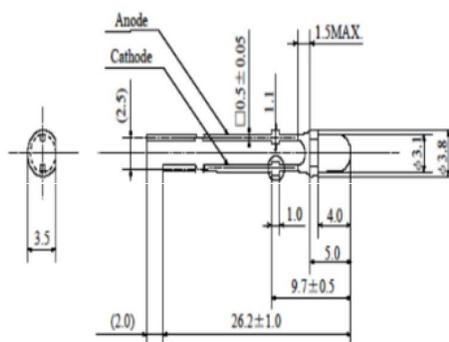


図 4.1: LED の寸法

4.2 Block Diagram

MPPC 単体の特性を測定するため、Clock generator が発する TTL パルスで LED を点灯させ、MPPC の出力信号を記録・解析した。ここでは MPPC の増幅率と全事象数に対するペDESTAL 事象の割合について述べる。方法は、69V から 71V の範囲で逆バイアスを変化させ、各々の電圧において MPPC の波高を ADC で記録し、その分布をもとに議論する。測定は 10 個の MPPC に対して行った。図 4.2 に Block Diagram、図 4.3 に Box の写真を示す。

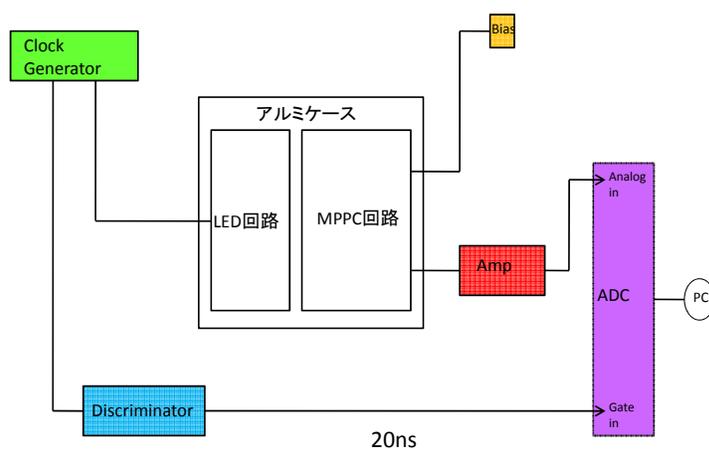


図 4.2: LED 点灯時の Block Diagram



図 4.3: LED 点灯による MPPC 特性測定のためのアルミ Box 内のセットアップ

雑音をシールドするためにアルミ Box 内に LED と MPPC の回路を入れ、Clock Generator の 1kHz の TTL パルスで LED を発光させた。Gate を作成する NIM パルスは TTL パルスと同期しており、LED が点灯したときの MPPC の出力を読み出す構成になっている。

4.3 結果・考察

4.3.1 測定結果

測定結果を縦軸に事象数、横軸に ADC カウントとしたヒストグラムとして示す。このヒストグラムでは検出した光電子の個数によって等間隔にピークが立っている。本研究では 10 個の MPPC をサンプルナンバーで区別している。以下の図 4.4 及び図 4.5 にサンプルナンバー 609 及び 606 の波高分布をそれぞれ示す。この分布より、検出した光電子 (p.e.) の数 (0 個、1 個、…) に応じて明確に分離していることを示している。

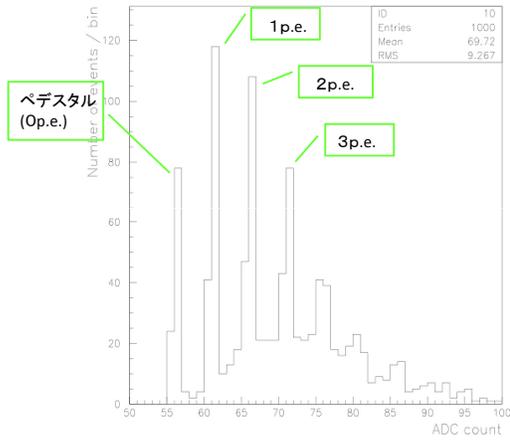


図 4.4: サンプルナンバー 609 に 70V の電圧をかけた場合

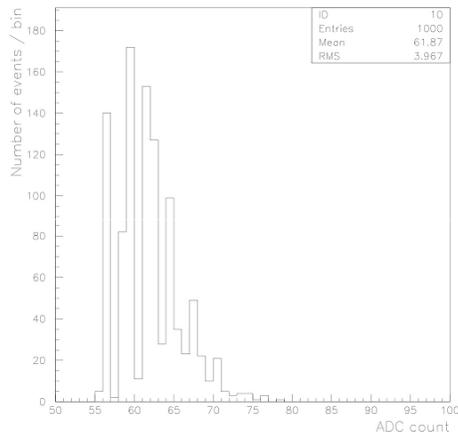


図 4.5: サンプルナンバー 606 に 70V の電圧をかけた場合

4.3.2 増幅率

各 MPPC の増幅率を求める。得られたヒストグラムから式 (4.1) で各電圧での増幅率を求め、これを MPPC 毎にグラフにまとめたものが図 4.6 である。このグラフの縦軸は増幅率、横軸は電圧である。

$$\text{増幅率} = \frac{\text{2つのピークの間隔} \times \text{ADC 変換量}}{\text{1 電子当たりの電荷量}} \quad (4.1)$$

2つのピークの間隔：1p.e. の ADC カウント数 - 0p.e. の ADC カウント数

ADC 変換量：0.25[pC/counts]

1 電子当たりの電荷量： 1.602×10^{-19}

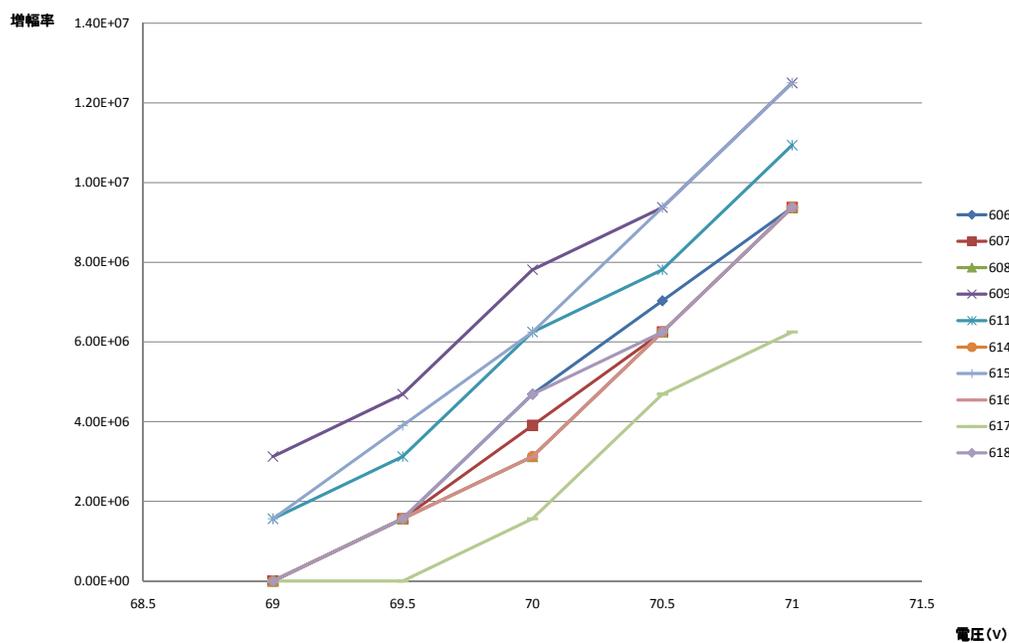


図 4.6: MPPC 毎の各電圧での増幅率

4.3.3 ペDESTAL事象の割合

この ADC 分布は平均で数個のフォトンが入射したもので、クロストークやアフターパルスの影響を無視すればポアソン分布にしたがうため、分布関数は式 (4.2) である。ここで、 $n = 0$ のときはクロストークやアフターパルスの寄与はないため式 (4.3) となる。したがって、 $n = 0$ の事象 (ペDESTAL事象) の割合から平均光電子数を得ることができる。

$$f(n; \nu) = \frac{(\nu^n e^{-\nu})}{n!} \quad (4.2)$$

ν : 平均値、 n : 検出した光電子数

$$f(0; \nu) = e^{-\nu} \quad (4.3)$$

式 (4.4) で全事象数に対するペDESTAL事象の割合を求める。増幅率と同様に、ペDESTAL事象の割合を求めて、これを MPPC の個体毎にシンボルを違えて、印加電圧の関数として示したものが図 4.7 である。

$$\text{ペDESTAL事象の割合} = \frac{N_0}{N_{tot}} \quad (4.4)$$

N_0 : 0p.e. の事象数、 N_{tot} : 全事象数

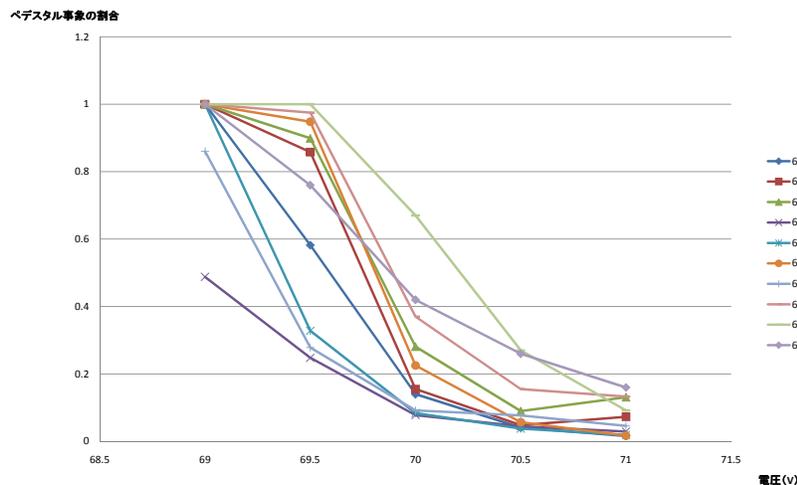


図 4.7: MPPC の個体毎の各電圧でのペDESTAL事象の割合

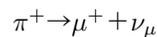
ほとんどの場合で、70V 以上を印加すれば、フォトン入射に反応した信号が出力されるということがわかった。

第5章 MPPC付きプラスチックシンチレーターの のレイによる宇宙線の測定

5.1 宇宙線について

1911~12年にヘスは、高さ5000mまで気球を何回か飛翔させ、5000mの上空では地表付近よりも空気中でイオンがたくさん出来ていることを確かめた。この結果、大気圏外から地球大気の中にやってくる透過性の強い放射線が存在することを突き止めた。この放射線を宇宙線と呼ぶ。宇宙線の発生源については未知な点も多いが、超新星は主な発生源の1つだと考えられている。

地球の大気圏の外から来る宇宙線を一次宇宙線と呼び、その90%以上は陽子である。一次宇宙線が大気の原子核と衝突して発生する素粒子を、二次宇宙線という。二次宇宙線としては、まず π 中間子が大量に作られ、 π 中間子の崩壊で生じる μ 粒子は地表の 10cm^2 に1秒間に約1個の割合で降り注いでいる。この μ 粒子を生成する反応を π^+ について書くと



となる。

図5.1に宇宙線が地表にどのように降り注ぐかを説明した模式図を示す。

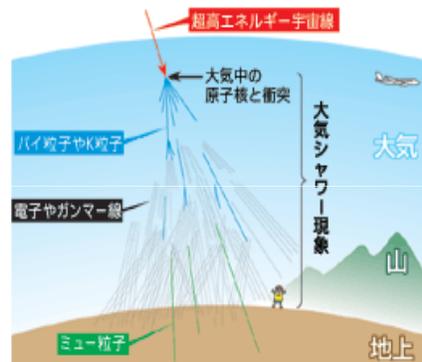


図 5.1: 宇宙線

5.2 実験セットアップ

宇宙線の測定の際にバイアスは全てのカウンターで一律に 71V とした。Block Diagram を以下の図 5.2 に、アルミ Box 内の写真を図 5.3 に示す。今回の実験では 9 本の MPPC 付きプラスチックシンチレータをアレイにして使用するので、1 枚の回路板に MPPC の基本接続回路 3 つを並列に配置したものを 3 段重ねにしてアルミ Box に入れた。宇宙線は、上の層の 3 本のカウンターのうち少なくとも 1 本が信号を出し、かつ下の層の 3 本のカウンターのうち少なくとも 1 本が信号を出したとき、それらのコインシデンスをとってトリガーとした。

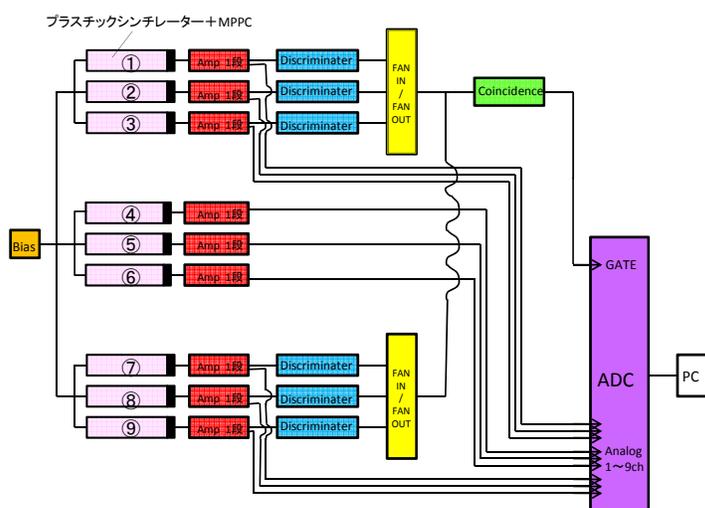


図 5.2: 宇宙線測定の Block Diagram

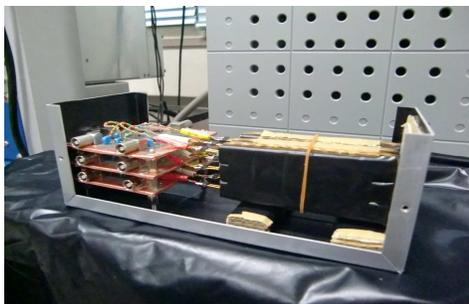


図 5.3: 宇宙線測定のためのアルミ Box 内のセットアップ

ここで、MPPC の読み出し番号 (丸数字) と各プラスチックシンチレーターとの対応を図 5.4 に示す。以後この番号で 9 本の MPPC 付きプラスチックシンチレーターを区別する。

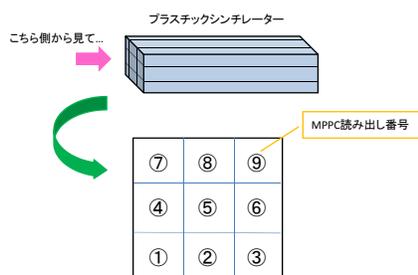


図 5.4: MPPC の読み出し番号の付け方

また、どの MPPC をどのプラスチックシンチレーターに粘着したのかを表 5.1 に示す。

表 5.1: プラスチックシンチレーターと MPPC の対応

読み出し番号	MPPC のサンプルナンバー
1	615
2	616
3	617
4	609
5	611
6	614
7	606
8	607
9	608

5.3 ペDESTAL事象の測定・結果

クロックジェネレーター側でゲートパルスを作り、ペDESTAL事象のみを測定した。測定結果は9本のADC分布を図5.5に示す。縦軸は事象数、横軸はADCcount数である。

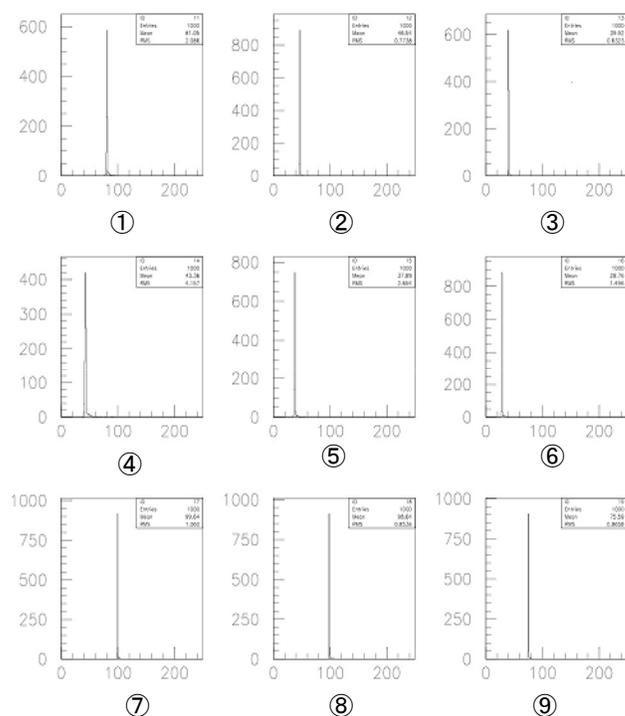


図 5.5: ペDESTAL事象の ADC 分布

5.4 宇宙線の測定・結果

次に宇宙線を 10000 事象分測定した。その ADC 分布を図 5.6 に示す。この ADC 分布図は前節の結果を用いてペダスタルの値を引き算してある。縦軸は事象数、横軸は ADCcount 数である。

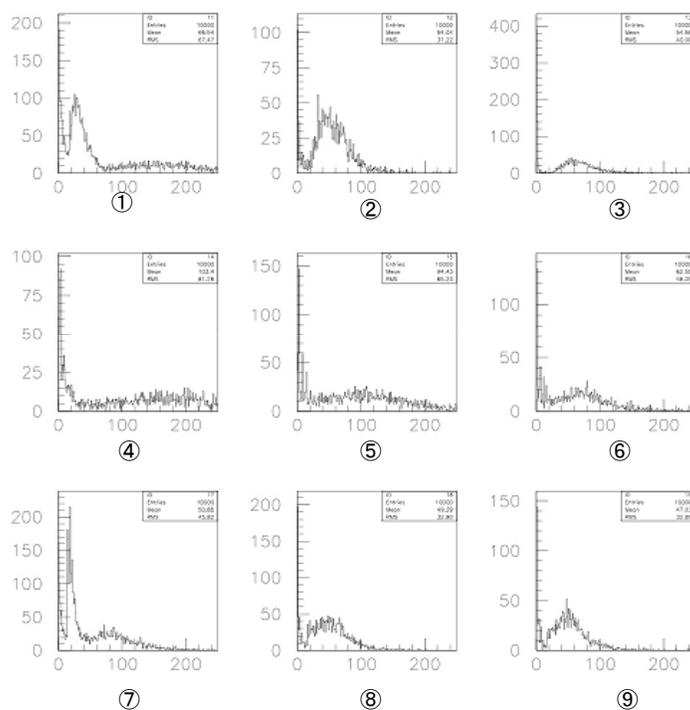


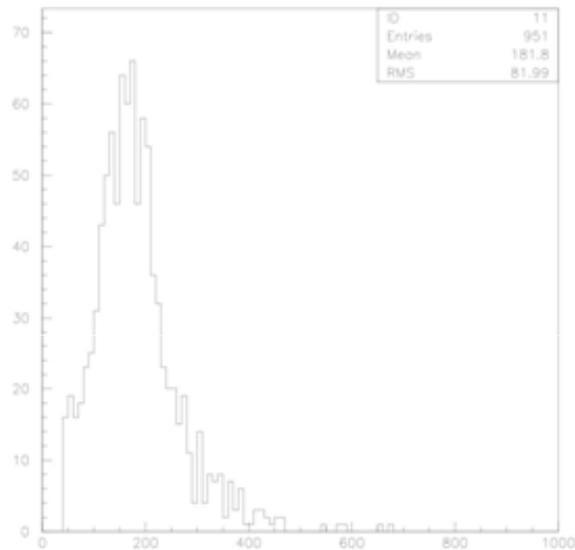
図 5.6: 宇宙線の ADC 分布

5.5 解析・考察

5.5.1 雑音の除去と入射パターンの選別

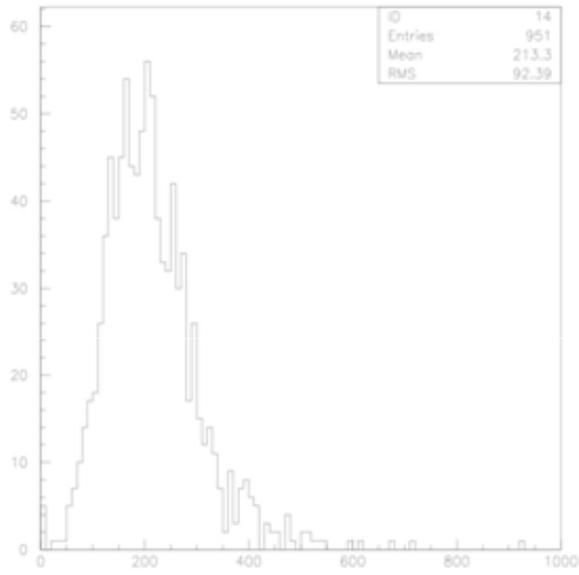
記録されたデータの事象毎に、またカウンター毎に ADC カウント数からペDESTALの値を引き算すると、正味の波高を得る。雑音を除去するために、求めた正味の波高が threshold(しきい値) 以上なら、そのシンチレータが鳴ったと見なすことにする。threshold は 1 番と 7 番を 40ADC カウントとし、それ以外は一律 3ADC カウントとした。

次に正味の波高のデータから宇宙線がほぼ鉛直に入射した事象を選別する。その方法は、例えば 9 本あるシンチレータのうち下段(1・2・3 番) は 1 番のみ・上段(7・8・9 番) は 7 番のみが鳴った場合に 4 番が鳴っていれば宇宙線は 1・4・7 番を通過したと見なせるので、上下段で 1・7 番のみが鳴っているものを探す。その時の 1・4・7 番の ADC 分布を図 5.7 及び図 5.8 及び図 5.9 に示す。また同様に、上下段で 2・8 番のみが鳴ったときの 2・5・8 番の ADC 分布を図 5.10 及び図 5.11 及び図 5.12 に、上下段で 3・9 番のみが鳴ったときの 3・6・9 番の ADC 分布を図 5.13 及び図 5.14 及び図 5.15 にそれぞれ示す。



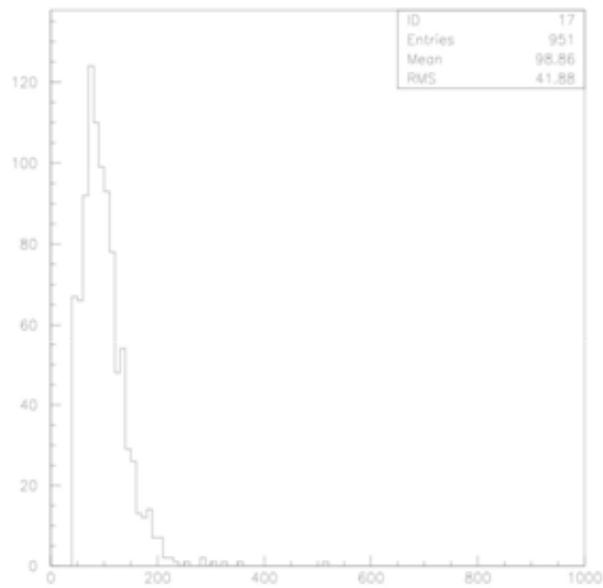
①

図 5.7: 1 番に入射した場合の分布



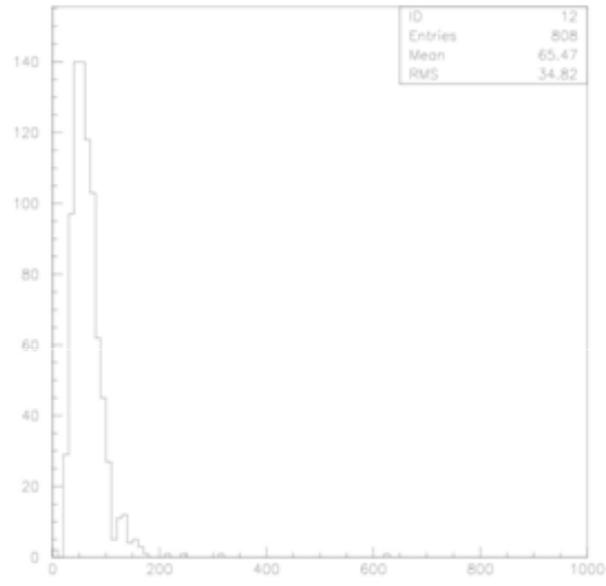
④

図 5.8: 4 番に入射した場合の分布



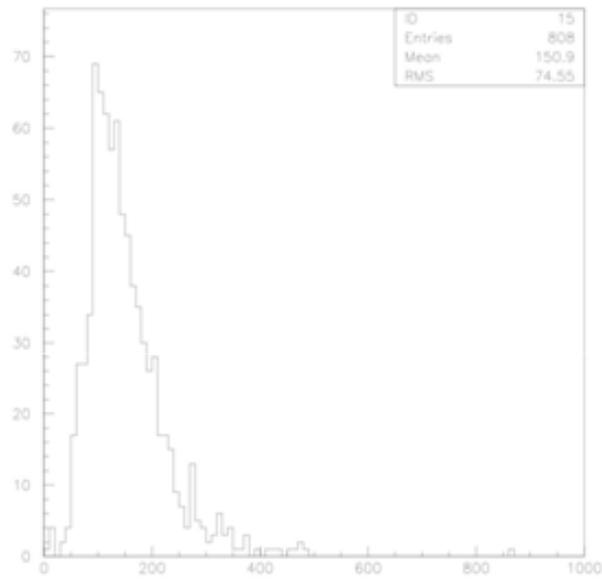
⑦

図 5.9: 7 番に入射した場合の分布



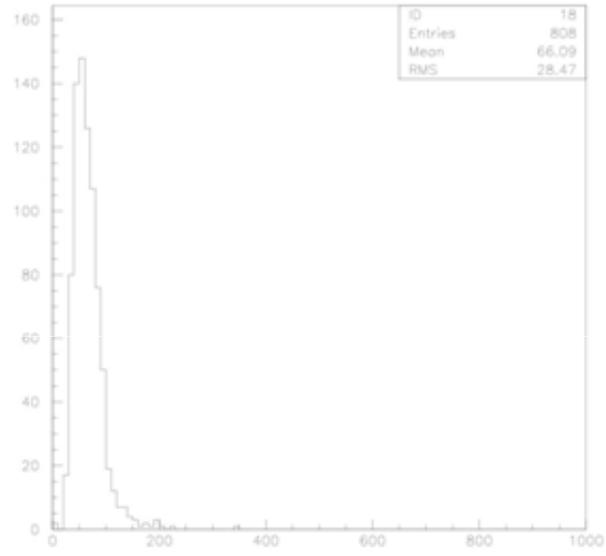
②

図 5.10: 2 番に入射した場合の分布



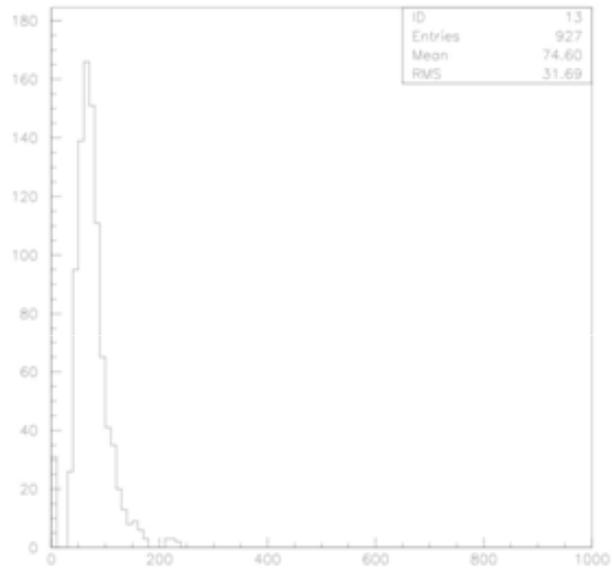
⑤

図 5.11: 5 番に入射した場合の分布



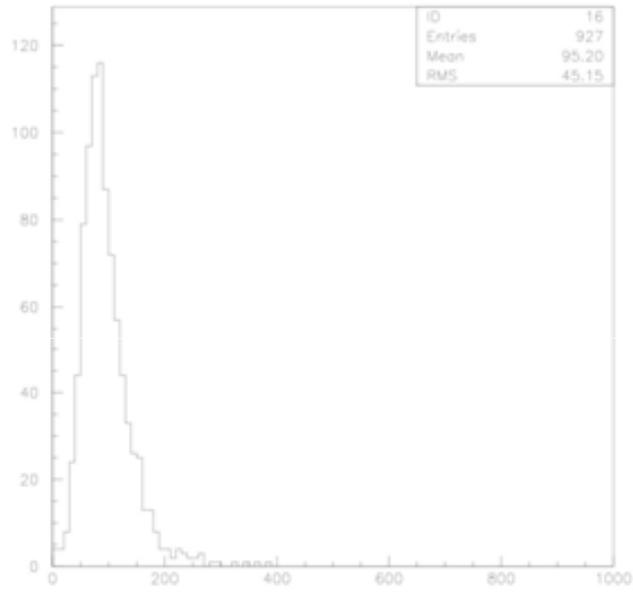
⑧

図 5.12: 8 番に入射した場合の分布



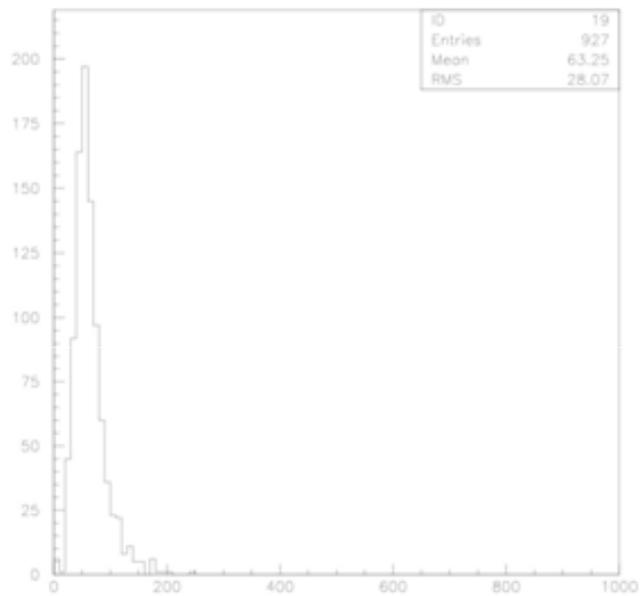
③

図 5.13: 3 番に入射した場合の分布



⑥

図 5.14: 6 番に入射した場合の分布



⑨

図 5.15: 9 番に入射した場合の分布

5.5.2 検出効率

宇宙線がほぼ鉛直に入射した事象サンプルを用いて、シンチレーションカウンターの検出効率を求める。まず、1・4・7番の場合について考える。1番と7番の鳴った事象数を N_{1and7} 、そのうちで4番の鳴った事象数を N_4 とすると、式 (5.1) で4番の検出効率を求められる。

$$N_4 \text{の検出効率} = \frac{N_4}{N_{1and7}} \quad (5.1)$$

同様に、5・6番の検出効率を求める。

この検出効率の統計誤差は、二項分布をもとに計算すればよい。

N 回の試行で鳴る確率を p 、鳴った回数を N_{on} とする。 N_{on} の分散 σ は式 (5.2) で表される。

$$\sigma = \sqrt{Npq} \quad (5.2)$$

ここで、 $q = 1 - p$ である。これより N_{on} は

$$N_{on} = Np \pm \sqrt{Npq}$$

$p = \frac{N_{on}}{N}$ より p は式 (5.3) で表される。

$$p = p \pm \frac{\sqrt{pq}}{\sqrt{N}} \quad (5.3)$$

1番と7番は鳴った事象数が異常に多く、雑音等を除去しきれていないと思われるので、1番と7番の threshold が4番の検出効率に与える影響を調べた (図 5.16)。縦軸は検出効率、横軸は1・7番の threshold である。

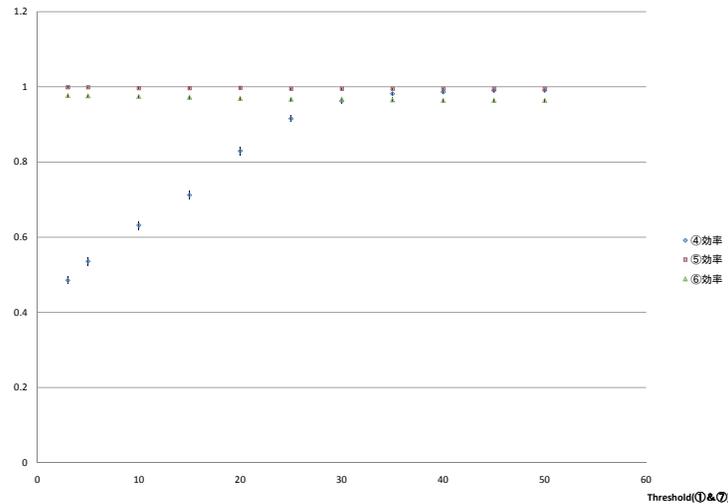


図 5.16: 1・7番の threshold に対する検出効率の変化

これより、1・7番は threshold を 40ADC カウント以上にすれば、雑音によるアクシデンタルコインシデンスの影響を取り除いて、4番の検出効率を正當に評価できることがわかった。

次に1・7番の threshold を 40ADC カウントに設定したのは適切だったかを調べるために、1番の threshold を固定して7番の threshold を変化させた時と、逆に7番の threshold を固定して1番の threshold を変化させた時の検出効率の変化を調べた。以下の図 5.17・図 5.18・図 5.19・図 5.20 にその結果を示す。

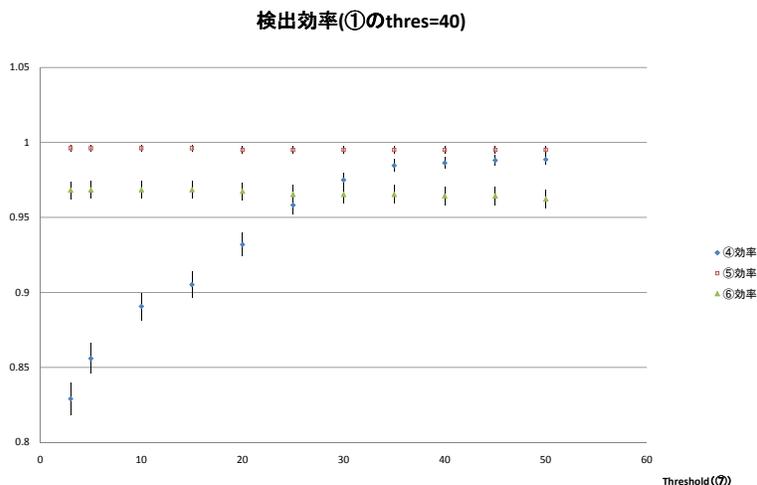


図 5.17: 1番の threshold を 40 に固定した場合

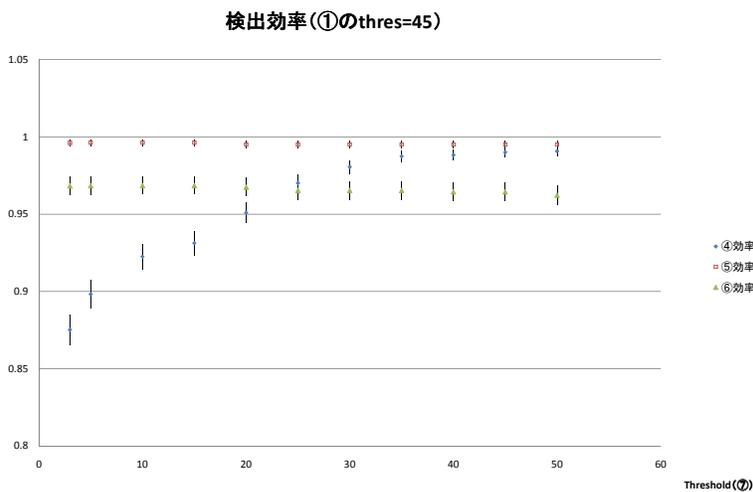


図 5.18: 1番の threshold を 45 に固定場合

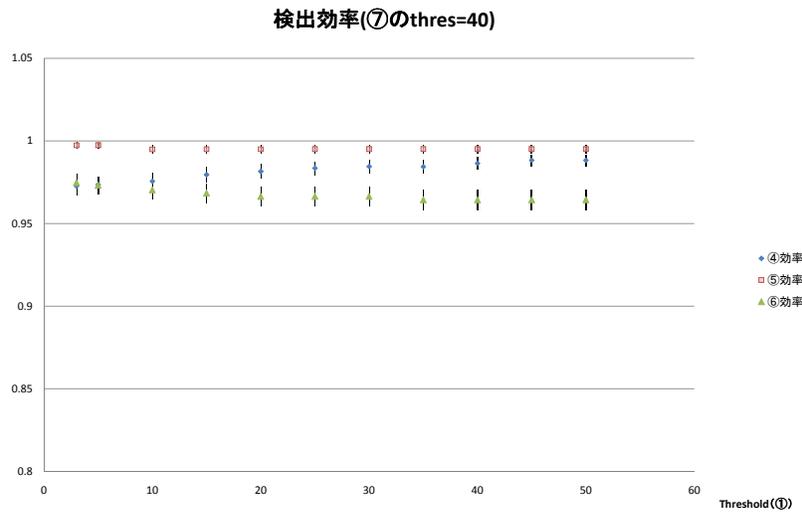


図 5.19: 7 番の threshold を 40 に固定した場合

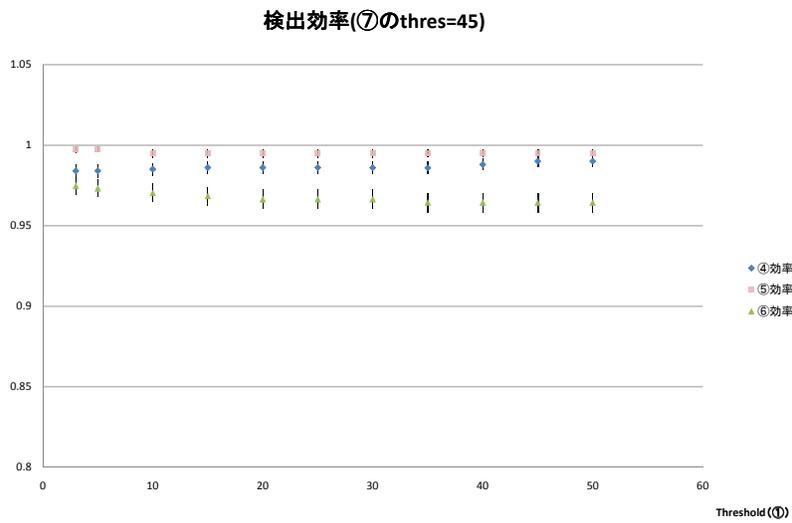


図 5.20: 7 番の threshold を 45 に固定した場合

比べると、7 番の threshold を高めに固定すると 4 番の検出効率が安定することが分かった。よって、7 番の雑音の効果がより顕著であるということがわかった。

5.5.3 宇宙線通過時の平均光電子数の計算

LED回路を用いて測定した時のADC分布より1 p.e.分の波高を a_{pe} 、宇宙線測定時のADCカウンターの平均を a_{cosm} とすると平均光電子数 $\langle N \rangle$ は式(5.4)で表される。

$$\langle N \rangle = \frac{a_{cosm}}{a_{pe}} \quad (5.4)$$

この計算を4・5・6番についてそれぞれ行う。その計算結果を表5.2に示す。

表 5.2: 平均光電子数の計算結果

読み出し番号	a_{pe}	a_{cosm}	$\langle N \rangle$
4	213.3	7	30.5
5	150.9	7	21.6
6	95.20	6	15.9

4・5・6番で $\langle N \rangle$ に差が出ているが、これは a_{pe} の精度にヒストグラムからの読み取り誤差の寄与があることが大きな理由だと考える。また、LED回路を用いた実験結果から a_{pe} を求めたが、その時と宇宙線データ収集時において、MPPCの温度を厳密には管理していないことも影響していると考えられる。しかし、いずれの場合も平均光電子数は10数個またはそれ以上であり、荷電粒子の通過はじゅうぶん雑音と分離して検出可能であることがわかった。

第6章 まとめ・今後の課題

今回の研究で、LEDを用いてMPPCの基本特性を測定する方法を確立した。LEDの発光量を適切に減光して用いれば、フォトカウンティング能力を有することをADC分布で確認できることが分かった。また、作成したADC分布よりピーク間隔を求めることで、増幅率を測定することが出来た。そして、全事象数からペDESTAL事象の割合を測定することも出来た。各個体によって、示す傾向が異なることが分かった。MPPCの温度特性を考慮せずに測定を行ったので、より研究の精度を上げるためには、MPPCの回路を恒温槽に入れ、温度制御を行い、測定する必要がある。シンチレーションカウンターを製作し、宇宙線を観測するためのセットアップ、そしてADC分布を確認することが出来た。3×3段のうち、縦1列ずつで、宇宙線が通過した条件やノイズを除去するための条件を探ることが出来た。そして、真ん中の段にある3つのシンチレーションカウンターの検出効率を測定したところ、いずれの場合も95%以上であった。

謝辞

卒業研究を行うにあたり、多くの方々のご協力を得ることが出来ました。この場をお借りして、心から感謝の意を示したいと思います。

指導教官である宮林謙吉先生、および林井久樹先生にはお忙しい中、ご指導・ご鞭撻いただき、大変お世話になりました。また、たびたびご助言・ご協力を頂いた先輩方にも感謝いたします。さらに、共に高エネルギー研究室で研究を行った4回生メンバーにも大変お世話になりました。

たくさんの方々の支えにより、ここに卒業論文を完成させることが出来ました。本当にありがとうございました。皆様に対する感謝の意を込めて謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] 浜松ホトニクス株式会社：MPPC のカタログ
- [2] 辻 知佳・宮田 香織：2007 年度卒業論文 MPPC の基本特性およびシンチレーションカウンターへの応用
- [3] 小池 博子・米山 知佐子：2008 年度卒業論文 シンチレーションカウンターの MPPC 読み出し
- [4] 平井 珠生：2009 年度修士論文 アバランシェ半導体光検出器の特性および中性子被曝効果の測定
- [5] 生出 秀行・音野 瑛俊・山下 了：次世代光検出器 (日本物理学会誌 Vol.66,No.1,2011)