

2008年度 卒業論文  
シンチレーションカウンターの  
MPPCの読み出し

奈良女子大学 理学部 物理科学科 高エネルギー研究室  
小池 博子・米山 知佐子

2009年 3月

## 目次

1	概要	3
1.1	実験の目的	3
1.2	本論文の構成	3
2	半導体光検出器 MPPC	4
2.1	MPPC ( Multi Pixel Photon Counter ) の基本特性	4
2.2	MPPC の動作原理	5
2.3	MPPC の仕様	7
2.4	MPPC の基本特性	8
2.5	MPPC 単体の基本接続回路	9
2.6	シンチレータ	10
2.7	シンチレーション・カウンタ	10
2.8	宇宙線	11
3	LED 点灯時の M P P C 単体の出力測定	12
3.1	Block Diagram	12
3.2	LED	13
3.3	サーミスタ	14
3.4	恒温槽	14
3.5	NIM 規格	15
3.6	エレクトロニクス	15
3.7	データ収集・解析の概要	17
3.8	ADC(2249W) の動作テスト	19
3.9	結果・考察	20
4	荷電粒子の測定	29
4.1	$\beta$ 線の測定	29
4.2	$^{90}\text{Sr}$	30
4.3	結果・考察	33
5	まとめ・今後の課題	43

## 1 概要

直径が約  $10^{-15}\text{m}$  の陽子や中性子、もっと小さい電子などこれらの素粒子を肉眼で直接見ることは不可能である。しかし、電気を帯びている陽子や電子の飛跡を肉眼で見えるようにすることは可能である。一つの方法は放射線の写真作用を利用して、写真看板中の荷電粒子の飛跡を記録することである。電子以外の荷電素粒子の検出には電離作用が利用される。荷電粒子は高速で物質を通過するときに近くの原子・分子に電気力を作用して、電子・分子中の電子を叩き出してイオンにする。このイオンの列を観測可能な形に変換し、増幅して、検出出来れば、素粒子の飛跡が分かる事になる。いろいろ開発されて来たが、本研究では光子や荷電粒子が当たると蛍光を発生し、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について注目する。

また同様に取れた光を取る粒子検出器は素粒子探索のための最も重要なデバイスのひとつであり、新しい測定法の開発が新しい発見を生み、素粒子研究の発展に決定的な役割を果たしてきたのはいうまでもない。MPPC (Multi Pixel Photon Counter) は、近年になって開発され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。

この半導体検出器とシンチレーターを組み合わせれば入射した粒子の検出ができる。このシンチレーターと光検出器を組み合わせたものをシンチレーションカウンターという。本研究では半導体光検出器である MPPC とそれを用いたシンチレーションカウンターについて報告する。

### 1.1 実験の目的

光を検出するものとして半導体の新しい光検出器である MPPC (Multi Pixel Photon Counter) を用いて、基本的な性能を測定することで、MPPC の特性を学ぶ。さらにプラスチックシンチレーターを組み合わせる事で、荷電粒子の通過時の波高測定を行う。荷電粒子の飛跡を探るための条件としてシンチレーターを全て通過した荷電粒子を選ぶための条件と、ノイズと荷電粒子の入射を分離できる条件を探ることが、本実験の目的である。

### 1.2 本論文の構成

本論文では、まず MPPC の原理や仕様を述べる。その後に実験装置の概略を述べた後、実験方法及び結果をまとめる。そして考察を行う。

## 2 半導体光検出器 MPPC

この章では MPPC の基本特性、および動作原理、そして仕様を述べる。

### 2.1 MPPC ( Multi Pixel Photon Counter ) の基本特性

Multi Pixel Photon Counter (MPPC) は浜松ホトニクス製の PPD ( Pixelated Photon Detector) の商品名で、PPD はピクセル化された APD をガイガーモードで動作させ、各ピクセルの信号の和を並列に呼び出すタイプの半導体検出器のことを言います。

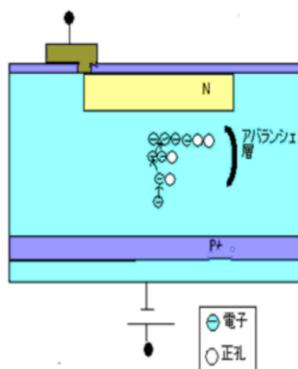


- 優れたフォトカウンティング能力
- 常温・低バイアス (100V 以下) で動作
- 高い増倍率 :  $10^5 \sim 10^6$
- 優れた時間分解能
- 磁場の影響を受けない

#### 2.1.1 APD(アバランシェ・フォトダイオード)

普段私達が見ている光を非常に微弱な光になるとフォトンが離散的になるため、このフォトンの数をカウントして光量を測定する必要がある。このフォトカウンティングをする半導体のデバイスとして考えられたのが APD である。APD は逆バイアスを印加することにより光電子が増倍されるフォトダイオードである。

#### 2.1.2 APD の動作原理



半導体中に大きな電界があると、光子の衝突によって発生する電子が加速され、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は電界によって加速され、ほかの半導体電子に衝突

してさらに電子を弾き出す。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。これはフォトダイオードの受光感度を大きく上昇させることが可能である。つまりアバランシェ増倍と呼ばれる現象を利用して受光感度を上げたフォトダイオードだといえる。

### 2.1.3 ガイガーモード

降伏電圧を超えた動作電圧で APD を動作させると、増幅された電子の数は入射光子の数と比例しなくなる。この状態のことをガイガーモードと言う。入射光子が 1 個でも 100 万個、2 個でも 100 万個、10 個でも 100 万個、というように増幅する。

つまり、このガイガーモード時に光子が入射すると、この時の増幅率は、降伏電圧未満のノーマルモードでの数 10 ~ 数 100 倍に対し  $10^5 \sim 10^6$  倍と非常に大きい。このことから、わずかな光の入射に対しても、高電界において放電現象が発生するようになる。

## 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 (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、逆バイアスは  $V_{BR}$  まで電圧降下する。その後、再充電され逆バイアスが  $V_R$  まで戻り、再びガイガーモードが可能になる。図 1 に示す。

$$Q = C \times (V_R - V_{BR}) \quad (1)$$

$C$ :各ピクセルの容量

$V_R$ :逆バイアス

$V_{BR}$ :降伏電圧

MPPC は APD ピクセルを並列接続することにより、1 つのピクセルに光子が入射したかしていないかを読み出すことができる。つまり、それぞれのピクセルの出力の和が MPPC の出力となり、その出力よりフォトンカウンティングが可能となっている。

MPPC の等価回路は図 2 に示す様になる。MPPC は各 APD ピクセルでの出力は入射光子数に関係なく一定である。また、すべてのピクセルは 1 つの読み出しチャンネルにつながっており、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。つまり、基本的には反応したピクセル数は入射 photon 数に等しいということである。すなわち、MPPC 全体の出力電流は式 (2) で表される。

$$Q_{out} = C \times (V_R - V_{BR}) \times N_{fired} \quad (2)$$

$N_{fired}$ :フォトンを検出した APD ピクセルの数

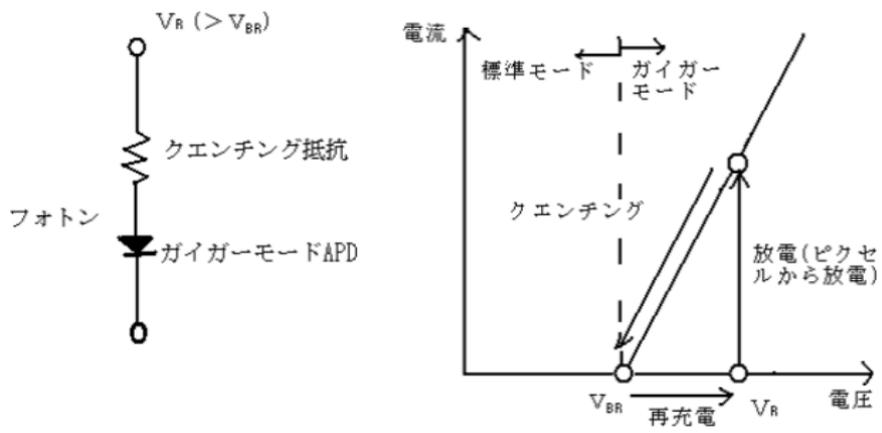


図1 ガイガーモードAPD

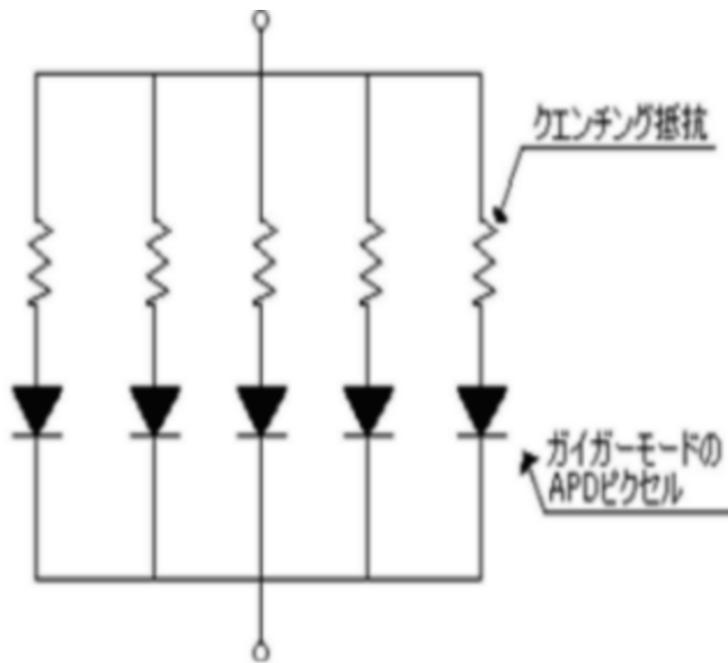


図2 MPPCの等価回路

## 2.3 MPPC の仕様

今回使用した MPPC は、ピクセル数 400 のセラミックタイプの MPPC (S10362-11-050C) である。表 1 に、S10362-11-050C の仕様及び図 3 に MPPC の外寸図を示す。

表 1 S10362-11-050C 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	μm×μm
開口率	61.5	%
感度波長範囲 (λ)	270 ~ 900	nm
最大感度波長 (λ <sub>p</sub> )	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°
増倍率	7.5 × 10 <sup>5</sup>	-

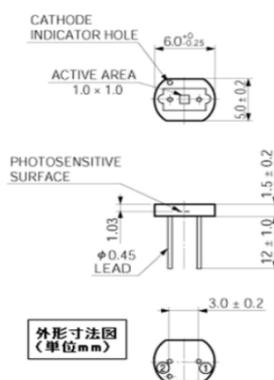


図 3 MPPC の外寸図

## 2.4 MPPC の基本特性

### 2.4.1 ダークカウント

光により生成したキャリアだけではなく、熱的に発生した暗電流のキャリアによってもパルスが発生します。このパルスがダークカウントとして測定され、検出誤差の原因となる。逆バイアスを高くすると、検出効率が上がるが、その分ダークカウントも大きくなる。ダークカウントは、温度が低いほど値は小さくなる。

### 2.4.2 アフターパルス

MPPC の各ピクセルはフォトンが入射されると電子雪崩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時に異なる大きさの信号を出力することがある。これをアフターパルスと言う。アフターパルスも検出誤差の要因となる。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、入射したフォトンとは別にアバランシェ増幅の過程でフォトンが発生することがある。このフォトンが別の APD ピクセルで検出された場合、そこで新たに電子雪崩が形成され、MPPC の出力は実際に入射したフォトン数よりも高い値を出力する。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が小さくなってしまう。

### 2.4.5 MPPC の逆バイアス特性

MPPC の増幅率は逆バイアスに対して優れた直線性を持つ。逆バイアスを上げていくと、増幅率も大きくなる。よって一定の出力を得るには、温度によって逆バイアスを変化させるか、素子の温度を一定にする必要がある。

## 2.5 MPPC 単体の基本接続回路

MPPC の基本接続回路を図 4 に示す。

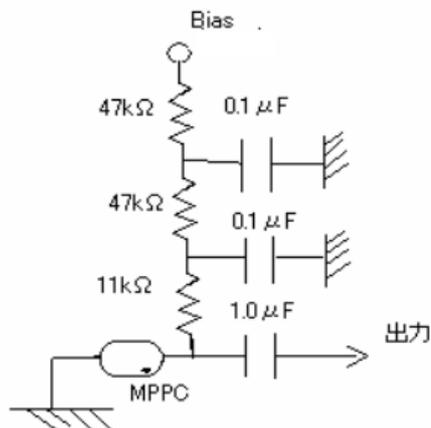


図 4 MPPC の基本接続回路

逆バイアスをつけるために +70.3(V) の電圧を印加する。47kΩ の抵抗と 0.1kμF のコンデンサーの 2 段で電源からくるノイズを除去する。読み出し側は 1.0μF のコンデンサーで電源からの直流成分を除去する。

MPPC 単体のダークカウント オシロスコープで MPPC 単体のパルスを暗黒下で観測したものを図 5 に示す。



図 5 ダークカウント

光を遮断してパルスが見えたので、これは熱的に発生した暗電流のキャリアによって発生したノイズによるパルス、つまりダークカウントだと考えられる。(MPPC は固体素子) MPPC はガイガーモードで動作するので、ノイズも同様に増幅されてしまう。(フォトンを検出したパルスと区別がつかない。)つまり図の雑音パルスの波高も離散的であるので、フォトカウンティングも可能だといえる。

## 2.6 シンチレーター

荷電粒子が通過する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くる。無機シンチレーター中には結晶格子内の不純物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、発光中心に達すると電子が励起状態に入り、それが基底状態に落ちるときに発光する。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、結晶の温度に依存している。

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  $10^{-11}$ s の精度で測定出来るようになった。

本実験ではこのプラスチックシンチレーターを使用した。このプラスチックシンチレーターは長さ 10cm、幅 1.3cm、厚さ 0.5cm のものを用いた。

## 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 6 に示すシンチレーション・カウンターを制作した。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で包み、それに黒の遮光テープを巻いた。また、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接着した。

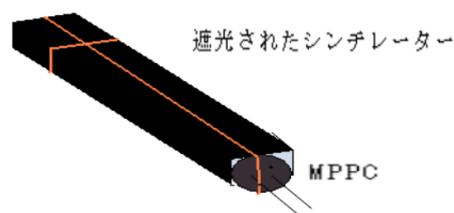


図 6 シンチレーションカウンター

## 2.8 宇宙線

箔検電器を帯電させて金属箔を開かせても、金属箔はやがて閉じてしまう。これは、空気中のイオンが金属箔の電気を中和するからである。空気中のイオンは地殻中の放射性元素の崩壊によっても作られるが、それだけでは説明できない。

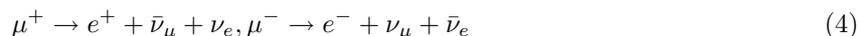
1911～12年にヘスは、高さ5000mまで気球を何回か飛翔させ、5000mの上空では地表付近よりも空気中でイオンが沢山出来ていることを確かめた。この結果、大気圏外から地球大気の中にやってくる透過性の強い放射線が存在することを突き止めた。この放射線を宇宙線と呼ぶ。宇宙線の発生源については未知な点も多いが、超新星は主な発生源の1つだと考えられている。

地球の大気圏に降り注ぐ宇宙線（一次宇宙線）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、まず中間子が大量に作られ、中間子の崩壊で $\mu$ 粒子が大量に生成させる $\mu$ 粒子は地表の $10\text{cm}^2$ に1秒間に約1個の割合で降り注いでいる。

二次宇宙線として作られた中間子は、



と崩壊して、 $\mu$ 粒子と $\mu$ ニュートリノになり、 $\mu$ 粒子は



と崩壊する。従って、地球の空気中で大量のニュートリノが発生する。これを大気ニュートリノという。図7を示す。

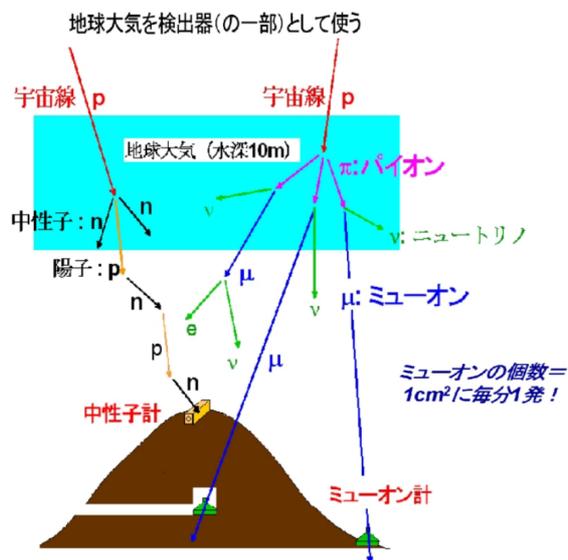


図7 宇宙線

### 3 LED 点灯時の M P P C 単体の出力測定

#### 3.1 Block Diagram

MPPC 単体の特性を測定するため、Clock generator で LED をパルス上に点灯させ、MPPC が出力するパルスを記録・解析した。本研究では MPPC の増幅率の温度依存性と逆バイアス依存性について議論する。測定方法は、恒温槽の温度を変化させていった時と恒温槽の温度を一定にし、逆バイアスを変化させていった時の MPPC による波高を ADC 分布で取る。

図 8 に、Block Diagram、図 9 に Box の写真を示す。

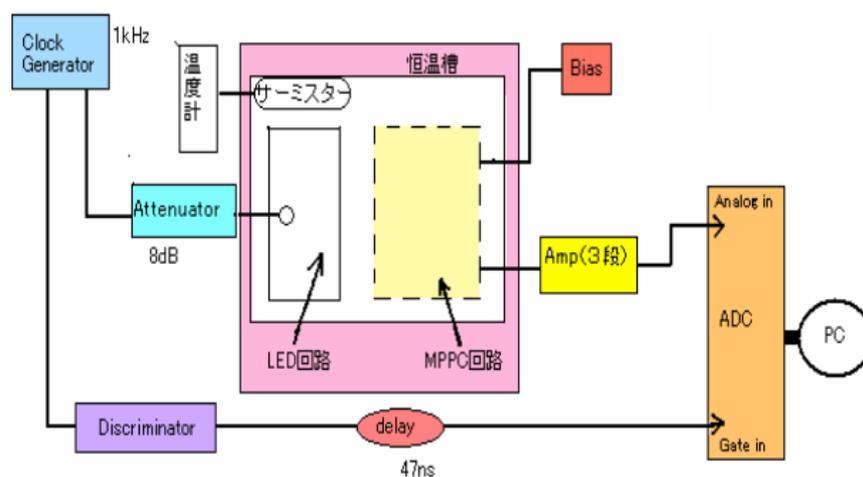


図 8 LED 点灯時の Block Diagram

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。MPPC の出力は CAMAC の電荷積分型 ADC を用いて測定した。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。MPPC の Bias は 70.3[V] とし、温度を測定するために、Box 内壁にサーミスタを設置した。また温度依存性を測定するために恒温槽に Box を入れる事で、温度を変化させた。



図9 LED回路とMPPC回路のBOX

### 3.2 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2、LEDの寸法を図10に示す。

表2 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°

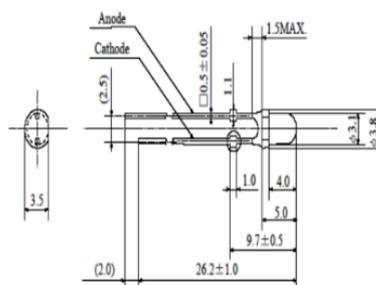


図10 LED

LEDの動作回路では、Clock generator 間に 100Ω の抵抗を入れ、Attenuator で gate の大きさを調節した。

### 3.3 サーミスター

サーミスター (thermistor) は、Co,Fe,Ni,Mn,Cr などの酸化物に有機物のバインダーを加えて高温で焼結成形した半導体セラミックス製の二端子の抵抗体である。電気抵抗は、温度とともに低下し、絶対温度  $T$  の関数として

$$R = A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (5)$$

と表される。これは半導体の電気伝導率  $\sigma$  がキャリア濃度に比例し、キャリア濃度が電子の伝導体への熱的励起によるのでボルツマン分布に従うからである。実際のサーミスターでは、基準温度  $T_0$  の値を用いて (25 をとることが多い)

$$R = R_0 \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (6)$$

で表すことが多い。ここで、 $R_0, B, T_0$  はサーミスターによって決まる定数であり、このことからサーミスタの抵抗を測ることで温度を求めることができる。定数  $B$  は、材料とその製造法により異なるが、およそ  $B = 2000 \sim 5000\text{K}$  の値である。

本研究では、石塚電子製のサーミスタ 103AT-2 型を使用し、抵抗値をアジレントテクノロジー 34970A 型デジタルマルチメーターで読み出すことにより温度測定を行った。

### 3.4 恒温槽

本研究で使用した恒温槽は日本プロアー株式会社の LS - 5 仕様のものである。表 3 に示す。

表 3 恒温槽の規格

品名	電子式マイクロ恒温槽
型式	LS-5
入力	AC.100V 1.5A
冷却能力	25w (0 時)
制御温度範囲	-2.5 ~ 70
使用環境	温度 0 ~ 40 湿度 35 ~ 85 %
内槽寸法	150(縦) × 150(横) × 200(奥行)

本研究ではサーミスターの温度と恒温槽の温度を同じで一定にさせるために 1 日置いたが、サーミスターは Box 内に入っているために約 1 の差が開いてしまったが、これは個体差もあり、1 の差は考慮することにした。

### 3.5 NIM 規格

NIM 規格 (Nuclear Instrument Modules) 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」のことである。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・原子等の幅広い分野に使われている。NIM 規格のモジュールを使用するには BIN 電源が必要である。また必要なモジュールを取り付け、ケーブルをつなぐことによって使用される。NIM モジュールは高さ 22.225cm、幅 3.43cm が最小規格であり、システムへの接合部が規格化・標準化されていて、容易に追加や削除ができ、ひとまとまりの機能を持った部品のことである。標準的な NIMbin はモジュールが 12 個挿入できる形になっている。

### 3.6 エレクトロニクス

本研究で実際に使用したエレクトロニクスについて述べる。

#### 3.6.1 Clock generator

N-TM203 100MHz Clock Generator は、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 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 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。

#### 3.6.2 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。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できる。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 ~ 70ns 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。

#### 3.6.3 Gate generator

スタート信号に対し、一定の遅延時間とパルス幅のパルスを作るモジュール。入力は NIM 信号で、出力信号の delay と幅をチャンネル毎に設定することができる。

#### 3.6.4 Attenuator(ATT)

Attenuator は、0dB から 31dB まで 1dB ステップずつ可変できるアッテネーターを 2 ブロック入れたモジュール。減衰率の選択は、1dB, 2dB, 4dB, 8dB, 16dB のスライドスイッチの組み合わせで行う。入力及び出力インピーダンスは、50 Ω である。また、入力信号には極性が無く、電力は、最大 1/8W までである。減衰率を  $x$  と置くと、

$$x = -20 \log \frac{v_o}{v_i} \quad (7)$$

$v_i$ :入力信号の波高値

$v_o$ :出力信号の波高値

で定義され、単位は dB である。

### 3.6.5 PMT Amplifier(AMP)

入力信号を線形増幅する。1 段のみの Amp では約 10 倍の増倍率があるが、本研究での MPPC の 1p.e. は 30mV であるので Threshold の限界が 20mV ~ 30mV であり、MPPC の信号が小さいので信号を確実に取るため、直列に 3 段使用することで増幅させた。

### 3.6.6 Delay

入力信号を遅らせるモジュール。1nsec から 62nsec まで遅らせることができる。

### 3.6.7 Coincidence

2 つの入力信号の AND と OR を作るモジュール。1 チャンネルに 4 入力あり、出力は OUT が 2 つと-OUT が 1 つある。AND と OR の切り替えは、スイッチにより選択を行う。

### 3.7 データ収集・解析の概要

本研究では、検出器からのアナログ信号をデジタル信号に変換し、データ解析に用いる ADC は CAMAC の規格の物を用いた。これらの ADC はクレートとコントローラーの制御下にある。このクレートコントローラーとの情報の受け取りを行う PC のインターフェイスと PC のデータ収集プログラムの仲介を行うのがデバイスドライバーである。

#### 3.7.1 camdrv

データ収集システム用プロジェクトの一つが CAMAC 向けの Linux デバイスドライバーが 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 camdrv ドライバーを使用した。

#### 3.7.2 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ィ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とが行われる。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。

#### 3.7.3 クレートコントローラー : CC7700

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 CAMAC 規格に対応した A2 タイプの CAMAC クレートコントローラーである。CC/ISA(16 ビット), 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パーソナルコンピューターと CAMAC システムをインターフェイス出来る。

#### 3.7.4 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。ADC は具体的に、例えば 10V の信号が入力されると、100 という数字を PC でデータとして出力する。今回使用した ADC は LeCroy 社の 2249W という型のものである。2249W については表 4 に示す。

表にある Q について、これを Q モードという。今回用いる予定の ADC は「電荷積分型」と呼ばれるタイプである。電荷積分型の ADC は入って来た電子の電荷の総和つまり、信号の電流を積分した結果を読み出す。図 11 に示す。よって ADC はこの電荷をデジタル信号に変換するのである。今回の ADC は gate が入っている時間に入力された電荷をコンデンサーに蓄積する。コンデンサーの 2 枚の極板間に電圧をかけると、電圧に比例した電荷を貯めることが出来るので、表 4 から  $1 \text{ count} = 0.25 \text{ pC}$  より電荷 (pC) に対して ADCcount は傾き 4.0 の比例の関係があると考えられる。

表 4 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 $\Omega$ )
Conversion Time	106 $\lambda$ sec

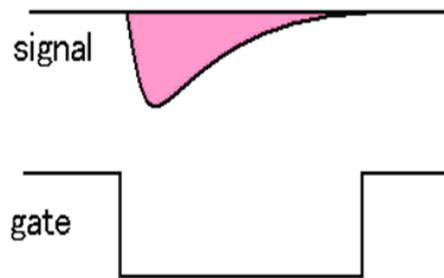


図 11 Q モード

### 3.8 ADC(2249W) の動作テスト

本研究で使用した ADC が正確な作動をしているかのテストを行った。Clock generator からの信号を ATT で変化させ、観測される電荷と測定される count 数の結果と関係を表 5 と図 12 に示す。

表 5 ADC の動作テスト

電荷 [pC]	ADC の count 数
50	307.5
100	553.6
200	1037
400	1939

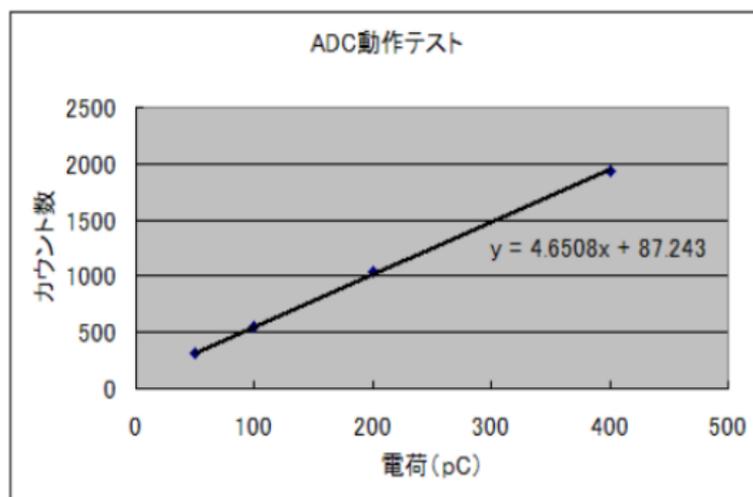


図 12 ADC 動作テスト

上のグラフから、傾き 4.65、ペダスタル 87.243 であることがわかる。電荷に対して、count 数が線形の形を取っており、カタログ値が 4.0 で近くなった。またペダスタルも実験値 86 と近くなったことから正確に作動していると言える。

### 3.9 結果・考察

LED 点灯時の MPPC の波形をオシロスコープで観測した。信号のノイズを減らすために、基盤の銅テープの貼り付けの強化、電源と基盤の接続、基盤の切り離し、Discriminator の調整を行った。TTL を外した時と接続したときに消えるものを見つけることで信号と確認した。図 13 に示す。

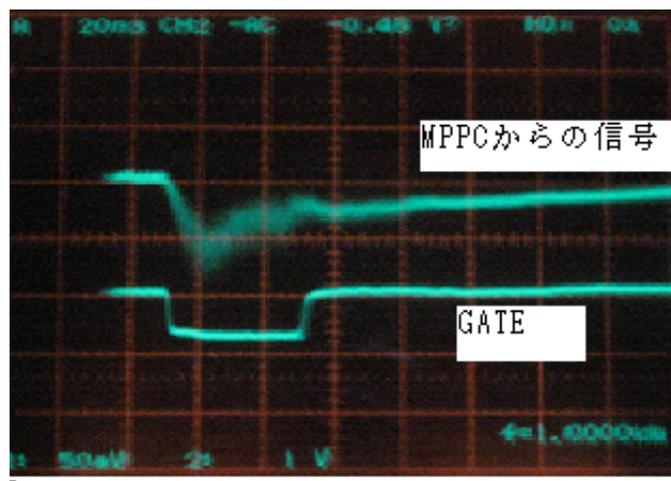


図 13 LED 点灯時の MPPC 波形

次に図 14 から図 20 に LED からの光を MPPC に入射させた時の ADC 分布を示す。この図は横軸が ADCcount であり、縦軸が event 数になっている。この図は恒温槽の温度を 0 から 30 まで 5 ずつ変化させた時の ADC 分布である。バイアスは 70.3V で一定にした。これらの図は各 Peak ごとに Gaussian を使って分布全体を fit したものである。Gaussian については、式 (8) に示す。

$$f(x) = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (8)$$

また、フィッティングパラメーターは次の 3 つである。

$N$  : 規格化定数

$\mu$  : 平均値

$\sigma$  : 標準偏差

Fit した分布のピークの間隔はそれぞれ一致しているのか。具体的に関係性を MPPC の温度依存の関係を踏まえて、温度を変えたときに増幅率の変化はどうなるのか、また逆バイアスは増幅率に依存するのかを知るために、以下に増幅率の式 (9) を示す。

$$\text{増幅率} = \frac{\text{二つの } peak \text{ 間隔} \times ADC \text{ 変換量}}{\text{素電荷} \times G} \quad (9)$$

また、

ADC 変換量 : 0.25pC/count

素電荷 :  $1.6 \times 10^{-19}C$

G ( Amp の増幅率 ): 131.1 倍

である。

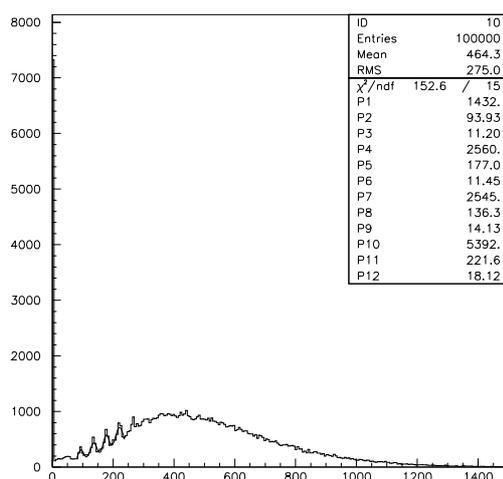


図 14 恒温槽 0 、サーミスター 3.53

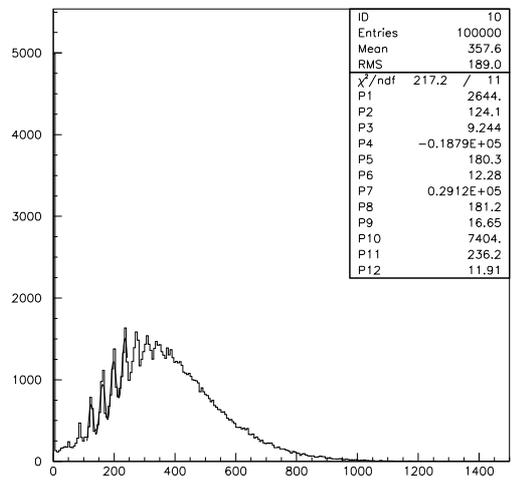


図 15 恒温槽 5 、サーミスター 8.75

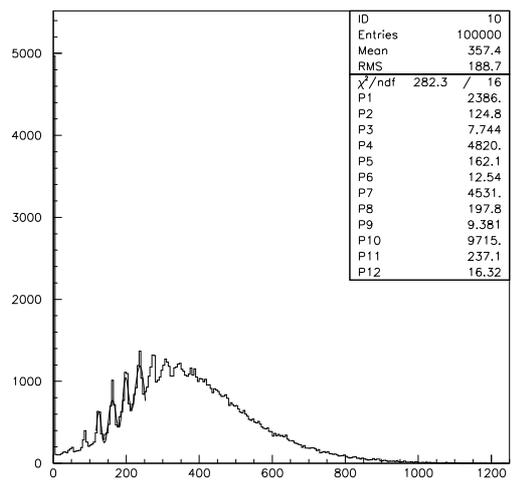


図 16 恒温槽 10 、サーミスター 12.92

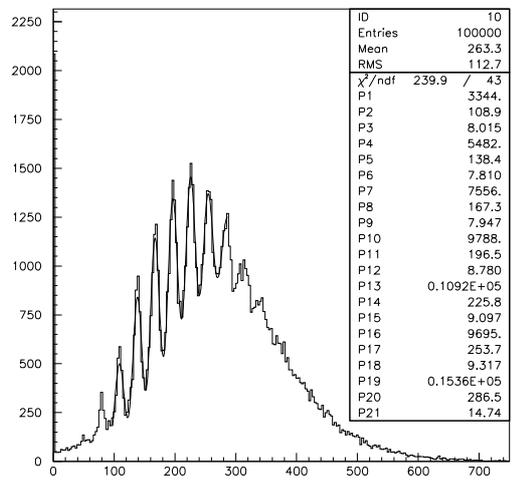


図 17 恒温槽 15 、サーミスター 16.96

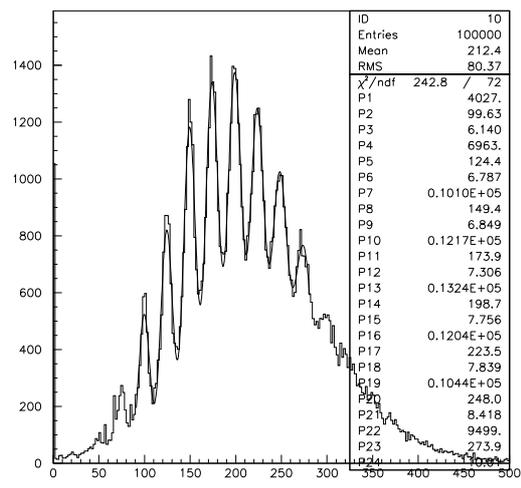


図 18 恒温槽 20 、サーミスター 21.08

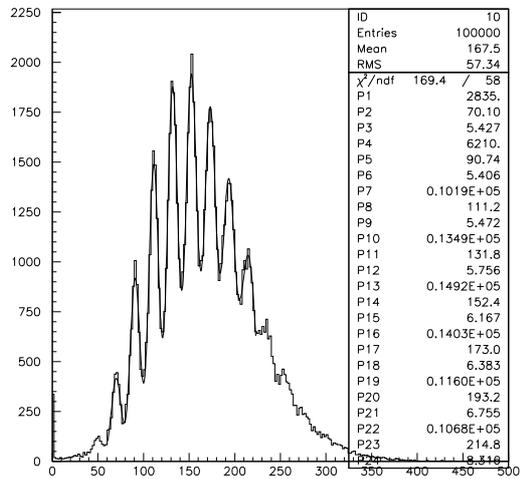


図 19 恒温槽 25 、サーミスター 25.1

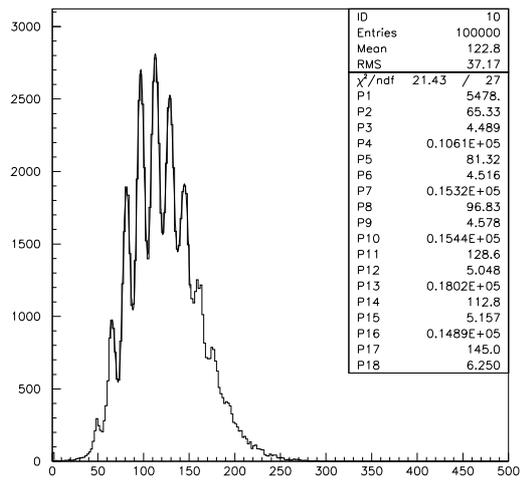


図 20 恒温槽 30 、サーミスター 29.52

結果より良好な Fit を実現できているため、Gaussian で分布を記述できることが分かる。このことから、ADC 分布はガウス分布に近い分布の重ねあわせであると考えられる。また、1p.e.,2p.e. と数えることが出来ることから優れた分解能を持っていると考えられる。グラフから温度が高い時の方が Fit が上手くいった。これは温度が低いほどアフターパルスの影響が大きくなることによって、peak が不明瞭になるためだと考えられる。

結果のグラフからそれぞれ peak 位置と式 (9) から増幅率の関係を考えた。以下に表 6 と図 21 を示す。グラフより、それぞれの温度での peak 位置のずれは約 1count であり、ほぼ等間隔で peak の山が来ていることが分かる。図 21 より、温度が上昇するとそれに比例して peak 間隔は小さくなっている。つまり、MPPC の増幅率は温度が上昇すると小さくなると言える。

温度が低いときに、fit が上手くいかなかったのはアフターパルス（発生したキャリアが結晶欠陥にトラップされそれが遅れた時信号以外のパルスが発生させてしまう現象）が原因であると考えられる。また、温度が高くなると結晶の格子振動が激しくなり、加速されたキャリアのエネルギーが十分大きにならないうちに結晶と衝突する確率が大きくなりイオン化が起こりにくくなるため、増幅率が低くなると考えられる。

また、温度を 1 上げた時の増幅率の変化の割合は 0.2 % であると分かる。

表 6 平均 peak 間隔による増幅率と温度の関係

恒温槽設定値 ( )	0	5	10	15	20	25	30
サーミスターの値 ( )	3.55	8.75	12.92	16.96	21.08	25.01	29.52
平均 peak 間隔 (count)	42.55	37.43	32.8	38.96	24.72	20.51	15.93
増幅率 ( $\times 10^5$ )	5.072	4.46	3.91	3.45	2.95	2.45	1.90

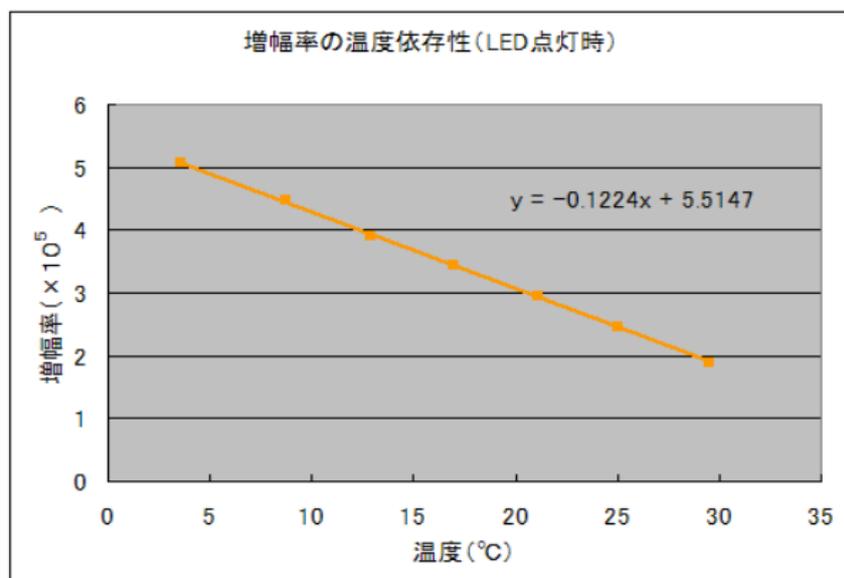


図 21 増幅率の温度依存性の関係

次にバイアス電圧を 69.6V,70.0V,70.2V,70.3V,70.4V,70.6V,70.8V,71.0V の時の ADC 分布を取った。これを 20 ,25 ,30 設定のときで観測した。以下にそれぞれの温度による平均 peak 間隔と増幅率との関係を表 7 と図 22 示す。

表 7 平均 peak 間隔による増幅率と温度の関係

逆バイアス電圧 (V)	69.6	70.0	70.2	70.3	70.4	70.6	70.8	71.0
平均 peak 間隔 (count):20	6.81	16.845	20.17	21.843	23.55	27.97	32.07	-
増幅率 ( $\times 10^5$ )	0.812	2.01	2.40	2.60	2.81	3.33	3.82	-
平均 peak 間隔 (count):25	-	9.94	15.98	17.56	19.23	23.75	28.57	31.33
増幅率 ( $\times 10^5$ )	-	1.18	1.90	2.09	2.29	2.83	3.41	3.73
平均 peak 間隔 (count):30	-	-	10.6	12.104	13.11	18.6	22.75	26.55
増幅率 ( $\times 10^5$ )	-	-	1.26	1.44	1.56	2.22	2.71	3.16

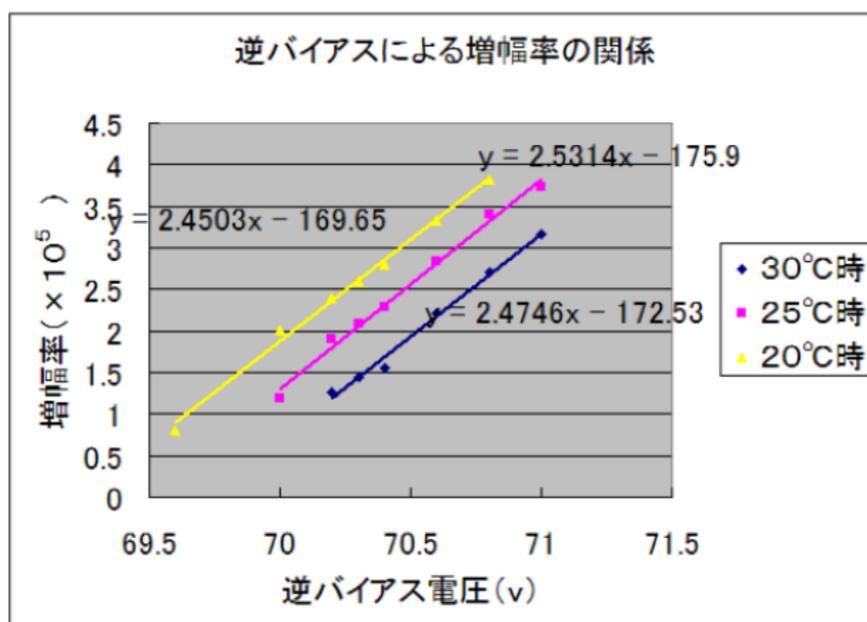


図 22 逆バイアスと温度依存性の関係

グラフより、MPPC の増幅率は逆バイアスに対して優れた直線性を持つことが分かる。図 22 より、増幅率の値として  $1 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$  が得られた。増幅率は印加電圧とブレイクダウン電圧の差に比例するところが分かる。また、温度は 1 以内を保つことがばらつきを抑えることができると考えられる。

グラフより、0.1V 増やしたときのゲインの変化の割合は、30 の時に 9.7%、25 の時に 12.3%、20 の時に 11.57% となった。

25 設定、バイアス 70.3V の時を考える。温度を変化させ、25 のピーク間隔は平均 20.51count、バイアスを変化させたとき、70.3V の時のピーク間隔は平均 17.56count となり、増幅率はそれぞれ  $2.385 \times 10^5$ 、 $2.094 \times 10^5$  となる。差は 12% となり、差はほとんどみられないと考えられる。

次に、バイアス電圧が 70.3 V 一定の時、温度を変化させた時の平均ピーク間隔  $d$  とガウス分布の平均分散  $\sigma$  の関係を見た。図 14 から図 20 の値から計算した。図 23 を下に示す。

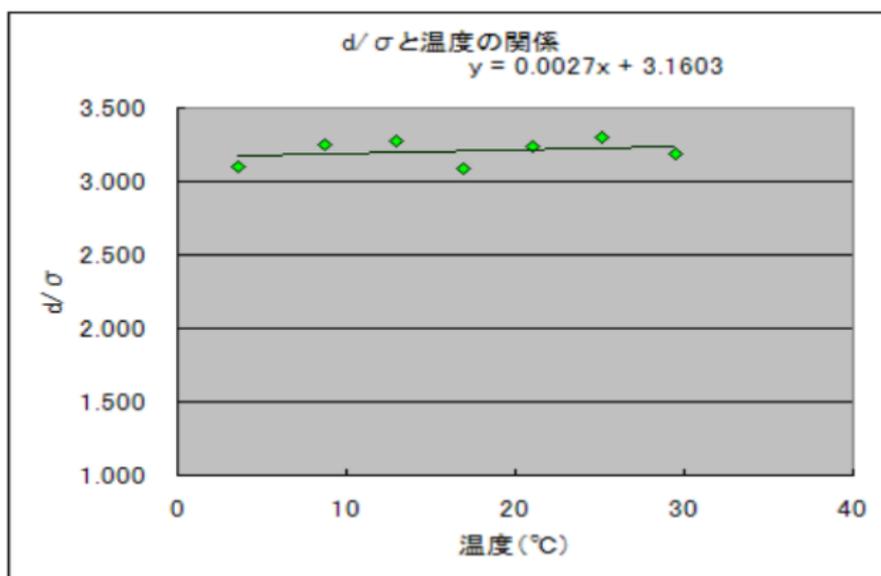


図 23  $d/\sigma$  と温度依存性の関係

図 23 より、温度が変わるときに、傾きはほぼ 0 であるので、 $d/\sigma$  はほぼ一定である。そのため、 $d$  が増加すると  $\sigma$  も同様に増加する。つまり波高分布の分解能が温度には依らないと考えられる。

図 22 における恒温槽 20 ,25 ,30 の時の増幅率が 0 になるときのバイアス電圧を計算した。以下に表 8 と、図 24 を示す。

表 8 Break down voltage

恒温槽設定値 ( )	$V_{bd}(V)$
20	66.335
25	67.533
30	67.175

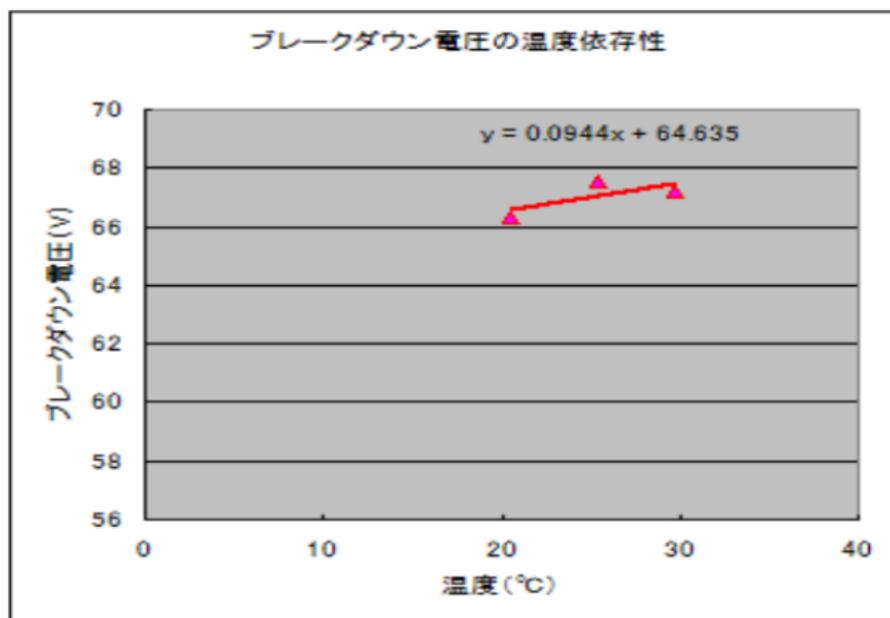


図 24 Break down Voltage

図 24 より Break down Voltage は温度に線形に依存しているように考えられる。つまり MPPC の特性には温度依存性があるが、その原因は主に  $V_{bd}$  の温度依存性により、同じ印加電圧  $V$  でも  $\Delta V = V - V_{bd}$  が変化するためであると考えられる。

## 4 荷電粒子の測定

LED の定期的な光によって反応する MPPC の波形より、MPPC の増幅率による温度依存性、また逆バイアス依存性の関係を確認することが出来た。この章では、この基礎をもとに、シンチレーターを組み合わせたシンチレーション・カウンターを作成して線源からの荷電粒子の測定を行った。

### 4.1 $\beta$ 線の測定

本研究では、まずシンチレーション・カウンターを作成し、 $\beta$  線を出す線源からの信号を取ることが出来るか調べた。本研究で使用したプラスチックシンチレーターの線源は  $^{90}\text{Sr}$  が発する  $\beta$  線である。今回、集光効率を上げるために、プラスチックシンチレータをアルミ箔で巻き、その上から遮光テープを巻きつけた。さらに厚さ 3mm の鉛の板をコリメーターとして使用し、その上に  $^{90}\text{Sr}$  を乗せ、暗幕を被せて恒温槽に入れた。恒温槽は 25 で一定にした。その条件で  $\beta$  線を測定した。以下に図 25 と図 26 を示す。

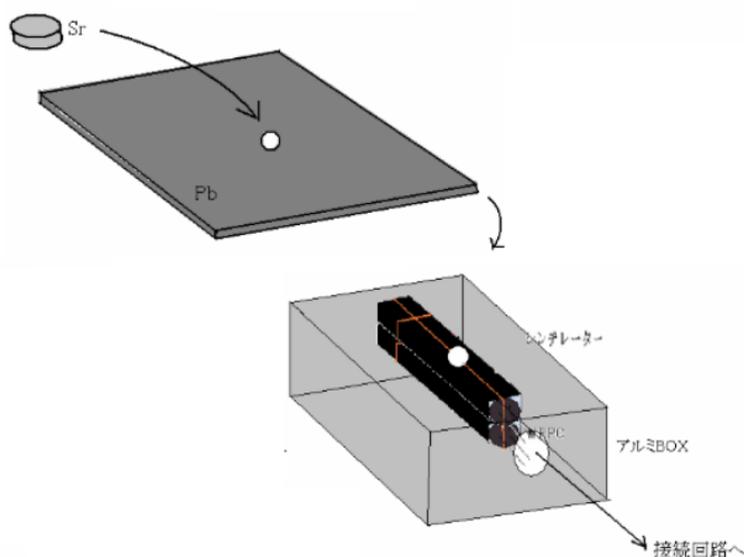


図 25  $\beta$  線測定のセッティング

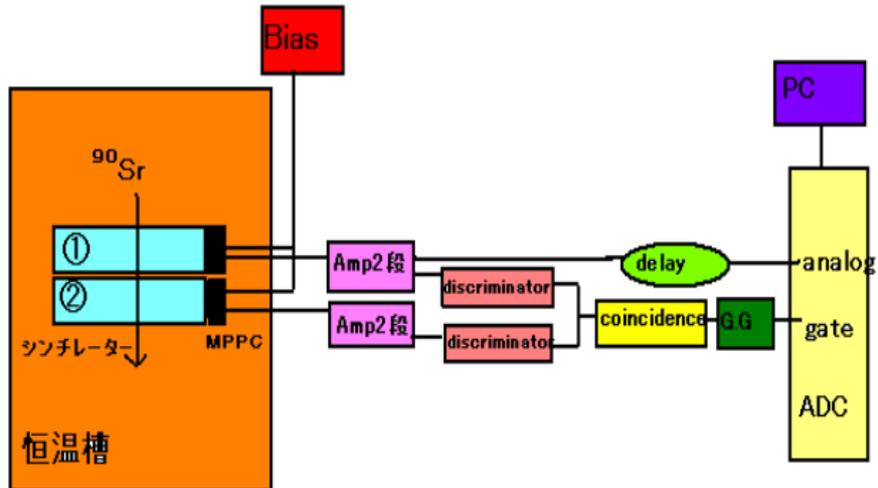


図 26 Block Diagram

## 4.2 $^{90}\text{Sr}$

$^{90}\text{Sr}$  は、崩壊時は  $\beta$  崩壊 (最大エネルギー 0.546MeV) で  $^{90}\text{Y}$  になる。なお  $^{90}\text{Y}$  の崩壊時は  $\beta$  崩壊 (最大エネルギー 2.28MeV) で  $^{90}\text{Zr}$ (安定)。この過程でごく微量 (0.02) の  $^{90}\text{Y}$  は 1.75MeV の線を放出する。 $^{90}\text{Sr}$  と  $^{90}\text{Y}$  の間では 2 週間以上放置すると放射平衡の状態が成立するようになるので、 $^{90}\text{Sr}$  を密閉線源として利用するときは、実際には  $^{90}\text{Y}$  の高エネルギー  $\beta$  線を利用することになる。 $^{90}\text{Sr}$  崩壊図を図 27 に示す。

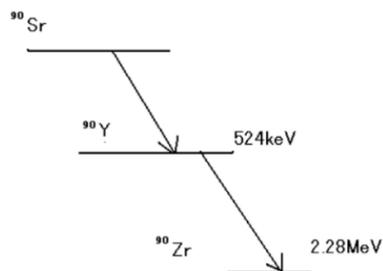


図 27  $^{90}\text{Sr}$  の崩壊図

#### 4.2.1 エネルギー損失

電荷  $Z$ 、速度  $v = \beta c$  の荷電粒子が、電荷  $Ze$ 、質量数  $A$ 、原子番号  $Z$ 、密度  $\rho$  の物質を通過する間に失う単位長さあたりの平均エネルギー損失は、以下の式 (10) で与えられる。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z z^2}{A \beta^2} \left[ \ln\left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I}\right) - \beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \left( \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \right) \quad (10)$$

ここで、

$N_A$  : アボガドロ定数

$r_e$  : 電子半径

$m_e$  : 電子質量

$\gamma = 1/(1 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}$

$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.3070 \left( \frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}} \right)$

$\delta$  : 密度効果

$C$  : 殻効果

である。また、 $I$  は原子を 1 つ励起するために必要なエネルギーのことで、

$$\frac{I}{Z} = (9.76 + 58.8 \cdot Z^{-1.19}) (\text{eV}) \quad Z \geq 13 \quad (11)$$

で表される。 [1]

ここで、プラスチックシンチレーターについて述べておく。プラスチックを通過する時の荷電粒子のエネルギー損失は式 (10) で求められる。今回、この値を参考文献 [8] から引用すると、

$$\left( \frac{dE}{dx} \right)_{min} = 1.936 \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2} \right] \quad (12)$$

である。また、プラスチックの密度は  $\rho = 1.032 \text{ g/cm}^3$  である。よって厚さ  $t = 0.5 \text{ cm}$  のプラスチックシンチレーターにおけるエネルギー損失は、

$$\Delta E = \left( \frac{dE}{dx} \right)_{min} \times \rho \times t \quad (13)$$

$$= 1.936 \times 1.032 \times 0.5 \quad (14)$$

$$= 0.999 \text{ MeV} \quad (15)$$

$$\sim 1.0 \text{ MeV} \quad (16)$$

である。

ここで、使用した線源  $^{90}\text{Sr}$  から入射する  $\beta$  線についてのエネルギー分布を考える。以下にエネルギー分布の図 28 とその式 (17) を示す。ここで、 $mc^2$  は電子の静止エネルギー 0.5MeV であり、 $T_{max}$  は  $^{90}\text{Sr}$  の場合、2.28MeV で定義される。

$$N(T) = (T + mc^2)\sqrt{T^2 + 2Tmc^2}(T_{max} - T)^2 \quad (17)$$

この式より、

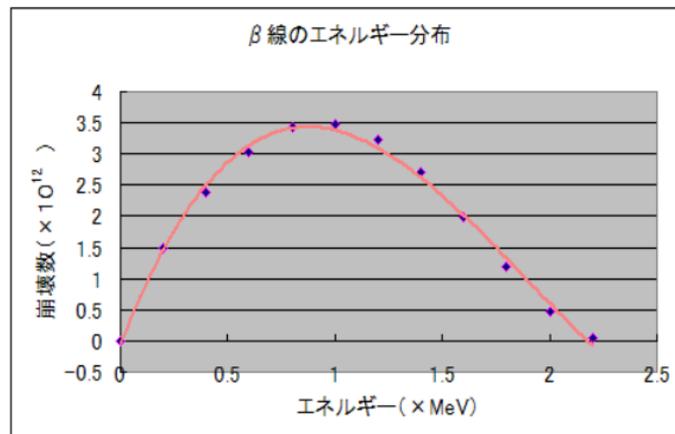


図 28  $\beta$  線のエネルギー分布

となる。図 28 より、最大エネルギーは 2.28MeV であるが、実際は約半分のエネルギーを持つものが大半であることが分かる。

### 4.3 結果・考察

図 25 の時に、まず上のシンチレーター-の信号つまり一本だけのシンチレーターでの  $\beta$  線の観測をした。オシロスコープで見たときは以下の図 29, 図 30 のようになった。それに対する ADC 分布の結果を図 32, 図 31 に示す。threshold は 22.0mV にした。analog 信号は上のシンチレーターで、gate 信号も上のシンチレーターのものを通してある。



図 29 MPPC+ シンチレーター

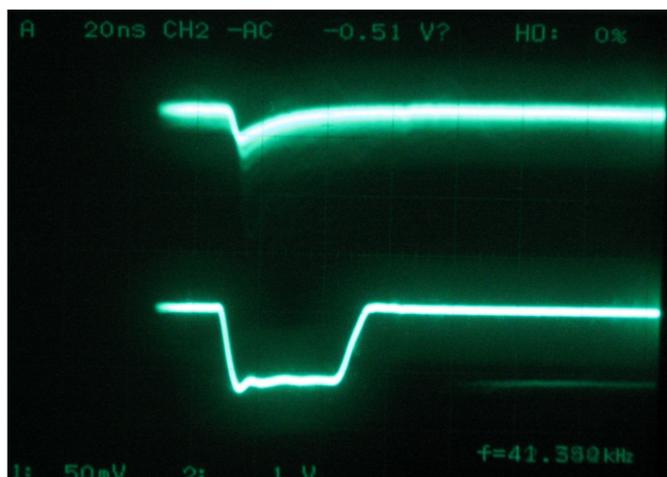


図 30 MPPC+ シンチレーター + S r

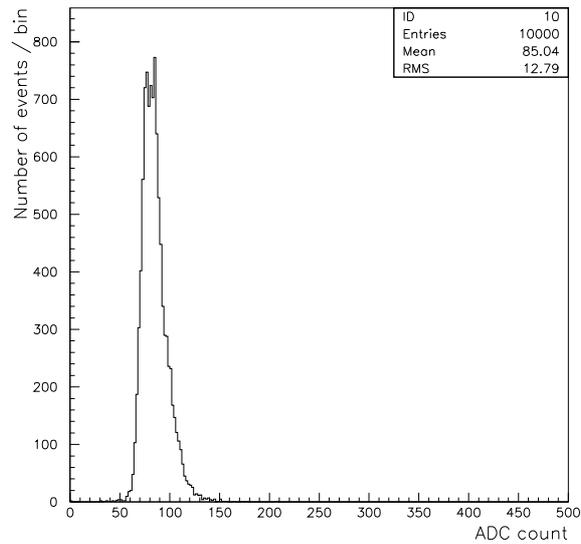


図 31 Sr 無

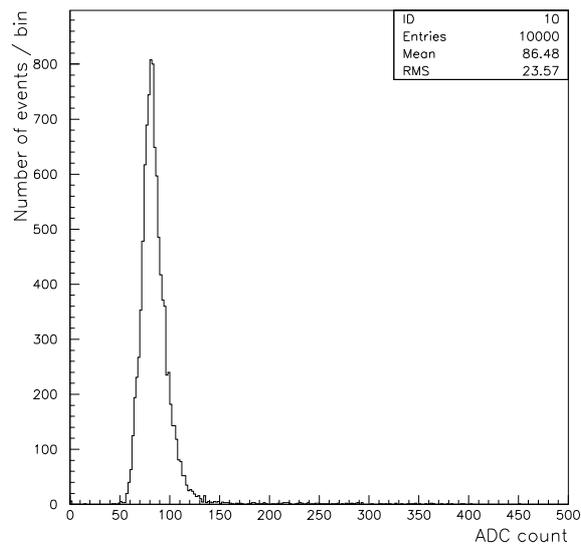


図 32 Sr 有

図 29 より、 $\beta$  線は 1p.e. を 30mV とすると、全体で約 700mV の波形を観測することが出来た。つまり、約 23p.e. の  $\beta$  線が来ていると考えられる。

また図 31, 図 32 より、peak 位置がほとんど同じところにある似たような分布になった。まず 0.999MeV 以下のエネルギー損失を持つ  $\beta$  線が途中で止まってしまったものもあると考えられる。また通過出来るエネルギーを持つ  $\beta$  線でも斜めに入ってエネルギーを損失し通過できなくなってしまったものも取れてしまったと考えられる。しかし、オシロスコープの図をみて分かるように、 $\beta$  線を乗せない時でも、約 3p.e. はダークカウントとして見えており、その波形が全体の信号を占めてしまったため、図 32 のようになったと考えられる。

次にこの条件ではシンチレータを通過せずに中で止まってしまうものやダークカウントの信号を拾ったりすることを考慮して、プラスチックシンチレータを2本重ねたとき、通過した $\beta$ 線のADC分布がどうなるかを確認する。

観測方法とは、上と下のシンチレータに $\beta$ 線が両方入った時の上のシンチレータの信号を見れば、全て通過した $\beta$ 線の信号だけを取ることが出来ると考えられる。先ほども述べた通り約3p.e.はSr無しでも信号として見えており、thresholdを約90mVにすれば、ノイズと生の信号を分けることが出来ると考えられる。そこで、

A:両方に掛ける threshold を最低にした場合

(Sr 有 (上)21.9mV (下)21.7mV)

(Sr 無 (上)22.1mV (下)21.9mV)

B:下のシンチレータのみ threshold を掛けた場合

(Sr 有 (上)21.9mV (下)87.2mV)

(Sr 無 (上)22.2mV (下)87.2mV)

C:上のシンチレータのみ threshold を掛けた場合

(Sr 有 (上)91.0mV (下)22.0mV)

(Sr 無 (上)91.0mV (下)22.0mV)

D:両方のシンチレータに threshold を掛けた場合

(Sr 有 (上)89.2mV (下)91.2mV)

(Sr 無 (上)90.7mV (下)90.8mV)

の場合で測定した。下に、図 33, 図 34, 図 35, 図 36, 図 37, 図 38, 図 39, 図 40 を示す。

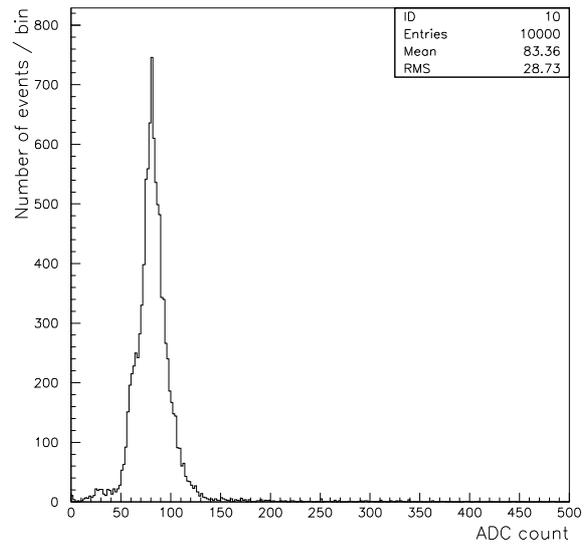


図 33 A:両方に掛ける threshold を最低にした場合: Sr 有

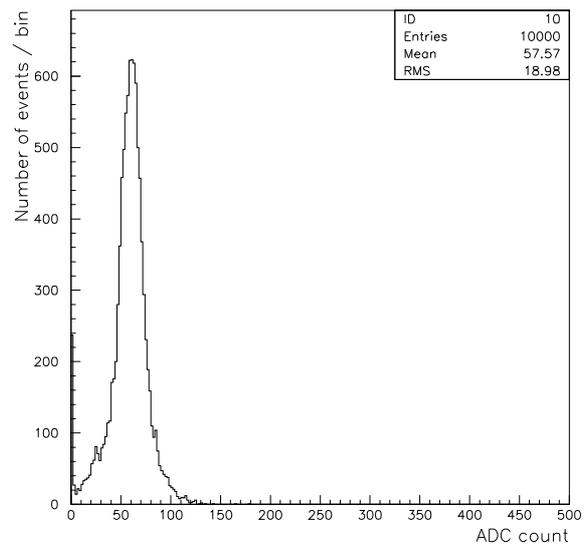


図 34 A:両方に掛ける threshold を最低にした場合: Sr 無

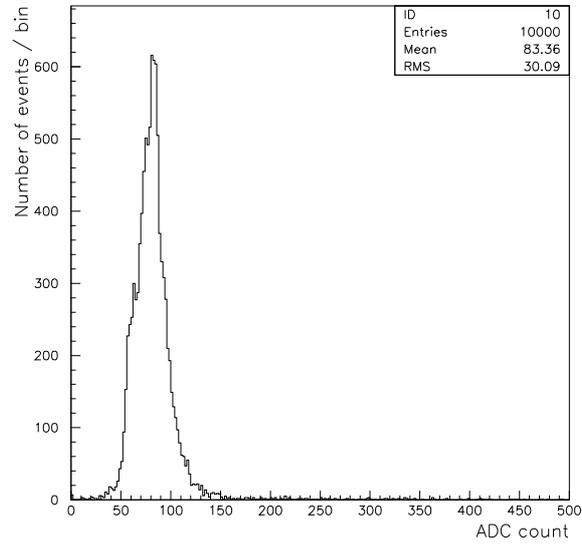


図 35 B:下のシンチレーターのみの threshold を掛けた場合: Sr 有

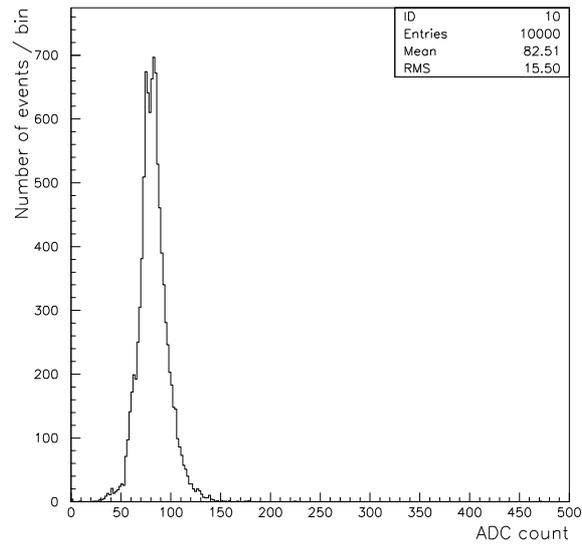


図 36 B:下のシンチレーターのみの threshold を掛けた場合: Sr 無

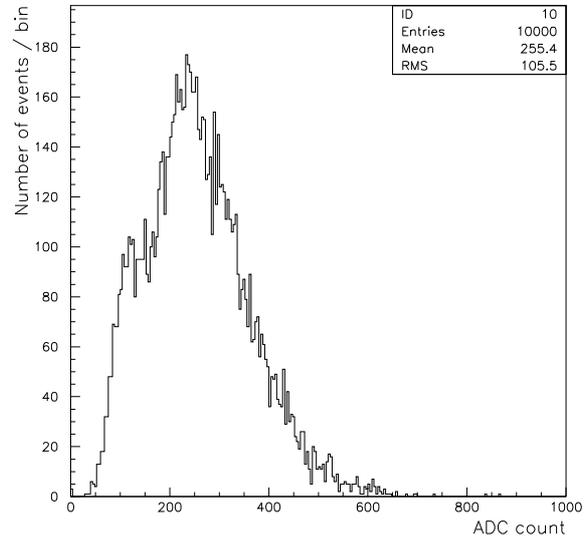


図 37 C:上のシンチレーターのみの threshold を掛けた場合: Sr 有

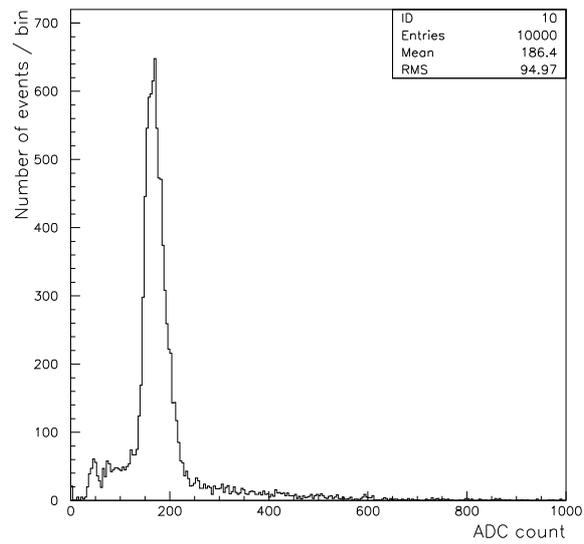


図 38 C:上のシンチレーターのみの threshold を掛けた場合: Sr 無

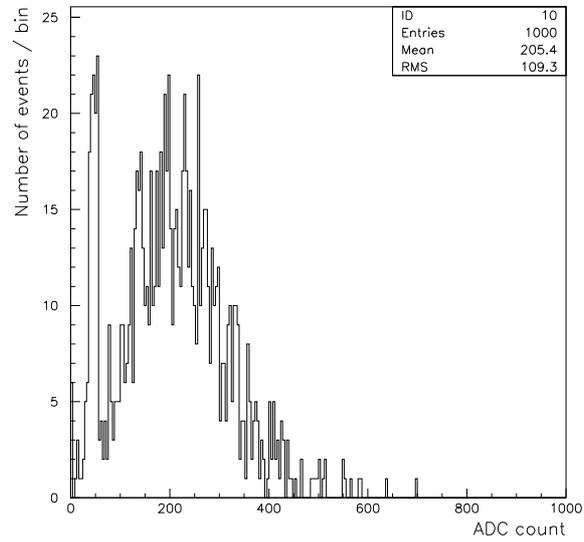


図 39 D:両方のシンチレーターに threshold を掛けた場合: Sr 有

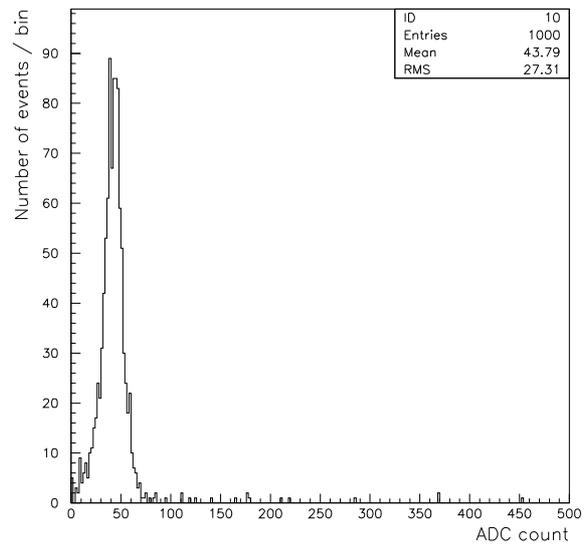


図 40 D:両方のシンチレーターに threshold を掛けた場合: Sr 無

図 A より、Sr の有無でピークの位置は変わっているが、threshold を掛けていないので、図 31 と同様ノイズも全て取ってしまっている。つまり、図 A ではほぼノイズ信号を見ていると考えられる。図 B より、下のみ Threshold を約 3p.e. を掛けた場合は、図 A と比べて GATE が開く頻度は減ると考えられる。しかし、上に Threshold が掛かっていないため、上のノイズに反応して GATE が開き、この図でもほぼノイズ信号を見ていると考えられる。

図 C について、図 A,B に比べてピーク位置が大きくなった。また、Sr の有無でピーク位置が約 100count 変化した。つまり、上に Threshold を約 3p.e. 掛けたことで図 A,B に比べてダークカウントを除去できていると考えられる。しかし、Sr 無の時のピーク位置のノイズも混ざっており、全ての生シグナルとは言えない。図 D について、Sr 有の時 2 本のピークが立った。これはピーク位置から考えても左がノイズで右が信号と区別することが出来ると考えられる。また、図 C ではノイズが混合しているが、図 D では見分けることが出来る相違が生まれた原因として、図 C では下のシグナルがダークカウントによって常に開いている状態になっているため threshold を掛けることで余分なノイズを取り除いてくれていると考えられる。つまり、両方について threshold を掛けることが、信号を得る必要条件だと言える。ここで信号を得ることが出来たが、図 39 を見るようにノイズが見えてしまう。そこでノイズを除去して信号だけとるためにはノイズレートに対応する threshold を決定する必要があると考えられる。しかし、threshold だけではノイズを取り切ることが出来ないのではと考えられる。この議論を宇宙線を含めて次で考える。

次に、宇宙線について議論する。図 34, 図 36, 図 38, 図 40 より、宇宙線ではなくノイズの信号が取れてしまったと考えられる。何故宇宙線が取れなかったのか図 40 について考える。この時 1event 取るのに約 90sec かった。

宇宙線の入射精度は平均  $1\text{cm}^2$  当たり 60sec に 1 事象である。今シンチレータは幅  $1.3\text{cm}$  × 長さ  $10\text{cm}$  なので、 $13\text{cm}^2$  当たり 1event 取るのに約 4.6sec と期待される。

本研究で、MPPC 単体での 4p.e. の rate は約 100kHz で、図 29 より gate はオーバーラップしているので約 100nsec と見積もると、

$$100k \times 100n = 10^4 \mu = 10^{-2} \quad (18)$$

となる。つまり  $\frac{1}{100}$  の確率で雑音が同時計数されると考えられる。これは 1event 取るのに 100sec かかる事から図 40 の実験値と 10% の誤差で一致する。今図 41,42 に注目する。

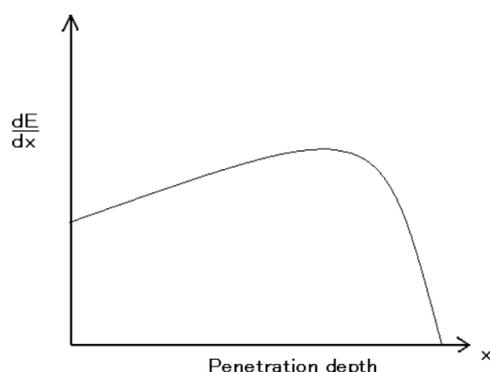


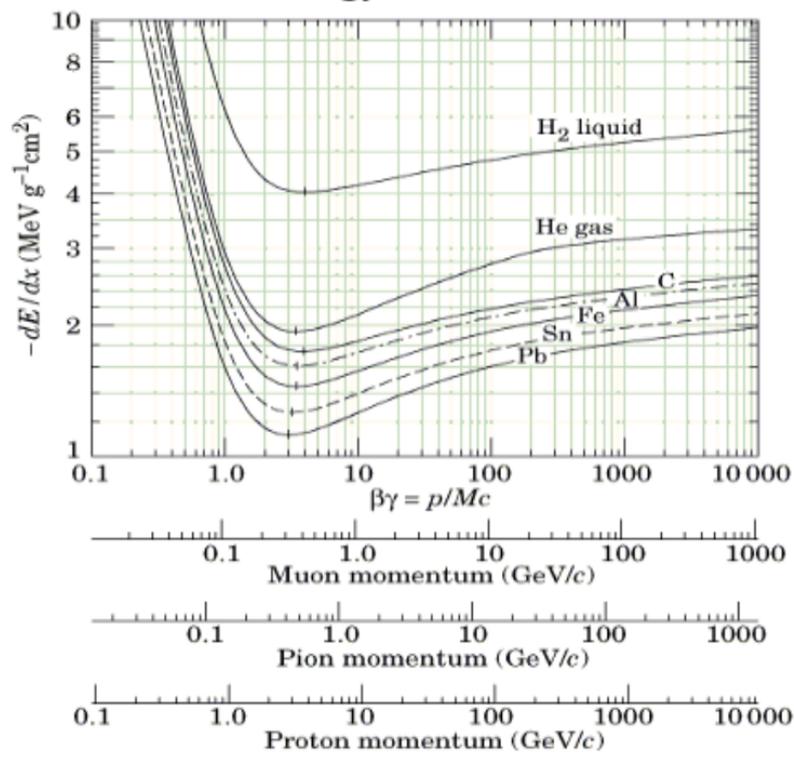
図 41 Bragg curve

宇宙線が地上に来るときはほぼ  $\mu$  粒子である。図 41 で見られるように宇宙線は長い崩壊過程でその分単位長さ当たりのエネルギー損失は低いと考えられる。つまり図 42 の最小値に宇宙線が多くあると考えられる。宇宙線は 4.6sec しか取るのに掛からないのに、1event 取るのに 90sec かっており、宇宙線が来る rate の  $\frac{1}{10}$  にしかなくておらず、このことから宇宙線は取れずノイズが取れたのではないかと考える。エネルギーの関係から述べる。同様に図 42 の  $x$  軸の  $\mu$  粒子を読み取ると宇宙線は約  $0.106\text{GeV}$ ,  $\beta$  線は最大  $0.00228\text{GeV}$  である。図 34, 図 36, 図 38, 図 40 からもノイズと思われるピーク位置は  $\beta$  線より小さい位置にあるため、宇宙線の取れる範囲の  $\frac{1}{10}$  にも達していないことが分かる。改善策として考えられるのは、

1. 恒温槽によるノイズからのシールドの強化およびセットアップの改善
2. 集光効率を良くするためのセットアップ (断面積からの光漏れ、ライトガイドの設置)

であるがこれが全てとは一概とは言えない。今後の課題である。

### Energy loss rate.



*Review of Particle Physics*  
 C. Caso et al., ( Particle Data Group )  
 The European Physical Journal C3(1998)p144.

☒ 42 The stopping power  $dE/dx$  as function of energy for different particles

## 5 まとめ・今後の課題

LED を用いて MPPC の基本特性を測定する方法を確立した。LED の発光量をじゅうぶん減光して使用すれば、フォトン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わかった。また、作成した ADC 分布を Gaussian で Fit し、ピーク間隔を求めることで増幅率を測定できる事が分かった。ピーク幅の波形分解能は温度には寄与しないことも分かった。

MPPC の増幅率の温度依存性は、測定した範囲ではほぼ一次関数になることが確認できた。同様に MPPC の増幅率の逆バイアス依存性も一次関数で表せ、傾きは温度には依存しないことが確認できた。Break down Voltage は温度に線形に依存しているように考えられるが、他の温度についても測定しないことには確かであるとは言えない。今回は fit が上手くいく温度でのみしか測定しなかったため、低温度の測定をすることは MPPC の特性を知る上で必要だと考える。

シンチレーションカウンターを製作し、 $^{90}\text{Sr}$  から発生する  $\beta$  線を観測するためのセットアップそして ADC 分布で確認することができた。そして全てシンチレーターを  $\beta$  線が通過できる条件やノイズの除去するための条件を探ることが出来た。しかし、完全にノイズを除去することが出来なかった。これは、 $^{90}\text{Sr}$  を乗せずに測定した時つまり宇宙線測定の段階からノイズが発生してしまい、このノイズを遮断するセットアップの改善をするべきであると考えられる。しかしこの波形は全体的に小さく、実際に宇宙線が出たらその信号と  $\beta$  線を見分けることが難しいと考えられるため、シンチレーターにフォトマルをつけたシンチレーションカウンターで同様の信号を取り、MPPC によるシンチレーションカウンターとの比較を行うことが必要であると考えられる。その上でセットアップの改善を行うべきである。

次の研究を行うことがさらなる課題である。以下に示す。荷電粒子の飛跡を見るために、9 組のシンチレーション・カウンターを用意して、3×3 段に寝かし、1 から 9 まで番号を振る。もし荷電粒子が来たら、3 段それぞれ 1 組ずつのみ反応するはずである。その信号を ADC で読みとれば、どんな飛跡で来たか確認できると考えられる。本研究ではこの Block Diagram を考えたが、製作まで至ることが出来なかった。ここにその Block Diagram を載せる。いろんな飛跡を探ることが出来るのでとても考え深い物があるだろう。

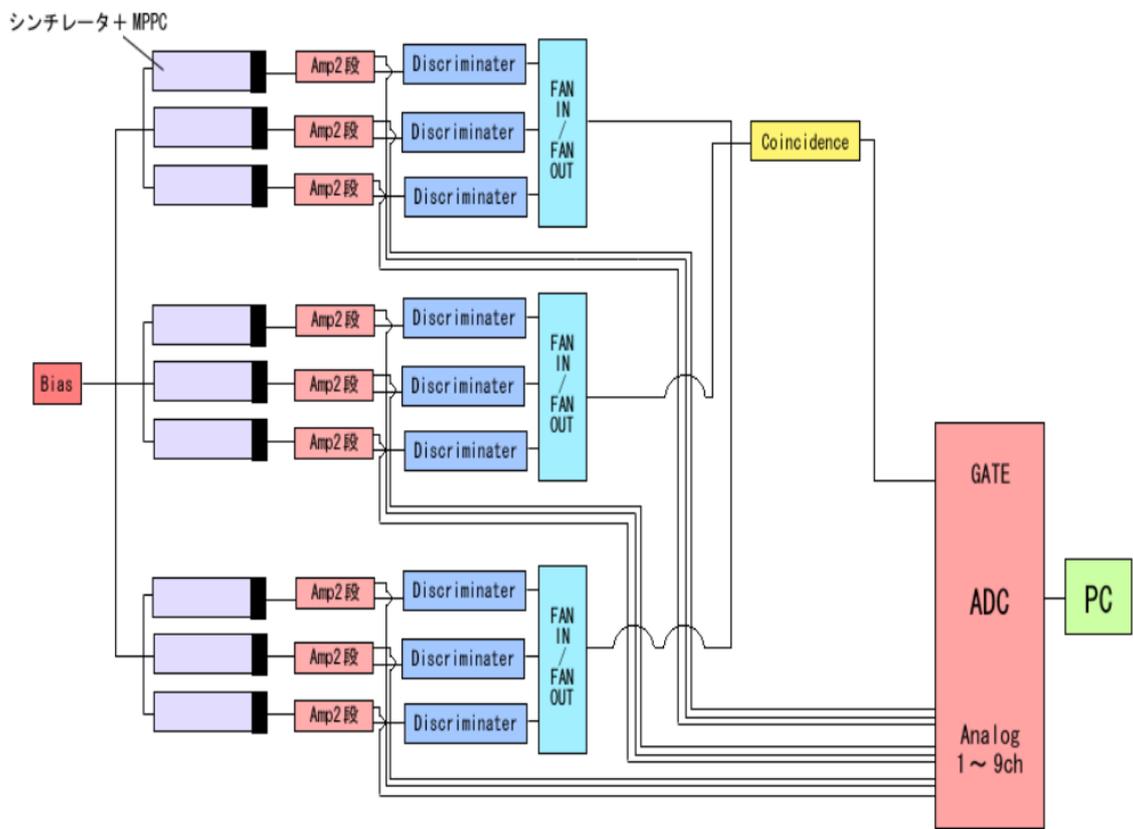


図 43 Block Diagram3

## 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々の御協力を得ることができました。この場をおかりして、心から感謝の意を示したいと思います。

お忙しい中、ご指導いただいた野口誠之先生、林井久樹先生、宮林謙吉先生、大変お世話になりました。特に指導教官である宮林先生には、様々な点でご指導、ご鞭撻いただき心から感謝いたします。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卒業研究を行った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できました。本当にありがとうございました。また、本論文を最後まで読んでくれた方へどうもありがとうございました。

## 参考文献

- [1] Willam R.Leo : Techniques for Nuclear and Particle Physic Experiments Springer-Verlag Second Revised Edition
- [2] 浜松ホトニクス株式会社 : MPPC のカタログ
- [3] 日亜化学工業株式会社 : LED 標準仕様書 (品名:青色 LED 型名:NSPB320BS)
- [4] 日本プロアー株式会社 : 恒温槽 LS - 5 仕様
- [5] 桜井捷海・霜田光一著 : 応用エレクトロニクス 裳華房 昭和 59 年第一版発行
- [6] 政池 明著 岩波書店 : 素粒子を探る粒子検出器 ものを見る捕らえる
- [7] 渡邊 靖志著 培風館 : 素粒子物理入門 基本概念から最先端まで
- [8] THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY : PHYSICAL REVIEW D PARTICLES AND FIELDS 1 JULY 2002 PART1
- [9] 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
- [10] 玉木 智子・平井 珠生 : 2006 年度 卒業論文 石英ガラスで発生するチェレンコフ光を用いた荷電粒子の検出