

MPPC と
ストリップ型プラスチックシンチレータの研究

2009 年 3 月

05S2032B 戸塚俊介

信州大学理学部物理科学科
高エネルギー物理学研究室

目次

第1章 序説.....	3
1.1 ILC 実験.....	3
1.2 ILC 測定器 GLD.....	5
1.2.1 カロリメーター.....	7
1.3 研究目的.....	8
第2章 MPPC.....	9
2.1 光検出器.....	9
2.1.1 光電子増倍管.....	9
2.1.2 アバランシェフォトダイオード(APD).....	10
2.1.3 MPPC.....	11
2.2 MPPC の諸性質.....	13
2.2.1 Gain.....	13
2.2.2 Noise Rate.....	13
2.2.3 Cross Talk.....	14
2.2.4 光子検出効率.....	14
2.2.5 その他の性質.....	14
第3章 シンチレータ.....	16
3.1 プラスチックシンチレータ.....	16
3.2 有機シンチレータの発光機構.....	17
3.3 波長変換ファイバー.....	17
第4章 MPPC の性能評価.....	18
4.1 測定方法.....	18
4.1.1 Gain の温度依存.....	19
4.1.2 光子検出効率の温度依存.....	21
4.2 結果.....	23
4.2.1 Gain の温度依存.....	23
4.2.2 光子検出効率の温度依存.....	24
第5章 シンチレータの一様性測定.....	25
5.1 測定方法.....	25
5.2 結果.....	28
第6章 まとめ.....	29
6.1 考察.....	29
6.2 今後の課題.....	29
謝辞.....	30
参考文献.....	31

第1章 序説

ここでは次世代の加速器実験である ILC(International Linear Collider)実験について概観し、本研究の目的について述べる。

1.1 ILC 実験

加速器実験とは、高電場を用いて人工的に高エネルギー粒子を作りだし衝突させることにより、高エネルギー領域での粒子の振舞を調べる素粒子物理学における研究手段のひとつである。高電場を用いるため加速できる粒子は電荷を持つ安定な粒子に限られる。主な粒子としては電子と陽子、および陽電子と反陽子の4種類であり、衝突型として意味があるのは、陽子と反陽子（または陽子）、電子と陽電子、そして陽子と電子（または陽電子）の3種類である。また、加速器はその形から線形と円形とに分けられる。円形加速器は磁場で粒子を曲げ、何度も同じところを通過させて加速するためビームバンチ（ビーム粒子のかたまり）を何度も衝突させることができる。しかし、粒子を磁場で曲げることによりシンクロトロン放射によるエネルギー損失が起こるという欠点がある。電荷 e の荷電粒子がシンクロトロン放射によって単位時間あたりに失うエネルギー ΔE は

$$\Delta E \propto \frac{1}{r} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^4 \quad (1.1)$$

で表される¹。ここで E は粒子のエネルギー、 m は粒子の質量、 c は光速、 r は加速器の半径である。

上式からわかるように、 ΔE は m^4 に反比例するため質量の小さい電子ではエネルギー損失が大きくなる。そのため、電子をより高いエネルギーに加速するためにはシンクロトロン放射のない線形加速器が必要である。但し線形加速器にも欠点がある。

それは円形加速器と違い、加速電場を何度も利用できない事である。加速空洞を大量に作るか加速電場を強くする必要があるのでどちらも困難である。また、衝突しなかった粒子を再利用することが出来ないという事も大きな欠点である。それらの問題により、高いルミノシティを得ることが困難になる。

ルミノシティ L は、 n_1 個と n_2 個の粒子が頻度 f で衝突するとき

$$L = f \frac{n_1 n_2}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1.2)$$

で表される²。ここで σ_x は衝突点での水平方向ビームサイズ、 σ_y は垂直方向ビームサイズである。すなわち、ルミノシティを高くするためにはビーム粒子数を多くし、ビームサイズを小さくしなければならないのである。

1 参考文献 素粒子物理学 原康夫・稲見武夫・青木健一郎 著

2 参考文献 素粒子物理学入門 渡邊靖志 著

上記のように線形加速器は克服すべき課題も多いが、より高いエネルギー領域の達成を目指し、今後の電子陽電子衝突型加速器は線形加速器が主流になると考えられる。

ILC とは現在世界規模で開発が進められている電子陽電子衝突型の線形加速器の事である。概略図を図 1.1 に示す。その全長は約 40km にもなり、TeV エネルギー領域の素粒子実験を行うことを目的としている。未発見のヒッグス粒子の精密測定や超対称性 (SUSY) の発見などがこの実験計画において期待されている。

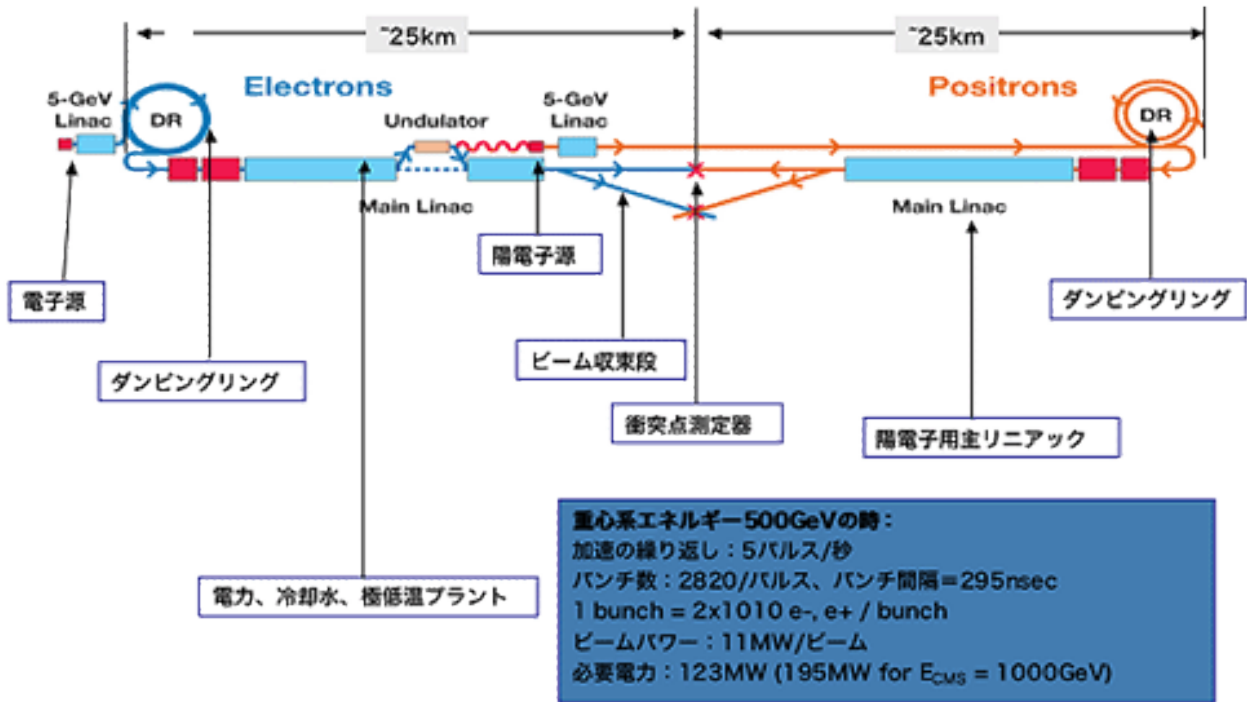


図 1.1 ILC 概略図

ILC (International Linear Collider) は電子陽電子衝突型線形加速器でその規模は全長約 40km にもおよぶ。TeV 領域のエネルギーに到達することで今までにない新しい物理現象を探索することを目的としている

1.2 ILC 測定器 GLD

GLD (Global Large Detector) とは ILC において用いられる測定器案のひとつである。現在はヨーロッパのグループと共に、ILD (International Large Detector) として研究が進められているが、ここでは GLD について説明する。電子、陽電子が正面衝突して反応が起こると、多種多様な粒子が生成され様々な方向へ飛び散る。現在の技術では、それらの粒子の種類、生成位置、飛跡、エネルギーなど多くの情報を一つの検出器で測定することはできない。そのため複数の検出器を組み合わせることによってそれらの情報を測定する。

測定器は内部から順に次のような構造になっている。

バーテックス検出器

電子陽電子衝突点の近くに設置され、衝突直後に発生した粒子の崩壊点を検出するための検出器である。崩壊点の位置を精度よく測定することにより崩壊過程を再構成し、崩壊前の粒子の性質を調べることが目的である。

飛跡検出器

荷電粒子の飛跡を測定する検出器である。飛跡の曲率と磁場の強さから粒子の運動量を知ることが出来る。現在は MPGD (Micro Pattern Gas Detector) をセンサーとして用いた TPC (Time Projection Chamber) が候補として上がっており研究が進められている。

カロリメーター

入射粒子のエネルギーを測定する。飛跡検出器と合わせることで粒子の種類を識別できる。ジェットを含むイベントが主なので入射した粒子全体のエネルギーだけでなく個々の粒子のエネルギーに分解できる優れたエネルギー分解能が要求される。また、空間分解能も優れていることが望ましい。本論文で述べる MPPC とストリップ型プラスチックシンチレータが用いられる予定の検出器である。詳しくは次節で述べる。

ソレノイドコイル

荷電粒子識別の為に高磁場を掛けるための装置である。コイル内はビーム軸に平行な方向に 3T もの高磁場になる。バーテックス検出器、飛跡検出器、カロリメーターはコイル内にあるので高磁場が掛かることになる。

ミューオン検出器

ミューオンは質量が重いレプトンであり比較的寿命が長い。そのため電磁シャワーを起こさず透過能力も高い為カロリメーターの外側まで通り抜ける。その性質を考慮してミューオン検出器は一番外側に設置される。ミューオンは新粒子を探索する上でもっとも他の粒子との区別しやすい重要な信号である。

各検出器はまだ研究開発が続けられている状態である。

GLD測定器

ILCでのイベントの測定には、従来の測定器の性能を大きく上回るものが求められています。そのモデルのひとつとして、GLD測定器が世界中の研究者と協力して検討されています。

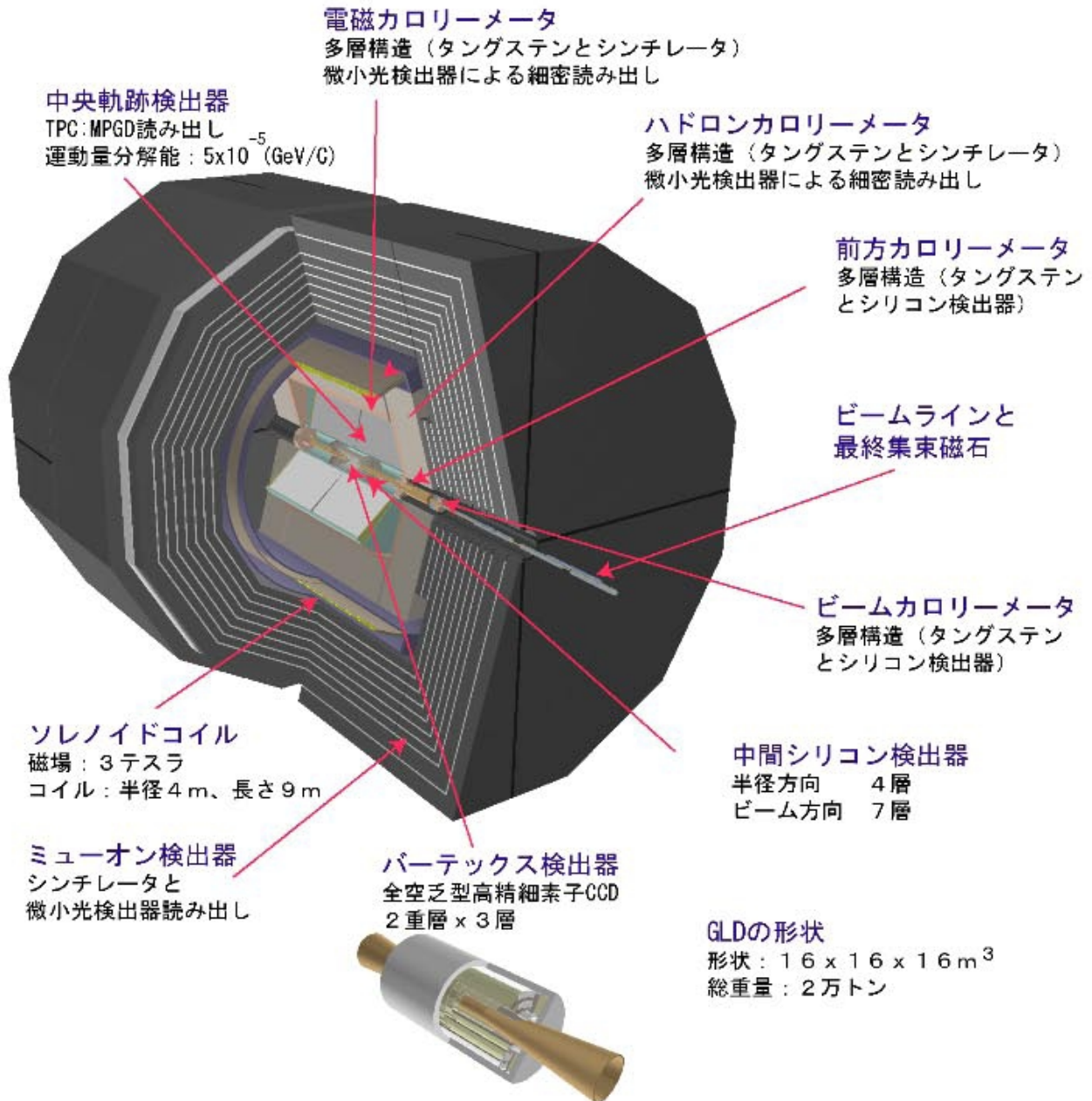


図 1.2 GLD

内側から順にパーテックス検出器、飛跡検出器、カロリメータ、ソレノイドコイル、ミュオン検出器となっている。本研究では主にカロリメータに関する研究を行った。
GLD 以外に SiD、LDC、4th 等の測定器も世界的に検討されている。

1.2.1 カロリメーター

カロリメーターとは入射した粒子のエネルギー測定を行う測定器である。入射粒子のエネルギーをシンチレータ等で光に変換してその光量を測定したり、液体アルゴン等で直接電気信号に変換して読み出す事でエネルギー測定を行う。

カロリメーターには電子や光子のエネルギーを測定する電磁カロリメーターとハドロンエネルギーを測定するハドロンカロリメーターがある。

電磁カロリメーター

高エネルギーの電子がカロリメーターに入射すると制動放射を起こし光子を放出しエネルギーを失う。また、光子は物質中で電磁場との相互作用によって電子、陽電子を対生成する。実際の GLD カロリメーターの構造としては、粒子のエネルギーを効率よく落とすため十分に大きな原子番号を持った物質で構成された吸収層と信号を測定するための検出層が交互に組み合わさったサンドイッチ構造をしている。そのため、ある検出層で静止しない電子や光子は次の吸収層に入射し制動放射や対生成を起こす。これを繰り返すことにより最初の粒子よりエネルギーの小さい多数の電子、陽電子と光子が生成される。これを電磁カスケードシャワーと呼ぶ。電磁カスケードシャワーによって生成された全粒子のエネルギーを測定する装置を電磁カロリメーターと言う。

ハドロンカロリメーター

高エネルギーのハドロンが物質中に入射すると弾性もしくは非弾性散乱により中間子やバリオンなどの二次粒子が生成される。二次粒子のうち中性 π 中間子は γ 線に崩壊して電磁シャワーを起こす。バリオンはさらに衝突して三次粒子を生成する。このように二次粒子によってバリオンが増幅されハドロンシャワーが形成される。ハドロンカロリメーターはそのハドロンシャワーのエネルギーを検出する。電磁シャワーとは異なりハドロンシャワーは離散的に発生するのでシャワーの起源を特定するのが困難である。

ハドロンは電子や光子と比べて反応長が長く多くの物質質量が必要とされるため内側に電磁カロリメーターを、外側にハドロンカロリメーターが設置される。

ILC-GLD カロリメーターでは電磁カロリメーターの吸収層としてタングステンを、ハドロンカロリメーターの吸収層として鉛を使用する予定である。また、検出層にはストリップ型のプラスチックシンチレータを用いる事が考えられている。カロリメーターの構想図を図 1.3 に示す。

前述の通り、個々の粒子のエネルギーを精度よく測定するためにはカロリメーターの分割設計が必要になる。しかしそれは読み出しの多チャンネル化によるコストの増加という問題を生じる。また、カロリメーターが強磁場下にあるという条件からも読み出しに使用できるデバイスは限られてくる。

このような要求を満たしているデバイスが、本論文で取り上げる MPPC である。

1.3 研究目的

ILC-GLD カロリメーターで使用される予定の新型光検出 MPPC はまだ発展途上のデバイスであり、各大学や研究所と浜松ホトニクス社が協力してより良いデバイスとするために研究を続けている。新型の MPPC が出来る度に、性能評価を行う必要がある。

また、実際に使用されるシンチレータの種類やサイズなどを決定するためにシンチレータの性能評価を行うことも重要である。現在の構想では WLS ファイバーを用いることが考えられているが、シンチレータの発光量が一様であり十分に大きいならばファイバーを使う必要がなくなり作業の効率化につながる。

本研究では MPPC の性能評価および MPPC を用いたストリップ型プラスチックシンチレータの性能評価を通して GLD カロリメーターの性能向上に役立てることを目的とする。

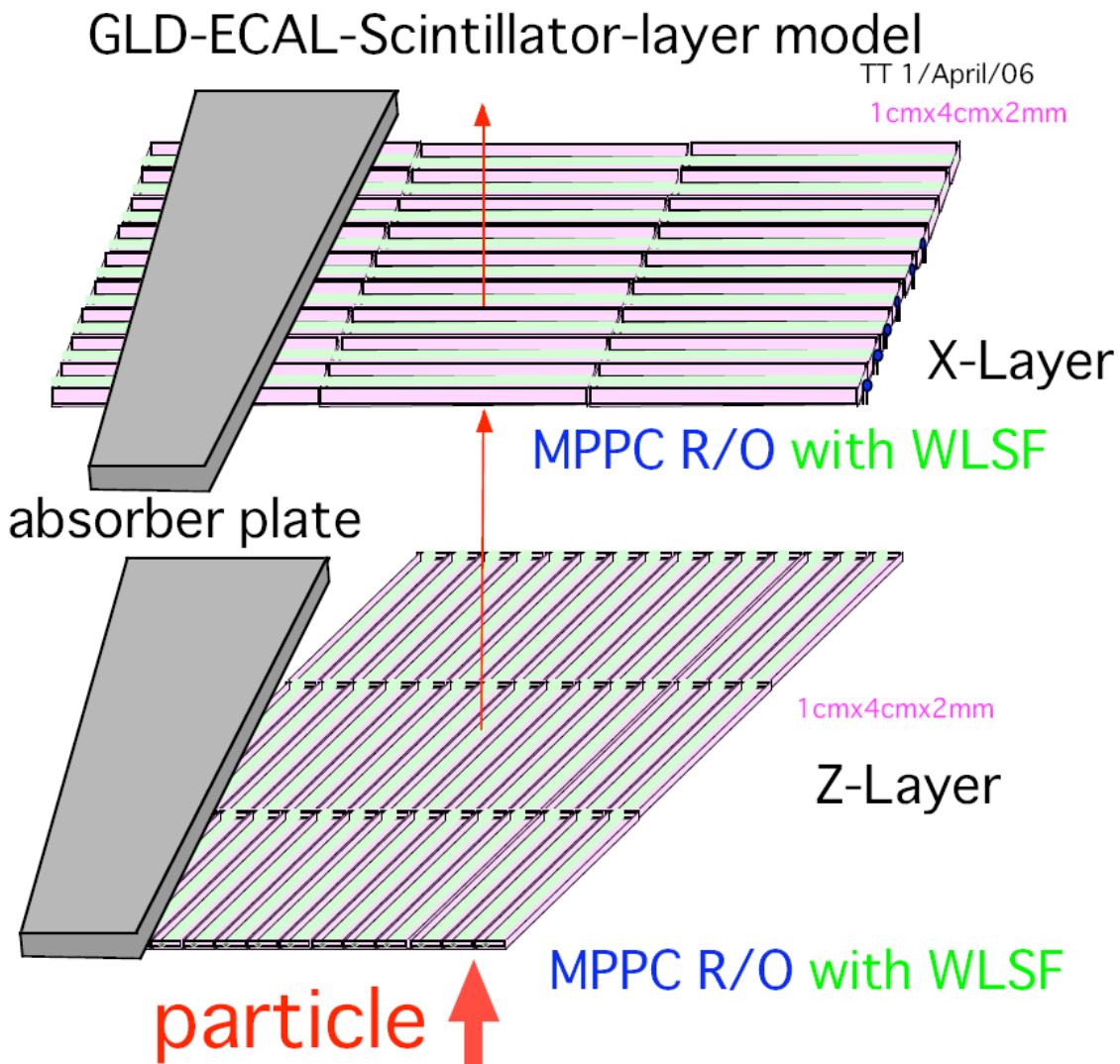


図 1.3 カロリメーターの構想図
WLS ファイバーを用いる場合の構想図。本研究ではシンチレータからの直接読み出しを行い性能を評価する。

第 2 章 MPPC

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) は、PPD (Pixelated Photon Detector) と呼ばれるデバイス的一种で、複数のガイガーモード APD (Avalanche Photo Diode) のピクセルから成る、新型の光検出器である。現在、信州大学などの様々な大学や研究所と浜松ホトニクス社が実用化に向けた開発、研究を進めている。ILD カロリメーターでの使用が提案されている。

2.1 光検出器

光検出器は素粒子実験には欠かせないデバイスである。以下に従来の代表的な光検出器、および MPPC についての概要を述べる。

2.1.1 光電子増倍管

光電子増倍管 (Photon Multiplier Tube 以下 PMT) は、高感度、高ゲイン、高時間分解能という優れた性能を持つ光検出器で、真空管内で電子を増幅するためノイズが小さく微弱な光を測定するのに最適である。図 2.1 に PMT の簡単な構造を示す³。

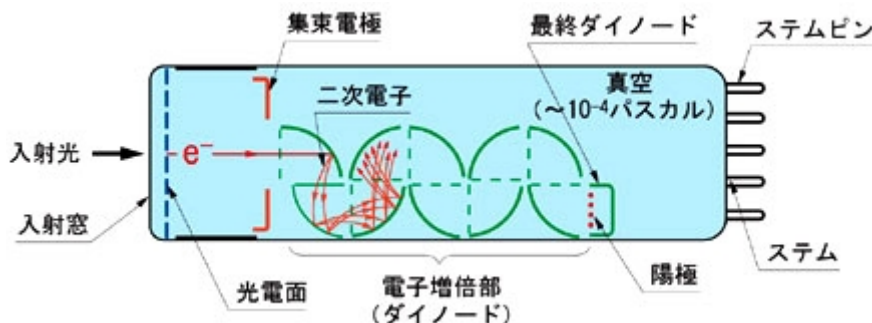


図 2.1 PMT の構造

光電面に光が当たると、光電面から光電子が放出される。その光電子は集束電極により電子増倍部に導かれダイノードに衝突し二次電子の放出を起こす。その電子は次段の電子増倍部で二次電子の放出を起こし、それを繰り返すことによって最終的に $10^6 \sim 10^7$ 倍に増幅され、陽極にて読み出される。大きさは直径 10mm 程度の物から 50cm の物まで広いバリエーションがあるが、多チャンネルの読み出しに使用するにはサイズが大きい。また磁場の影響を受けやすく GLD カロリメーターでの使用には適さない。

3 参考文献 浜松ホトニクス社 資料 <http://jp.hamamatsu.com/>

2.1.2 アバランシェフォトダイオード(APD)

p型半導体とn型半導体を接合させたダイオードを光検出器として用いたものをフォトダイオードという。アバランシェフォトダイオード（以下APD）とはフォトダイオードにある一定以上の逆バイアス電圧をかけることによりアバランシェ増幅を引き起こし、高い増幅率を持つ光検出器としたものである。

pn接合半導体は逆バイアス電圧をかけても殆ど電流が流れないが、ある電圧を越えると突然電流が流れるようになる。これをブレイクダウンと言ひ、ブレイクダウンが起こる電圧の事をブレイクダウン電圧と呼ぶ。

ブレイクダウンが起こる理由は二つある。一つはツェナー降伏、もう一つは電子雪崩降伏である。図2.2にそれぞれの模式図を示す。ツェナー降伏とは逆電圧を高くするとp型半導体の価電子がトンネル効果で空乏層を通り抜けてn型半導体の伝導帯に移り電流が流れる事である。空乏層が比較的厚いダイオードでは電圧を高くしてもわずかのトンネル電流しか流れず、なかなかツェナー降伏は起こらない。しかし、少数のキャリアが空乏層を通り抜ける時、大きな電位差で加速され高エネルギーを持つようになり、それとの衝突によって価電子帯の電子が伝導帯に励起され、伝導電子と正孔を作る。これらが加速されるとまた価電子が励起され、ねずみ算的にキャリアが増加する。これをアバランシェ増幅と呼び、これにより大きな電流が流れることを電子雪崩降伏という。一般に不純物濃度が高いpn接合半導体では低い電圧でツェナー降伏が起こるが、不純物濃度が低いときは電子雪崩降伏の方が著しくなる。それは、不純物濃度が高いほど空乏層の厚さが薄くなるからである。

APDにブレイクダウン電圧以上の逆バイアス電圧をかけて動作させると、同時に入射するフォトン数に関係なく一定の信号を出す。このようなモードをガイガーモードという。

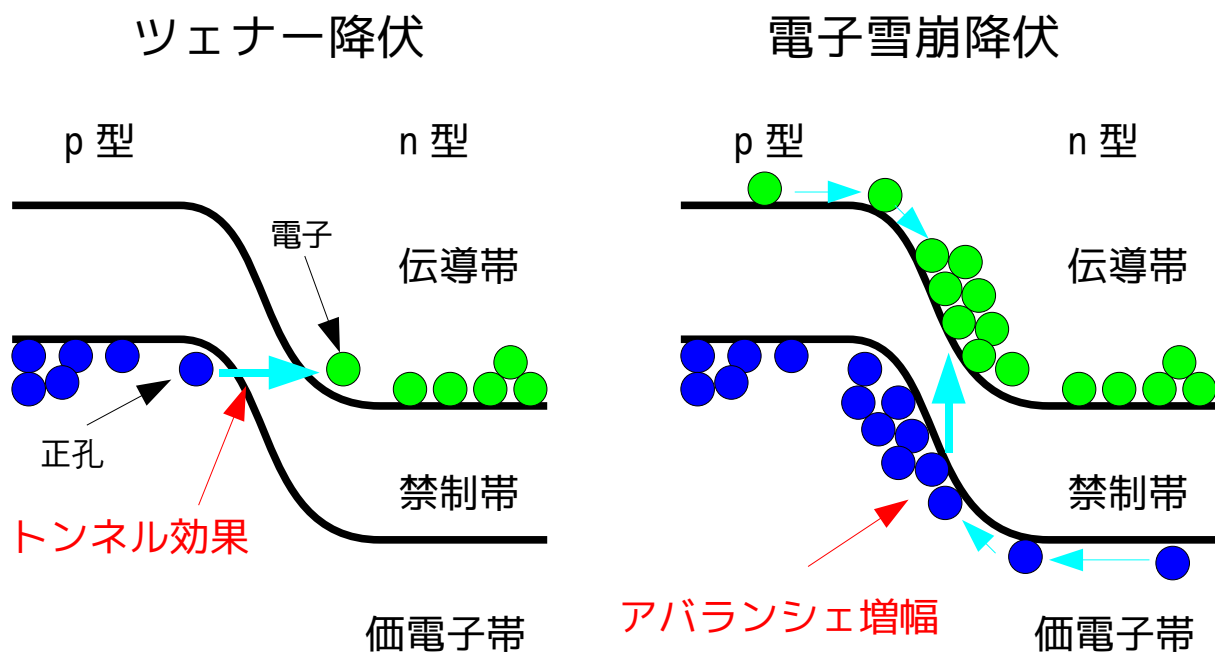


図2.2 ツェナー降伏と電子雪崩降伏

2.1.3 MPPC

MPPCは複数のガイガーモードAPDのピクセルから成る光検出器で、PMTと比べ非常に小さく、磁場の影響を受け難いことからGLDカロリメーターで使用される予定である。また、優れたフォトンカウンティング能力、常温、低バイアス電圧で動作、高い増倍率など様々な特徴を持ち、非常に将来性の高い光検出器となっている。MPPCの写真を図2.3に示す。

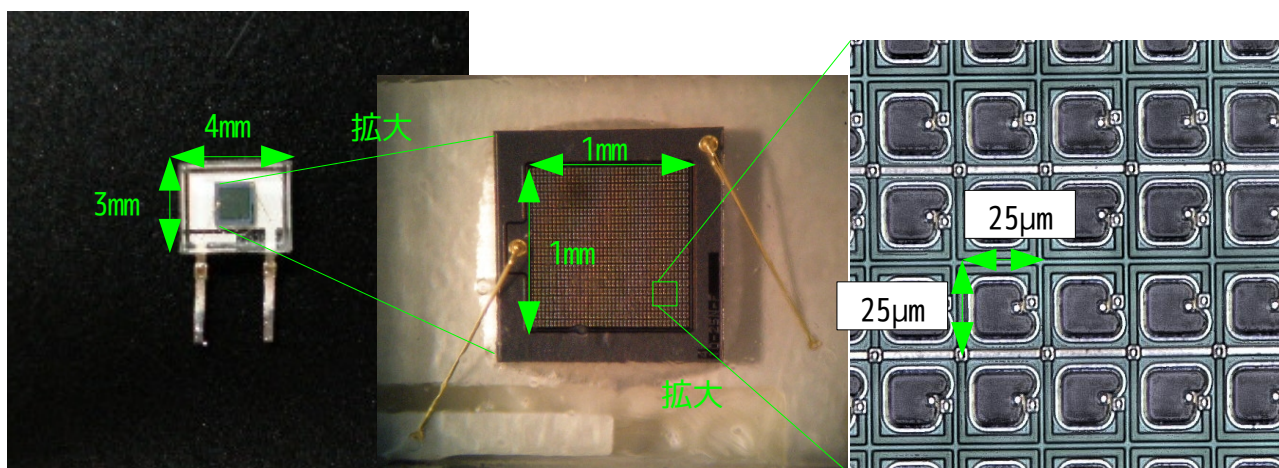
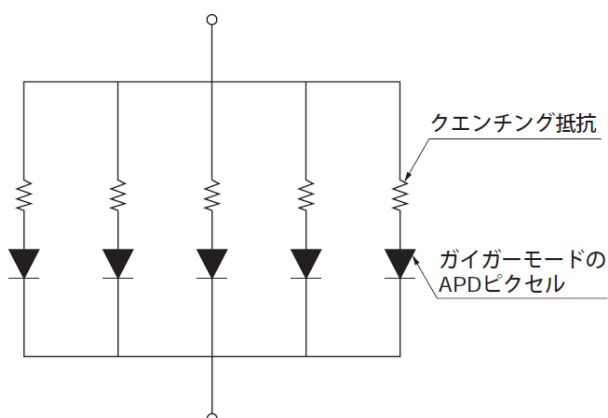


図 2.3 MPPC (左：全体図 中央：受光面 右：1ピクセル)

MPPCの等価回路を図2.4に示す⁴。ガイガーモードではAPDに光子が入射すると、その数によらず常に一定の大きさの信号を出す。それによってクエンチング抵抗に電流が流れ逆バイアス電圧はブレイクダウン電圧まで電圧降下する。その後、再充電によって元の逆バイアス電圧に戻り、ガイガーモードとして再び動作する。再充電の時定数は4nsである。

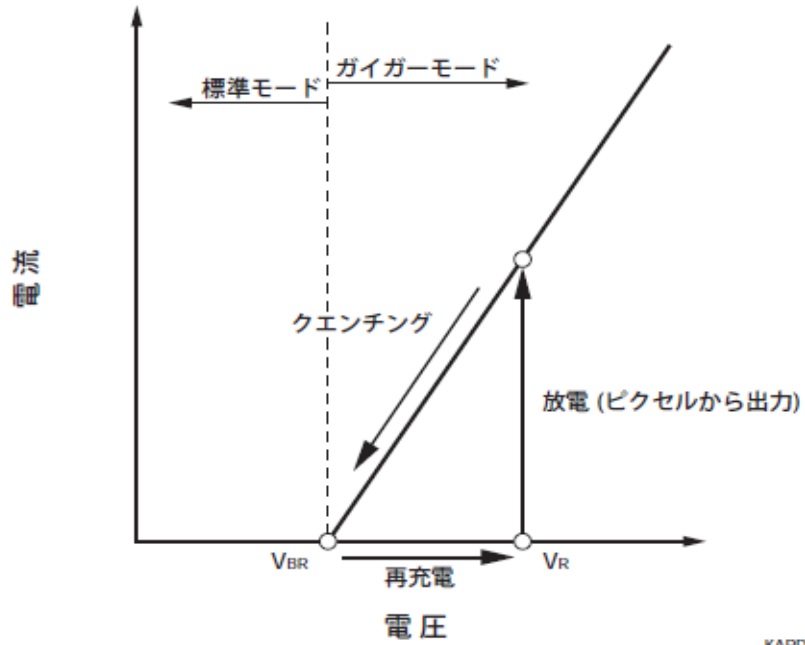


KAPDC0029JA

図 2.4 MPPC の等価回路

4 参考文献 浜松ホトニクス社 資料

<http://jp.hamamatsu.com/>



KAPDB0129JA

図 2.5 ガイガーモード APD の動作⁵

バイアス電圧がブレイクダウン電圧 (V_{BR}) 以下のモードを標準モードと呼び、ガイガーモードと区別している。

5 参考文献 浜松ホトニクス社 資料

<http://jp.hamamatsu.com/>

2.2 MPPC の諸性質

MPPC の性能に関する様々な性質について述べる。
本研究の主な測定項目は

- Gain
- 光子検出効率

の二点である。

2.2.1 Gain

Gain とはアバランシェ増幅による信号の増倍率の事である。Gain を G 、出力信号の電荷量を Q とおくと、

$$Q = eG \quad (2.1)$$

で表せる。 e は素電荷 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ である。また、ピクセルの電気容量 C 、逆バイアス電圧 V_{bias} 、ブレイクダウン電圧 V_0 とおくと、ガイガーモードにおいて 1 ピクセルで増幅される電荷は、

$$Q = C(V_{\text{bias}} - V_0) \quad (2.2)$$

で表せるので Gain は、

$$G = \frac{C}{e}(V_{\text{bias}} - V_0) \quad (2.3)$$

となる。

2.2.2 Noise Rate

MPPC は固体素子であるため、熱電子によるノイズが発生する。空乏層内の電子が熱的に励起され、アバランシェ増幅を起こし信号となってしまう。そのようなノイズをダークノイズといい、一秒間のダークノイズの数を Noise Rate と呼ぶ。MPPC の特性を決める重要なパラメーターの一つであり、GLD において実際の使用にむけて 1MHz 以下を目標としている。⁶

6 参考文献 前田高志 『リニアコライダー実験用カロリメーターのための光検出器 MPPC の研究開発』
筑波大学 数理物質科学研究科 修士学位論文 (2007 年)

2.2.3 Cross Talk

APDピクセルにおいて、アバランシェ増幅の過程で入射した光子以外の光子が発生することがある。あるピクセルでアバランシェ増幅によって発生した光子が隣接したピクセルに入射し、空乏層内で電子と正孔対が生成されるとアバランシェ増幅が起こり信号を出してしまう。それによって本来出力される信号より大きな値を出してしまうことになる。このような現象を Cross Talk と呼ぶ。Noise Rate と同様に重要なパラメーターの一つである。

2.2.4 光子検出効率

光子検出効率 (Photon Detection Efficiency : PDE) とは、単一光子の入射に対してそれを検出する確率を指す。光子の入射時に発生した電子全てが検出できるレベルのパルスになるわけではない。光子検出効率は次の式で表される。

$$\text{光子検出効率} = \text{量子効率} \times \text{アバランシェ効率} \times \text{開口率} \quad (2.4)$$

量子効率：光子の入射による正孔と電子の対生成が起こる確率

アバランシェ効率：アバランシェ増幅が起こる確率

開口率：ピクセルサイズに対する受光面のサイズの割合

バイアス電圧を高くするほど光子検出効率は高くなる。

2.2.5 その他の性質

ダイナミックレンジ

全ピクセル数に対して入射光子数が多くなると、一つのピクセルに二つ以上の光子が入射することがある。各ピクセルは入射光子数によらず出力信号の大きさは一定なので、光子検出の線形性が低下することになる。応答があるピクセル数は次式で表される⁷。

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-N_{\text{photon}} \times PDE}{N_{\text{total}}} \right) \right\} \quad (2.5)$$

ここで、 N_{fired} ：信号を出したピクセル数、 N_{total} ：全ピクセル数、 N_{photon} ：入射光子数である。

7 参考文献 浜松ホトニクス社 資料 <http://jp.hamamatsu.com/>

アフターパルス

アフターパルスとは、増幅によって発生した電子が格子欠陥にトラップされ、それが開放される際に信号以外のパルスを発生させてしまう現象である。アフターパルスは数十 ns 程度の長い時定数を持つため、始めのパルスからやや遅れて観測される。温度が低いほど電子がトラップされる確率高くなり、アフターパルスは増加する。アフターパルスも検出誤差の要因になる。

時間分解能

MPPC の信号出力には従来の光検出器と同様に時間の揺らぎが存在する。二つの光子がある時間差を持って異なるピクセルに入射した場合、この揺らぎ以下の時間差は見分けることが出来ない。見分けることの出来る最小の時間差を時間分解能と呼ぶ。本研究で用いた 1600 ピクセル素子の時間分解能は 250ps である⁸。

8 参考文献 浜松ホトニクス社 資料 <http://jp.hamamatsu.com/>

第3章 シンチレータ

シンチレータとは、粒子の通過に伴って蛍光を生じる物質全般のことを指す。無機シンチレータと有機シンチレータに大別される。本研究で用いるプラスチックシンチレータは有機シンチレータの一種である。

3.1 プラスチックシンチレータ

有機シンチレータを溶媒に溶かした後、これを高分子化して固溶体を作ることが出来る。一般的な例としては、スチレン単量体から成る溶媒に適当な有機シンチレータを溶解する場合である。スチレンはその後高分子化して固体プラスチックになる。その他のプラスチックマトリクス材料としてポリビニルトルエンとポリメチルメタアクリレートがある。プラスチックは製作と加工が容易であり有機シンチレータとしては非常に有用なものである。また材料が安価なので、大体積の固体シンチレータが必要な場合プラスチックシンチレータを用いる以外の選択肢が無い場合も多い。本研究で用いるプラスチックシンチレータはポリスチレンベースの物である。

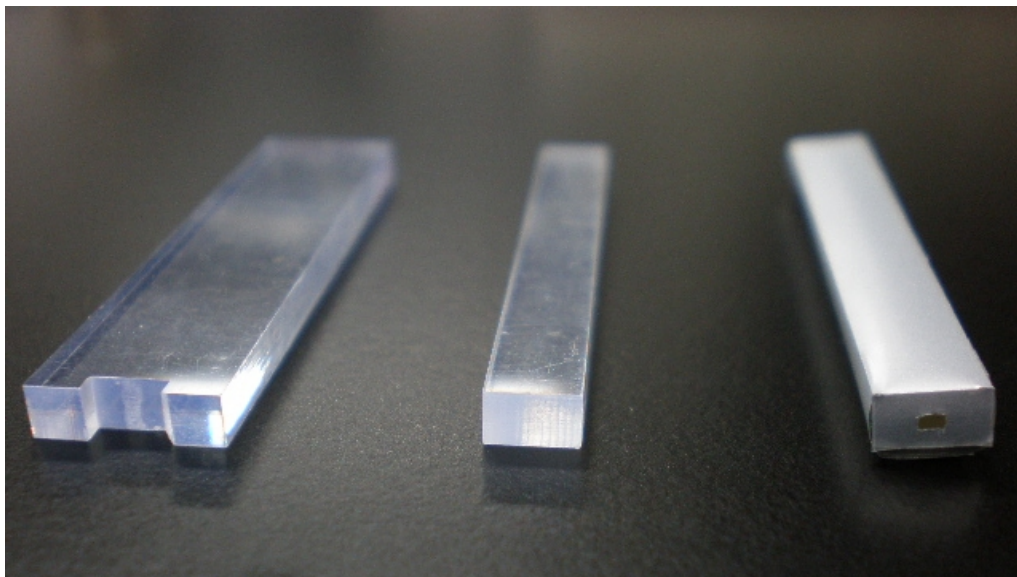


図 3.1 シンチレータ

左：幅 10mm、長さ 45mm、厚さ 3mm 中央に 1.3mm の溝あり

中央：幅 5mm、長さ 43.7mm、厚さ 3mm

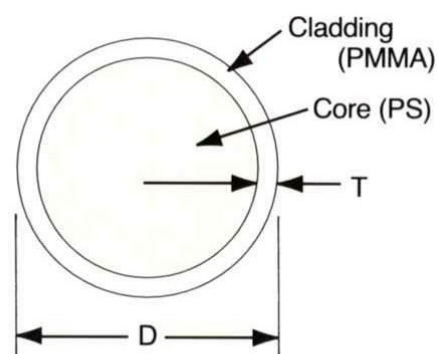
右：中央と同じシンチレータに反射材を巻いた物

3.2 有機シンチレータの発光機構

有機シンチレータの大半は π 電子構造という有機分子に基本を置いている。室温ではほとんどの電子は基底状態 A にある。シンチレータを荷電粒子が通過すると運動エネルギーを吸収し π 電子が励起され、あるエネルギー準位 B に遷移する。より高いエネルギー準位に遷移する場合もあるが、放射を伴わない内部転換により ps 程度の高速で B へ遷移する。主要なシンチレーション光は状態 B から基底状態 A の状態間遷移によって発生する。

3.3 波長変換ファイバー

波長変換ファイバー (Wave Length Shifting fiber : WLS ファイバー) とは外部から受けた短波長の光を吸収し、長波長の光に変換するファイバーである。中心部のコアとその周囲を覆うクラッドから成るプラスチック製のファイバーで、通常のコアを高屈折率、クラッドを低屈折率にすることで両者の境界面内側に全反射を起こさせる (図 3.2) ⁹。コアに波長変換剤が含まれており特定の波長域の光を吸収し、長波長側にシフトした光を放出する。コア内で生じた光は、全反射を繰り返しファイバーの端へと進行する。GLD カロリメーターでの使用が計画されている。



Cladding Thickness : $T=3\%$ of D

Numerical Aperture : $NA=0.55$

Trapping Efficiency : 3.1%

図 3.2 WLS ファイバー断面

第 4 章 MPPC の性能評価

半導体素子である MPPC は少なからず温度の影響を受ける。本研究では Gain と光子検出効率の温度依存について測定する。

4.1 測定方法

今回の測定に用いた MPPC は浜松ホトニクス社の 1600 ピクセルの MPPC である。また、測定の際に温度を一定に保つために恒温槽を用いた。使用した恒温槽を図 4.1 に示す。

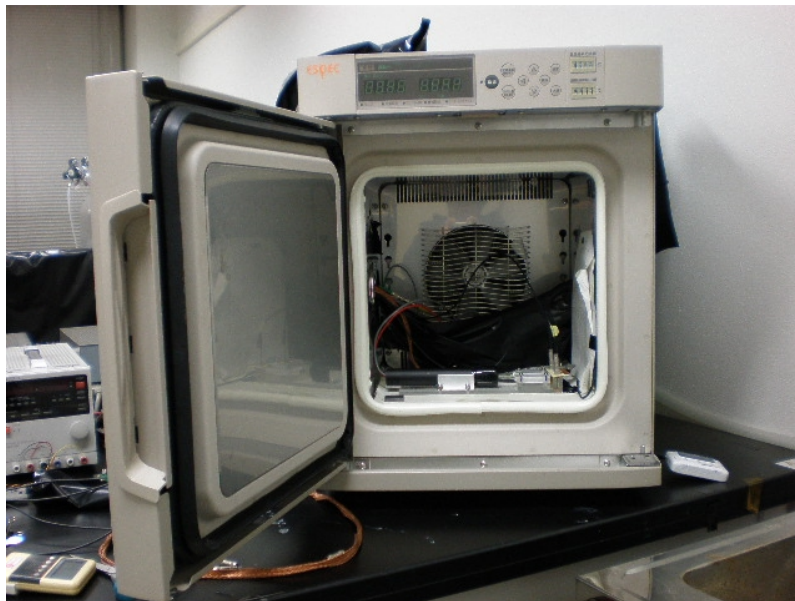


図 4.1 恒温槽

MPPC の読み出し回路の回路図と写真を図 4.2 に示す。

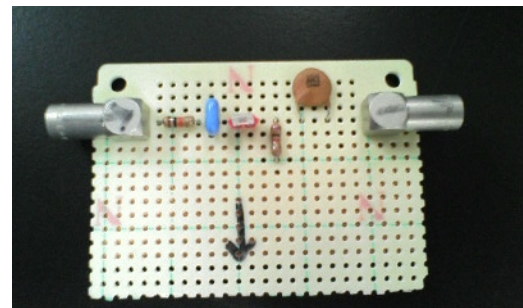
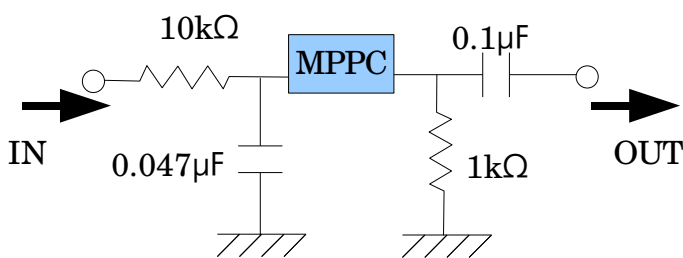


図 4.2 読み出し回路 (左：回路図 右：写真)

4.1.1 Gain の温度依存

温度を変化させて Gain の値を測定し、その変化を調べる。

Gain 測定には CAMAC の ADC (Analog to Digital Converter) を用いた。ADC を用いることで、測定したいアナログ信号を Gate 信号が入っている間積分し、信号の電荷を数量的に扱うことが出来る。今回用いた ADC は 1 カウント当たりの 0.25pC の電荷に相当する。また、ADC での測定ではペDESTAL に注意しなければならない。ADC では常に信号にオフセットがあり、得られる値はそのオフセット分大きな値になる。そのオフセットの積分値をペDESTAL という。実際に得られた ADC 分布を図 4.4 に示す。

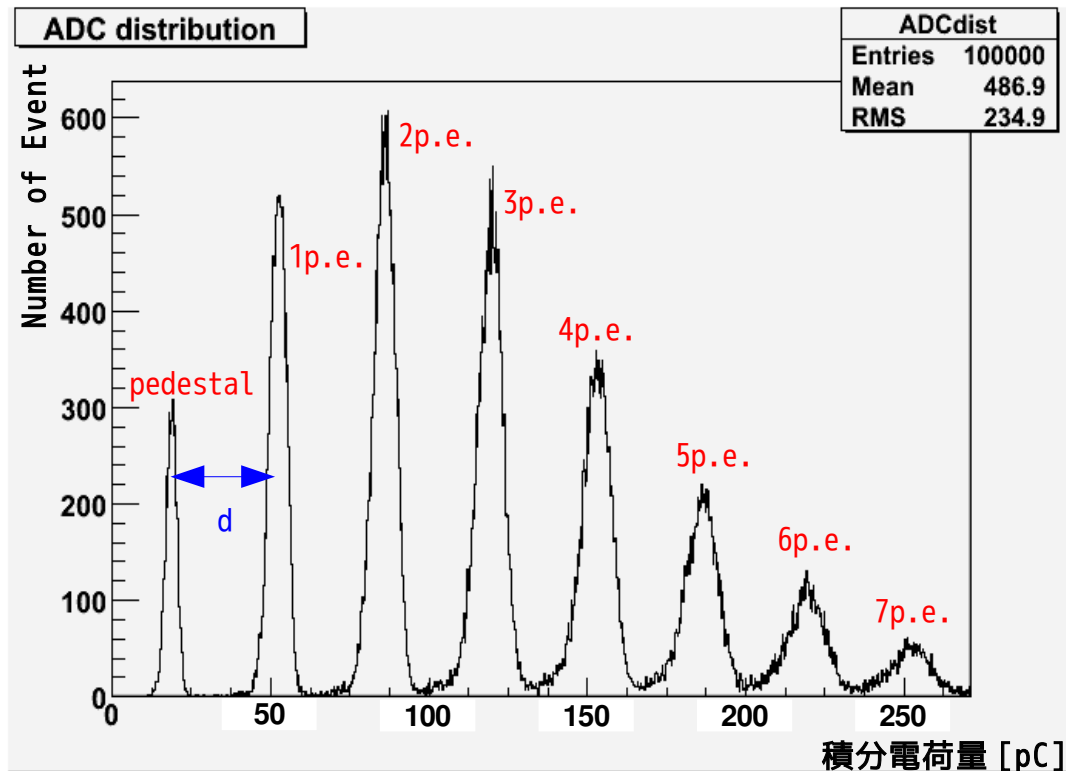


図 4.3 LED を用いた ADC 分布

具体的な Gain の求め方は、まずペDESTAL と 1photo electron (以下 1p.e.) の山をガウス分布で Fitting してピークの位置の差 d を求めると、

$$G = \frac{d \times r}{A \times e} \tag{4.1}$$

と表せる。ここで r : ADC の分解能 (0.25pC/ADC count)、 A : アンプの増幅率 (594.6)、 e : 素電荷 ($1.6 \times 10^{-19}C$) である。

実験のセットアップ図を図 4.5 に示す。

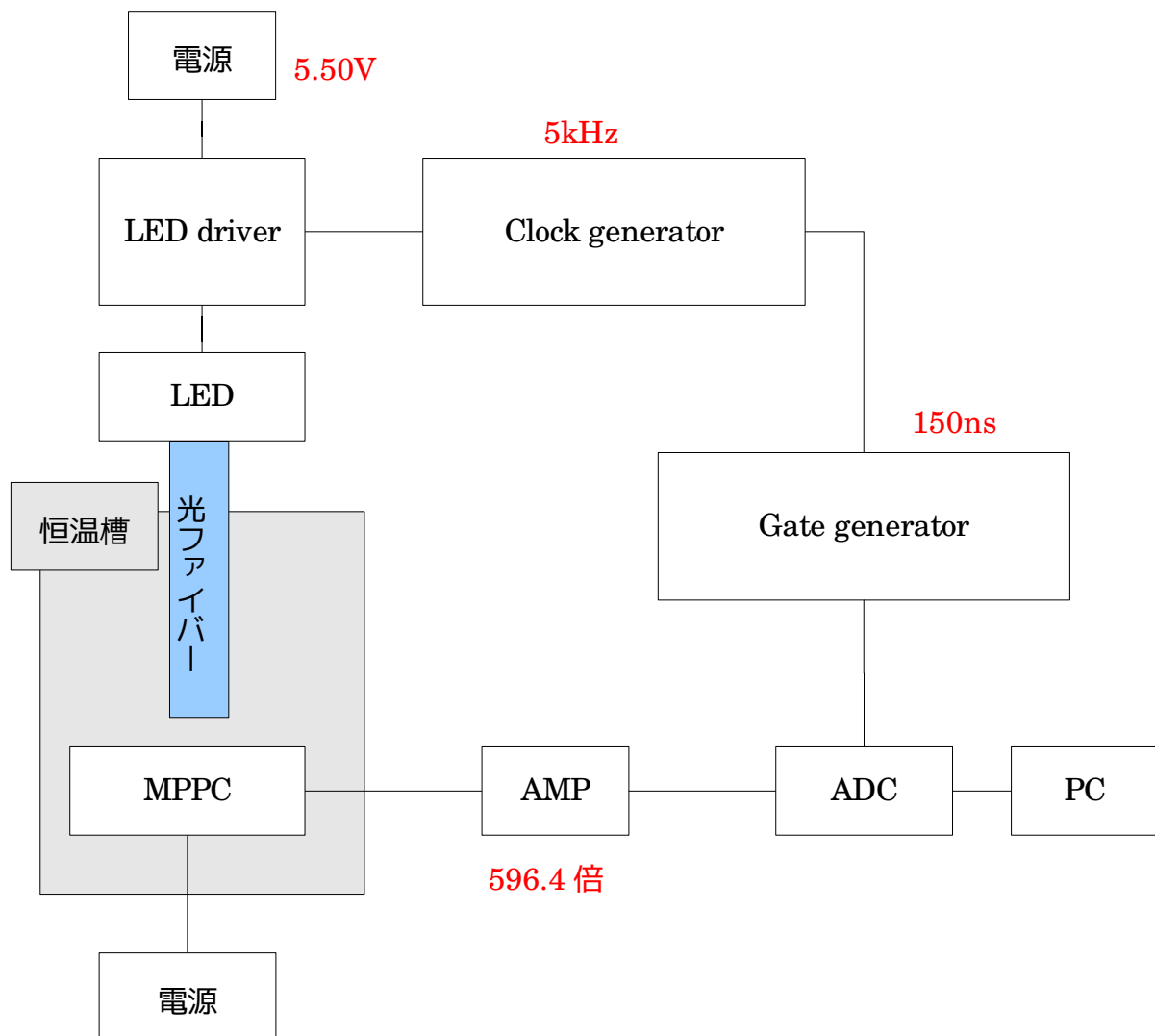


図 4.5 測定のセットアップ 1

Clock generator を用いて LED を光らせるタイミングとゲートを開くタイミングを合わせた。温度変化による光量の変化を防ぐために LED を恒温槽の外に置き、光ファイバーで光を恒温槽の中に導いた。

4.1.2 光子検出効率の温度依存

測定した ADC 分布から光子検出効率の温度依存を調べる。
光子の入射は離散的な事象なのでポアソン分布に従い、次の式で表せる。

$$P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (4.2)$$

ここで λ は入射する平均光子数、 k は実際に入射する光子数である。

もし光子検出効率が 100% ならばこの分布は正しいが、実際は 100% ではない。ここでは光子検出効率の値を f と置く。 k 個の光子が検出される確率は、実際には $k+i$ 個の光子が入射したが i 個の光子が検出されなかった事象を考慮する必要がある。 i 個の光子が検出されずに k 個の光子だけ検出される確率 P_i は次式で表される

$$P_i(k) = \frac{\lambda^{k+i} e^{-\lambda}}{(k+i)!} \times \frac{(k+i)!}{i!(k+i-i)!} (1-f)^i f^{k+i-i} \quad (4.3)$$

\times 以降の項は、入射した光子 $k+i$ 個の内 i 個の光子がそれぞれ $(1-f)$ の確率で検出されない場合の二項分布である。(4.3) 式は $i=0$ の時、すなわち全ての光子が検出される場合も成り立つ。

以上より、光子検出効率が f の場合に k 個の光子が検出される確率は次式で表される。

$$\begin{aligned} P(k) &= \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\lambda^{k+i} e^{-\lambda}}{(k+i)!} \times \frac{(k+i)!}{i!(k+i-i)!} (1-f)^i f^{k+i-i} \\ &= \frac{(f\lambda)^k}{k!} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\lambda^i e^{-\lambda}}{i!} (1-f)^i \\ &= \frac{(f\lambda)^k e^{-f\lambda}}{k!} \end{aligned} \quad (4.4)$$

(4.4) 式は入射する平均光子量 $f\lambda$ のポアソン分布である。ADC 分布はこのポアソン分布に依存する。そのため、ADC 分布から $f\lambda$ を求めることが出来る。

まずペDESTALと 1p.e.のCOUNT数の合計をそれぞれ求める。実際は、Fittingによつて求めたガウス分布を積分することで合計を求めた。つぎに両者の比、

$$\frac{\text{1p.e.のCOUNT数}}{\text{ペDESTALのCOUNT数}} \quad (4.5)$$

を求める。これは、ポアソン分布における $f\lambda$ に相当する。

λ は入射光量に依存するが、光源である LED は恒温槽の外にあるため測定中の入射光量は一定であり λ も一定である。そのため $f\lambda$ の温度依存を調べれば f の温度依存を知ることが出来る。

4.2 結果

4.2.1 Gain の温度依存

測定の結果を図 4.6 に示す。

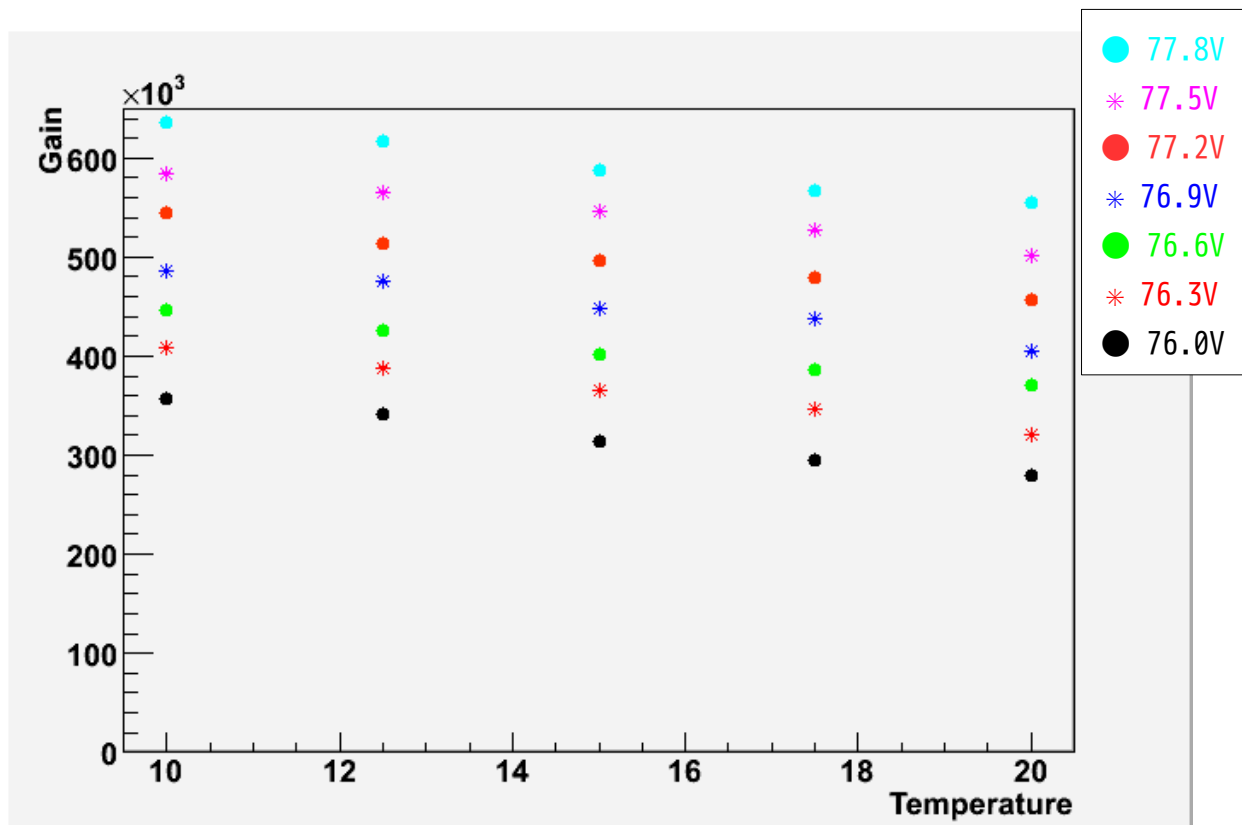


図 4.6 Gain の温度依存

Gain は温度の上昇に伴い減少し、線形の関係にあることが分かる。その減少量はバイアス電圧が 76.0V の場合、10°C のときの Gain を 100% とすると約 2.24%/K である。

4.2.2 光子検出効率の温度依存

測定の結果を図 4.7 に示す。

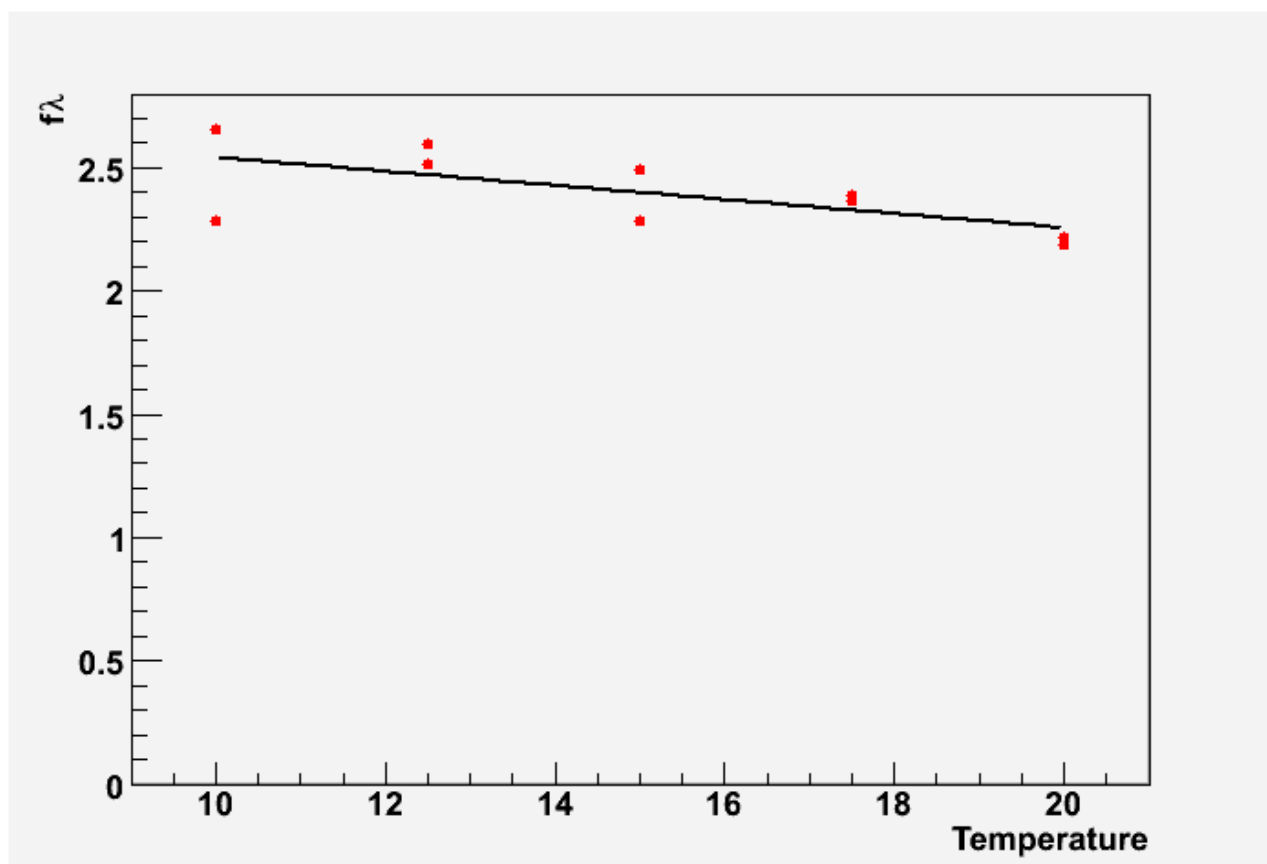


図 4.7 fλ の温度依存

同じ条件で 2 回測定をしている。二つの点で大きく値が異なる箇所がある。傾きは $(-2.86 \pm 1.24) \times 10^{-2}$ である。これによると f は温度上昇に伴い減少するという事になる。しかし、傾きの誤差が最確値の 43% 以上あり、この結果だけで結論を出すことは出来ない。

第5章 シンチレータの一様性測定

GLD カロリメーターで使用するに当たり、シンチレータの光量の一様性は無視できない重要な要因である。サイズの違う二種類のシンチレータについて光量の発光位置依存性を測定する。

5.1 測定方法

ADC を用いて光量の測定を行う。光量を上げるためシンチレータには KIMOTO 社の反射材を巻いた。実験のセットアップ図を図 5.1、図 5.2 に示す。

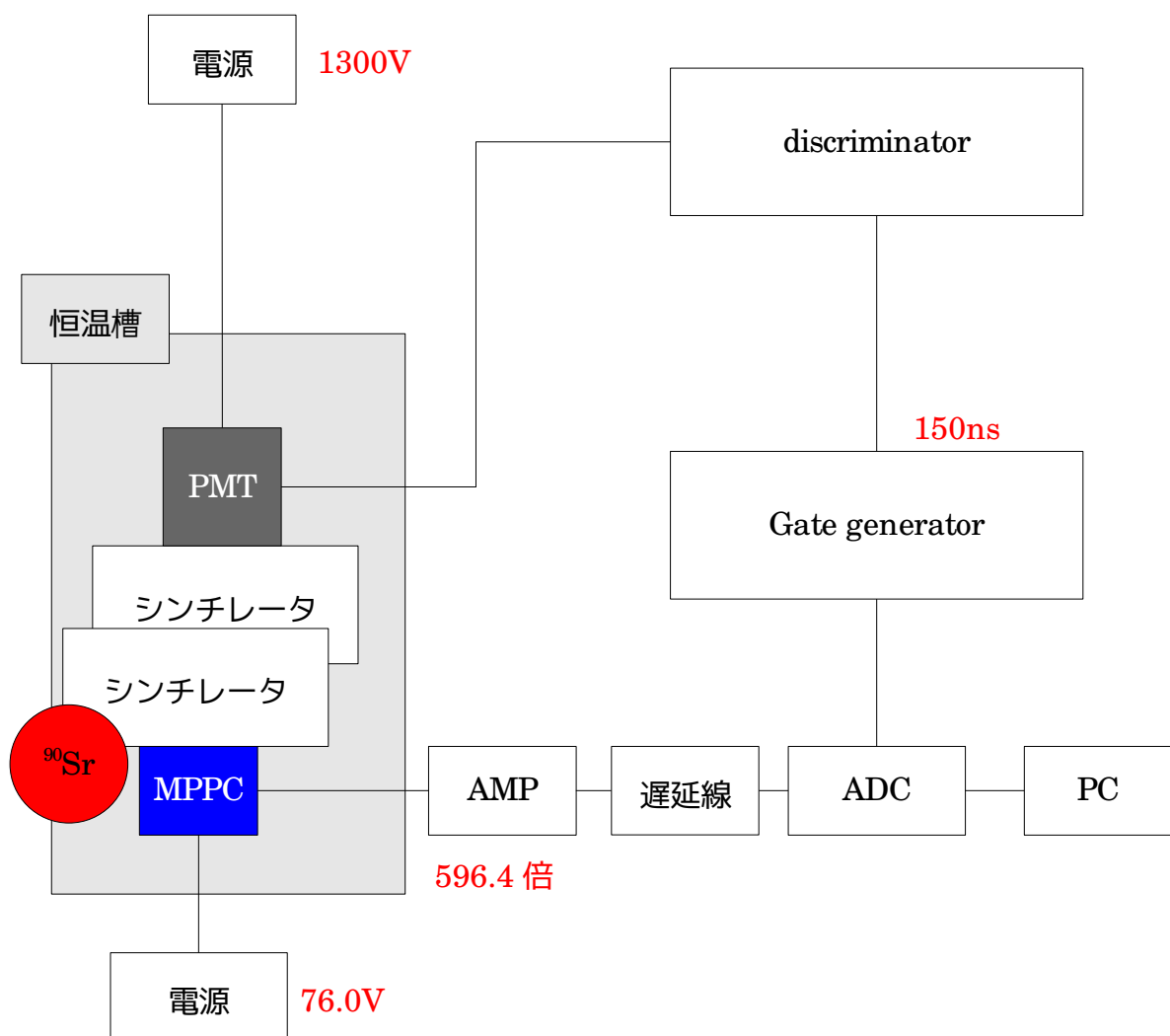


図 5.1 測定のセットアップ 2

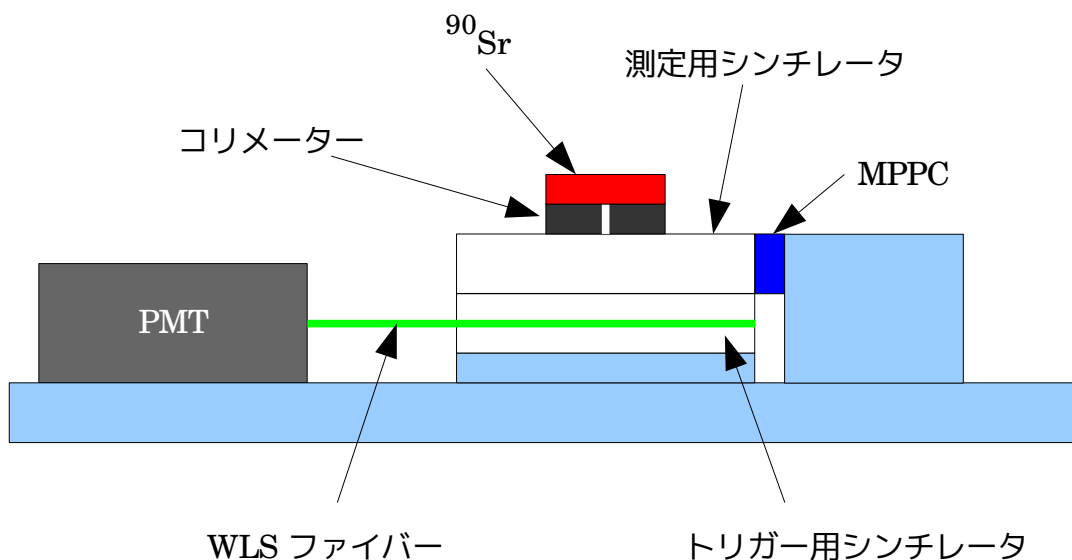


図 5.2 装置図

トリガー信号にはPMTを用いた。二つのシンチレータは別々の反射材で巻いてある。コリメーターには厚さ4.5mm、孔径1.4mmの鉛を使用している。

シンチレータを発光させるβ線源として ^{90}Sr を用いた。 ^{90}Sr は半減期28.8年でβ崩壊し、半減期64.1時間の ^{90}Y になる。 ^{90}Y は更にβ崩壊し安定核種である ^{90}Zr となる。通常β線のエネルギーはエネルギーの最大値で表現する。 ^{90}Sr の最大エネルギーは0.546MeV、 ^{90}Y は2.283MeVである¹⁰。実際には、これらの最大エネルギーを持つβ線が同じ割合だけ放出されるため、線源から放出されるβ線のエネルギー分布は二つのエネルギー分布を重ね合わせた形になる。

図 5.3 の様に、 ^{90}Sr と MPPC からの距離を変えた場合、縁からの距離を変えた場合の二つの場合について測定を行った。また、10mm 幅シンチレータと 5mm 幅シンチレータでは MPPC の取付け方に違いがある。

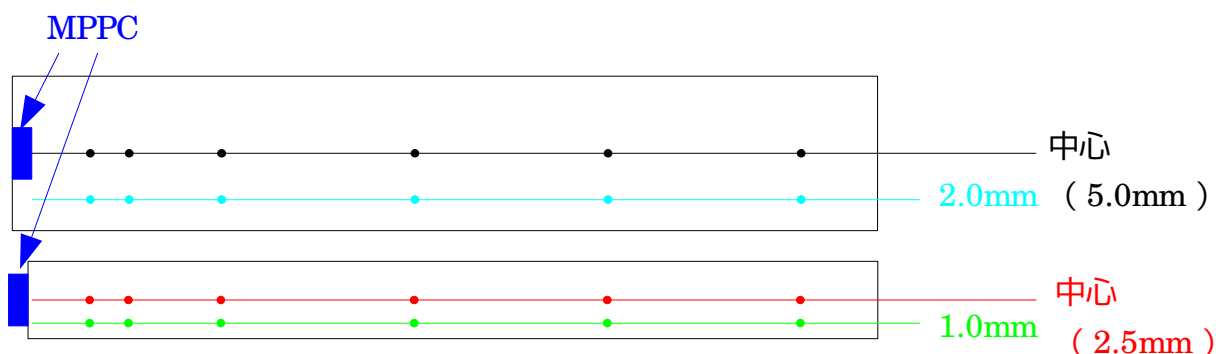


図 5.3 ^{90}Sr の位置

上：10mm 幅シンチレータ、下：5mm 幅シンチレータ

10 参考文献 REVIEW OF PARTICLE PHYSICS Particle Data Group

図 5.4 にシンチレータを用いて測定した ADC 分布を示す。1p.e.以上のイベントの積分電荷量からペDESTALを差し引いた物の平均を求める。この値を 1p.e.の積分電荷量で割ると平均光量が求まる。

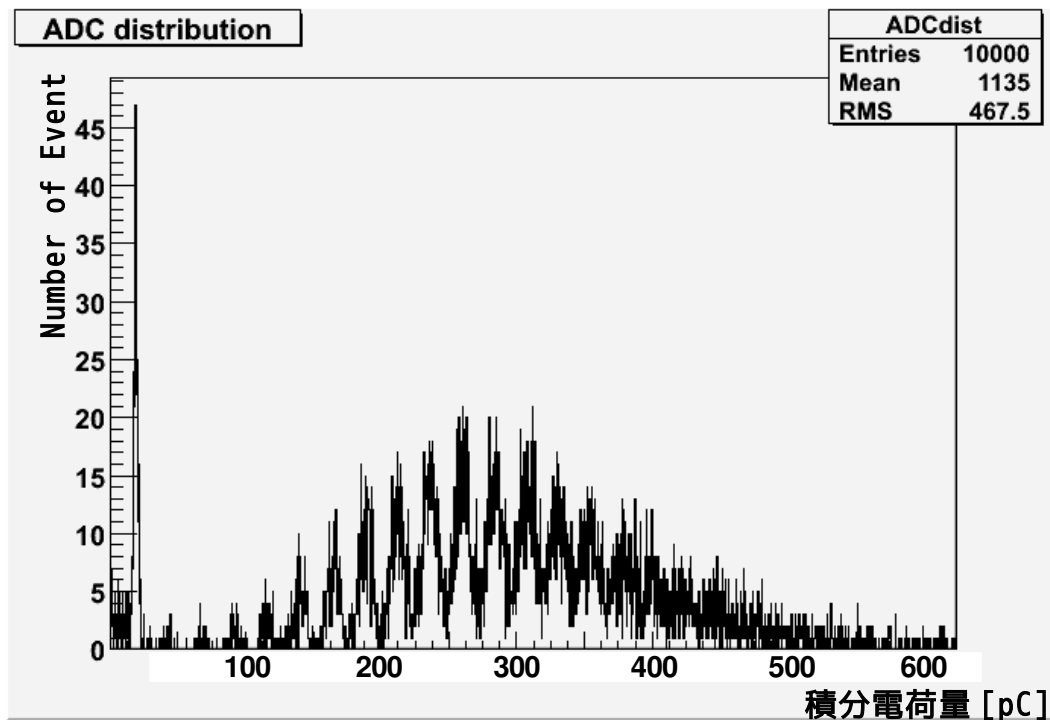
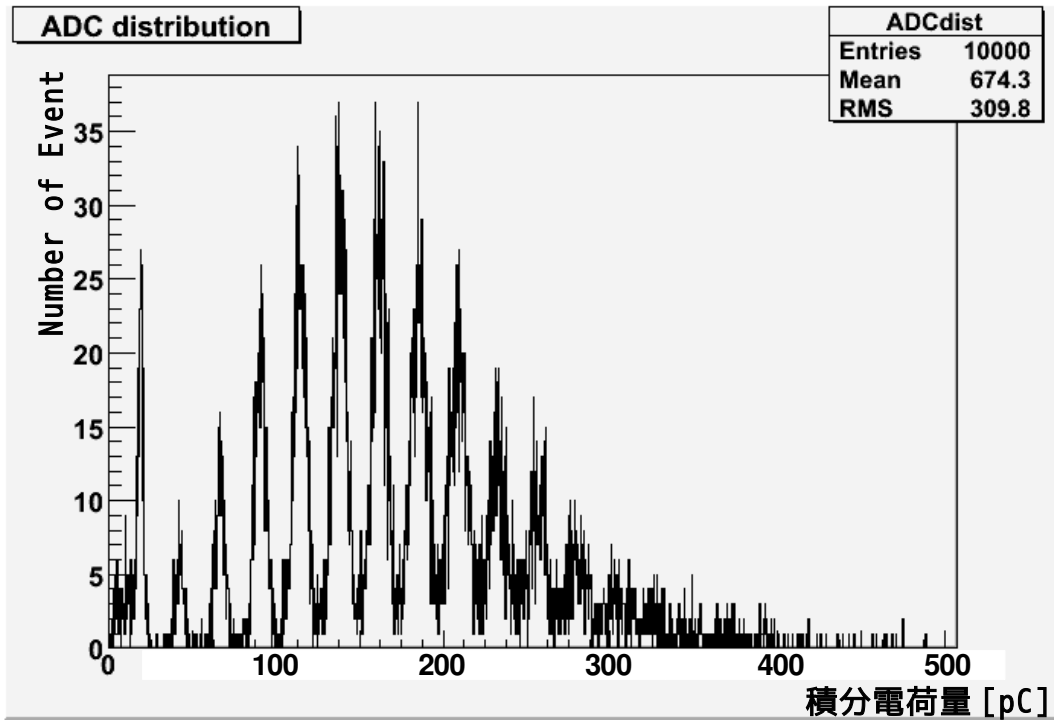


図 5.4 シンチレータを用いた ADC 分布
 上：10mm 幅シンチレータ 下：5mm 幅シンチレータ
 線源は両方共 MPPC からの距離 10mm で中心に置いた。

5.2 結果

測定結果を図 5.5 に示す。

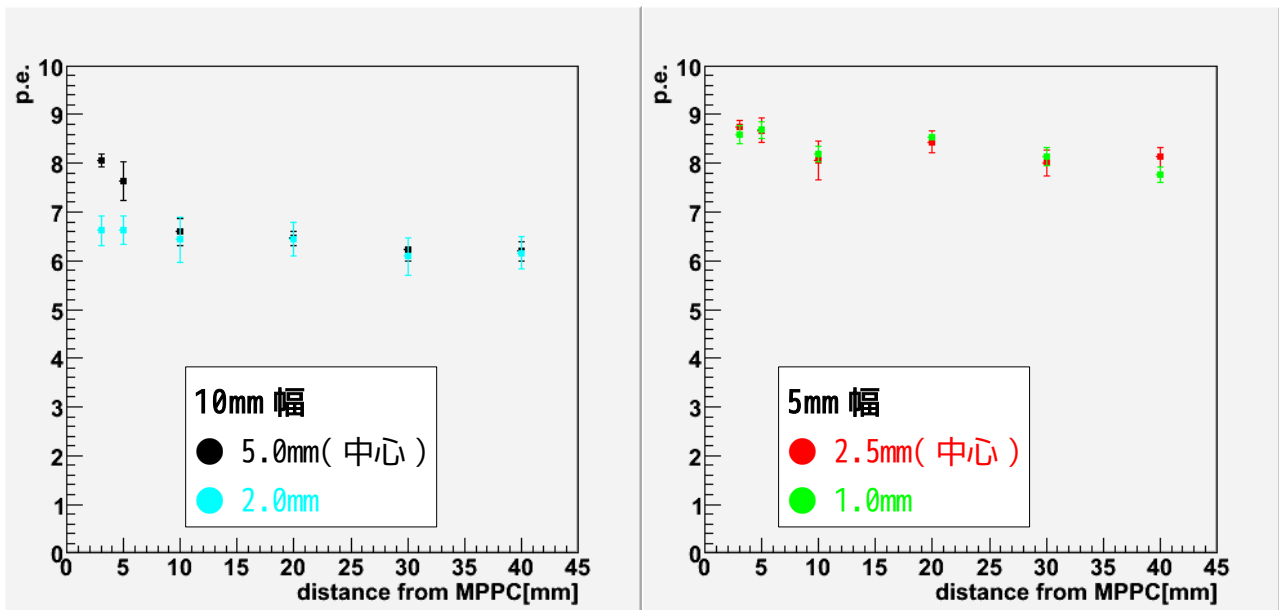


図 5.5 シンチレータの一様性

10mm 幅シンチレータは線源が MPPC に近い所で光量に差が見られるが 5mm 幅のシンチレータでは見られない。また、10mm 以上では両者とも差が見られない。10mm 幅シンチレータで見られる光量の差は、生じた光が反射材で反射されずに直接 MPPC に入射したためだと考えられるが、5mm 幅シンチレータでは見られないので MPPC とシンチレータの取付け方やシンチレータの形にも関係があると考えられる。

また、両者とも WLS ファイバー無しで十分な光量を得ることが出来たが、5mm 幅のシンチレータの方が全体的に光量が大きいことがわかる。

第6章 まとめ

6.1 考察

研究結果をまとめると以下の様になる。

MPPC の性能評価

Gain は温度の上昇に伴い減少する。76V の場合、10°C のときの Gain を 100% とすると約 2.24%/K である。しかし、室温では 3×10^5 以上という高い倍率を持つことがわかる。

光子検出効率は温度上昇に伴い減少したが、誤差が最確値の 43% 以上あり信頼できる結果とは言えない。

シンチレータの一様性測定

5mm 幅のシンチレータの方が 10mm 幅の物より一様性が良く、光量が高いことがわかる。

WLS ファイバー無しでも十分な光量を得ることが出来た。

光子検出効率の温度依存については確かな事はわからない。誤差を評価する為にも測定回数を増やし、系統誤差を調べる必要がある。また、今回の研究では温度上昇による Noise Rate や Cross Talk の上昇、アフターパルスの減少等を考慮にいれていなかった。これらは $f\lambda$ の値に影響を及ぼすと考えられるのでこれらを考慮にいれて考え直す必要がある。

今回の研究の結果から、カロリメーターには 5mm 幅のシンチレータを使うのが良いと考えられる。また、WLS ファイバー無しで使用できる事もわかり、コストの削減や作業の簡略化等につながる。

6.2 今後の課題

新型 MPPC の性能評価

2009 年 3 月に納品予定の新型 MPPC の性能評価を行う。今回の研究で用いた MPPC は受光面のサイズが 1mm×1mm の物だったが、新型の物は 1.4mm×1.4mm である。ピクセルサイズは変わらず 25 μ m なのでピクセル数は 3136 個になる。

より長いシンチレータの一様性測定

MPPC から線源の位置をより遠ざけた場合の光量の変化を調べる。より長いシンチレータを使用できれば、読み出しチャンネルの減少につながる。

謝辞

本研究を行うに当たり、多くの方々に御協力を頂きました。自分のような未熟者がここまで来られたのは皆様のおかげです。

指導教員である竹下徹教授、長谷川庸司准教授の御二人には非常に御世話になりました。御二人の御指導のおかげで様々な事を学びました。御忙しい中時間を割いていただき御迷惑をお掛けいたしました。心より御礼を申し上げます。

研究員の小寺克茂さんには実験技術の御指導やデータ解析等についての助言を頂きました。自分がこの研究をやり遂げることが出来たのは小寺さんのおかげです。本当にありがとうございました。

大学院の先輩方には様々な面で御世話になりました。特に、佐久間隆幸先輩にはMPPCの基本測定について非常に多くの御指導、助言を頂きました。

物理科学科の友人たち、サークルの友人や先輩、後輩たち、この4年間を無事に乗り切ることが出来たのは皆さんのおかげです。気の合う仲間たちに囲まれて過ごした大学生活はとても有意義なものとなりました。本当にありがとうございました。

最後に、この4年間自分を支えてくれた両親に心より御礼を申し上げます。

2009年3月 戸塚俊介

参考文献

- (1) Physics and Detector Study for International Linear Collider
<http://www-ilc.kek.jp/index-j.html>
- (2) ILC project <http://www.linear-collider.org/index.html>
- (3) 浜松ホトニクス社 資料 <http://jp.hamamatsu.com/>
- (4) kuraray 資料
- (5) REVIEW OF PARTICLE PHYSICS Particle Data Group
- (6) 素粒子物理学入門 渡邊靖志 著
- (7) 素粒子物理学 原康夫・稲見武夫・青木健一郎 著
- (8) エレクトロニクスの基礎 霜田光一・桜井捷海 著
- (9) 放射線計測ハンドブック Glenn F. Knoll 著
木村逸郎・坂井英次 訳
- (10) 原幸弘 『K+飛崩壊実験のためのガンマ線検出器の研究』
防衛大学校 理工学研究科 修士学位論文 (2006年)
- (11) 田村勇樹 『次世代線形加速器実験へむけての新型光検出器の評価』
神戸大学 自然科学研究科 修士学位論文 (2006年)
- (12) 前田高志 『リニアコライダー実験用カロリメータのための光検出器
MPPCの研究開発』
筑波大学 数理物質科学研究科 修士学位論文 (2007年)
- (13) 五味慎一 『半導体検出器 MPPC の性能評価システムの構築』
京都大学 理学部研究科 修士学位論文 (2008年)
- (14) 佐久間隆幸 『MPPC の安定性能の研究』
信州大学 理学部物理科学科 卒業論文 (2008年)