



MPPC の性能評価方法の研究

修士学位論文

2007年 1月 31日

03SA208K

坪川貴俊

信州大学工学系研究科 物質基礎科学専攻
高エネルギー研究室

指導教官：竹下徹 教授

概要

現在計画中の電子陽電子衝突型線形加速器実験 ILC(International linear collider)においては、その存在が理論で予言されつつもいまだ発見されておらず、LHC(Large Hadron Collider)にておそらく発見されるであろうヒッグス粒子の性質の精密測定、また標準理論を越える物理の探索などのさまざまな要請によりその検出器は従来のもよりも高性能なものが望まれている。

現在信州大学では線形加速器実験における粒子検出器のひとつであるカロリメータについての研究を行っている。カロリメータはさまざまな種類があるが、ILCのカロリメータにおいては(シンチレータ)+(タングステン)+(光検出器)のサンプリング型カロリメータが研究されている。カロリメータについてはシミュレーションにおける最適化が研究されると同時に、ここに用いる光検出器に関してもさまざまな種類が検討されているが、カロリメータに要求されている性能として、

- ジェット(発生粒子の束)の成分を分割するための granularity(細分割性)の高さ
- 入射までの物質量を小さくする為にカロリメータ全体がトラッキングチェンバーに使用する2~3 T(テスラ)のソレノイドコイルに内包されることによる磁場に対する性能の安定性の高さ

が挙げられ、このことから

- 多チャンネルであるか・単価が安いこと
- 磁場による性能変化が小さいこと

が使用するデバイスには要求される。

これらの要求を満たすものとして近年有力視されているものに MPPC(Multi Pixel Photon Counter)がある。MPPCはAPD(アバランシェフォトダイオード)をピクセル状に配列した構造を持つ半導体光検出器で、増幅領域が極短距離であることから磁場に対して増幅率が不安定になることがなく性能が安定であり、またその仕組み上1 p.e.(1 photo electron)分解能も良いとされており、単価も\$10(予定)と安価で上に挙げた要求を満たしている。しかし、浜松ホトニクス(株)製MPPCも製品化が始まったデバイスであり調べなければならない様々な項目がある。

本研究では浜松ホトニクス社製MPPCの性能を測定すると同時に、これから非常にたくさん使用されるであろうMPPCのため大量同時テストに関する今後の課題や今回の400個のテストの結果を示すことを主な目的としている。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、適切な助言および指導を下された竹下徹先生に深く感謝致します。
また神戸大・筑波大・新潟大・東京大 ICEPP のスタッフおよび研究生の皆様にも研究において多くの助言を頂きました。多大なサポートを頂きました。改めてここでお礼申し上げます。
技術的な指導および研究生としての考え方を教えてくださった長谷川庸司助教授・魚住聖研究員・大下英敏氏・里山典彦氏・伊藤さおり氏には大変感謝しております。仕事に行き詰まったときに適切な助言を頂き、視野を大きく広げることが出来ました。学んだ事を今後の人生に大きく生かしていこうと思っております。
素子の提供及び技術的なサポートをしてくださった浜松ホトニクスの皆様には感謝すると共に今後の素子の開発向上を願っております。
充実した研究生生活を送ることができたのは研究室の皆様のおかげです、皆様にはことあるごとに助けをいただき大変ご迷惑をおかけしました。
最後に学生生活をバックアップしてくださった両親に感謝いたします。

目次

第1章 ILC実験

ILC 実験は Higgs などの新粒子の精密測定を目的にした次世代の電子陽電子衝突型線形加速器実験である。1978 年の計画の始まり以来、JLC(Japan Liner Collider) GLC(Global Liner Collider) ILC(International Liner Collider) とその名を変えていくにつれ、より世界規模の活動になりその技術も発展している。本章では ILC 実験に関するいくつかの事項について述べておく。

1.1 線形加速器実験

高エネルギー物理学分野における現在の課題は、Higgs などの新粒子の発見や電弱相互作用の破れ等の物理の実現が可能な領域の重心系エネルギーを実現できていないことである。2005 年現在、稼働している最も高い重心系エネルギーをもつ加速器はアメリカのフェルミ国立研究所 (FNAL) の陽子反陽子衝突型加速器 TEVATRON で重心系エネルギーは、2TeV である。また、現在進行中のスイスの欧州合同原子核研究機関 (CERN) 大型陽子陽子衝突型加速器 LHC (Large Hadron Collider) (2007 年実験開始予定) は重心系エネルギー 14TeV とエネルギーは非常に高い。しかし、これらの加速器はいずれも (u,u,d)+gluon という内部構造をもった陽子同士を衝突させるため、実際反応に寄与する粒子はそのエネルギーの一部を持つに過ぎない。さらに反応する粒子の種類が陽子自身を構成しているクォーク (valence quark) のほかグルオンから対生成されるクォーク (sea quark)、またグルオン自身など多数あり、実際目的としている反応以外のバックグラウンドが非常に多いことも特徴であり、目的とした反応を選び出すことが困難であるという短所を持つ。これに対して電子陽電子型衝突実験においては内部構造を持たない素粒子同士の衝突である為ハドロン衝突型実験と比べてバックグラウンドが少なく非常に綺麗に反応を捕らえる事が可能であるという長所がある。現在構想中の ILC(電子-陽電子衝突型線型加速器) においては、線型加速器の形を取っているが、その理由は円形加速器の形を取ると次式

$$\Delta E = \frac{4\pi e^2}{3R} \beta^3 \gamma^4 \propto \frac{1}{m^4}, \quad \Delta E: \text{シンクロトロン放射によるエネルギー損失} \quad (1.1)$$

$\beta = v/c$, $\gamma = E/mc^2$ R : 加速器の半径, m : 粒子質量, c : 光速, v : 粒子の速度
のようにシンクロトロン放射が起こるため質量の軽い粒子は損失が大きく達成できる重心系エネルギーがハドロンの場合に及ばないことがあることである。このため加速に際しては直線状に加速空洞を設けるという線形加速器の形をとったほうが高い衝突エネルギーを電子や陽電子については得られる事がわかる。ただし線形加速器にも短所がある。それは円形加速器のように衝突できなかった粒子を別の衝突点で再利用することができなかつたり、次に述べるルミノシティに関するビームの収束や高加速のための高電界を作り出すことが難しいことなどが挙げられる。

現在稼働中のレプトン衝突型加速器は、次式

$$L = N_{e^+} N_{e^-} \frac{f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} R_L \quad (1.2)$$

N_{e^+} : バンチに含まれる陽電子の数, N_{e^-} : バンチに含まれる電子の数, f : バンチの衝突頻度

σ_x : 衝突点での水平方向ビームサイズ, σ_y : 衝突点での水平方向ビームサイズ,

R_L : 幾何学的な要因による補正項

で表されるルミノシティ¹を蓄積リングにおけるビーム電流を大きくしたり、衝突点におけるビームサイズを

¹ 反応断面積を掛けることで反応数となる

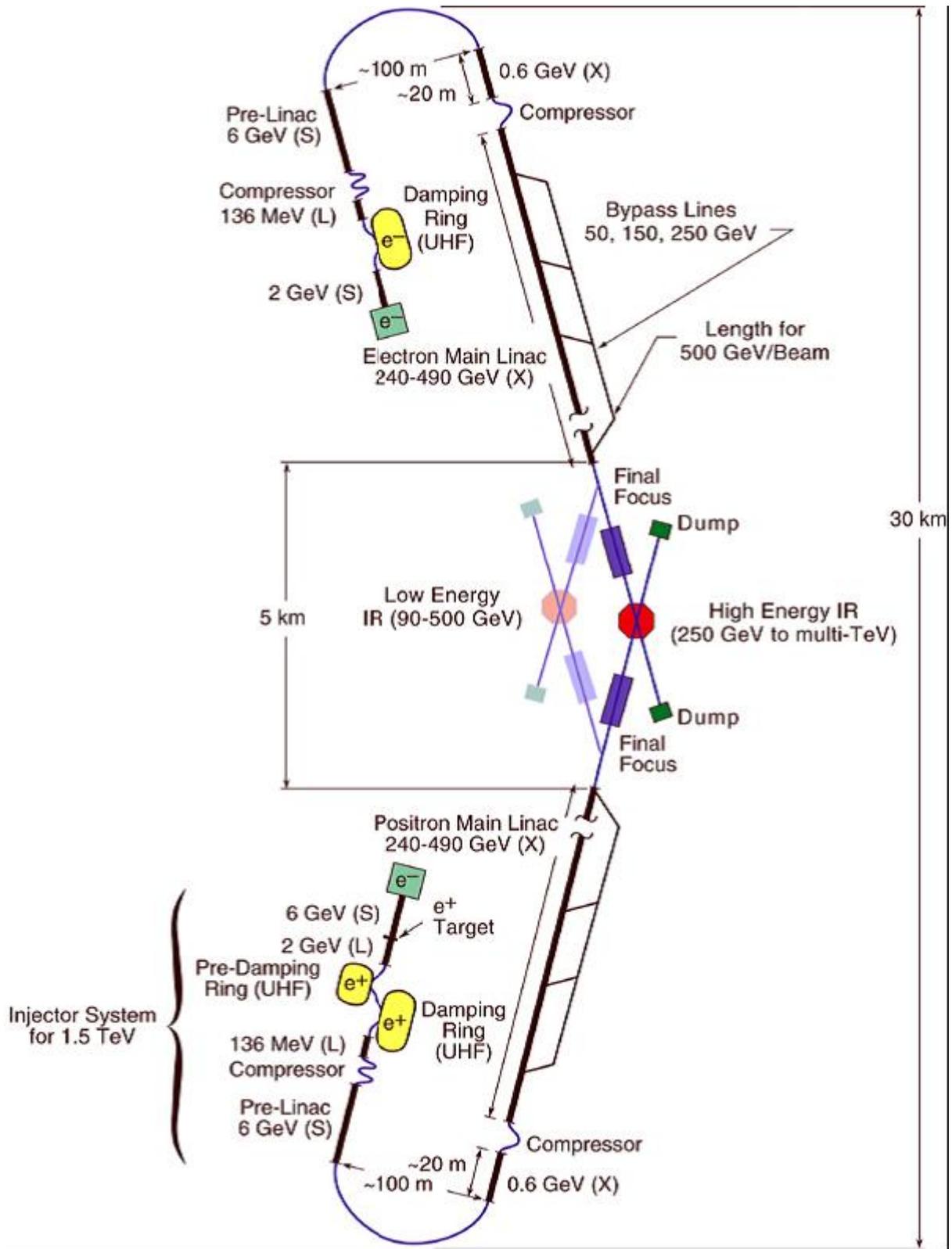


図 1.1: 次世代線形加速器構想図 (GLC 時代のもの): 現在のところ超伝導加速器になる予定である。超伝導加速器とは超伝導物質でできた空洞内で粒子の加速を行うもので、加速するためにかける RF(Radio Frequency) 波に対して発生する熱的なエネルギーロスが少なく低電力で高い加速が行える。

小さくするなどして高くすることで統計データ量をあげるように設計されており、測定精度の良い実験を行うことができる。例えば B ファクトリーと呼ばれる日本の高エネルギー加速器研究機構の KEKB、アメリカの SLAC の PEP-II が例として挙げられる。それぞれの重心系エネルギーは 10GeV 程度と、低いエネルギーであるが、特に KEKB では近年 B 中間子、反 B 中間子生成ルミノシティにおける最高記録を次々と塗り替えている。また、レプトン衝突型加速器で達成できた最も高い重心系エネルギーは、CERN の LEP(Large Electron Positron Collider) と呼ばれる電子陽電子衝突型円形加速器による、210GeV である。ルミノシティは ILC でも重要なパラメーターであり、ビームサイズを従来の mm オーダーから nm オーダーへと高める必要があるが、これを高めることは技術上難しい課題のひとつである。

上述のように電子陽電子の円形加速ではシンクロトロン放射によるエネルギー損失が存在するため、円形加速器を用いて LEP 以上の重心系エネルギーを達成するのは不可能に近く、今後の電子陽電子加速器は高エネルギーを目指すため粒子を直線的に加速する線形加速器が必要になる。

1.2 ILC 実験の物理

次世代線形加速器計画は TeV 領域のエネルギーに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。その中でも電磁相互作用弱い相互作用を統一的に記述する標準模型において、最後の未発見粒子であるヒッグス粒子の精密な測定、および超対称性(SUSY)の発見がこの実験計画において重要視されている。

・ヒッグス粒子とは

ゲージ理論の世界では全ての素粒子の質量が厳密に 0 であるとした上で成立しているが現実の世界において素粒子はそれぞれ質量を持っている(光子やグルーオンにはないが)。このずれを説明するために取り入れられたのがヒッグス場である。大昔、宇宙の生まれた瞬間(ビッグバン)にはまだ全ての素粒子が真空中を光の速度で動き回っていた。しかしビッグバンから 10^{-13} 秒を過ぎた頃に相転移(自発的対称性の破れ)が起こりヒッグス場を導入し、粒子の質量がこの場との相互作用で発生すると考えることで粒子に質量を持たせ、ゲージ不変性のみ導入における矛盾²を解決することができる。

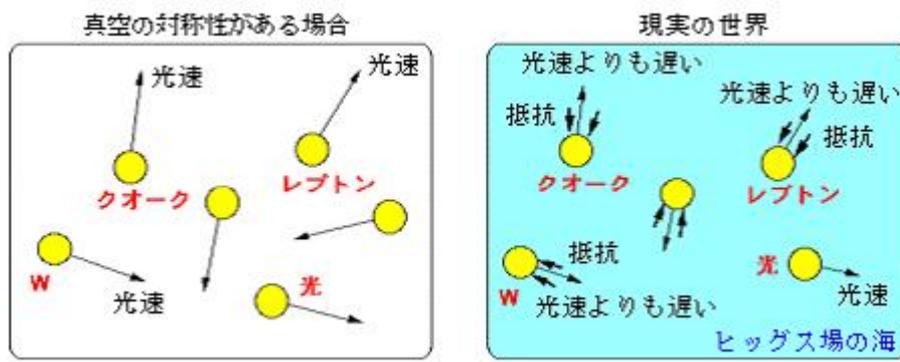


図 1.2: 真空の世界と対称性の破れた世界

²これのみでは質量をもてない

1.3 測定器全体

信州大学を始めとした ILC-CAL グループにおいてこの中のカロリメータについての研究を行っている次世代線形加速器における測定器は前節で述べた質量の再構成を正しく行うことができるよう精密な測定が出来るものでなければならない。特に Z 粒子や W 粒子より発生したジェットの再構成および b ジェットの識別はヒッグスの発見のためには精度よく行う必要がある。

本節では ILC 測定器の構成を述べる。

測定器は内側より次のような構成となっている。

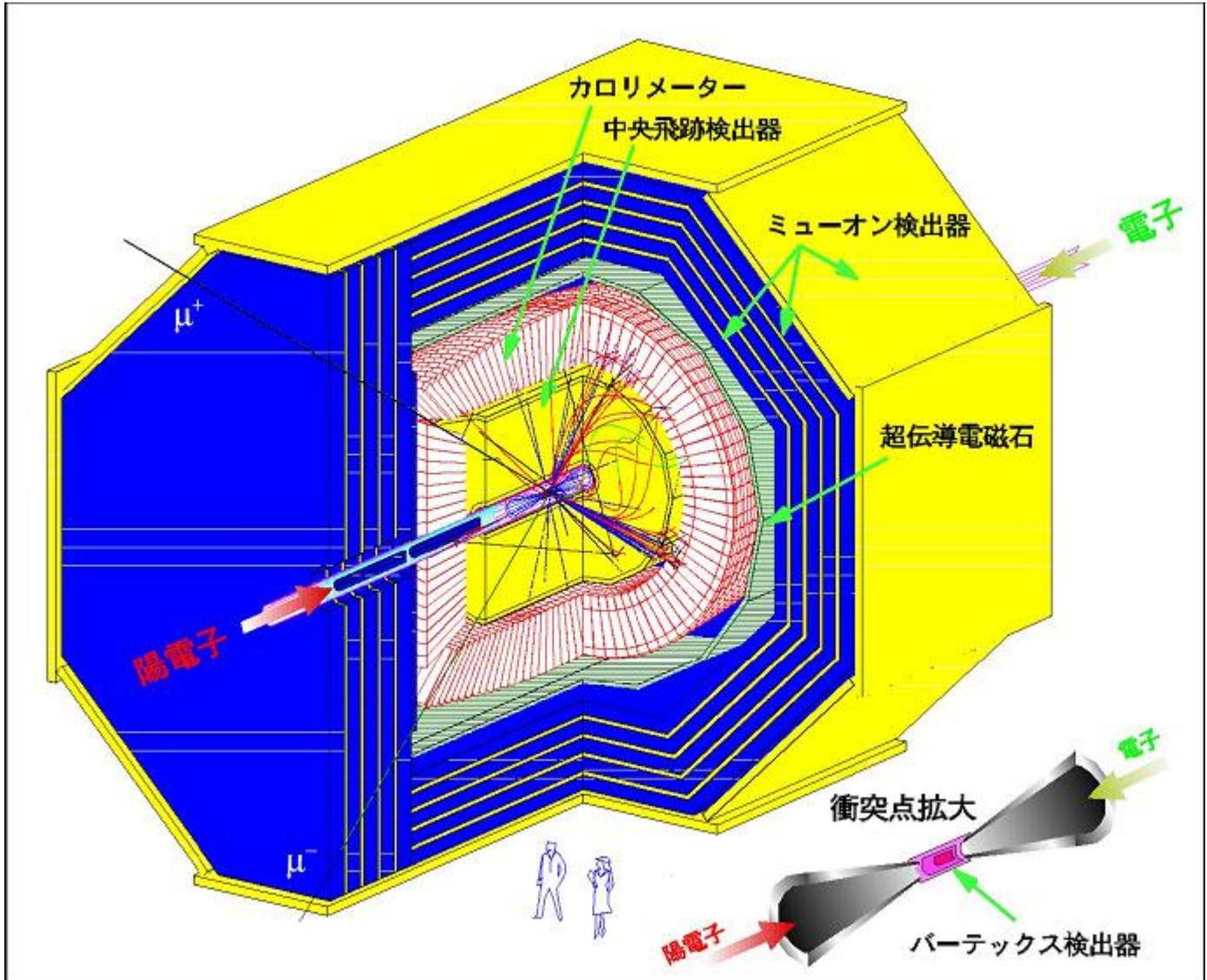


図 1.3: 測定器概念図

・パーティックス測定器：

電子陽電子衝突点の極めて近傍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為の測定器である。これにより衝突点から生成された D 中間子や B 中間子の崩壊点を見つけ、ジェットが b クォークや c クォークから発生した事を識別する。b クォークについてはヒッグスの終状態 ($e^+e^- \rightarrow Z^0H$ $b\bar{b} + q^-q$ のような) から、中心部に発生した事象を選び、その事象に二つの b クォークのジェットを要求することにより、効率

よくヒッグス粒子の事象を選ぶことができる。ヒッグス粒子の質量が $2m_W$ よりも重い場合、ヒッグス粒子は二つの W 粒子に崩壊するのでその終状態の六つ、四つあるいは二つのジェットや残りのトラックから $Z0$ 粒子に一致する組み合わせをみつけて先ほどと同じようにしてヒッグス粒子を見つけることができる。ヒッグス探索において非常に重要である。また検出器に入射する粒子束は非常に密な為バーテックス検出器には二次元分解能の高かつ読み出し速度の高いデバイスを用いる。

・中央飛跡検出器：

荷電粒子の飛跡を正確に測定し、その曲率と磁場の大きさから運動量を測定する。デバイスにはMPGD(Micro Pixel Gas Detector)を用いたTPC(Time Projection Chamber)が想定され、研究が進められている。

・カロリメータ：

入射粒子のエネルギーを測定する。飛跡検出と組み合わせることで入射粒子の質量を知ることが出来る。ILCでは $H \rightarrow b\bar{b} \rightarrow 2Jet$ のようなジェット発生イベントが主なので単に入射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ようにすることで粒子ジェットの構成要素を認識する事が可能になるものを考えている。詳しいことは次章で述べる。

・ミューオン検出器：

μ 粒子の同定を行う。 μ 粒子は電子よりも質量が重くまたレプトンであることから電磁シャワーをおこさず強い相互作用を受けない為非常に透過能力が高く測定器の外側まで通り抜けてしまう。この性質を考慮してミューオン検出器は測定器のもっとも外側を覆う形で設置される。 μ 粒子の運動量は内部の飛跡検出器で特定できるのでこれとミューオン検出器によるものとが一致するかを調べる。 μ 粒子は新粒子を探索する上でもっとも他の粒子との区別が付き重要な信号であることから隙間のないように並べる。デバイスとしてはまだ具体的に決まっていない。

以上のように次世代型線形加速器における測定器構想はまだ個々の分野でR & Dが続けられている状態であるのが現状である。本研究も含めデバイスの確立が急務となっている。

第2章 カロリメータ

信州大学を始め ILC-CAL グループに所属する各大学では GLD 検出器のためのカロリメータの研究開発を行っている。

2.1 カロリメータの構造と原理

カロリメータは入射した粒子のエネルギーを光に変換してその光量を光検出器で測定したり (ex:シンチレーター、鉛ガラス...)、直接電気信号に変換して読み出す (ex:Liquid Ar, SiW...) ことでエネルギー測定を行うものである。構造としては入射粒子の反応を促進しカロリメータ内のエネルギー損失・反応による二次粒子生成を促進する吸収体と反応によって生成された二次粒子のエネルギーを光に変換する検出体の層の組み合わせからなるサンプリング型カロリメータと吸収体と検出体の両方の性質を持つ物質 (CsI 等の無機シンチレーターや鉛ガラス等のチェレンコフ放射体) を使った全吸収型カロリメータがある。吸収体については鉄・鉛・タンゲステン・ウラニウム等が挙げられ、検出体についてはプラスチックシンチレーターや半導体、ガス、有機液体等が挙げられ、その目的に合わせて選択される。

いずれのカロリメータについても電子や光子のエネルギーを検出する電磁カロリメータとハドロンのエネルギーを検出するハドロンカロリメータがある。ハドロンは電子や光子と比べ反応長が長く多くの物質質量が必要とされる為電磁カロリメータの後方にハドロンカロリメータが置かれる。

電磁カロリメータにおいて電子や光子はカロリメータに入射すると吸収体にて対生成 ($\gamma \rightarrow e^+ e^-$) や制動放射 ($e^- \text{ or } e^+ \rightarrow \gamma e^- \text{ or } e^+$) を起こし (図 2.1)、発生した粒子 (電子や光子) が検出体の電子を励起する。励起された電子がもとの基底状態に戻った際に発生した光を光検出器に引き入れることで光量を測定する。

サンプリング型カロリメータについては吸収体、検出体を層状に交互に組み合わせた構造となっているので、ある検出体の層で停止しない (層を貫通する) 電子や光子は次の吸収体に入射し対生成・制動放射を起こす。このような反応が繰り返されると電磁シャワーと呼ばれるカスケードシャワーが生成される。最終的に電磁カロリメータはこの電磁シャワーのエネルギーを検出することになる。

またハドロンについては物質中での弾性もしくは非弾性散乱により二次粒子を発生させこれがイオン化または次なる弾性・非弾性散乱を発生させることでカスケードシャワーを発生させる。これをハドロンシャワーと呼びハドロンカロリメータはこのハドロンシャワーのエネルギーを検出する。電磁シャワーと異なりこの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ことが難しいのが特徴である。図 2.2 に模式的な図を示す。

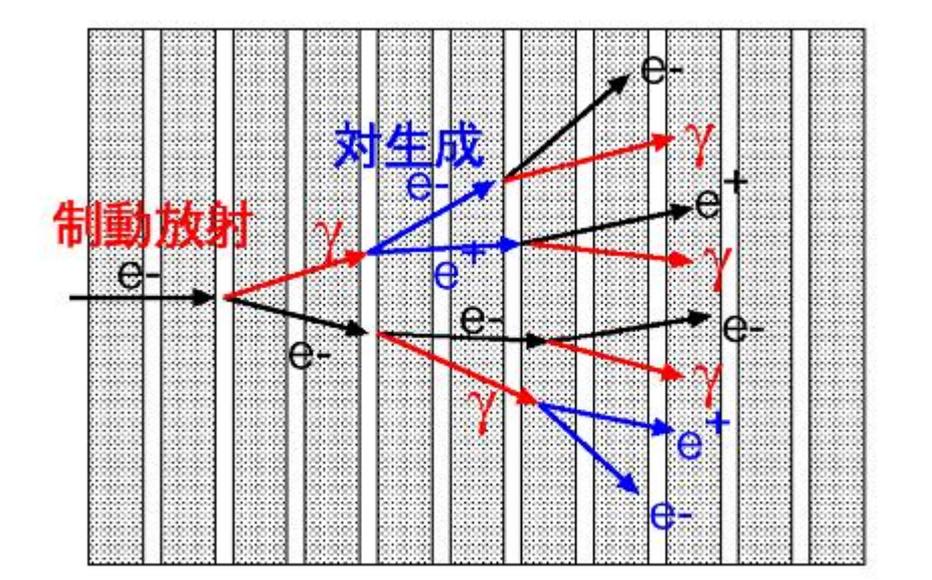


図 2.1: 電磁シャワーの様子:対生成と制動放射の繰り返しである。網掛け部分:吸収体、白色部分:検出体

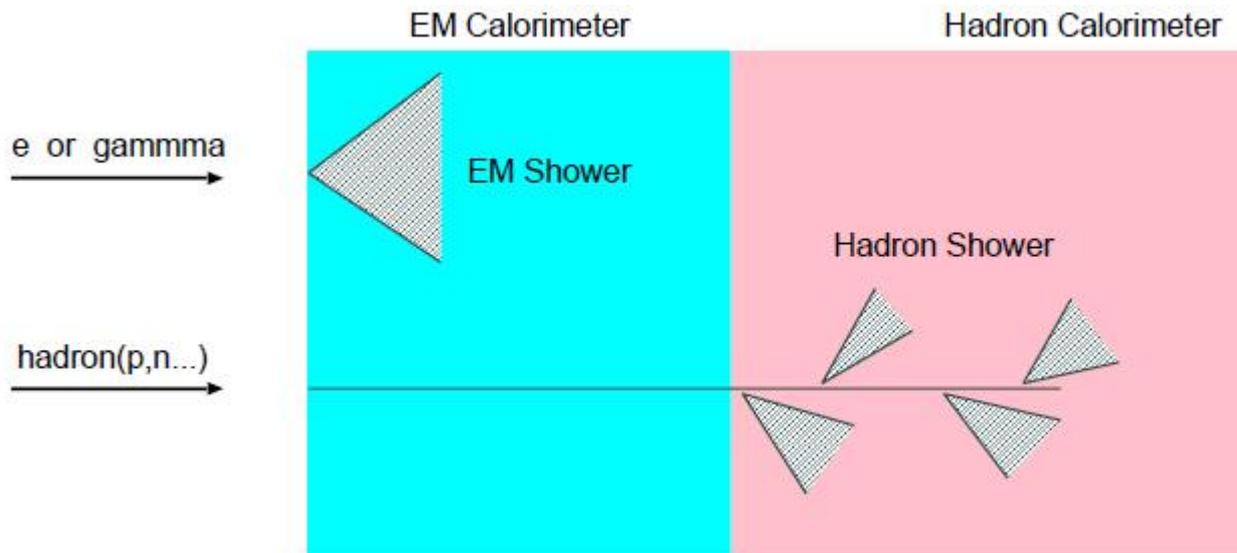


図 2.2: カロリメータにおける粒子の反応

2.2 カロリメータの性能

カロリメータに要求される性能にはどのような性能があり何の関係しているのでしょうか。本節では次に挙げるカロリメータに要求される性能及び概念について述べる。

- エネルギー分解能
- グラニュラリティー
- 補償の概念

2.2.1 エネルギー分解能

カロリメータに入射した粒子のエネルギーをどの程度正確に（揺らぎを少なくして）検出できるかを示すパラメーターをエネルギー分解能と呼ぶ。エネルギー分解能は以下の式のように表すことができる。

$$\frac{\sigma_E}{E} = a \oplus \frac{b}{E} \oplus \frac{c}{\sqrt{E}} \quad (2.1)$$

E :入射エネルギー σ_E :分解能 a :定数項 b :ノイズ項 c :統計項

ここで、 $A \oplus B = \sqrt{A^2 + B^2}$ を表す。定数項は読み出しチャンネル毎のゲインの不均一性やカロリメータのエネルギーの漏れに起因する。よって入射エネルギーに比例する形を取ることから上の式では定数項となる。ノイズ項については読み出し回路などのエレキ部などのノイズによる寄与を表しているので入射エネルギーに関わらず一定である。これより上の式では $\frac{1}{E}$ に比例する。最後の統計項については下の三つの寄与に分類できる。

- σ_{int} : intrinsic な揺らぎ
- σ_{photo} : 検出される光子数の揺らぎ
- $\sigma_{sampling}$: サンプルングによる揺らぎ（サンプルング型カロリメータについてのみ存在）

ここで σ_{int} とはカロリメータに入射したシャワー自身の揺らぎである。

σ_{photo} についてはシンチレーターや鉛ガラス等の検出体からの光量検出において光検出器が検出する光電子数の揺らぎで次式のように表される揺らぎである。

$$\frac{\sigma_{photo}}{E} = \frac{1}{\sqrt{N_{p.e.}}} \quad (2.2)$$

最後に $\sigma_{sampling}$ はサンプルング型カロリメータにおける有感層（検出体で構成されている層）に落ちるエネルギーのゆらぎでありサンプルング型カロリメータのエネルギー分解能に寄与する。

2.2.2 グラニュラリティー

前節で述べたように実際の実験では非常に多くのハドロン・レプトンからなるジェットを精度よく捉えることが重要になる。では精度よく捉えるにはどうすればよいだろうか。答えは捉えるカロリメータの読み出し単位(タイル型カロリメータで言えばタイルのこと)を非常に細かいものにすればよいのである。これは画素のサイズが大きい撮像素子では一定サイズの被写体に対して大雑把な映像しか捉えられないのと同じ具合である。読み出し単位を非常に細かいものにするとジェットの解きほぐし(1粒子1粒子の軌跡に分解すること)が行うことができ、トラックとクラスタ¹の対応付け(Matching)やバックグラウンドの除去なども容易に行うことが出来るはずである。この読み出し単位の細度をグラニュラリティー(Granularity)といい、細かければ細かいほどグラニュラリティーがいいという。

しかし Granularity をよくするには課題がある。それはこれを実現するには、

- 読み出しチャンネル数が莫大なものになり、コストが大変高くなってしまう(コストの問題)
- 均一な応答を保持するのが難しい(均一性(uniformity)の問題)
- ファイバー読み出しの場合、効率よく読み出すには不感部分(デッドスペース)が大きくなってしまう(取り回しの問題)
- 読み出し単位を小さくすると同時に読み出し単位から得られる光量も小さくなりノイズとの区別がつかない(S/N比の問題)

などのことが障害となることである。但しこれらの問題にも解決策がある。それは単価が低く、かつ p.e. 分解能²および量子効率の高い検出器で無感部分を小さく出来るような光検出器を用いればよいのである。本研究も含めて様々な光検出器が研究され、この構想に用いることが出来るかどうか検討されてきた。これについては次章以降で述べたいと思う。

2.2.3 補償の概念

補償とはカロリメータのハドロンシャワーに対する応答と電磁シャワーに対する応答を同一にする事をいう。一般にカロリメータにおいて電磁シャワーから得ることの出来る信号と比べて、ハドロンシャワーから得ることの出来る信号のほうが小さい。これはハドロンシャワーの散乱プロセスにおける核破砕反応にて原子核の結合エネルギー分はそこから発生する粒子には伝播されない為である(純粹にこのエネルギーは失われる)。更に核反応で発生した中性子は中性であることから荷電粒子に変換されるような反応を起こさない限りはエネルギーを持ち去ってしまう。またハドロンシャワーにおいて π^0 粒子の生成もカロリメータの性能において大きな影響を及ぼす。 π^0 粒子は電磁相互作用によって 線2つに崩壊し電磁シャワーを発生させる為ハドロンシャワーに電磁シャワーの成分が混ざることになる。このことからハドロンのエネルギーを評価することが難しくなり(同一の信号を得てもどの程度電磁シャワー成分があるかでエネルギーは異なるから)分解能も悪化する。そこで補償という概念をもちいた補償型カロリメータを用いる。方法としては以下のようなものが挙げられる。

- 吸収体に鉛などの重元素を用いることで、核破砕反応のエネルギー消費をへらす
- 検出体に水素原子を多く含むプラスチックシンチレーターを用いることによって陽子中性子散乱を誘発する
- 吸収体の比を増やし電磁シャワーが検出体に落とすエネルギーを減らす

¹カロリメータ内でのヒットの並び替え

²どのくらいの光量が入っているかわかる性能

これらの方法は核結合エネルギーの低下によるロス低減、中性子の核破砕もしくは陽子中性子散乱の促進、電磁シャワーに対する電子とハドロン の 応答比 (e/h とする) を 1 に近づけるものである。尚 3 番目のものについてはサンプリング数を減らすことでカロリメータの性能を悪化させることは望ましくないことから検出体を薄くしサンプリング数は多く保ったままで吸収体の比を増加させることが望ましい。

2.3 ILC - CAL の動向

日本の ILC-CAL は現在に至るまで様々なタイプのカロリメータをテストしてきた。なかでもストリップ型カロリメータについては現在も改良が考えられている。

2007 年 1 月時点における動向としては、ストリップ型カロリメータのサイズおよび形状を最適化するべく検討中であり、そのためのビームテストの準備を行っている。吸収体についてはこれまでは鉛を採用していたが、モリエール半径³がタングステンに比べ大きく、今後のエネルギー分解能の向上について考えた際不適とみなし、タングステンを採用する方向に動いている。また読み出しの光検出器については本研究にて用いている MPPC (Multi Pixel Photon Counter) が現在有力視されている。

カロリメータについては MPPC+Fiber Read Out のタイプが構想されている。小さな MPPC を用いることでファイバーに直付けすることが可能となりファイバーの取り回しによるデッドスペースの問題が解消される。図 2.4 に MPPC を用いたカロリメータの構想図を載せる。

2.3.1 PFA(Particle Flow Algorithm)

最後に近年のカロリメータの概念的な動向として Particle Flow Algorithm (PFA) について述べる。PFA は衝突で生成されるジェットのエネ ルギーを精度良く測定するためにカロリメータで測定したエネルギーから荷電成分 (EM 成分と荷電ハドロン) を取り除く解析手法をいう。PFA が必要とされる理由は次のとおりである。ジェット中の粒子のエネルギーは相対論から

$$E = \sqrt{m^2 + p^2} \quad (2.1)$$

となりさらに運動量が質量に比べ非常に大きくなる ($m \ll p$) ことから $E \cong p$ と考えられる。ここで中央飛跡検出器の運動量分解能 $\frac{\sigma_p}{p}$ とカロリメータのエネルギー分解能 $\frac{\sigma_E}{E}$ において $\frac{\sigma_p}{p} \ll \frac{\sigma_E}{E}$ であることが知られており⁴

$$(\text{中央飛跡検出器での運動量}) \cong (\text{粒子のエネルギー}) \quad (2.2)$$

と考えることが出来る。但しこれはあくまで荷電粒子の場合であり中性粒子の場合はトラッキングできないため、カロリメータに頼るほかない。ジェット中における粒子の構成成分についてはトラッキングできる荷電成分が 65 % 含まれており多くが中央飛跡検出器によるエネルギー測定が有効になることが分かる。またジェットのエネ ルギーにおける σ_{jet} は、

$$\sigma_{jet}^2 = \sigma_{charge}^2 + \sigma_{\gamma}^2 + \sigma_{hadron}^2 + \sigma_{confusion}^2 \dots \quad (2.3)$$

と書ける。ここで σ_{charge} は荷電粒子に対するエネルギー分解能、 σ_{γ} は光子に対するエネルギー分解能、 σ_{hadron} はハドロンに対するエネルギー分解能である。 $\sigma_{confusion}^2$ は荷電粒子・中性粒子両方の粒子のエネルギーがカロリメータに落ちることによるエネルギー分解能への影響であることから、上手くクラスタリング (粒子由来ごとのシャワーに分別すること) を行い、カロリメータから荷電粒子由来の成分を除いてやることでこの揺らぎを小さくすることが出来る。(測定器構造においてジェットを解きほぐす為にカロリメータとバーテックス検出器の距離を十分に離すことでも $\sigma_{confusion}$ は小さく出来る) 現在 ILC のシミュレーターである Jupiter に組み込むべき PFA が研究されているが、PFA の基本的な手順は以下の通りである。

³横方向のシャワーの広がりをおろそかにする

⁴ $dp/p \sim (5 \times 10^{-5}) \text{ or } 1 \times 10^{-4}$ の関係がある

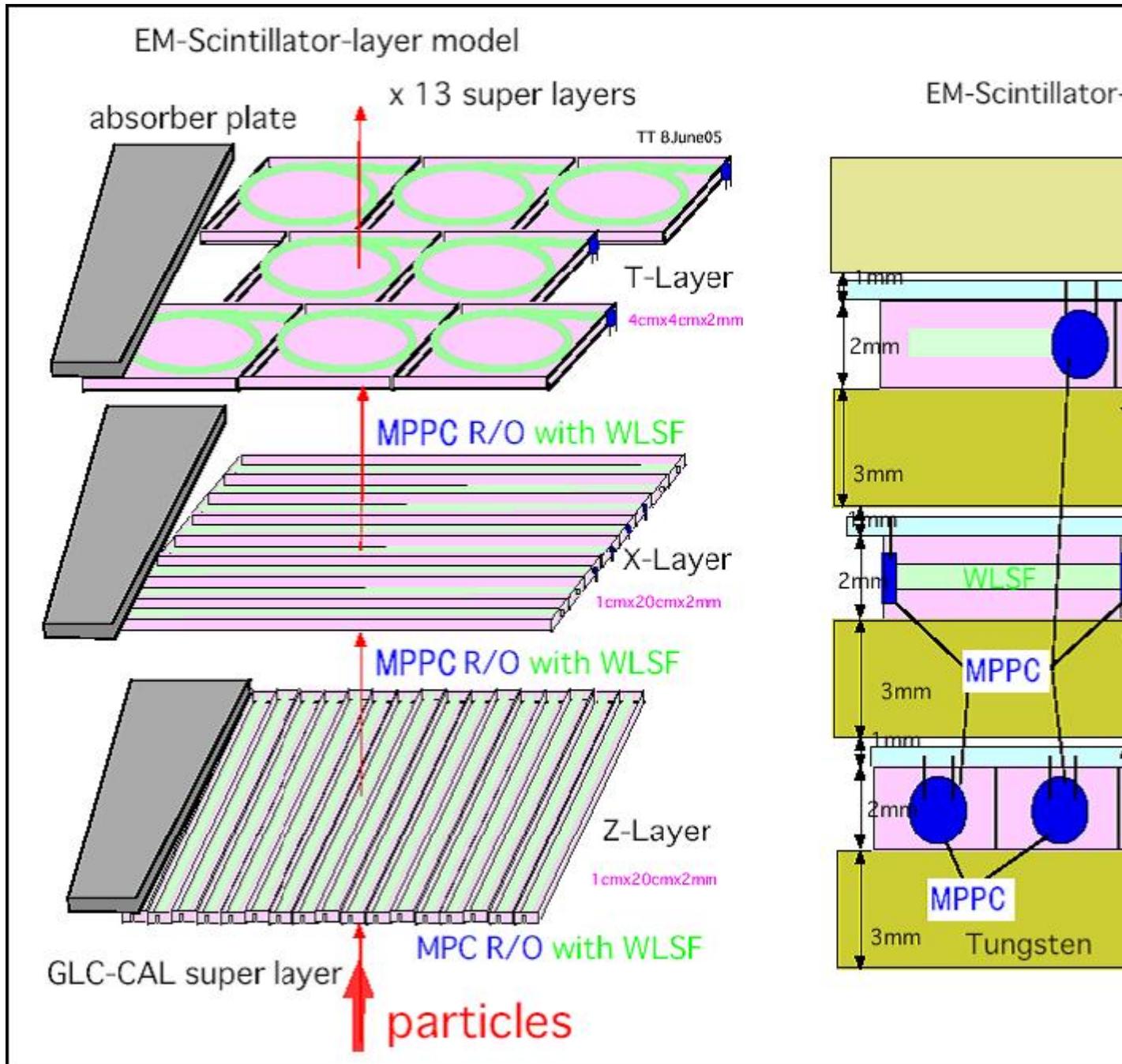


図 2.3: MPPC を用いたカロリメータ構想：左図：検出体のシンチレータ部分の構想。MPPC はシンチレータ内のファイバーの端に直付けが可能になってデッドスペースの低減が図られている。右図：カロリメータを上から見たときの図（X-Z 軸）

1. 小クラスタの生成と γ の検出
 - 隣接のヒット同士の結合
 - ハドロンと γ の分離
2. 中央飛跡検出器のトラック情報とクラスタの対応付け
 - カロリメータにおけるハドロンによるエネルギー成分をトラック情報より見つけ出す。
3. 残りのエネルギーを中性ハドロンの成分と仮定

個々の手順でどのようにクラスタを生成するか、 γ をどのように見つけるかトラックとクラスタをどう対応付けるかが考えるべきところである。

第3章 光検出器

これまで多くの粒子物理実験が行われてきたが、実験における光検出器の役割はカロリメータに組み込むことで粒子のエネルギーを電気信号として検出できる点やある事象を捉えるためのトリガーに用いることが出来る点で非常に重要である。次世代線形加速器実験においてはカロリメータに対する要請がこれまで以上に高いものになっているため従来使用してきたものより高い性能・安定性が必要とされており、様々な検出器がその候補として挙げられ、またテストされた。

本章ではこれまで次世代線形加速器実験のカロリメータに用いるためにテストされてきた光検出器を紹介する。

3.1 これまでの光検出器

これまで次世代線形加速器実験に向けて以下のような光検出器に関して研究が行われてきた。

- 光電子増倍管 (PMT)
- アバランシェフォトダイオード (APD)
- Multi Pixel Photo Counter(MPPC)

傾向として信号が磁場によって不安定にならない、という要請による増幅領域の狭域化¹、また高グラニュラリティの要請から読み出しが多くなることによる多チャンネル化が挙げられる。また電子管から半導体に移行している。本節では上に述べた光検出器について述べる。

3.2 光電子増倍管

光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube 以後 PMT) は光電陰極²と多段金属電極 (ダイノード) を組み合わせることで光量に応じた大きさの電気信号に変換する光検出器である。高速応答で (nsec 単位)、高感度 (光電面の量子効率³による) 更に高ゲイン (10⁷ 程度) なデバイスでこの分野では広く使われている光検出器である。図 3.1 に PMT の基本的な構造を示す。ガラスを通過した光子は光電陰極にて光電効果を起こし電子に変換される。光電面にはこの実験分野においてよく使用されるものとして GaAs(ガリウムヒ素) やバイアルカリ⁴などが挙げられるがこれはシンチレーターからの光に対する感度が高かったり、暗電流 (光子が入射していない状態で発生する電子) が少なかったりするためである。変換された電子はその後複数段のダイノードにて、加速されると同時にダイノードとの衝突から二次電子が放出される。この電子も次段のダイノードにて二次電子の放出を引き起こし、最初に光電面から発生した電子は 10⁷ ~ 10⁸ 程度に最終的に増幅され、最終段のアノード (陽極) に到達し読み出される。ダイノードについて最大 19 段まであり、それぞれの電極はニッケル金属やステンレス金属を用いた基盤電極とアルカリアンチモンなどの二次電子放出材料から構成されている。また材質だけでなく構造においてもダイノードには様々な種類がある。主なものとしては光電子の収集効率にすぐれたボックス型、磁場の影響を受けにくくし、更に位置分解能をもたせたファインメッシュ型、

¹PMT のように増幅領域が広いと磁場によりローレンツ力等によりゲインが揺らぐ

²光電効果を起こす物質を陰極に塗布 (蒸着) している

³入射光子に対する光電子の割合をいう

⁴2 種類のアルカリ金属をもちいた材質

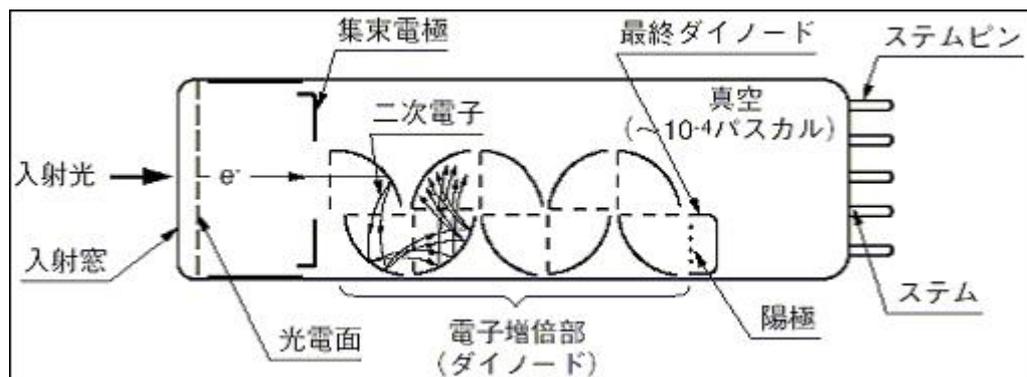


図 3.1: PMT の一般構造：図は 1 チャンネル、ボックス型ダイノードのものである

コンパクトで応答性のよいサーキュラージ型、時間特性やパルスリニアリティ特性が重要な測定に用いられるラインフォーカス型、大口径のものに使われユニフォミティのよいベネシアンブラインド型、そして応答時間が最も速く、磁場の影響を受けにくい MCP(マイクロチャンネルプレート) 等がある。これらは目的に応じて選択される。

PMT は上に述べたように非常に種類も豊富で優れた光検出器だが増幅に要する距離が長い為磁場が存在するような状況下では磁力線に増倍される電子が捕らえられてうまく増幅できない可能性がある。したがってビームテストのようなカロリメータそのものの性能をテストしたり磁場の影響が少ない状況下(大気を越えてきた宇宙線測定など)での使用はできるが、ILC の衝突実験の測定器では磁場がかかるため使用に適していない。

3.3 アバランシェフォトダイオード (APD)

APD はフォトダイオードに高い逆電圧をかけることでアバランシェ増幅⁵を起こし、ある程度のゲインをもつ光検出器としたものである。構造上は PIN 型ダイオードと同じものであるが、高い電圧をかけて使う為、表面絶縁破壊を起こすほど表面の電場を大きくしないでかつ検出器有感領域内に高い電界を作ることが出来るような半導体組成にする必要がある。

半導体の一般的な性質としてアバランシェ増幅におけるゲインは周囲の温度に大きく依存するという点では PIN 型フォトダイオードに劣る。しかしながら APD を使うことで小さいゲインを補うことが出来、また PIN 型に比べ高い S/N 比⁶をもつ。

APD の構造を 3.2 図に示す。高電場は p-n ダイオードの境目(空乏層)に出来ており、i 型半導体⁷(真性半導体)はこの空乏層に電子を導くドリフト領域の役割を担っている。この構造は主に反応速度の速さを重視したものである。半導体光検出器の基礎的な知識は次章で述べる。

3.4 MPPC(Multi Pixel Photo Counter)

MPPC とは浜松ホトニクス株式会社が現在開発中の光検出器で、微細加工技術により前述の APD をひとつのチップ上(現在あるものは $1\text{mm} \times 1\text{mm}$) に array 状に多数配置したものである。

MPPC も半導体光検出器のひとつとして基礎的な知識は次章で述べる。

⁵半導体内でなだらかに電子が増幅する現象

⁶ノイズと信号の比、これが高いほどノイズが少ない

⁷不純物を加えていない 100% のシリコンのこと

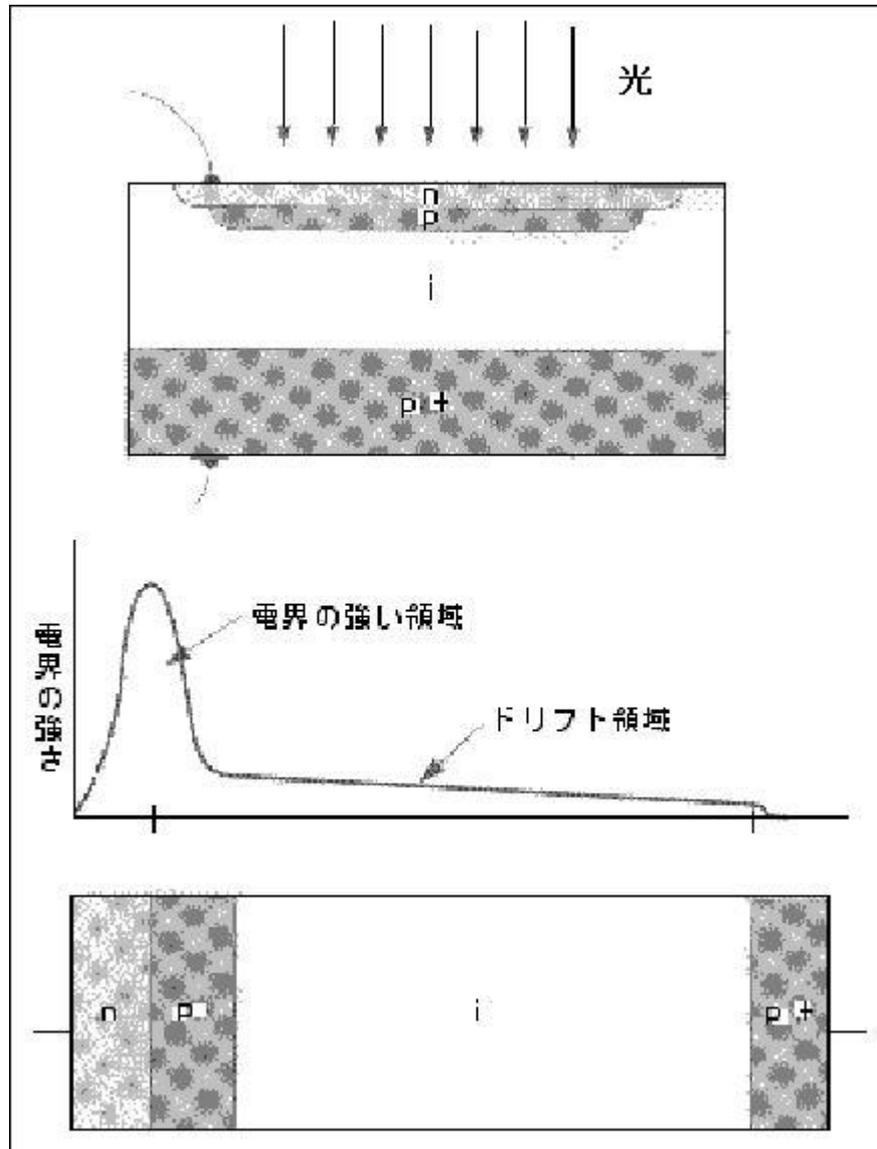


図 3.2: APD の組成と構造：電子の増幅は p-n ダイオードの空乏層で行われる

第4章 MPPC

前章で述べてきた光検出器 (MPPC を除く) は一定程度の要求は満たすもののやはりコスト (読み出し回路なども含めて) が高く、実際のカロリメーターに組み込む際のスペースの問題 (物理的サイズの問題) もある。そこで ILC-CAL が着目したのが浜松フォトにクス株式会社で開発された MPPC である。本章では光検出器 MPPC の紹介と本研究で重要になる半導体光検出器の知識について述べる。

• 逆方向電圧とブレイクダウン

接合にかける逆方向電圧を大きくしていくと、図 4.1 のようにやがて大きな電流が急に流れ始める。これはブレイクダウン (降伏) とよばれ、これが起こる電圧をブレイクダウン電圧あるいは逆方向耐圧などという。ブレイクダウンの起こる機構は主になだれ降伏とツェナー降伏がある。なだれ降伏では大きな逆方向電圧による高電界において、空乏層中をキャリアがドリフトする際にそのエネルギーで結晶格子の結合を切り、そこに新たな電子と正孔を作り出す。ここで生成された電子や正孔は再び電界によって加速され新たな電子-正孔対を作るのに必要エネルギーをえるので、電子-正孔対の数はネズミ算式に増えて、大電流が結果として流れる。この増倍現象のことをなだれ増倍現象 (アバランシェ増幅) と呼ぶ。一方ツェナー降伏では逆方向電圧の絶対値が大きくなると中性 p 領域の価電子帯と、中性 n 領域の伝道帯との間の空乏層による障壁の厚さが薄くなり、価電子帯の電子が量子力学的なトンネル効果で伝道帯に抜けるようになる。この結果、大きな電流が流れるようになる。逆電圧における増幅のバンド図を図 4.2 に示す。光信号を高感度かつ高速の応答性で

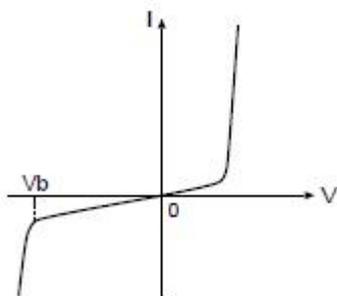


図 4.1: ダイオードの一般的な電流電圧特性

検出する目的で作られる pn ダイオードがフォトダイオードである。動作領域は、逆バイアス領域に設定される。なだれ増倍現象は、キャリア濃度が正帰還的に増大する現象であり、またトンネル効果の電子の透過率は障壁の厚さの指数関数に依存するので、どちらも電圧に対して強い非線形性をもつ現象である。したがって図 4.1 のようにブレイク電圧付近の電流の増大の勾配は非常に大きい。なだれ増倍にはキャリアが走行する距離が必要であるので、比較的的空乏層が厚く、高い電圧でブレイクダウンする場合に支配的である。これに対してツェナー降伏は不純物濃度が高く、空乏層の薄い場合に起こりやすくブレイクダウン電圧は低い。半導体光検出器において光入射による電子-正孔対の生成からなだれ増幅により信号を可測化するという仕組みがとられているものとして APD が代表的である。

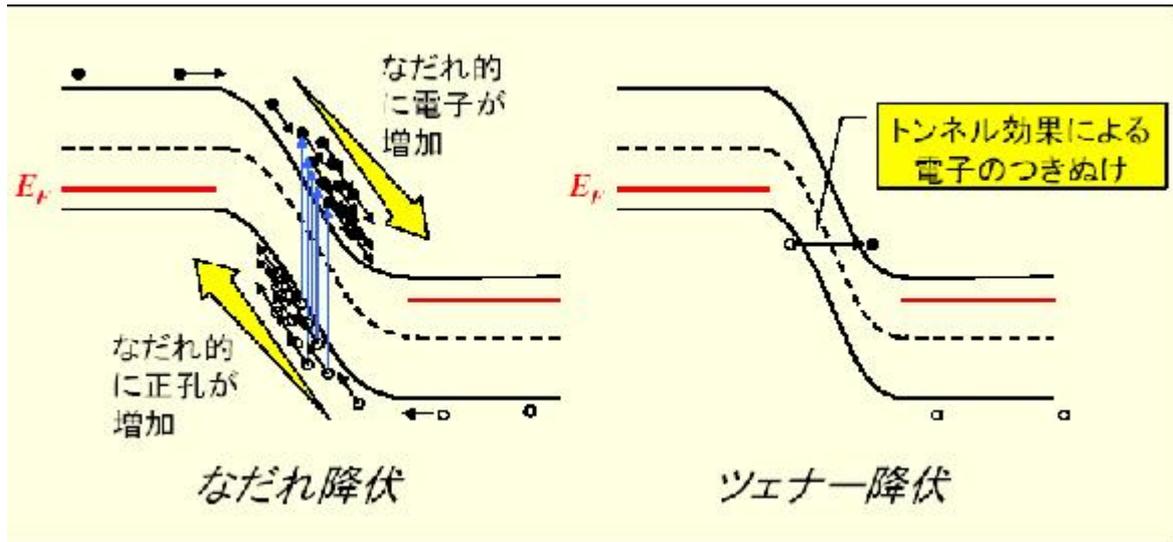


図 4.2: なだれ増幅とツェナー増幅

4.1 半導体光検出器

上には後述する半導体デバイスを理解する上で必要な性質を述べたが、実際に半導体をどのように光検出器として用いていくのかについて本節で述べる。光信号を高感度かつ高速の応答性で検出する目的で作られる pn ダイオードがフォトダイオードである。動作領域は、逆バイアス領域に設定される。図 4.2 にその構造を示すように通常は光は接合面に垂直に表面から入射するが、Si などのフォトダイオードでは、基礎吸収¹が起こる波長領域においても μm オーダーの深さまで侵入する。したがって、ダイオードを逆バイアスして空乏層を広げることによって、空乏層内の励起キャリア数を増やすことが有効である。動作としては暗状態ではわずかな逆方向飽和電流しか流れないが、光が入射すると光電流が流れ光検出器として働く。

応答速度において、図 4.3 a) の pn 接合ダイオードでは、励起キャリアは中性領域と空乏層と両方で発生する。このうち、空乏層内は高電界で大きなドリフト速度で移動するが、中性領域の発生キャリアは空乏層端までは拡散で移動する。中性領域が厚いとこの部分の走行時間が大きくなり、応答速度は遅くなる。そこで、図 4.3 b) のように p 層と n 層の間に i 層を挟んだ、pin 型ダイオードが使われている。この構造では、広い範囲にドリフト電界がかかり、光電流の大部分をドリフトで高速に引き出せるので、高速応答性に優れる。

応答速度を決めるもう一つの要因は、CR 時定数である。ダイオードは接合容量をもっているので、ダイオードの内部抵抗や外部の回路の抵抗成分との時定数で応答特性が劣化する。逆バイアスで空乏層を広げる、あるいは pin 構造をとることが接合容量を低減させ、応答速度の向上に貢献することが分かる。また接合面積を小さくすることで応答速度の向上が見込める。

フォトダイオードの逆方向バイアスを大きくしていくと、やがてなだれ増倍現象による電流の増大が見える領域になる。ここでは、光電流がなだれ増倍によって数十から数百倍になり、増倍利得を持ったフォトダイオードとして動作することが可能になる。この動作を目的として作られたものがアバランシェフォトダイオード (APD) である。

なだれ増倍は非線形性の強い不安定な現象であるから、素子構造やバイアス電圧の高安定制御などに留意する必要があるが、高速応答性を維持して大きな利得を得る素子として重要な役割を担っている。

これらのフォトダイオードは一般的に光通信におけるキーデバイスとなっている。

フォトダイオードにおいて加える逆電圧により出力される信号の大きさは変わるがその様子はガス検出器におけるものと似ている。この様子を図 4.4 (b) に示す。入射光量と出力信号の間に比例の関係のある領域から入射光量に関わらず一定の信号を出す領域に逆電圧を上げていくにつれ変化していく。光量に関わらず信号

¹光電効果が起こるよりもエネルギーが低い場合に起こる吸収

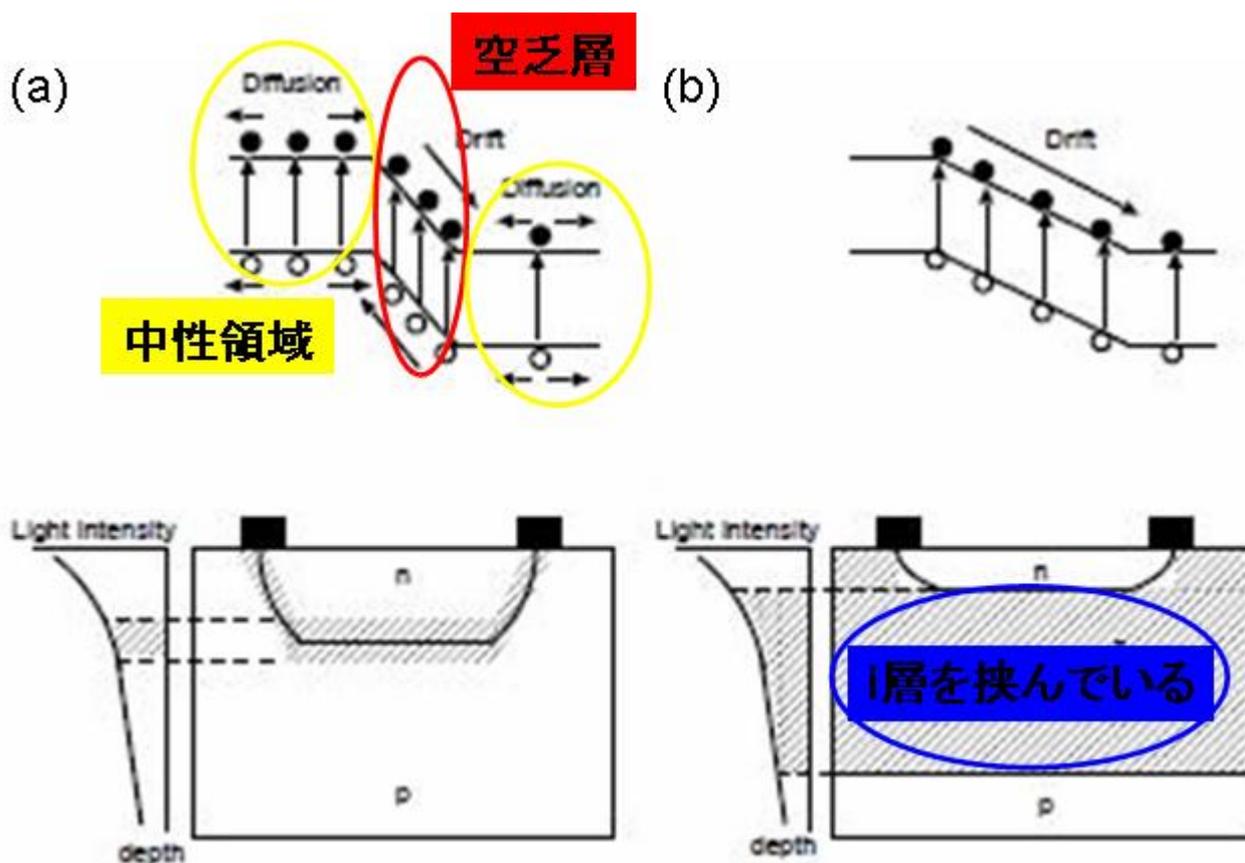


図 4.3: フォトダイオードの構造とエネルギーバンド

が一定になる状態のことをガイガーモードという。半導体光検出器においてはその用途に合わせこれらの逆電圧のどの領域を用いるか様々である。

4.2 MPPC

4.2.1 MPPC の構造

MPPC における基本構造は図 4.5 で示すように一枚の p^+ 型基礎半導体の上にダイオードのピクセルを設けている。ガードリング (n_- 型半導体で構成) は隣接するピクセルへの電荷漏れを防ぐ役割を担っている。電荷増幅に関しては p^+, n^+ ダイオードにおける空乏層で起こる。substrate p^+ に関してもドリフト領域となっており高速応答性を考えた構造となっている。

各ピクセルについては限定ガイガー領域 (Limited Geiger Mode)² と呼ばれる電圧領域で駆動し入射光量に関わらず一定量の信号を放出する。これによって LGP と同じく光量をデジタルに検出することが可能でありかつ高い p.e. 分解能を得ることが期待される。

ガイガーモードで駆動するピクセルから放出された信号は Al の導線の流れ、読み出しワイヤーから読み出されるが、このとき表面に各ピクセルに対して実装されている Si 抵抗 (100 – 200kΩ) によって放電したピクセルにかかる電圧をブレイクダウン電圧よりも下に押さえる。(信号が流れることで電圧降下が起こる) またこの抵抗はデカップル (個々のピクセルを独立させる) の役目も担っており隣接するピクセルからのノイズが入り込むのを防いでいる。

MPPC は浜松ホトニクス株式会社が現在開発中の光検出器でこれが完成することで日本における高性能光検

²ブレイクダウン電圧から 10 – 20 % 上の電圧領域のこと

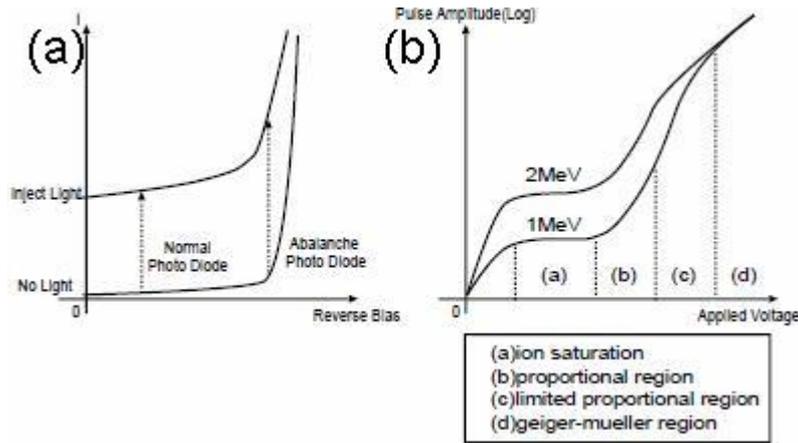


図 4.4: 左:フォトダイオードにおける逆電圧と信号 右:ガス検出器の電圧と信号

出器の調達が可能になる。具体的な内部構造は明かされていないが、クエンチング抵抗の値や不純物濃度を調整することにより複数のプロトタイプを現在作っている。

4.2.2 MPPC の一般性能

MPPC における一般的な性能は次のようになる。

- Gain

ガイガーモードにおいて入射光量に関わらず出力信号は一定である。そこで出力信号を Q_{out} 、ゲインを G とすると

$$G = \frac{Q_{out}}{e} \quad (e = 1.6 \times 10^{-19} C) \quad (4.1)$$

となる。また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ピクセルの接合容量を C_{pixel} とすると

$$Q_{out} = C_{pixel}(V - V_0) \quad (V \text{ 及び } V_0 \text{ は逆電圧だが } + \text{ とする}) \quad (4.2)$$

となる。ここで V は MPPC の印加電圧、 V_0 はガイガーモードが開始する電圧値である。

この関係からゲインの測定を行うことで各ピクセルにおける接合容量とガイガーモードの始まるバイアス電圧が分かる。

- Noise

MPPC においてノイズの主な要因は熱励起によるノイズであり熱的に励起されたキャリアが空乏層内で増幅されて生成されるノイズがほとんどである。本研究においてもこのノイズレートの測定を行っており、MPPC についてはこのノイズが、なるべく低い値であることが望まれている。

- Efficiency と Photon Detection

PMT などの電子管において Efficiency は光電面の量子効率で決まるが、MPPC においては次の式で Efficiency は決まる。

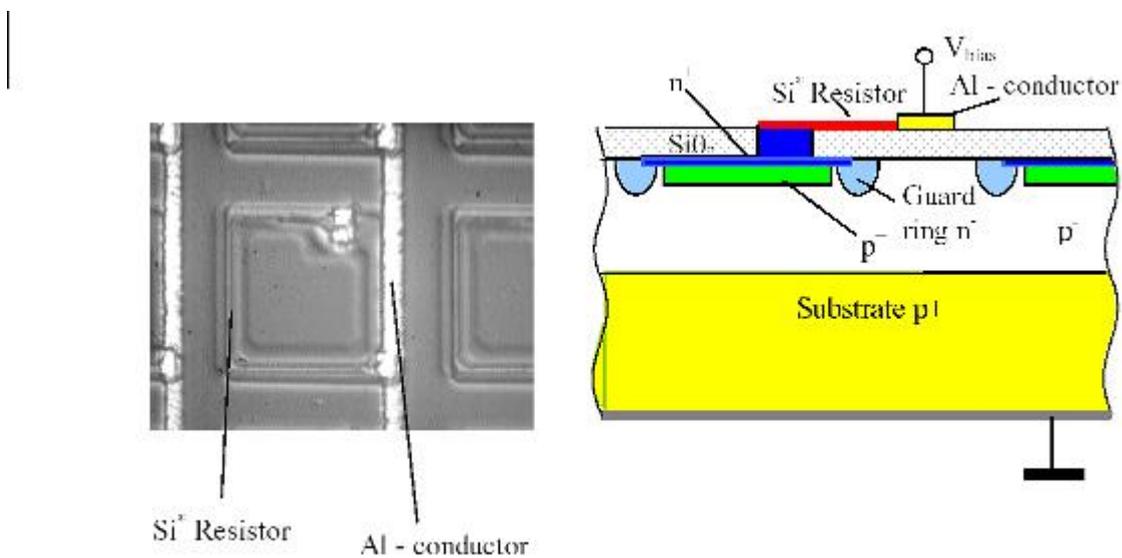
$$\varepsilon = \varepsilon_q \times \varepsilon_{geiger} \times \varepsilon_{geometry} \quad (4.3)$$

ε_q : 半導体の量子効率 ε_{geiger} : Geiger 放電の起こる確率 $\varepsilon_{geometry}$: 構造による量子効率 (有効受光面積など)

Efficiency は実際の光子検出の際に次のように関係してくる。

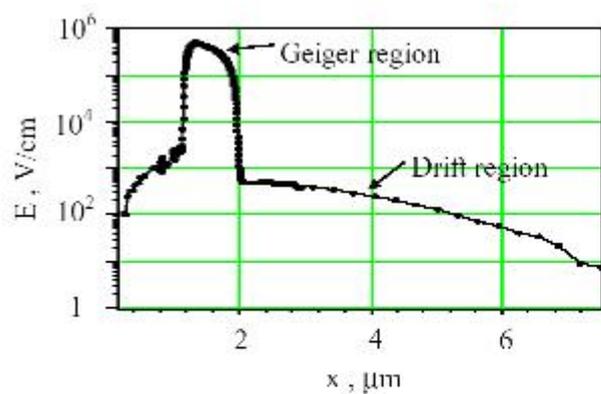
$$N_{pix} = N_{max}(1 - \exp(-\frac{\varepsilon N_{ph}}{N_{max}})) \quad (4.4)$$

ここで N_{max} は検出器のピクセル数、 N_{ph} は検出器に入射する光子数、 N_{pix} は実際に応答したピクセル数である。これは一つのピクセルについて平均 N_{ph}/N_{max} 個の光子が入射しており少なくとも一つ光子が入射し放電する確率は Efficiency を含めてポアソン分布より $1 - \exp(-\frac{\epsilon N_{ph}}{N_{max}})$ となる。これが N_{max} 個のピクセルについて成り立つので全体的な期待値は式 4.4 のようになる。



ピクセルの写真

基本構造図



電場分布

図 4.5: MPPC の構造 (空乏層の厚みは $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 程度で電圧勾配は $(3 - 5) \times 10^5 \text{V/cm}$ となっている)

第5章 MPPCの性能評価

前章までは本研究に関する諸々の知識及び概念について述べてきた。ILC 実験において MPPC の利用価値として

- 増幅領域が狭いことからカロリメータにかかる磁場の影響をあまり受けない。
- 単価が\$10 程度であれば granularity の高いカロリメータを作る際に低予算ですむ

という点が挙げられる。この2点は従来使ってきた PMT にはないもので非常に魅力的である。本章では本研究である新型光検出器 MPPC の性能評価及びそこから導き出される問題を述べていく。

5.1 MPPC の評価項目

本研究では MPPC の主に個体差による性能の違いを調べる為の測定を行っている。項目としては、

- Gain
- Noise Rate
- 同じ電圧をかけた場合の性能のばらつき

となっている。また本研究では素子全体としての評価を行っている¹。

尚、現在のところ MPPC に対する性能的な要求として、以下のようなものが挙げられる。

- 高いゲイン (10^6 程度) 少光量イベントも無光状態の信号とはっきり区別できるように
- ゲインの各ピクセルにおける一様性 uniformity の高いカロリメータに
- 素子ごとの性能の統一性

本研究ではまた前章で述べた MPPC の動作を確認・把握することも目的としている。

¹ILC-CAL に所属する他大学では MPPC のピクセルの評価をやっているところもある

5.2 評価対象とした MPPC

5.2.1 外部構造

本研究では浜松ホトニクス(株)より購入している MPPC を評価の対象としている。図 5.1, 図 5.2 に MPPC の全体像およびピクセルの拡大写真を載せる。尚全体的な大きさとしては基本的にダイオードなどの一般的な回路素子と同程度なので、回路上に半田付けしてパッケージの足に逆電圧をかける必要がある。

図 5.2 の MPPC においては Geometrical Efficiency が 25 % 程度になっており、有効受光域の広域化が望まれる。またこの MPPC のパッケージにおいては素子全体にプラスチックが保護の為に設けられており、実験においてファイバー等に接着する際やレーザーを当てる際に、光を拡散してしまう。MPPC についてはまだこのようなパッケージングにおける改良は可能であり、よりこちらの用途に合わせた構造をモデリングする必要がある。

現在 MPPC に要求されている構造的な要求として

- 受光面はファイバー半径により決まり、直径 1 mm
- ピクセル数は ECAL のためには、数千以上、HCAL だと 1000 程度。

が今のところ挙がっている。

5.2.2 内部構造

MPPC の内部構造については企業秘密となっているので具体的なことは分からない。以下に研究対象とした MPPC のパラメータ表を示す。上記のパラメータのうち V_{op} は MPPC の Gain が 2.75×10^5 となる電圧、Dark Noise (本研究では Noise Rate と同じ意味) のうち 0.5p.e.thr は MPPC に V_{op} の電圧をかけたときの最小信号以下に閾値を設定した時の Noise Rate, 1.5p.e.thr は MPPC に V_{op} の電圧をかけたときの光電子による最小信号の 1.5 倍の値に閾値を設定した時の Noise Rate である。

5.3 実験装置

実験を行った環境については以下のように設定した。尚 LED と MPPC の間は 20cm ほど離している。温度変化については恒温槽内の温度が一定になるまで 10 分程度待って測定している。

- 電源：KEITHLEY 2400
- LED：星和電子 SDDDB16000A1
- Output Register:HOSIN C004
- ADC:HOSIN C009 16ch
- Discri:Lecroy 4416 16ch
- Scaler:KEK8807 C1013 12ch × 2

セットアップは図 5.4。また MPPC については以下の回路で信号の読み出しを行っている。電源からの Low Pass Filter と交流信号を取り出すコンデンサの組み合わせというシンプルな組み合わせである。図 5.5 のクエンチング抵抗は MPPC のものである。

5.4 測定結果

5.4.1 応答波形

まず応答波形について見てみる。(図 5.6) MPPC の波形であるが信号幅が $60 \sim 80ns$ である。この応答速度を決める主な要因は AMP の時定数と MPPC 自身の空乏層の厚み、クエンチング抵抗がある。また p.e. ピークが見えることから原理通り整数倍ごとに信号がでていのように見える。

5.4.2 Gain

Gain は pixel の容量とガイガーモードの開始電圧とバイアスの差で決まる。測定環境は、

- LED に与える電圧・時間幅 : $2.5V \times 10ns$
- ADC へのゲート入力 : $100ns$ 程度 (MPPC の信号幅より少し大きめに)

である。LED にかける電圧は ADC 分布の p.e. ピークの高さを見て決定した。

-バイアスと Gain

バイアスと Gain についてバイアスを大きくすると Gain は第 4 章で述べたように空乏層 (高電界領域) が広がることから大きくなる。また、Gain を測定する際に用いる ADC 分布をした図 5.7 に示す。

この ADC 分布の Pedestal(0p.e. ピーク) と 1p.e. ピークの ADC count の差から MPPC の Gain を知ることができて、

$$Gain = \frac{d \times r}{A \times e} \quad (5.1)$$

d : pedestal(p.e.) と 1p.e.peak の ADCcount の差, r : ADC の分解能, A : アンプのゲイン², e : 電子の電荷 [$1.6 \times 10^{-19}C$]

これを各印加電圧を変えて求めた Gain をグラフ化させると図 5.8 のグラフになる。図 5.8 の赤い直線は

$$Gain = C(V_{bias} - V_0)/e \quad (5.2)$$

C : Pixel capacitance, V_{bias} : MPPC にかけた印加電圧, V_0 : Breakdown Voltage, e : 電子の電荷と表すことができる。そして、Gain の測定ではこの C と V_0 が重要な値となる。

これを 400 個について行い性能のばらつきを見る。

5.4.3 Noise Rate, Cross-talk

ノイズレートについて見てみる。ノイズレートは以下の条件で測定している。

- Discriminator の Threshold を変えていき、各点で Noise Rate を測定する。(Threshold Curve をとる)
- 1p.e.peak のところで急激に Noise Rate の値が落ちるため、その場所を参考にし 0.5p.e.thr と 1.5p.e.thr 値をとってくる。

また、図 5.9 に典型的な Threshold Curve をしめす。ここから、Noise Rate(0.5p.e.thr, 1.5p.e.thr とともに) が導き出すことができる。また、MPPC の pixel が隣り合った pixel に影響を与え、信号を出さしてしまう値として Cross-talk probability という量を定義する。そして、Cross-talk probability は

$$Crosstalk = \frac{NoiseRate_{1.5p.e.thr}}{NoiseRate_{0.5p.e.thr}} \quad (5.3)$$

と表すことができる。

Gain, pixel capacitance, breakdown voltage, Noise rate, Crosstalk の値は、MPPC をカロリメータに用いる際に MPPC の性能を調整するために必要な値となる。

これを 400 個 (1 月)、351 個 (2 月) について行い性能のばらつきを見る。

5.4.4 400 個 + 351 個の性能のばらつき

400 個 + 351 個の MPPC の性能のばらつきを見る。ばらつきを見る性能は

- Pixel capacitance
- Breakdown Voltage

という MPPC の性能によるもの 2 点と、我々の用途で用いるときに知りたいばらつき

- 全ての MPPC に同じ電圧をかけた場合の MPPC の Gain のばらつき
- 全ての MPPC に同じ電圧をかけた場合の MPPC の $NoiseRate_{0.5p.e.thr}$ のばらつき
- 全ての MPPC に同じ電圧をかけた場合の MPPC の Cross-talk probability のばらつき

の 3 点である。まず、最初に Pixel capacitance のばらつきを図 5.10 に示す。つぎに Breakdown Voltage V_0 のばらつき図 5.11 に示す。

また MPPC をカロリメータに組み込む際には全ての MPPC に同じ電圧をかけて使用できるか、それとも浜松のデータ及び一度我々で測定したデータを参照して個別に電圧を設定したほうが良いのかを知ることは重要である。そのためすべての MPPC に同じ電圧をかけて様々な電圧で調べる必要がある。

調べた結果としては、電圧によってばらつきが大きく変わることはないが、やはり個体差があった。

Gain のばらつきは図 5.12 のようになり、各電圧で 14 ~ 28 % のばらつきが見受けられた。

また、Noise Rate のばらつきは図 5.13 のようになり、各電圧で 20 ~ 60 % のばらつきが見受けられた。そして、Cross-talk probability のばらつきは図 5.14 のようになり、各電圧で 27 ~ 70 % のばらつきが見受けられた。結果としては、MPPC をカロリメータに用いるには全て同じ電圧をかけて使うには性能差が大きいため、今回取ったデータや浜松ホトニクスからのデータを参照し、個別に電圧を決めてかけることが望ましいと考えられる。

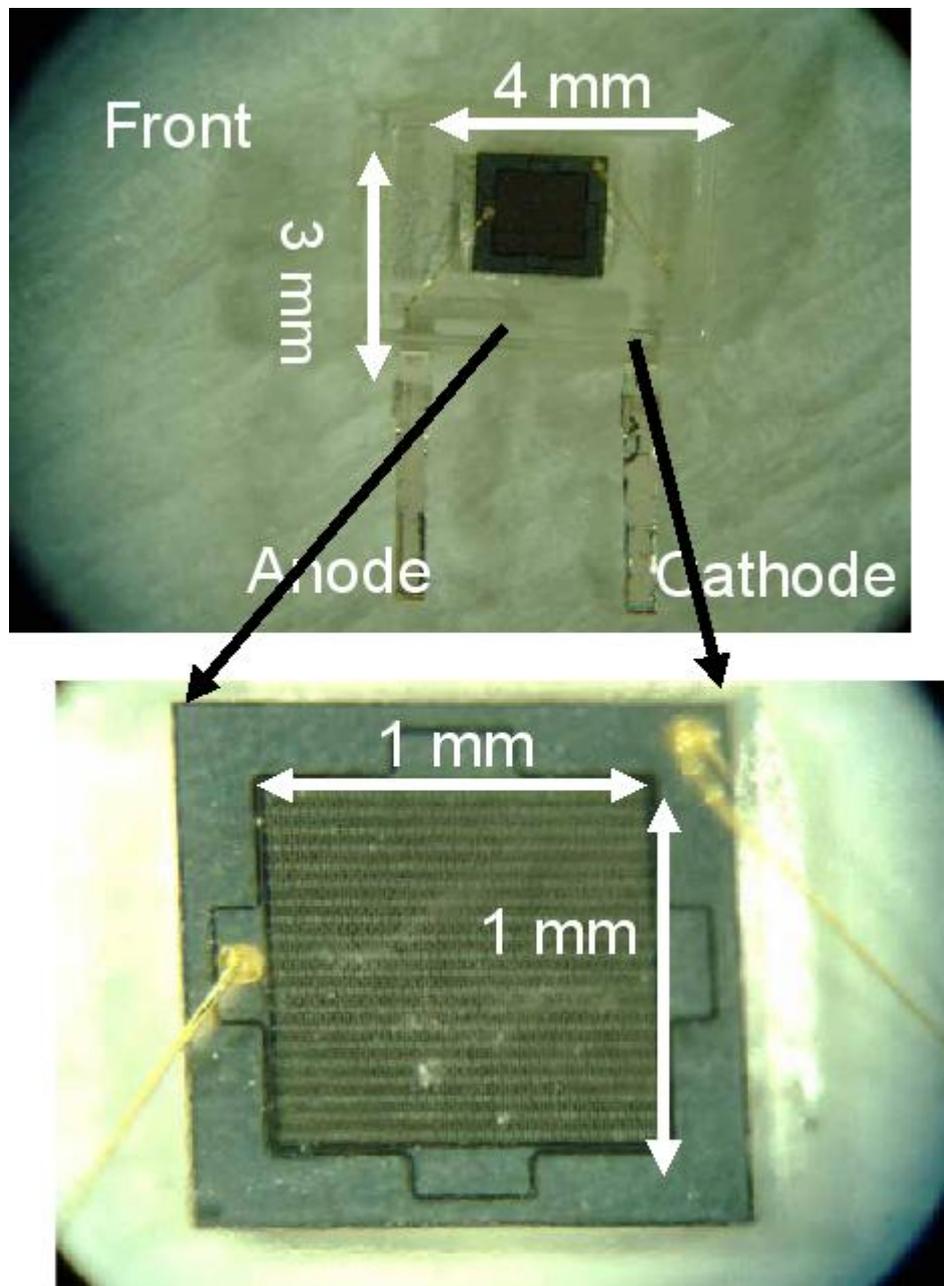


図 5.1: MPPC の全体像

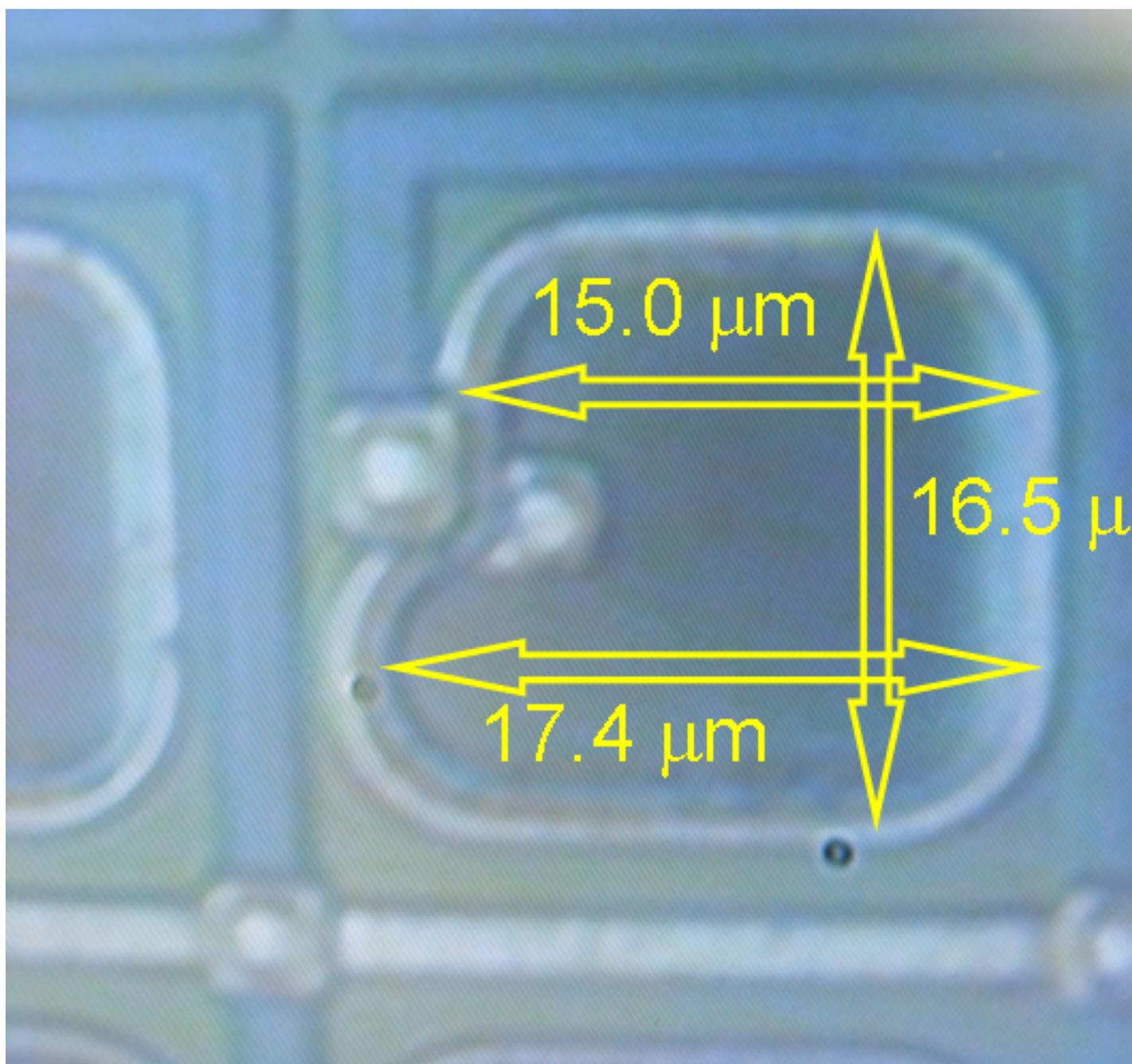


図 5.2: MPPC の pixel 部分の拡大写真

型名	Sample No.	Vop	Gain	dark(0.5thr)	dark(1.5thr)
S10362-11-025MK	33	76.54	2.75E+05	152	2

図 5.3: MPPC のパラメータ表

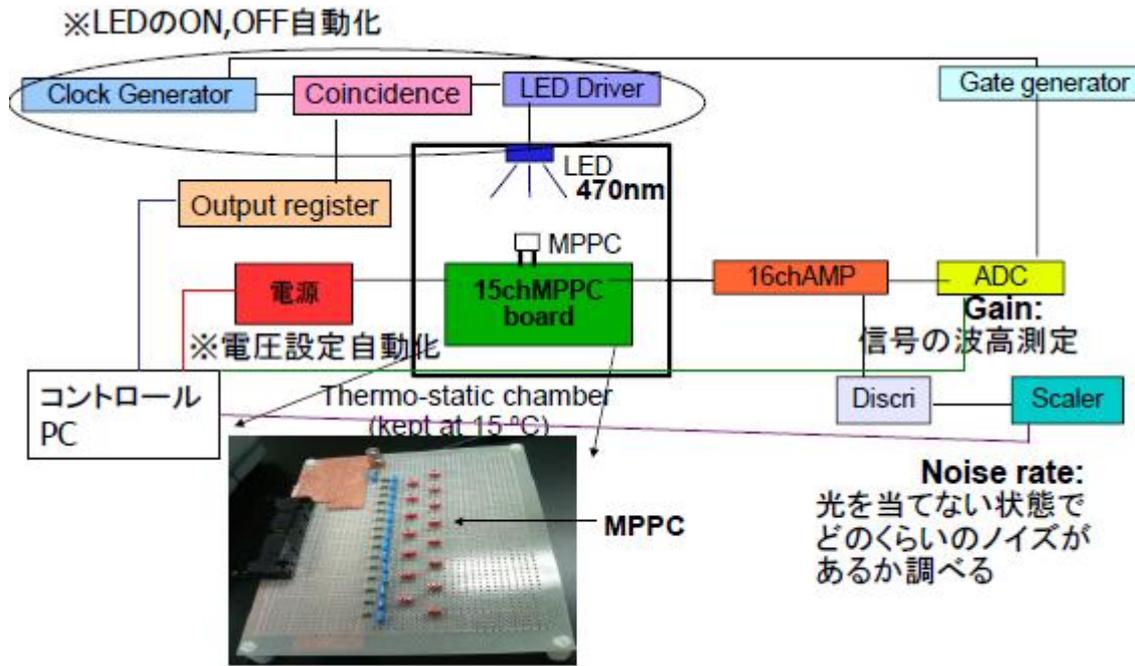


図 5.4: 実験装置の図

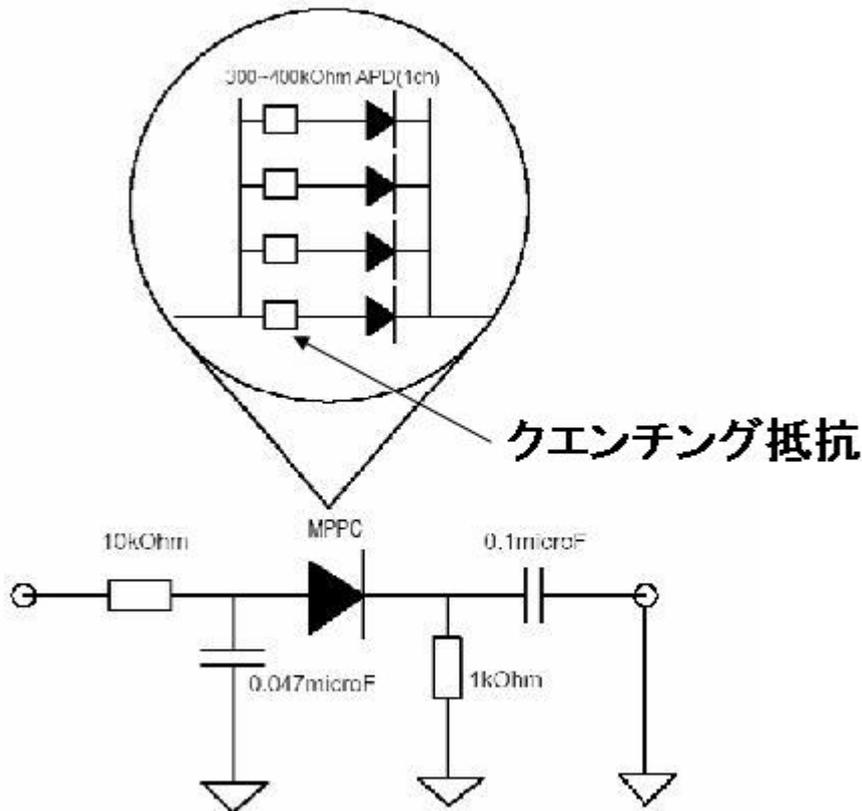


図 5.5: MPPC の読み出し回路

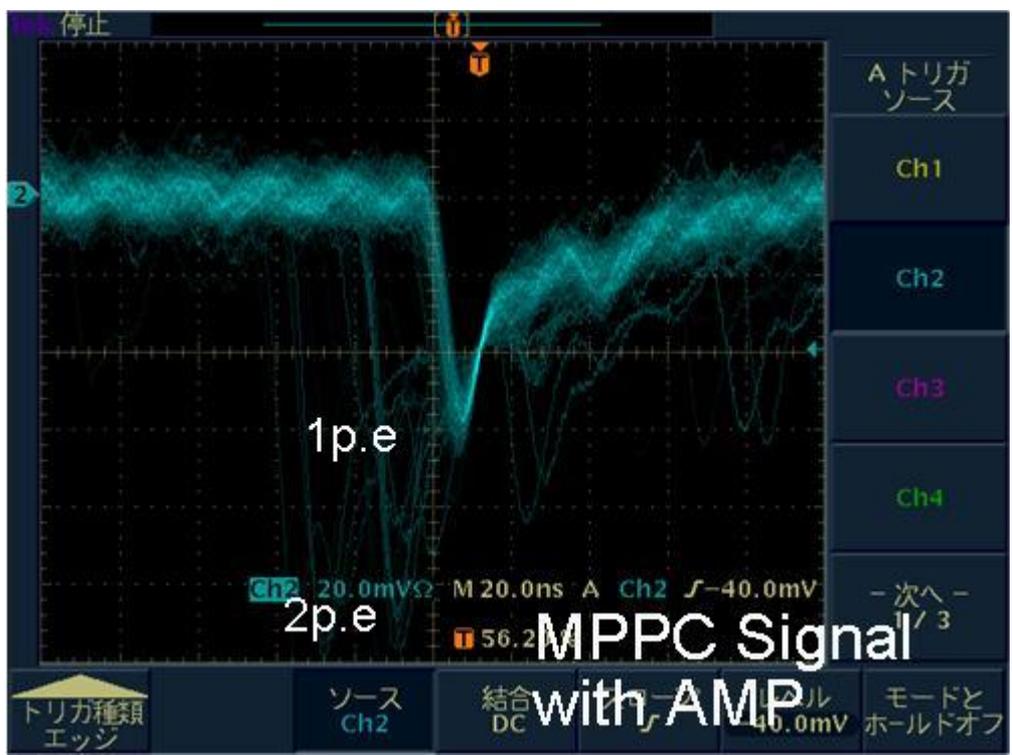


図 5.6: MPPC の応答波形

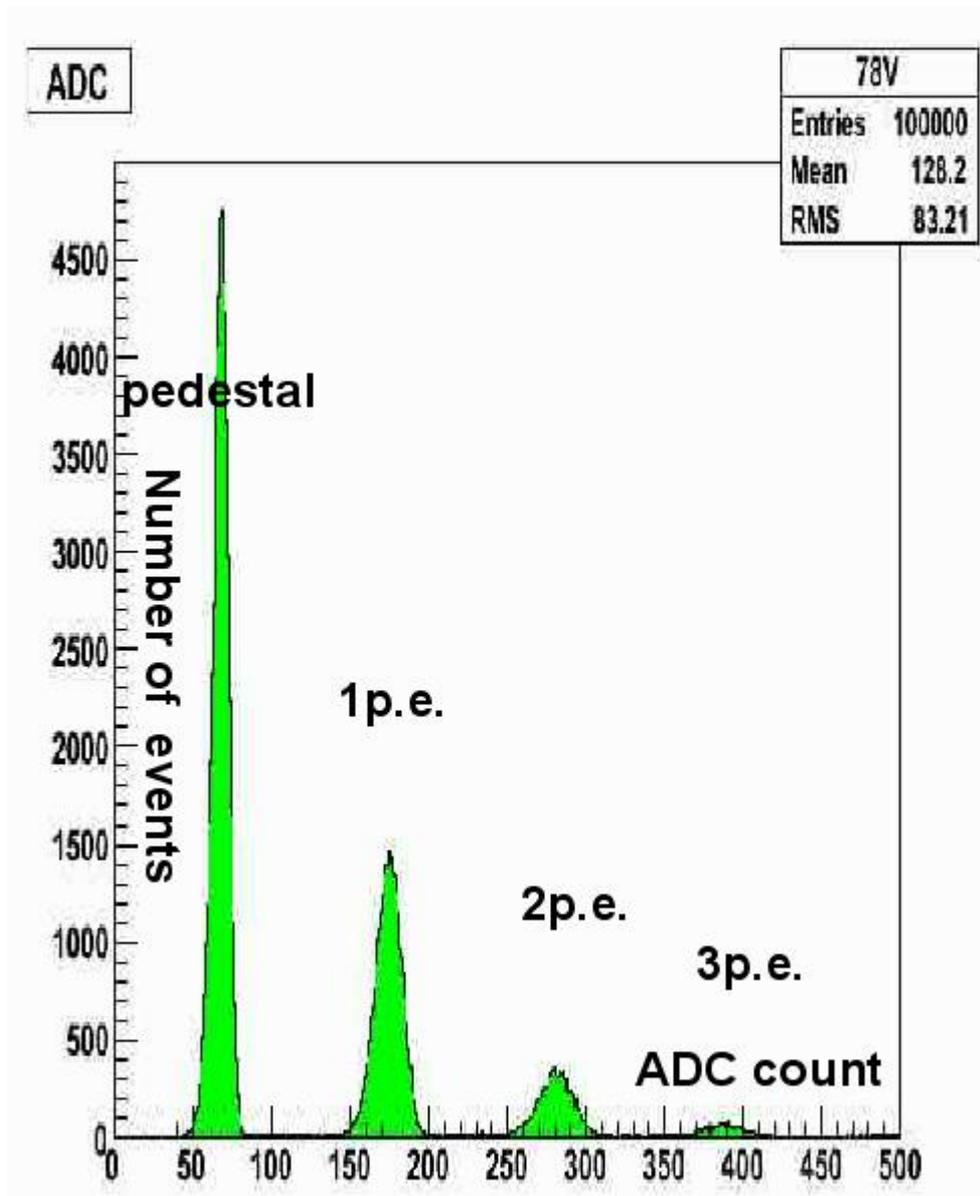


図 5.7: ADC 分布

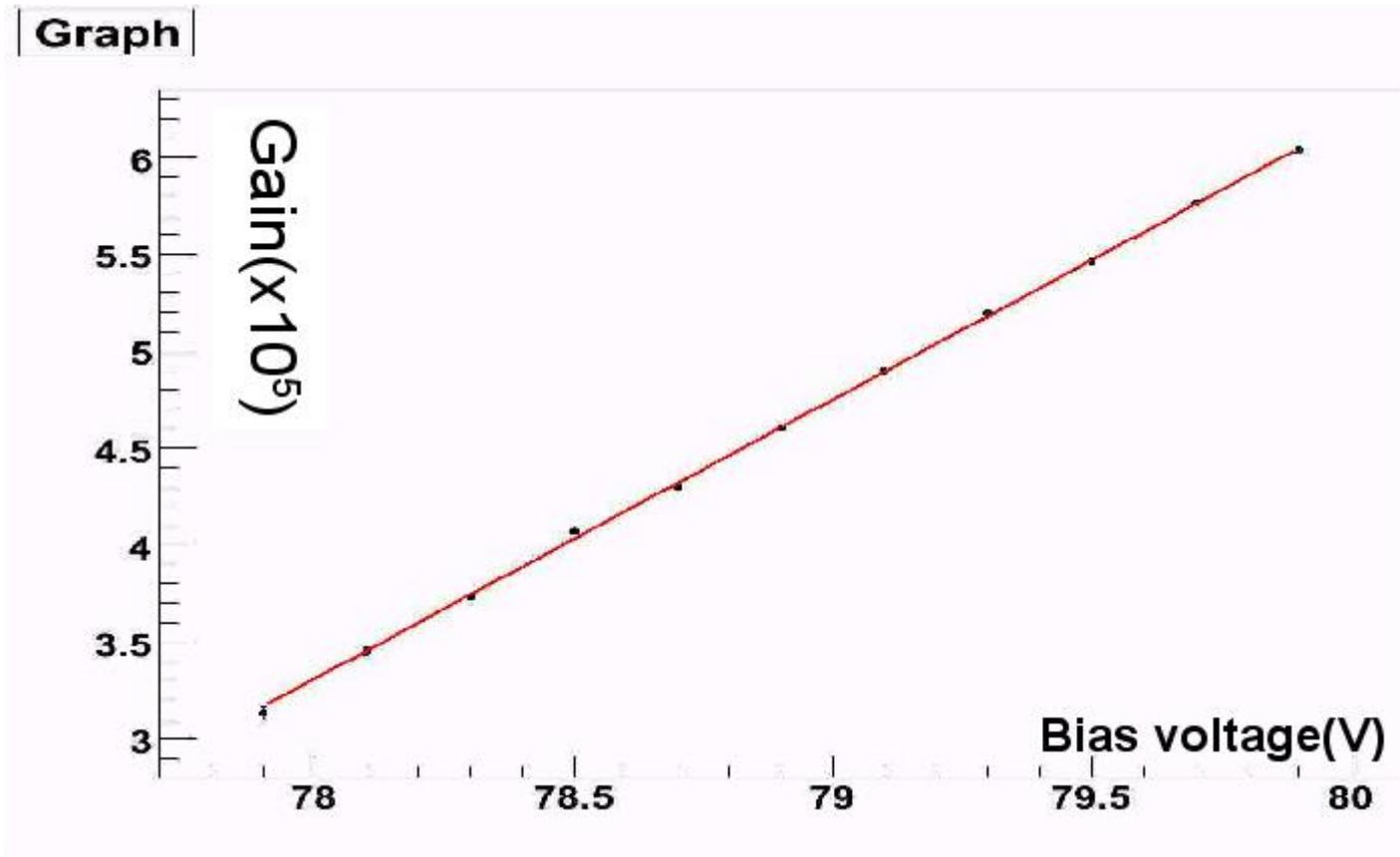


図 5.8: Gain と MPPC にかかる Bias 電圧の関係

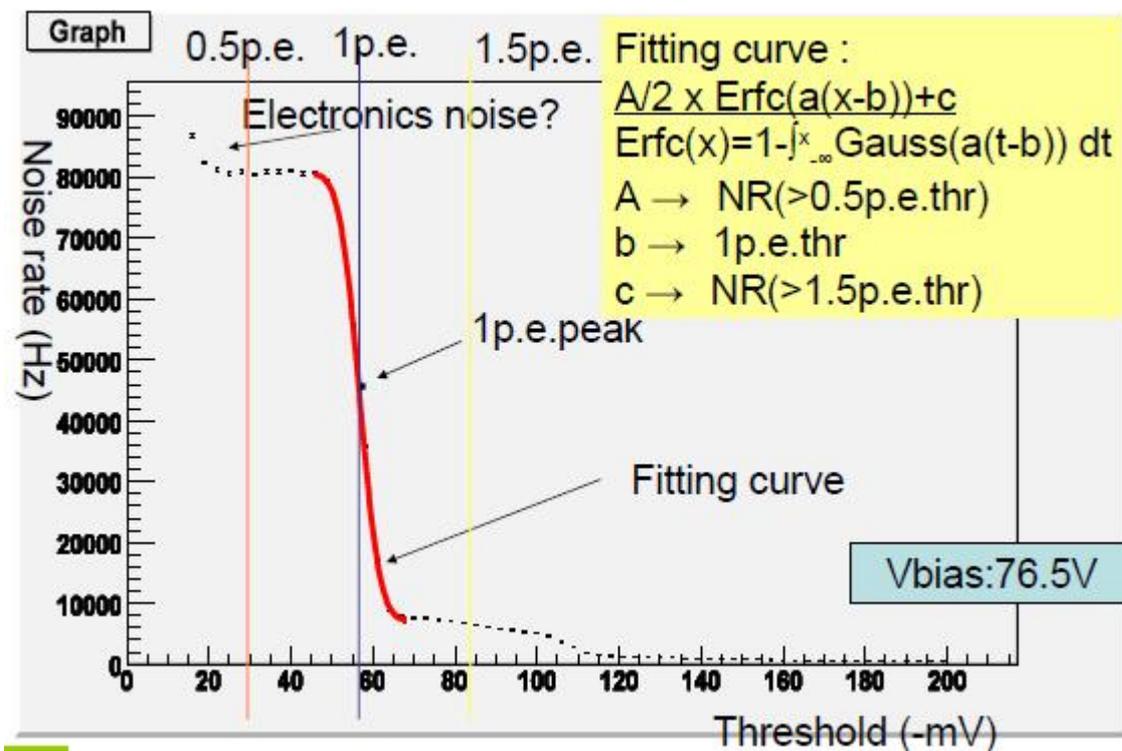


図 5.9: Discr の Threshold を変えていった時の Noise Rate の変化

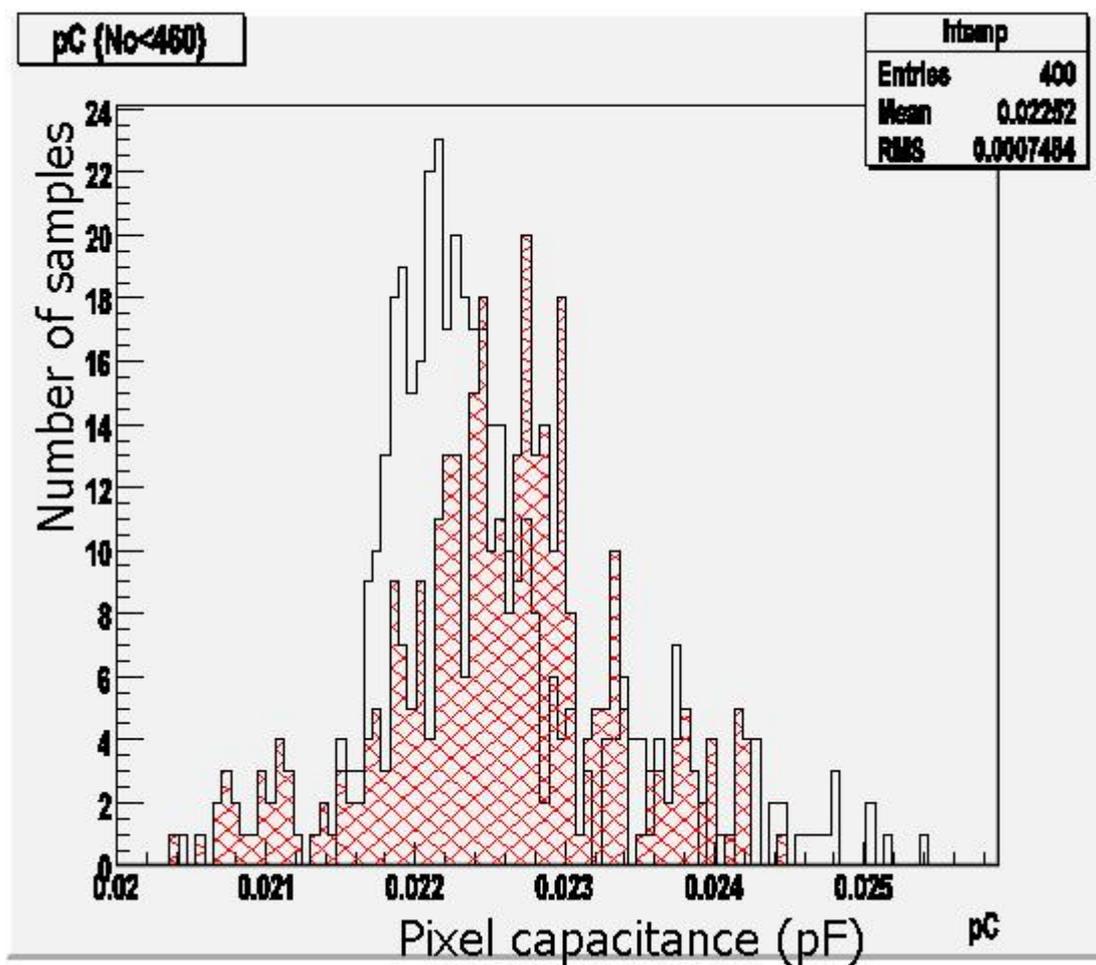


図 5.10: Pixel capacitance のばらつき, 黒いヒストグラム : 400 個の結果、赤い網掛けのヒストグラム : 351 個の結果

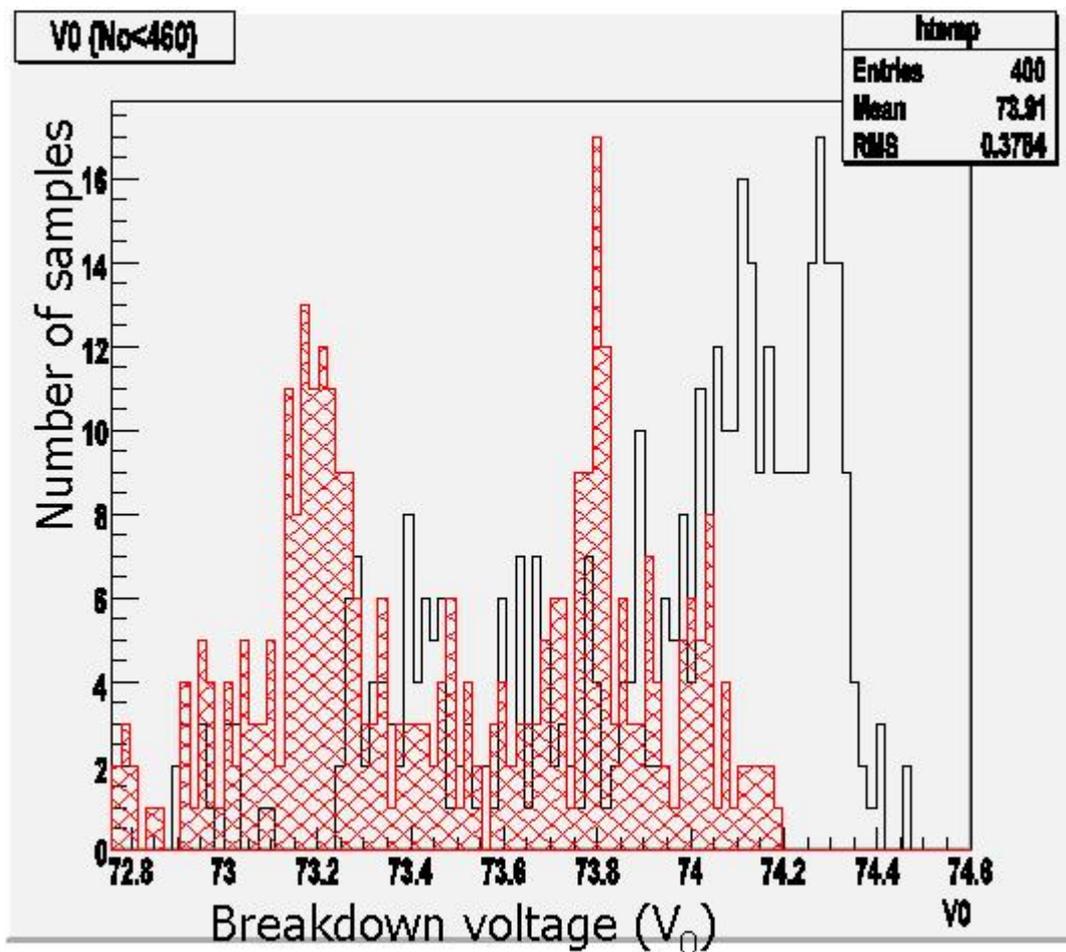


図 5.11: Breakdown Voltage(V_0) のばらつき, 黒いヒストグラム : 400 個の結果、赤い網掛けのヒストグラム : 351 個の結果

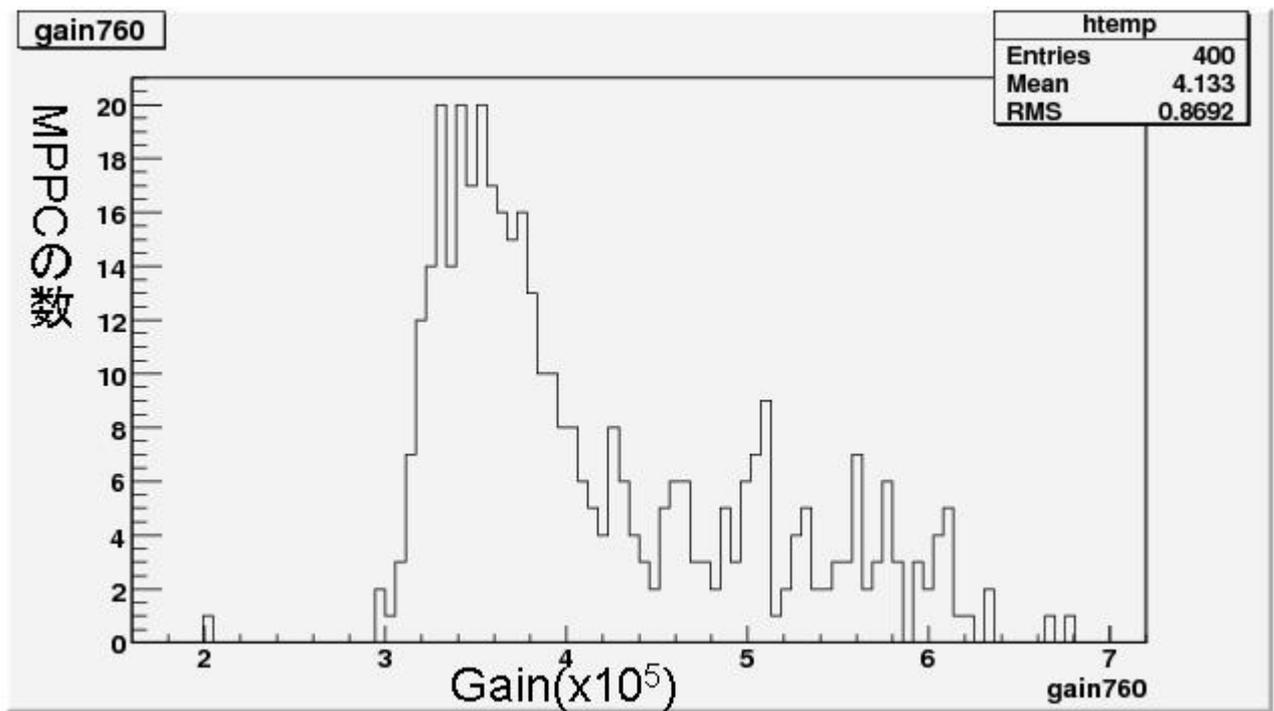


図 5.12: 全ての MPPC に 76.0V をかけた場合の MPPC の Gain のばらつき

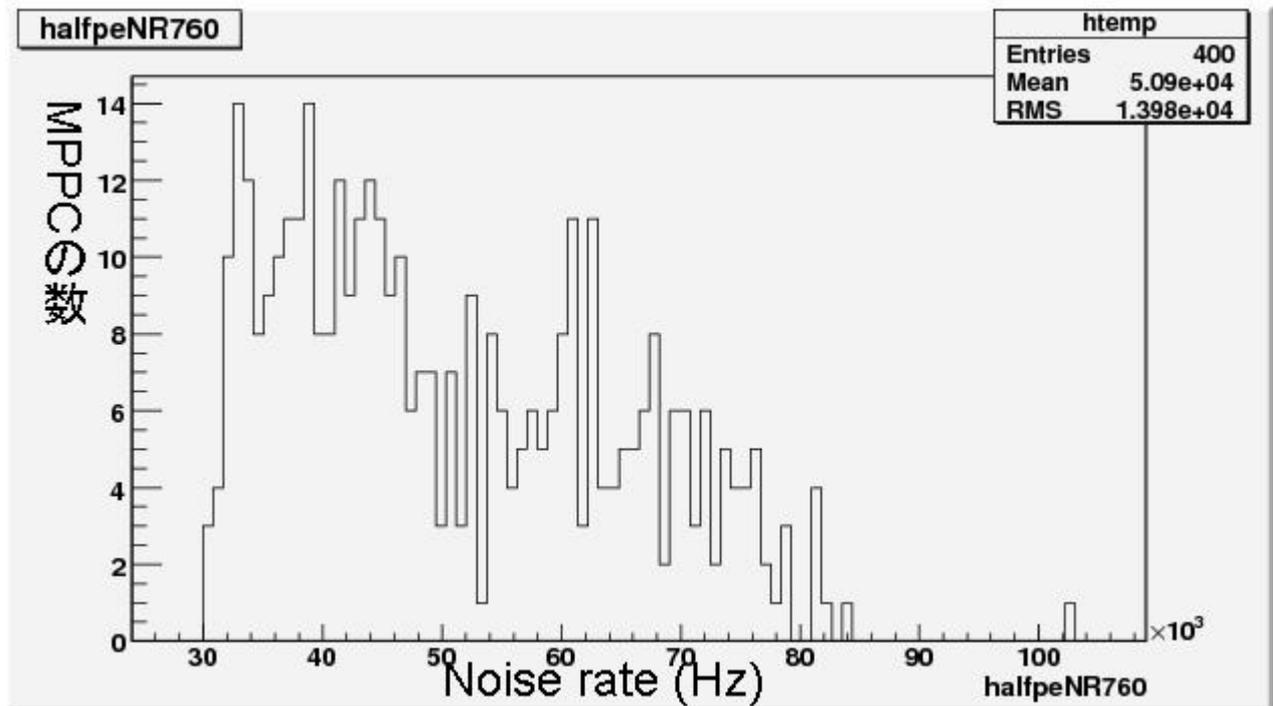


図 5.13: 全ての MPPC に 76.0V をかけた場合の Noise Rate(0.5p.e.thr) のばらつき

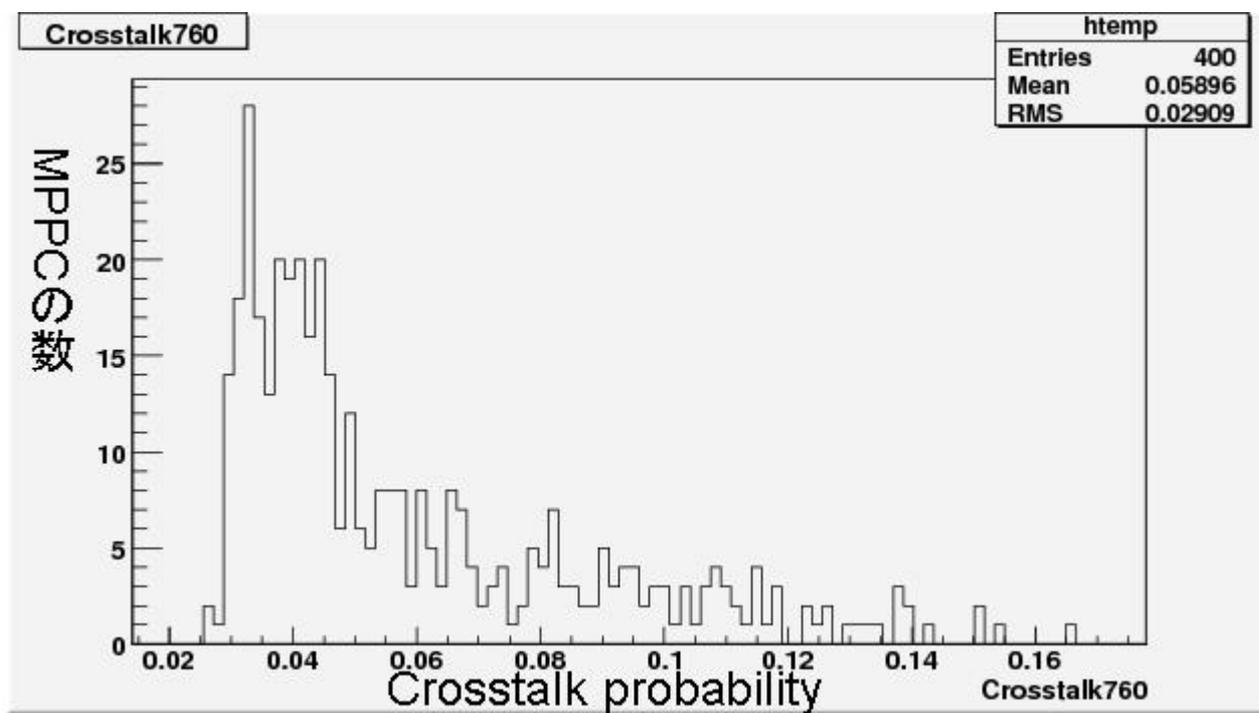


図 5.14: 全ての MPPC に 76.0V をかけた場合の Cross-talk のばらつき

第6章 まとめと今後の課題

本章ではこれまでの研究のまとめと今後の課題について述べる。

6.1 測定結果のまとめ

評価については以下のように結論付けることが出来る。

- 本研究で対象とした MPPC はカロリメータが求めている性能を満たしている。
- 各測定項目について浜松ホトニクスとは独立に短期間にデータを取ることができた。(1日で100個)
- 各測定項目について同じ電圧下でのばらつきは大きく、カロリメータに用いるには今回の測定のデータ及び浜松のデータを参照し MPPC にかける電圧を決定する必要がある。

6.2 今後の課題

今回の評価に関して以下のような問題を抱えている。

- 現在使用しているアンプは他の研究グループで使っているものであり、MPPC に対して最適化されたアンプ及びエレクトロニクスが必要
- 測定環境における並列化・自動化により 400 個 + 351 個の測定を終えることができたが、今後数千～万の数の MPPC のテストの必要があるかもしれないため、測定の更なる高速化・信頼性が必要となる。これについては後継されるかたにそのデザインを期待するものとする。
- そもそもこのデバイスが候補として上がった理由に磁場・放射線に対する性能の安定性がある。現在信州大学には強い定常磁場・放射線を発生させるものがなく、今回の研究については測定できなかった。しかし今後この測定は必要になることは歴然である。この測定については現在放射線に関しては東工大が研究を開始し、磁場に関しては KEK 測定器開発室が立ち上がって現在準備中である。

以上のことが今回の研究より考えなければならぬとされる問題である。

MPPC 開発上の問題：MPPC は現在開発中のデバイスであるが、開発に関して以下のような課題が挙げられる。

- 現在 MPPC の詳細な内部構造は企業秘密とされておりその構造はわかっていない、しかしこういった構造におけるパラメータがどのように MPPC の性能に関わってくるかを理解することは評価および検査する側にも求められることであるといえる。
- 本研究で用いた MPPC はファイバーを接着するといった、カロリメータを作っていくうえでこういった外部構造のデザインを選択したがこのパッケージングではプラスチックで光が乱反射し、光検出効率が測定困難であるという点があるため、また新しいパッケージングを頼まなければならない可能性がある。

- ILC で用いるカロリメータは大光量イベントが起きるため、サチュレーション¹の影響を少なくするためなるべく多くの pixel 数が欲しいわけだが、MPPC の構造上の要求よりこれを実現する為には 1mm 四方という極限られた空間に対して数千という多くのピクセルを設けなければならない。または、3mm 四方の浜松ホトニクスで開発中のものを用いるためにカロリメータのデザインを変えて行かなければならない可能性がある。

これら3点が現時点における問題である。今後浜松ホトニクスと連携して解決していく必要がある。このように開発・評価ともに問題を抱えているが、今後 KEK 測定器開発室や他大学とも連携していき解決できると考えられる。

¹ピクセルの数が有限であるため、入射光量に対して信号強度が線形的なあがり方を見せない