

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

奈良女子大学 理学部 物理科学科
高エネルギー研究室
辻 知佳・宮田 香織

2008 年 3 月

目次

1	はじめに	3
1.1	実験の目的	3
1.2	本論文の構成	3
2	検出器の概要	4
2.1	MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)	4
2.2	シンチレータ	9
3	LED 点灯時の MPPC の出力測定	11
3.1	Block Diagram	11
3.2	LED	12
3.3	サーミスター	12
3.4	NIM 規格	14
3.5	エレクトロニクス	14
3.6	データ収集・解析装置	17
3.7	ADC(2249W) の動作テスト	20
3.8	結果・考察	21
4	β 線の測定	27
4.1	使用する線源	27
4.2	荷電粒子のエネルギー損失	27
4.3	Block Diagram	28
4.4	結果・考察	29
5	まとめ・今後の課題	32

1 はじめに

「物質とは何からできているか？」という問いが素粒子物理学の起源である。分子、原子、とすでに答えが出ているのでは、と思う人もいるかもしれない。しかし、原子は原子核の作る電場に電子が束縛されて形成される。また、原子核は陽子と中性子からなる。現在では、陽子と中性子には内部構造があり、クォークと呼ばれるさらに小さな構成要素を含むことが明らかになっている。こうした自然の階層構造を形成する相互作用は、量子力学的描像ではそれを媒介する粒子の交換により起こる。これが、素粒子物理学の基本的な概念であり、物質を構成する最小の要素および物質を結び付ける相互作用を研究することが素粒子物理学の目的である。

では、こうした微小サイズの粒子を発見するにはどのようなことを行えばよいのか？原子核を発見したラザフォードは、金箔に線を当てるという実験からこれを証明した。したがって、高エネルギーの粒子を作って、標的粒子にぶつけ、その散乱の様子から粒子の構造を調査できる。同時に高エネルギー粒子の衝突では新たに粒子を生成することもできる。生成した粒子を検出器でとらえ、その信号をエレクトロニクスとコンピュータで記録・解析するという手法を用いれば、物質の究極の構成要素を調べることができるはずである。

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がある。光検出器を用いて、これを測定することにより、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。本研究では新型の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

光検出器は、大別して光電管ベースのものと半導体ベースのものがある。半導体は、量子効率（光を電子・ホール対に変換する効率）が高いという利点を持つ。本実験では、この半導体の性質を生かして新たに開発された半導体型光検出器 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) の基本特性を測定し、さらにはプラスチックシンチレーターと組み合わせることで、荷電粒子通過時の波高測定を行う。これらにより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、始めに半導体型光検出器 MPPC の仕様・動作原理などについて述べ、次に実験装置やデータ収集解析装置の概要について述べる。そして、それらを使用して行った実験方法・結果をまとめ、考察を述べる。

2 検出器の概要

2.1 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)

MPPCはPPD(Pixelized Photon Detector)と呼ばれるものの一種で、浜松ホトニクスにより製品化されたものである。これは、個別に動作する複数のガイガーモードAPD(アバランシェ・フォトダイオード)のピクセルから成る新しいタイプのフォトカウンティングデバイスである。MPPCの特長としては次のようなものが挙げられる。

- 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)

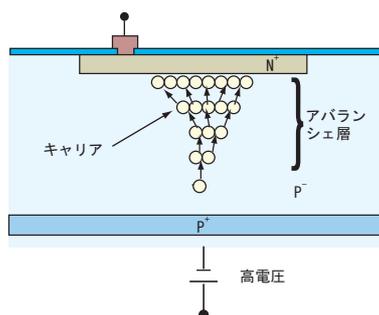


図1 APDの動作原理図

非常に微弱な光量ではフォトン(光子)が離散的に検出される。このような状態でフォトンの数をカウントし光量を計測することをフォトンカウンティングと言う。これまでフォトンカウンティングをするためのデバイスとしては光電子増倍管のみが使用可能であった。

半導体ベースの光検出器でフォトンカウンティングを実現するため、ガイガーモードで動作するAPD(アバランシェ・フォトダイオード)の利用が考えられた。APDに降伏電圧以上の逆バイアスを印加することをガイガーモードという。ガイガーモードでは、内部電場が非常に高くなり、増倍率が大きくなる。このガイガーモード時にフォトンが入射すると、アバランシェ層に電子-正孔対を生成することによりキャリアが注入される。半導体内で発生したキャリア(自由電子・正孔)は加速され、この加速されたキャリアが半導体内の原子と衝突したとき新たに電子-正孔対を発生する。新たに生成された電子-正孔対もまた加速され、他の原子と衝突し同様に電子-正孔対を生成する。こうした反応が繰り返し起こることで、電子雪崩が引き起こされてキャリアが指数関数的に増加する。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。以上の事より、APDはガイガーモードの高電場において、わずかな光子の入射でも放電現象を起こす。この時、出力電流の大きさは入射フォトン数に関係なく一定であることを注意

しておく。

これまでに話してきたガイガーモード 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。(図 2) 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。

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

C :各ピクセルの容量

V_R :逆バイアス

V_{BR} :降伏電圧

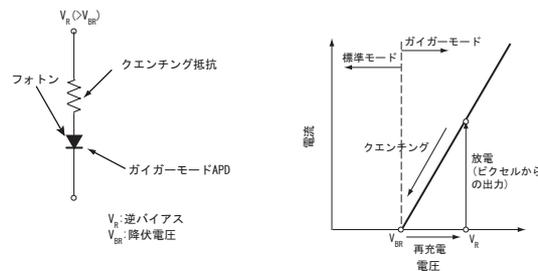


図 2 ガイガーモード APD

さらに、MPPC はガイガーモードで動作する APD ピクセルを並列接続した構造になっている。MPPC の等価回路は図 3 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

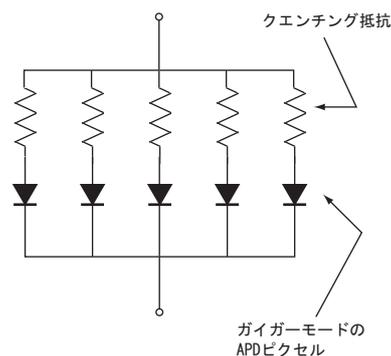


図 3 MPPC の等価回路

あるので、光子が入射したか入射していないかだけを情報として知ることができる。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 が検出した光子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

2.1.2 MPPC の仕様 [2]

今回使用した MPPC は、ピクセル数 400(20 × 20) のセラミックタイプの MPPC(S10362-11-050C) である。表 1 に、S10362-11-050C の仕様および、図 4 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 _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°
増倍率	7.5 × 10 ⁵	-

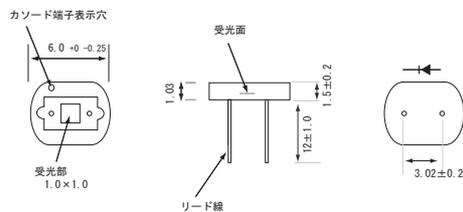


図 4 MPPC の外寸図

2.1.3 ダークカウント

MPPC は固体素子であるため、熱励起によるノイズが発生する。特に MPPC はガイガーモードで動作するので、ノイズ成分も同じように増幅されてしまい、フォトンを検出したパルスと区別がつかなくなる。このように光により生成されたものとは違う熱的に発生したノイズによるパルスのことをダークカウントという。ダークカウントは熱励起により起こるノイズであるので、温度が低いほど小さくなる。

2.1.4 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、元のフォトンによるパルスより遅れて、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。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。

2.1.5 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電子雪崩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。

2.1.6 MPPC の温度特性とバイアス依存性

MPPC の増幅率は印加するバイアスと温度に依存する。MPPC は、逆バイアスに対しては優れた直線性を示し、一定温度のもとで印加する逆バイアスを上げるほど増幅率は大きくなる。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。

一定の出力を得るためには、温度によって逆バイアスを変化させるか、MPPC の温度を一定に保つ工夫をしなければならない。

2.1.7 MPPCの基本接続回路

MPPCの基本接続回路を図5に示す [2]。

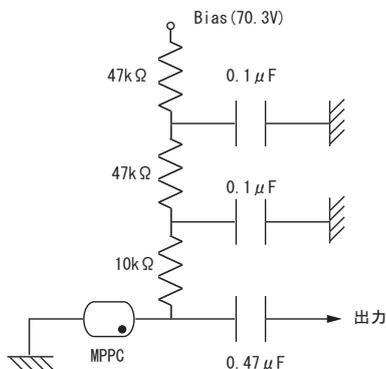


図5 MPPCの基本接続回路

図5に示したように、逆バイアスがかかるために +70.3(V) の電圧を印加する。バイアス側は $47k\Omega$ の抵抗と $0.1\mu F$ のコンデンサーのローパスフィルター2段により、電源から来るノイズを除去する。信号読み出し側は $0.47\mu F$ のコンデンサーにより、電源からの直流成分を除去する。

実際のダークカウント 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6に示す。図の挿入雑音パルスの波高も離散的であるので、フォトンカウンティングも可能であるといえる。

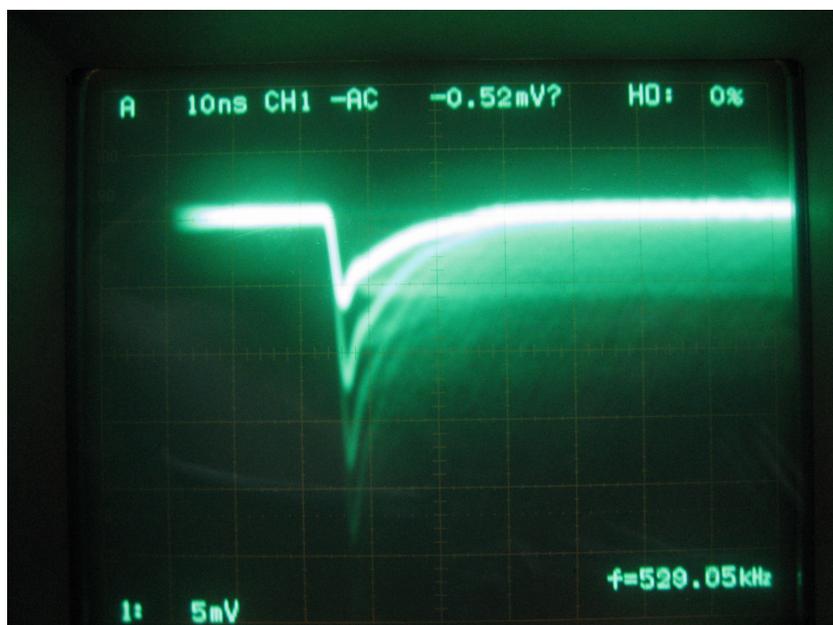


図6 オシロスコープで観測したダークカウントのパルス

2.2 シンチレーター

原子がエネルギーを得ると、軌道上の束縛電子が励起される。これが、もとの状態に遷移するとき、余分なエネルギーが光として放たれる。光や熱、放射線の入射によってエネルギーを与えられた時、そのエネルギーを吸収し、可視光として再放射する過程をルミネセンスと言う。この中で、エネルギーの吸収後直ちに (10nS 以内) 再放射される光を蛍光、遅れて再放射される光を燐光という。得たエネルギーを蛍光に変換する効率の高いものをシンチレーターと呼ぶ。再放射までにかかる時間と、その光の波長はシンチレーターの材料によって異なる。放射される光の出力は時間に対し、指数関数的に減少する。これは式 (3) のようになる。

$$N = \frac{N_o}{\tau_d} \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (3)$$

$$N : \text{時間 } t \text{ に放たれるフォトン数} \quad (4)$$

$$N_o : \text{全フォトン数} \quad (5)$$

$$\tau_d : \text{崩壊定数} \quad (6)$$

主にシンチレーターとして用いられているものには、有機結晶、有機液体、プラスチック、無機結晶、ガス、ガラスの 6 種類がある。本実験では、その中でもプラスチックシンチレーターを使用した。以下で、プラスチックシンチレーターについてさらに詳しく記述する。

2.2.1 プラスチックシンチレーター

プラスチックシンチレーターは、核物理・素粒子物理の実験で最も広く使われる有機検出器である。プラスチックシンチレーターの崩壊時間は 2 ~ 3nS と速く、時間分解能が優れている。そのため、光検出器応答の有限の立ち上がり時間を無視できず、この効率を関数 $f(\sigma, t)$ で表現し、得られる信号波形は式 (3) を次のように変形したものになる。

$$N(t) = N_o f(\sigma, t) \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (7)$$

$$N : \text{時間 } t \text{ に放たれるフォトン数} \quad (8)$$

$$(9)$$

プラスチックシンチレーターはポリスチレンやアクリル樹脂のような母体に微量の蛍光物質を含む。また、wavelength shifting(波長を長くする) という特性を与えるための物質が加えられていることが多い。荷電粒子が通過すると、蛍光物質が励起し、それが基底状態に戻る時に光を発する。プラスチックは簡単に加工でき、比較的安価である。また、一般的にかなり頑丈である。しかし、有機溶媒には弱く、他にも手で直接触れると、皮脂などによって表面がおかされるので、取り扱いの際には、注意する必要がある。

2.2.2 シンチレーションカウンター

シンチレーターと光検出器を組み合わせた粒子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、これ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光検出器である MPPC を用いて、図 7 に示すシンチレーションカウンターを組み立てた。このプラスチックシンチレーターは長さ 5cm、幅 1.2cm、厚み 0.5cm のものを用いた。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集めるために、シンチレーターをアルミフォイルでくるみ、その上から黒色の遮光テープを巻いて、MPPCは端面に光学グリースで粘着した。

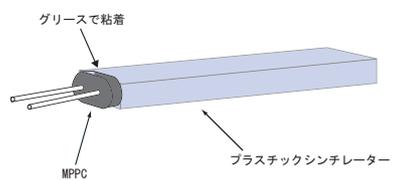


図7 MPPCを用いたシンチレーションカウンター

3 LED 点灯時の MPPC 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。図 8 に、Block Diagram を示す。

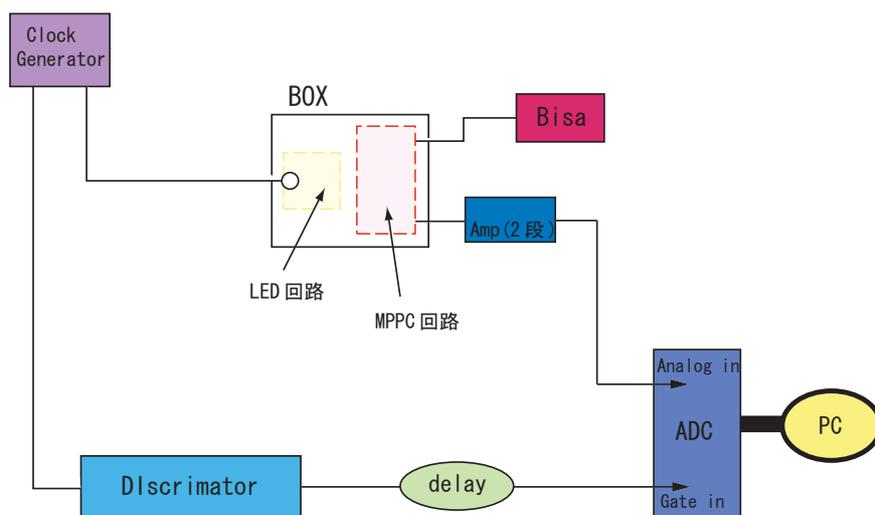


図 8 LED 点灯時の Block Diagram

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 内壁にサーミスターを設置した。

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。図 9 に LED の外寸図および、表 2 に LED の規格を示す。 [3]

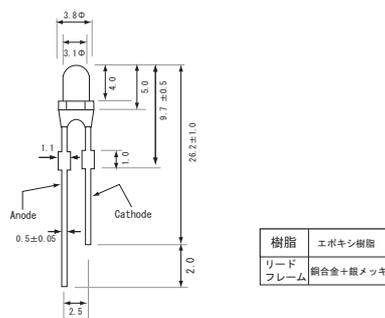


図 9 LED の外寸図

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°

LED の動作回路では、クロックジェネレーターとの間に 100Ω の抵抗を入れ、アッテネーターでパルスの電圧を 4V、パルスの幅は 20nS とした。また、LED に紙で作った三角の帽子を被せ、頭頂部の一部を除いて黒く塗り、MPPC に入射するフォトン数を調整した。

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

$$R = A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (10)$$

と表される。これは半導体の電気伝導率 σ 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)

$$R = R_0 \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (11)$$

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ー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 NIM 規格

実験で使用される基本の電子学 (例えば Amplifier や Discriminator など) 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(原子核計器測定基準) は、原子核、高エネルギー物理学のために初めて設置されたモジュールシステムである。使用する電子学システムは、必要なモジュール (例えば、Amplifier、Discriminator など) を集め、それらを NIMbin に取り付け、さらにそれらに合わせてケーブルを取り付けることによって作成される。この NIM システムは、計器の交換などにおける適応性を持ち、非常に大きな利便性を与える。

3.4.1 NIM 規格の概要

図 10 に標準的な NIM bin の例を示す。

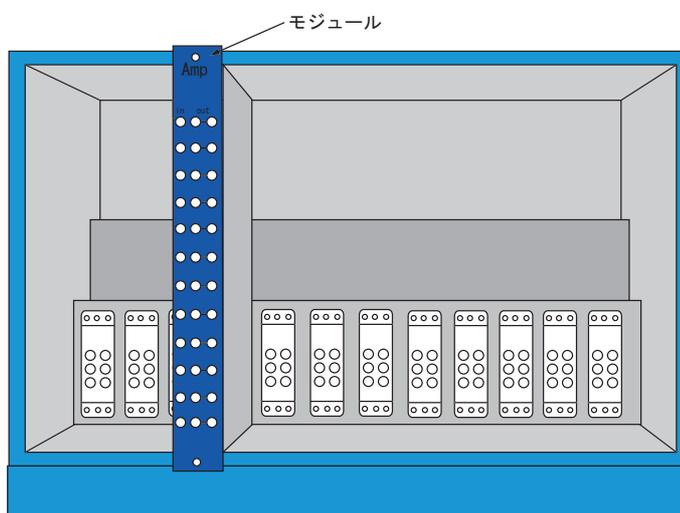


図 10 NIMbin

モジュール NIM モジュールは、高さ 22.225cm、幅 3.43cm が最小規格であり、その整数倍の幅のものもある。これらのモジュールの電源は、後部の bin に一致するコネクタから供給される。

Power Bins 標準的な NIMbin は、最小規格モジュールが 12 個挿入できるようになっており、19 インチのラックに取り付けられるような寸法である。後部には、電源コネクタがあり、D.C 電源 -12V、+12V、-24V、+24V、-6V、+6V を供給する。

3.5 エレクトロニクス

実験で使用した電子学についての説明を次に述べる。

3.5.1 Clock Generator

指定したパルス幅と繰り返し周波数で、NIM または TTL の規則正しいパルスを発生させる装置。

NIM Logic Signals [1]NIM モジュールは、アナログとデジタルの両方の器具をもつ。アナログ信号において、情報はその信号の連続的に変化する高さや形である。一方で、デジタル、もしくは論理信号は、決められた形と yes か no かの 2 つ状態のみをもつ。その二つの状態を logical0 と logical1 とするのが、慣習である。しかしながら、1 もしくは 0 として選ばれる信号は任意である。

NIM Logic Signal の標準タイプは 2 つあり、それは、slow-positive logic と fast-negative logic である。実験で使用する NIM パルスは後者であるので、それについてのみ、ここでは述べることとする。

fast-negative logic は、NIM logic と呼ばれ、1ns のオーダーの極度に速い立ち上がり時間の信号を出力する。このタイプは、しばしば速いプラスチックシンチレーションカウンターを使う実験 (例えば、高エネルギー物理学における) に使用される。この NIM logic レベルは、表 3 に定義する。この NIM モジュールの入出力イ

表 3 Fast-negative NIM logic

	Output must deliver	Input must accept
Logic 1	-14mA to -18mA	-12mA to -36mA
Logic 0	-1mA to +1mA	-4mA to +20mA

ンピーダンスは、接続ケーブルの典型的なインピーダンスである 50Ω である。このことから、この電圧レベルは、logic 0 と 1 に対してそれぞれ 0V と -0.8V である。この fast-negative logic は、信号によって送られる電流が比較的大きいので、長いケーブルを通して信号を送ることが可能である。

TTL Logic Signals [1]NIM 規格ではないが、原子核や粒子物理学のエレクトロニクスとして、しばしば使用されるのが TTL(Transistor-Transistor Logic) logic 族である。これは、positive logic で、しばしば NIM エレクトロニクスモジュールの中で見受けられる。この電圧レベルは表 4 に示す通りである。

表 4 TTL signal levels

Logic 1	2-5V
Logic 0	0-0.8V

3.5.2 Discriminator

入力信号が設定した Threshold(しきい値) を超えたときにパルスを出力する装置。しきい値は、フロントパネルのポテンショメーターによって調節することができる。一般的に Discriminator は、PMT や他の検出器からの低い振幅のノイズを除去するために使用される。図 11 に Discriminator の動作について示す。

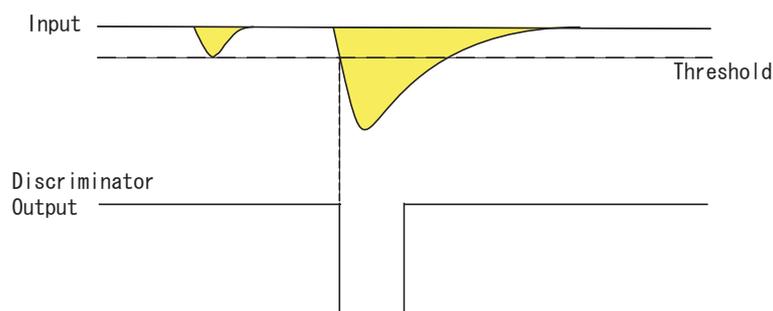


図 11 Discriminator

3.5.3 Gate Generator

入力信号の幅を数 $nsec$ から数 sec の長さに変動させる装置である。このパルス幅は、フロントパネルのつまみによって調節することができる。

3.5.4 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信号を線型増幅する。約 10 倍の増幅率があり、実験のセットアップに応じ、一段または直列に二段を入れて使用した。

3.5.5 Attenuator(ATT):減衰器

入力信号を減衰させる装置。減衰率を x とおくと、

$$x = -20 \log \frac{v_o}{v_i} \quad (12)$$

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 データ収集・解析装置

本研究では、検出器からのアナログ信号をデジタルデータに変換するために用いる ADC や TDC には CAMAC の規格のものを用いた。これらの ADC や TDC はクレート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授受を行う PC 側のインターフェースと PC 内部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。

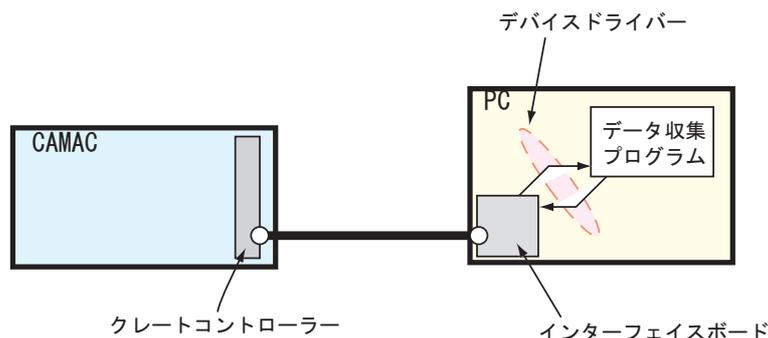


図 12 データ収集・解析装置の概要

3.6.1 camdrv

データ収集システム用パッケージ開発プロジェクトの一つである Kiniko のソフトウェアの一部として、東北大学ニュートリノセンターの榎本三四郎氏らが作成した CAMAC 向けの Linux デバイスドライバーが camdrv である。PC は OS に Redhat Linux 9 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。

3.6.2 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。

3.6.3 CAMAC 規格の概略

クレート クレイトは 19 インチの標準ラックに取り付けられるようになっており、最大 25 個のモジュールが挿入できるよう 25 個のステーションを 17.2mm 間隔で持っている。それぞれのステーションには、モジュールをデータウェイ・コネクタに導き入れるために 86 ピンのデータウェイ・コネクタのソケット・モジュールを固定するためのねじ穴が設けられている。

データウェイ モジュールの相互間の信号の授受はデータウェイを通して行われる。この受動多線式のハイウェイはクレイト内部に組み込まれており、全てのステーションのデータウェイ・コネクタ・ソケットに接続

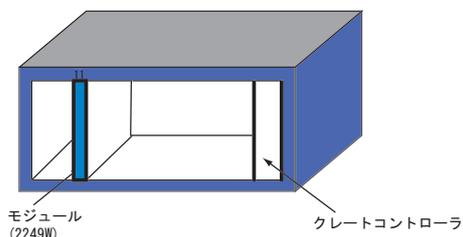


図 13 CAMAC 規格

されている。

モジュール モジュールは幅約 1.7cm の整数倍がゆるさ、裏側の半分にはモジュールの回線配線に使われるプリント基板ヘッジが 86 ピンのコネクタとなっている。クレートに差し込むと自動的にクレートの裏側のコネクタを通して CAMAC データウェイに接続され、電源、データや制御信号の受け渡しが行われるようになっている。

クレートコントローラ クレートの右端の 25 番目のステーションは特別な配線になっており、クレート・コントローラと呼ばれる。クレート・コントローラは 25 番目以外の通常の配線をされたステーションを少なくとも一つ占拠し、データウェイを監視する。

3.6.4 ADC

ADC とは、アナログ電気信号をデジタル信号に変換する装置である。その過程を簡単に、次に述べる。ADC に入力された信号は、コンデンサーに電荷として蓄えられる。コンデンサーは、一定の割合で放電され、入力電荷に比例する時間を与える。その時間は、放電している間の発信器のパルス数を数えることで測定される。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 5 に示す。表

表 5 2249W

No. of Channel	12
No. of Bits	11
Charge(Q) or Voltage(V)	Q
Analog Inputs	AC-coupled(50Ω)
Full scale	-512pC± 5%
Maximum Resolution	-0.25pC
Conversion Time	106λsec

5 における“Q”とは、Q モードの事である。Q モードは、Gate が開いている間の信号の電流を積分した結果得られる電荷に対応する整数を出力する ADC のモードである。ADC の Q モードを模式的に図 14 に示す。ADC は、Gate パルスが ON になっている間の信号積分電荷 (図 14 の網かけ部面積) を対応する整数に変換

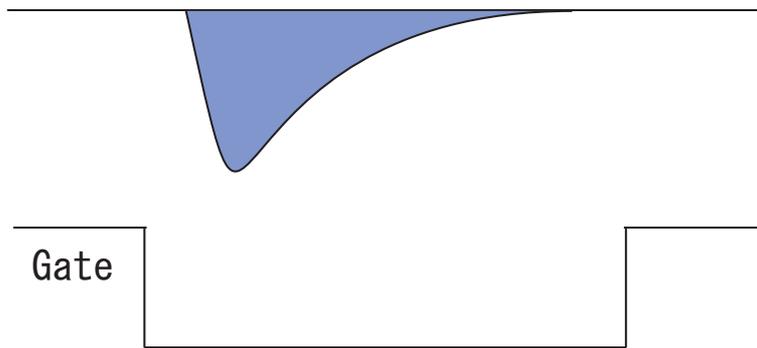


図 14 Q-mode

する。ADC が出力する数値は $1\text{count}=0.25\text{pC}$ であるので、アナログ値である電荷 [pC] とデジタル値である ADC count の関係は傾きが 4.0 の一次関数であるといえる。

3.7 ADC(2249W) の動作テスト

使用する ADC が正常に動作するかを確かめるための測定を行った。ATT を用いて Clock Generator の信号を変化させ、電荷と ADC のカウント数を測定した結果を表 6 および図 15 に示す。

表 6 ADC の動作テスト

電荷 [pC]	ADC の count 数
50	201
100	391
200	769
400	1532

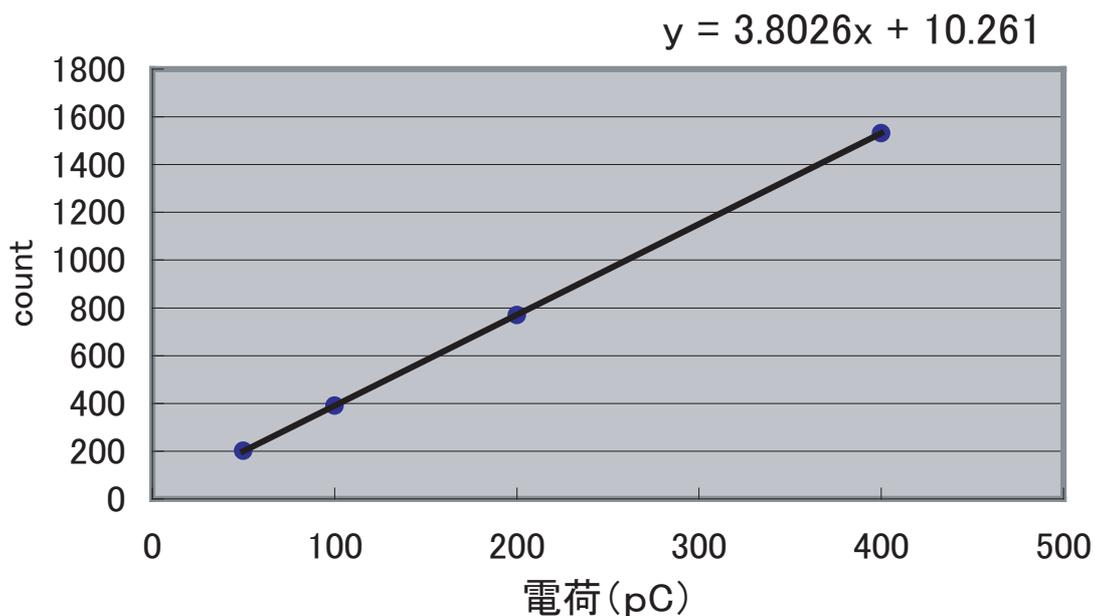


図 15

この時、最小二乗法を用いて近似直線を求めたところ、ペダスタルは 10.3、傾きは 3.8 となった。これは、カタログ値の傾き 4.0 とほぼ一致している。

3.8 結果・考察

図 16 から図 21 に LED からの光を MPPC に入射させたときの ADC 分布を示す。この図は横軸が ADC count、縦軸が event 数となっている。これらは温度の低いものから順に並べ、各 Peak ごとに Logarithmic Gaussian[6] を使って分布全体を fit したものである。Logarithmic Gaussian については、式 (13) に示す。

$$f(x) = \frac{N}{(\epsilon - x) \sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{1}{\sigma_0} \ln\left(\frac{\epsilon - x}{(\epsilon - \mu) e^{\sigma_0^2}}\right)\right) \quad (13)$$

ここで、

$$\epsilon = \frac{\sigma}{a} + \mu y = a \sqrt{2 \ln 2} \sigma_0 = \frac{\ln\left(y + \sqrt{1 + y^2}\right)}{2 \ln 2} \quad (14)$$

また、フィッティングパラメーターは次の 4 つである。

N : 規格化定数

μ : 平均値

σ : 標準偏差

a : 非対称度

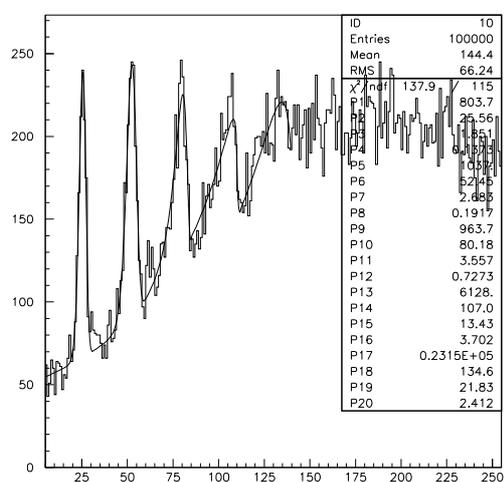


図 16 LED 光入射時、11.78 における MPPC の波高分布

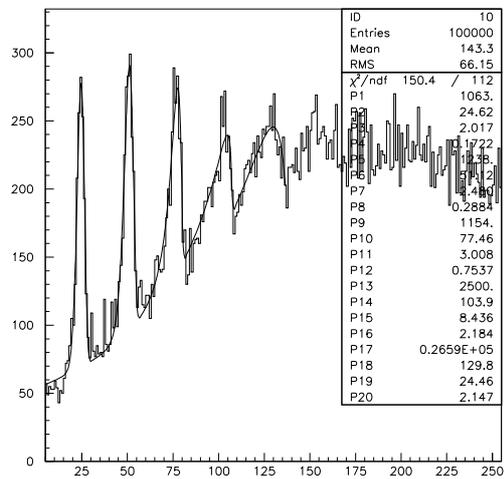


図 17 LED 光入射時、13.15 における MPPC の波高分布

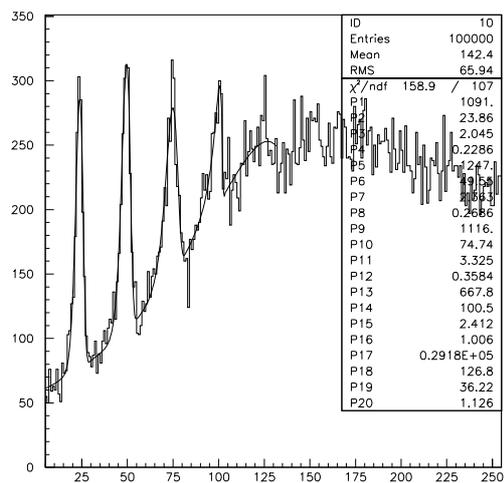


図 18 LED 光入射時、14.42 における MPPC の波高分布

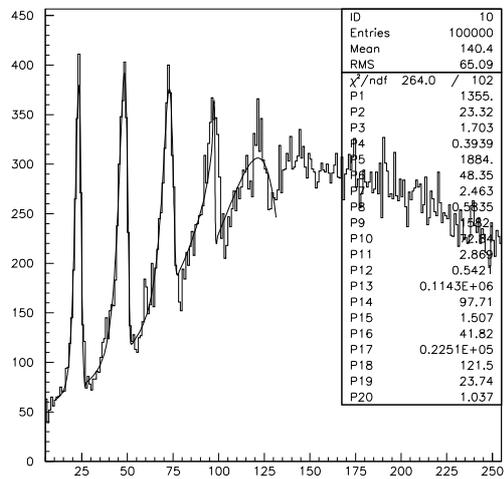


図 19 LED 光入射時、16.62 における MPPC の波高分布

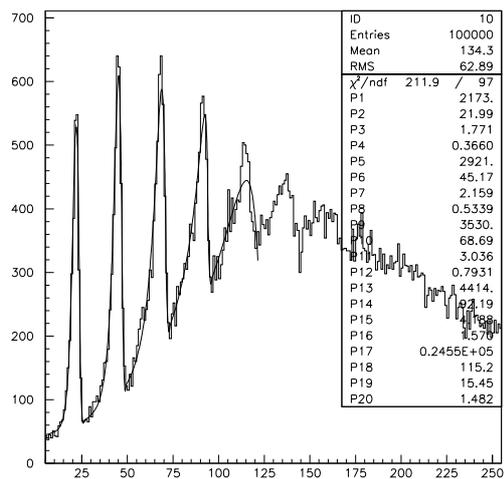


図 20 LED 光入射時、19.00 における MPPC の波高分布

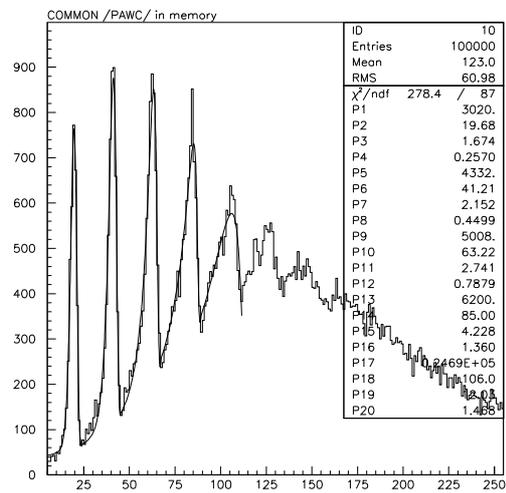


図 21 LED 光入射時、21.42 における MPPC の波高分布

これらの波高分布についてピークを Gaussian で表現し、その他をバックグラウンドとみなして一次多項式を用いた fit では、クロストークとアフターパルスの影響で各ピークがテールをひいて左右非対称な分布を示すため、良好な fit を実現できなかった。よって、非対称の関数である Logarithmic Gaussian を用いることにした。図示したとおり、複数の Logarithmic Gaussian でおおむね分布を記述できていることがわかる。このことから、ADC 分布は Background の上にピークが立っていると考えるのではなく、テールをひいた分布の重ね合わせであると考えられる。さらに図より、温度の高いときのほうが fit が上手くいっている。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り、ピークが不明瞭になるためである。fit 結果より、ピーク位置のずれは約 $\pm 1(\text{count})$ と見積もった。

ここで、ピーク間隔は MPPC の増幅率 (相対値) を与える。これを温度の関数として求めた結果を表 7 と図 22 に示す。

表 7 各温度のときのピーク間隔

温度 ()	Peak 間隔
11.78	27.26
13.15	26.31
14.42	25.68
16.62	24.57
19.00	23.34
21.42	21.64

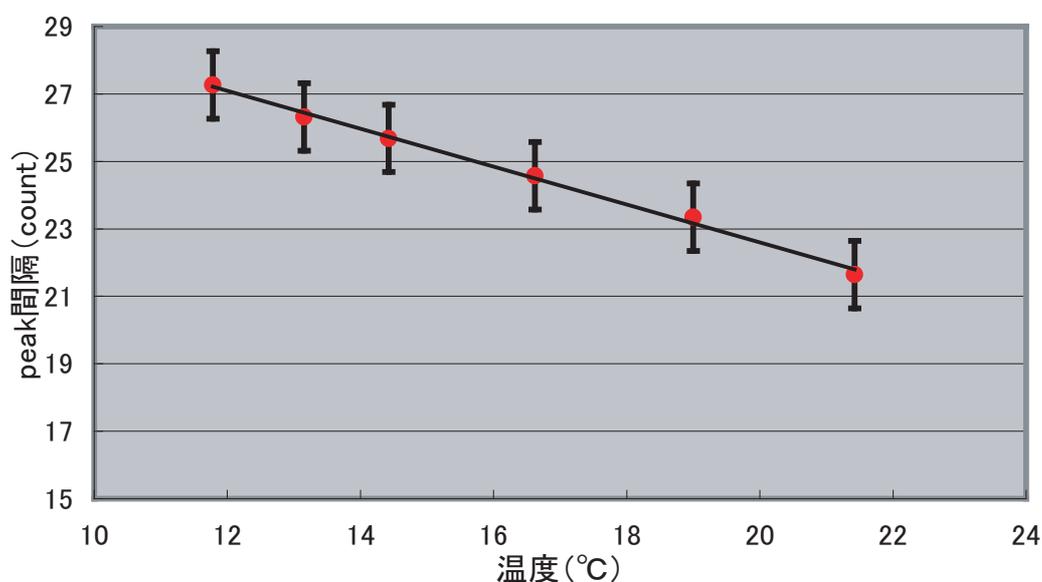


図 22 (相対的) 増幅率の温度依存性 (Logarithmic Gaussian による fit)

測定した温度の範囲内では、温度とピーク間隔 (相対的増幅率) はほぼ直線的である。ADC の時と同様の方法で近似直線の傾きを求めたところ、 -0.57count/ であり、これは 1 温度変化で増幅率が約 2.5% 変化することを意味する。

4 β線の測定

LEDを用いた測定の結果、MPPCの増幅率とその温度依存性を確認することができた。これをもとに、プラスチックシンチレーターと組み合わせて荷電粒子の測定を行った。

4.1 使用する線源

本実験では、検出の対象とする荷電粒子を ^{90}Sr が発するβ線とした。図23に、 ^{90}Sr の崩壊図を示す。原子核 ^{90}Sr は最大0.546MeVのβ線を出して ^{90}Y になり、さらにこの ^{90}Y は、さらに2.27MeVのβ線を出して ^{90}Zr に遷移する。使用した線源はアルミで密封されており、始めの0.546MeVのβ線はこれを通過できない。そのため、シンチレーターに入射するβ線の最大エネルギーは2.28MeVである。

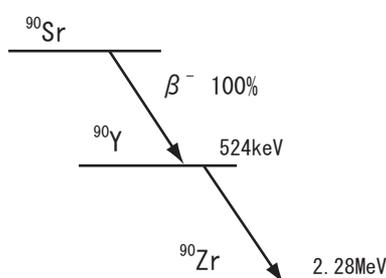


図23 ^{90}Sr の崩壊図

4.2 荷電粒子のエネルギー損失

荷電粒子が物質を通る時、入射粒子と物質を構成する原子との電磁相互作用により原子が電子と陽イオンに電離する。もしくは、荷電粒子の通過により原子がエネルギーを得て、励起状態になる場合もある。これらを繰り返すことによって、荷電粒子はエネルギーを失う。

電荷 Z 、速度 $v = \beta c$ の荷電粒子が、電荷 Z_e 、質量数 A 、原子番号 Z の物質 (密度 ρ) 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

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \frac{Z z^2}{A \beta^2} \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I}\right) - \beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \left(\frac{\text{MeV}}{\text{cm}}\right) \quad (15)$$

で与えられる。ここで、

N_A :アボガドロ定数

r_e :電子半径

m_e :電子質量

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

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

δ :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、

$$\frac{I}{Z} = (9.76 + 58.8 \cdot Z^{-1.19})(eV) \quad Z \geq 13 \quad (16)$$

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 (15) より求められる。今回、この値を参考文献 [5] から引用すると、

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{min} = 1.936 \left[\frac{MeV}{g/cm^2}\right] \quad (17)$$

である。また、プラスチックの密度 $\rho = 1.032g/cm^3$ である。よって、厚さ $t = 1cm$ 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

$$\Delta E = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{min} \times \rho \times t \quad (18)$$

$$= 1.936 \times 1.032 \times 1 \quad (19)$$

$$\sim 2MeV \quad (20)$$

である。さらに、使用した線源 ^{90}Sr から入射する β 線は $2.28MeV$ であるので、これは実験で使用した厚さ $t=0.5cm$ のプラスチックシンチレーターを貫通する。

4.3 Block Diagram

MPPC にプラスチックシンチレーターをグリースで粘着し、 ^{90}Sr からの β 線を測定した。図 24 にこの時の Block Diagram を示す。なお、この時 ATT は 10dB とした。

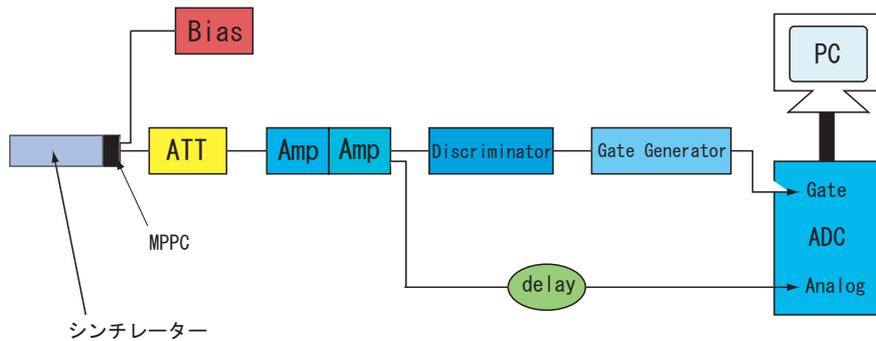


図 24 β 線を測定のための Block Diagram

今回の実験で使用したシンチレーターのサイズは縦 5mm、横 12mm、長さ 50mm である。(図 25)

プラスチックシンチレーターには集光効率を上げるためにアルミ箔で巻き、その上から遮光テープを巻きつけた。さらに遮光シートで覆い、この上に ^{90}Sr を乗せ、暗幕を被せて β 線を測定した。

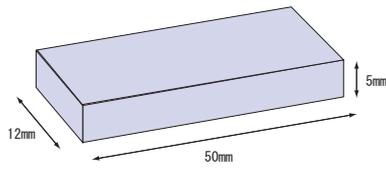


図 25 使用したシンチレーターのサイズ

4.4 結果・考察

図 26 に温度 16 度で、 β 線を当てた時の ADC 分布を示す。さらにバックグラウンドを測定したところ、図 27 のようになった。

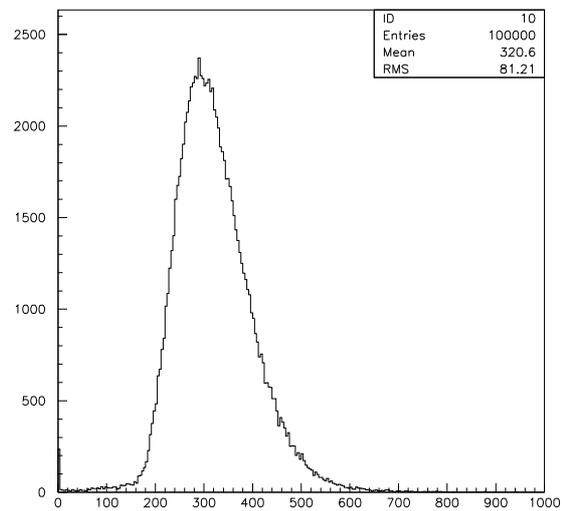


図 26 β 線を当てた時の ADC 分布

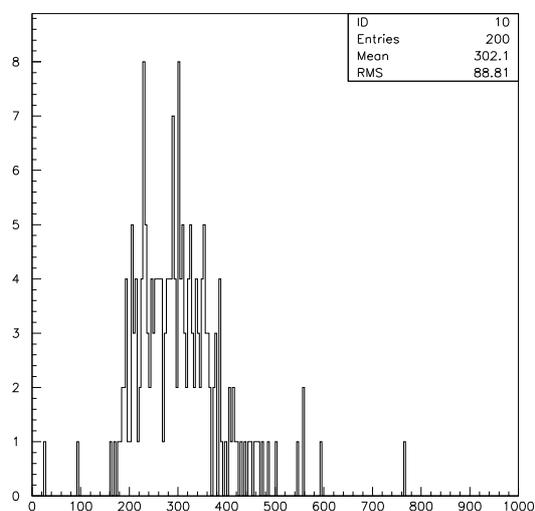


図 27 β 線を当てなかった時の ADC 分布

以下に測定条件を整理する。まず、MPPC のノイズについて述べる。MPPC 単体のノイズレートは表 8 のようになる。すなわち、Threshold を 10photon 以上にすれば、MPPC からのノイズは 100Hz 以下のオーダーまで減らすことができる。

表 8

Photon 数	Rate(kHz)
1	720 ~ 750
2	430 ~ 450
3	240 ~ 260
4	135 ~ 140
5	50 ~ 55
6	22 ~ 25
7	8 ~ 10
8	3 ~ 4
9	1.2 ~ 1.8
10	0.5 ~ 0.9

次に、MPPC にシンチレーターを粘着し、 ^{90}Sr を乗せたときと、乗せていないときのレートについて述べる。この測定結果は表 9 に示す。

表 9

Photon 数	^{90}Sr を乗せた時の rate(Hz)	^{90}Sr を乗せていない時の rate(Hz)
1	900 ~ 930	900 ~ 910
2	440 ~ 470	410 ~ 430
3	230 ~ 260	210 ~ 230
4	115 ~ 125	95 ~ 100
5	40 ~ 45	40 ~ 45
6	12 ~ 15	16 ~ 20
7	4 ~ 5	4 ~ 6
8	1.8 ~ 2.3	2.5 ~ 3
9	0.7 ~ 1	1.5 ~ 2
10	0.15 ~ 0.35	1.2 ~ 1.5

表 9 を見ると、threshold が 1 ~ 3photon では MPPC のノイズレートが高いためにこれが支配的であるが、8 ~ 10photon になると線源ありの場合と無しの場合でレートに 1 ~ 2kHz の差が出ている。このことから、 ^{90}Sr からの β 線が 1 ~ 2kHz で入射している信号を観測していると言える。また、 ^{90}Sr を乗せた時の出力をオシロスコープで見たところ、その波高は平均 35photons に対応していた。以上のことより、ノイズがほぼ気にならなくなる 15photons に Threshold をおくことにした。

また、LED を用いて温度依存性を調べた時、16 におけるピーク間隔が約 25count であった。ATT の 10dB を考慮すると、図 26 におけるピーク間隔は約 8count であると言える。よって、120count のところに Threshold がある。しかし、図 26 を見てみると、120 以下にも分布があり、Threshold で垂直に切れていない。これは、アフターパルスの影響によるものである可能性がある。

バックグラウンドは、同じ条件のもと線源を置かずに測定したものである。(図 27) この測定においては、200event とるのにおよそ 30 分かかった。これは単純に考えて、10 秒に 1event の割合である。この rate は宇宙線の rate の期待値と無矛盾であるが、真に宇宙線の入射による信号であると判断するには宇宙線トリガーのセットアップが必要である。

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 Logarithmic Gaussian でフィットし、ピーク間隔を求めることで増幅率を測定できる事がわかった。

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。

プラスチックシンチレーターと組み合わせると荷電粒子の通過により平均 35photons が得られるので、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。

測定した温度は、ほぼ一定に保っていたが、安定かつ確実な温度制御には恒温槽の使用が望ましい。また、LED は半導体素子であるため、MPPC 同様温度依存性があり、その影響を排するには、LED を MPPC とは別の一定の温度に保った場所に隔離し、そこから光ファイバーを利用して MPPC に光を導くなどのセットアップが望ましい。

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。ありがとうございました。

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。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] 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] 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
- [5] THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY : PHYSICAL REVIEW D PARTICLES AND FIELDS 1 JULY 2002 PART1
- [6] 岩崎麻友 : 2007 年度 修士学位論文 $B^0 \rightarrow J/\psi\gamma$ 稀崩壊過程の探索 2008.2
- [7] 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