修士学位論文
次世代線形加速器実験のための
電磁カロリメータの開発研究

神戸大学理学部自然科学研究科
高エネルギー物理学研究室
038S117N
中村 龍平
指導教官　川越 清以

2005 年 2 月 10 日

概 要

現在計画中の電子陽電子線形加速器実験においては、標準理論で予言されながらいまだ見つかっていない最後の粒子であるヒッグス粒子の探索、発見された場合その質量の精密測定、また、標準理論を超える物理の探索など様々な要請から、極めて高性能の測定器が要求される。

カロリメータにおいて、上記物理現象ではジェットと呼ばれる複数の粒子からなる「束」が一度に入射する場合が多く、ジェットの質量を精度よく再構成することが新しい物理現象を解明するための必要条件となっている。しかし、ジェットの質量を精度よく再構成するためには、複数の粒子からなる「束」を 1 つ 1 つの粒子の寄与に解きほぐさなければならない。そのため、カロリメータはできるだけ細分割しなければならず、それに伴い、読みだしチャンネルは膨大になっていく。さらに、カロリメータ前物質量を減らすために、トラッキングチェンバーに用いる 2 ~ 3T (テスラ) ソレノイド磁石は、カロリメータの外に設置することが想定されている。

カロリメータの検出体にプラスチックシンチレータを用いる場合、その微弱光を検出するための光検出器が必要となってくるが、上記要請のため、光検出器は多チャンネル読み出しが可能で、強磁場中でも動作可能である必要がある。

我々カロリメータグループでは、今までになく細分割化された電磁カロリメータを試作し、2002 年から 2004 年にかけて、KEK (高エネルギー加速器研究機構)、DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) でビームテストを行い、その性能評価を行った。

本研究では、1cm × 1cm × 20cm のプラスチックシンチレータ 20 本からなる、「シャワーマキシマム測定器」を開発した。この測定器は、電磁カロリメータ内に設置し、電子、光子の入射位置の精密測定、及び電子、光子とハドロンを識別するための測定器である。

これを電磁カロリメータとともに、2002 年 10 月に KEK π 2 ビームライン、2003 年 10 月、DESY ST21 ビームラインで、マルチアノード光電子増倍管を用いて、シャワーマキシマム測定器の位置分解能、電子識別能力の測定を行った。また、2004 年 3 月、再び KEK π 2 ビームラインで強磁場中で動作可能である光検出器、HAPD (Hybrid Avalanche Photo Diode) をシャワーマキシマム測定器に用いて同様の測定を行った。

そして、今後カロリメータの読み出し光検出器として非常に有望な SiPM について、ゲイン測定、ノイズレート、またそれらの温度依存性などの一般性能測定を行った。

目 次

第 1 章 序論 **3**

1.1 次世代線形加速器計画 . . . 3
1.2 次世代線形加速器の物理 . . . 5
1.3 測定器 . . . 7

第 2 章 カロリメータ **10**

2.1 カロリメータの原理 . . . 10
2.2 カロリメータの構造 . . . 10
2.3 エネルギー分解能 . . . 10
2.4 カロリメータに要求される性能 . . . 11
2.4.1 カロリメータ前物質量 . . . 12
2.4.2 1 粒子エネルギー分解能 . . . 12
2.4.3 補償型カロリメータ . . . 13
2.4.4 ジェットエネルギー分解能 . . . 13
2.4.5 Particle Flow Algorithm . . . 13
2.4.6 グラニュラリティ . . . 15
2.5 これまでのカロリメータの開発研究 . . . 15
2.5.1 HCAL . . . 16
2.5.2 Fine granularity EMCAL . . . 16
2.6 シャワーマキシマム測定器 . . . 17

第 3 章 光検出器 **21**

3.1 MAPMT . . . 21
3.2 HAPD . . . 22
3.2.1 動作原理 . . . 22
3.2.2 構造 . . . 24
3.2.3 APD (アバランシェフォトダイオード) . . . 24
3.2.4 VA/TA . . . 24
3.2.5 HAPD の一般特性 . . . 24
3.3 SiPM . . . 26
3.3.1 動作原理 . . . 26
3.3.2 構造 . . . 26
3.3.3 ロシア製 SiPM の一般特性 . . . 27

第 4 章　ビームテスト **34**
4.1　T517 ビームテスト及び DESY ビームテスト 34
4.1.1　目的 34
4.1.2　T517 セットアップ 34
4.1.3　T517 解析結果 35
4.1.4　DESY セットアップ 38
4.1.5　DESY ビームテスト解析結果 39
4.2　宇宙線による HAPD テスト 46
4.2.1　セットアップ 46
4.2.2　読み出し回路からのノイズの取り扱い 46
4.2.3　HAPD の宇宙線によるテスト結果 47
4.3　T545 ビームテスト 51
4.3.1　目的 51
4.3.2　セットアップ 51
4.3.3　T545 ビームテスト解析結果 51

第 5 章　結論 **54**
5.1　シャワーマキシマム測定器 54
5.2　SiPM の一般特性 54
5.3　今後の展望 55

第 6 章　謝辞 **56**

第1章　序論

1.1　次世代線形加速器計画

高エネルギー物理学において標準模型のより高い精度での検証とそれを超える新粒子、新現象の発見・研究を行うために、よりエネルギーの高い加速器の建設が望まれている。現在稼動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 TeV 領域の素粒子実験計画はスイスの欧州原子核共同研究機構（CERN）大型陽子陽子衝突型加速器 LHC（2006 年実験開始予定）で、重心系エネルギーは 14TeV である。しかし、これらの加速器は構造をもったハドロン同士を衝突させるため粒子内で反応に寄与するパートンの持つエネルギーはその数分の 1 であり、また、その衝突エネルギーを知ることは困難である。更に、反応にかかわらない残りのパートンが多くのジェットを発生するためきれいに反応をとらえることが難しい。しかしながら、円形加速器において、エネルギー損失の少ない重い粒子（陽子）は高エネルギーまで加速しやすいので、新粒子の発見など、エネルギーフロンティアを狙うのに適している。

一方、ハドロン加速器に対して、レプトン（ほとんどは電子、陽電子）衝突型加速器においては、そのシンクロトロン放射によるエネルギー損失のため、達成できる重心系エネルギーはハドロン衝突型加速器には及ばないが、衝突する粒子が構造を持たない素粒子であるために、ほとんどのエネルギーが反応に使われ、ハドロン衝突時のような余分なジェットなどは発生せず、非常にきれいに反応を捕らえることが可能である。現在稼動中のレプトン衝突型加速器は、より高いルミノシティ、すなわち加速粒子数を多くすることで衝突粒子数を増やし、統計データ量を上げることに重点をおいて設計されており、測定精度の良い実験を行うことができる。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 PEP2 であり、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、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。一方、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加速器による、210GeV であり、円形加速器での数値である。上述のように、電子陽電子の円形加速器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、粒子を直線的に加速する、線形加速器が主流になる。

図 1.1 はこれまで日本で計画されてきた電子陽電子線形加速器の概念図である。現在の実験計画によれば、当初重心系エネルギー 300 ~ 500GeV での実験を行い、その後引き続き TeV 領域へのエネルギー増強をはかる計画である。

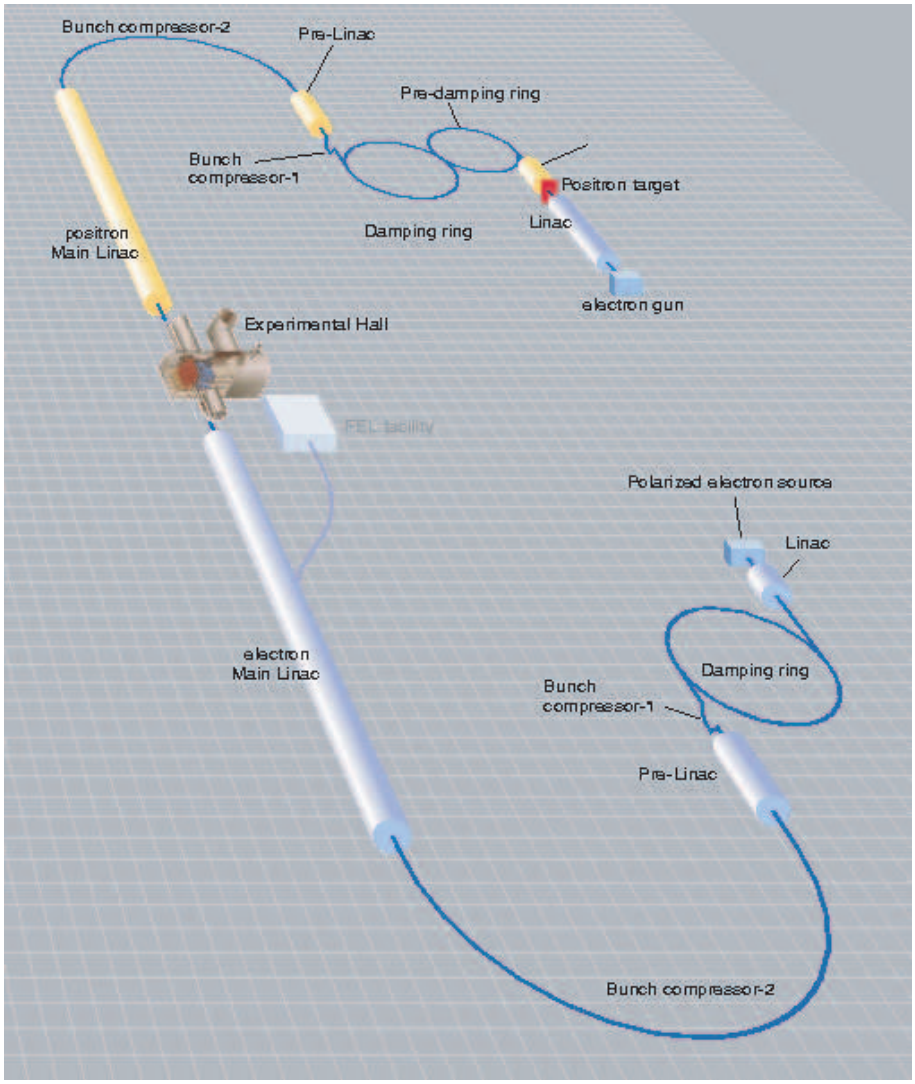


図 1.1: 全長 30km に及ぶ、次世代電子陽電子線形加速器の概念図。この概念図は、日本で計画されていた常伝導電磁石を用いたタイプのものである。最近、超伝導電磁石を用いるデザインが採用されたため、現在の概念図はこれとは異なる。

1.2　次世代線形加速器の物理

次世代線形加速器計画ではエネルギーフロンティアと呼ばれる TeV エネルギーの領域に到達することによって、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。電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用を統一的に記述する素粒子の標準模型において、最後の未発見粒子である、ヒッグス粒子の発見、そしてそのヒッグス質量及び、トップクオークの性質の詳細な研究がこの計画に求められている。現在のヒッグス粒子の質量の上限は LEP 実験により、

$$116GeV < m_H(95\%C.L.) \tag{1.1}$$

である。

次世代線形加速器計画である、電子陽電子衝突型加速器でヒッグス粒子を生成する反応としては、

(a) $e^+e^- \to Z^0H^0$

(b) $e^+e^- \to \nu\bar{\nu}H^0$

(c) $e^+e^- \to e^+e^-H^0$

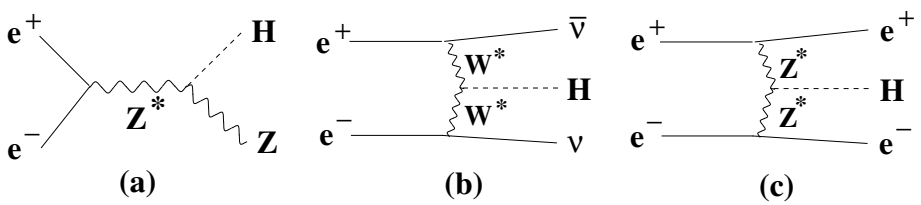


図 1.2: ヒッグス粒子生成過程のファインマン図

などがある。図 1.2 にそれらのファインマン図を示す。2 と 3 の反応はフュージョン過程と呼ばれ、1TeV を超えるようなエネルギーで断面図が大きくなるので重いヒッグス粒子をさがすのに適している。これに対して 1 の反応は低いエネルギーで断面積が大きくなるので軽いヒッグス粒子の探索に適しており、LEP でもこの反応が用いられた。一方、ヒッグス粒子のフェルミオン、ウィークボソンとの結合はその二乗に比例し、その崩壊の部分巾は

$$\Gamma\left(H^0 \to f\bar{f}\right) \propto \left(\frac{gm_f}{2m_W}\right)^2$$
$$\Gamma\left(H^0 \to V\bar{V}\right) \propto (gm_V)^2$$

となる。よってヒッグス粒子は運動力学的に許される範囲内で最も重い粒子への崩壊巾が大きい。しかし、ウィークボソン対への崩壊巾は b クォーク対への崩壊巾より大きいので 140GeV 以上では、仮想的な W 粒子を含めて、$H^0 \to W^+W^-$ への崩壊巾が最も大きくなる。図 1.3 にヒッグス粒子の崩壊分岐比をヒッグス粒子の質量の関数として示す。

次に、次世代電子陽電子線形加速器計画でのヒッグス粒子の探索の方法について述べる。まずヒッグス粒子の質量が $2m_W$ より小さいときであるが、このとき、(b)、(c) の生成過程は起こらないので、生成過程は $e^+e^- \to$

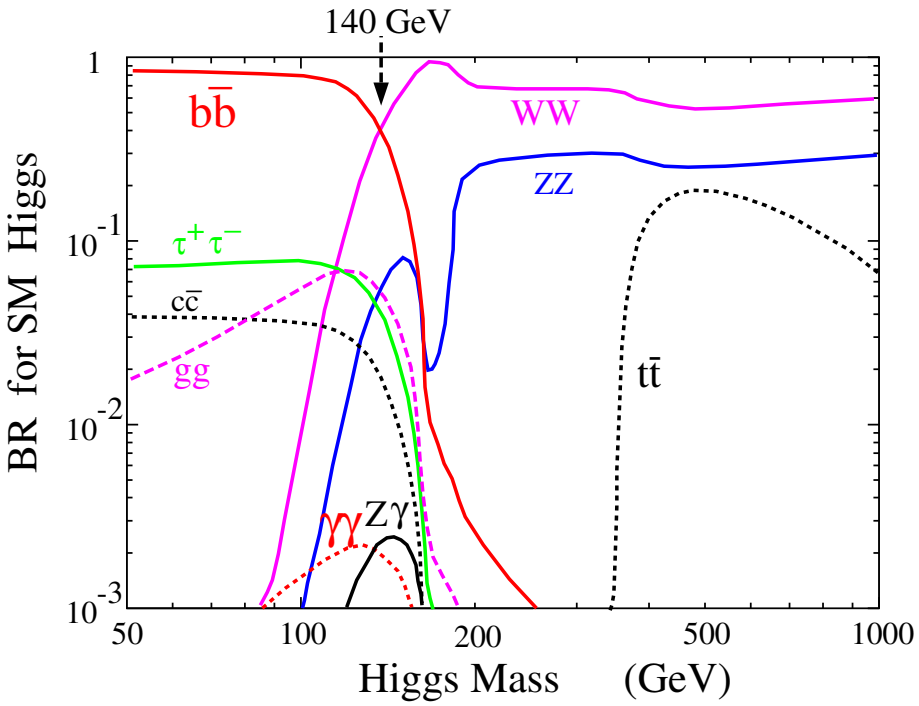


図 1.3: ヒッグス粒子の質量の関数として表したヒッグス粒子の崩壊分岐比

Z^0H^0 である。図 1.3 より、その質量でのヒッグス粒子の崩壊分岐比は b クォークと反 b クォークが支配的であるので、その終状態は Z^0 粒子の崩壊モードによって

1. $\nu\bar{\nu}b\bar{b}$
2. $l^+l^-b\bar{b}$
3. $q\bar{q}b\bar{b}$

のように 3 つに分けられる。これらの場合に 1 の場合は四元運動量欠損、2 では二つのレプトンの recoil mass、3 の場合は二つのジェットの不変質量の分布にピークとなってヒッグス粒子はあらわれる。

このときの主なバックグラウンドは、

1. $e^+e^- \to Z^0Z^0$
2. $e^+e^- \to W^+W^-$
3. $e^+e^- \to e\nu W$

であるが、このうち 1、2 は微分断面積が前方にピークを持ち、2 と 3 はヒッグス粒子の崩壊過程の特徴である b クォークを含んでいない。よって、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、図??の (a)、(b)、(c) 全ての生成過程が起こりうる。またそのときヒッグス粒子は主に二つの W 粒子に崩壊するので、生成過程 (a)、(b)、(c) 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 Z^0 粒子に一致する組み合わせをみつければ、上記の方法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。

このようにしてヒッグス粒子が見つかったときにはその性質を詳しく調べることが次の課題となる。なかでも、見つかったヒッグス粒子が標準模型のそれか、最小超対称性粒子のそれかを調べることは重要である。これはヒッグス粒子の全崩壊巾や、$H^0 \to \gamma\gamma$ 崩壊の崩壊分岐比を精密に測定することによって知ることができる可能性がある。

重心系エネルギーの関数として電子陽電子衝突におけるさまざまな生成過程の断面積を図 1.4 に示す。

1.3　測定器

次世代線形加速器計画で設置が検討されている測定器は予想される様々な物理現象を正確に測定できるよう、高性能であることが要求される。特にＺ粒子やW粒子のジェットを用いた質量再構成やｂジェットの識別は重要である。また、予想外の物理現象が起きたときにも十分対応ができるように高い汎用性をもつことが要求される。次世代線形加速器での測定器はビーム衝突点に近いほうから以下のような検出器で構成されている。測定器の概念図を図 1.5 に示す。

バーテックス検出器　：電子・陽電子の衝突点の極めて近傍に設置され、荷電粒子の飛跡を高い精度で測定する。これから 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クオークから発生したことを識別する。とくに b クォークの同定はヒッグス粒子探索において非常に重要である。また、バーテックス検出器に入射されるジェットは強くコリメートされ、粒子の密度が非常に高いため、入射位置を二次元的に

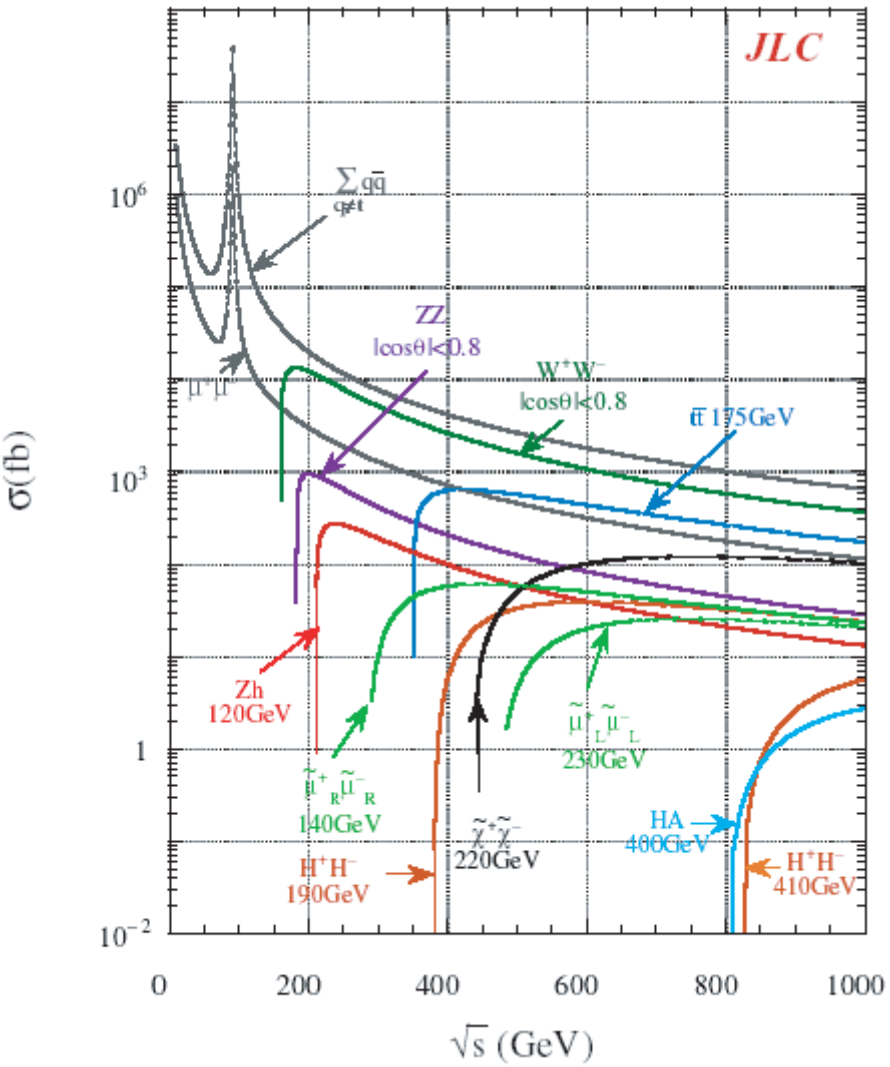


図 1.4: 粒子の反応断面積とエネルギーの関係

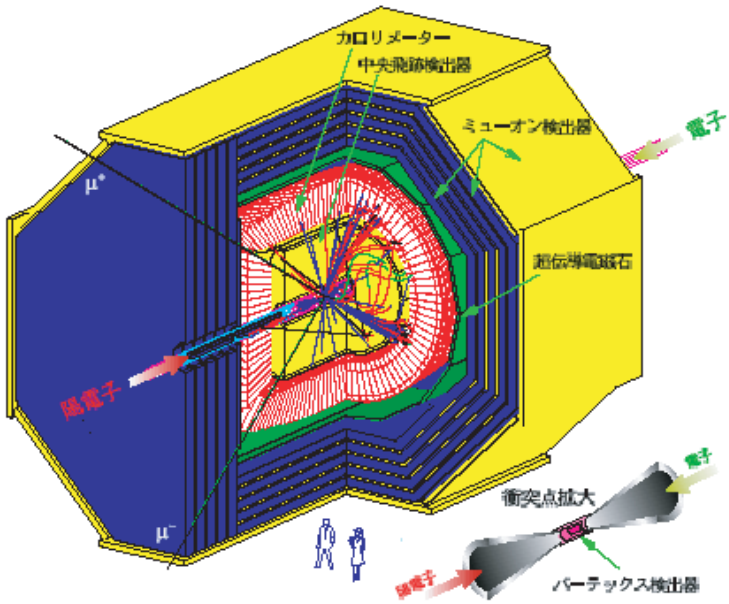


図 1.5: 測定器概念図

読み出す必要がある。そこでバーテックス検出器は CCD (電荷結合素子) のような二次元分解能の高いモジュールが想定されている。現在、加速器に超伝導磁石が用いられることになり、これまでの CCD では使用が難しくなったため検出器については再検討中である。

中央軌跡測定器 ：荷電粒子の飛跡を正確に測定し、その曲率から荷電粒子の運動量を測定する。小型ジェットセル構造をもった、ワイヤードリフトチェンバーが計画されていたが、現在は、MPGD (Micro Pattern Gas Detector) を用いた、TPC (Time Projection Chamber) が想定され、開発研究が進められている。

カロリメータ ：粒子のエネルギーを測定する。本研究の主題であり、次章で詳しく記述する。

ミューオン測定器 ：μ 粒子の同定を行う。μ 粒子は質量が重く、強い相互作用を起こさないため、他の粒子と違い測定器の最も外側まで達する。μ 粒子の運動量は内側の中央軌跡測定器で精度よく測定される。そこで構成されたμ 粒子の飛跡とμ 粒子測定器で測定された位置が一致するかを調べる。μ 粒子は多くの場合、新粒子探索におけるもっとも明解な信号であるため、立体角をできるだけ広く覆うとともに、隙間のないように配置される。

本研究では、次世代線形加速器計画における測定器のうち、カロリメータの中でも、電磁カロリメータ内に設置し、入射粒子の位置測定をするためのシャワーマキシマム測定器の開発、性能評価を行った。また、カロリメータにプラスチックシンチレータを用いるため、そこからの超微弱光を検出する必要があり、そのための光検出器の性能について研究を行った。

第2章　カロリメータ

2.1　カロリメータの原理

カロリメータは入射粒子の全エネルギーをその測定器内で全て消費させることによってそのエネルギーを測定するためのものである。そのほかにも入射粒子の位置測定、粒子の同定を行う。入射粒子が電子、陽電子あるいは光子である場合、これらの粒子の物質との相互作用は、主として制動放射と電子陽電子対生成であり、これら二つの相互作用が交互に続いて起こる結果として、電子、陽電子、及び光子のカスケードシャワーが起こる。そのシャワーはそれらの粒子のエネルギーが臨界エネルギー E_c に近くなったところで初めて停止する。このようなシャワーの過程を電磁シャワーと呼び、電磁シャワーを引き起こす電子、陽電子、光子のエネルギーを測定するためのカロリメータを電磁カロリメータと呼ぶ。

一方入射粒子が荷電 π 粒子などのハドロン粒子である場合、その粒子は物質中において核子との弾性散乱や非弾性散乱を起こす。このような衝突反応においては、π 粒子、K 粒子、陽子や中性子などからなる複数の二次粒子が放出され、これらの二次粒子が次の非弾性散乱を引き起こす。これらの粒子がイオン化や物質中の核子の結合を壊すことによりエネルギーを失っていくこのようなカスケード現象のことをハドロンシャワーと呼び、これらハドロンのエネルギーを測定するためのカロリメータをハドロンカロリメータと呼ぶ。

2.2　カロリメータの構造

カロリメータの構造は、入射粒子の全エネルギーを吸収するのに十分な厚さの吸収体と、吸収体の相互作用によって生成された二次粒子を検出する検出体からなる。吸収体として用いる物質によってはそれ自身が信号を発するもの (NaI、CsI 等の無機シンチレータ、鉛ガラス等のチェレンコフ放射体) がある。これらは均質な構造のカロリメータを製作することができる。この構造をもつカロリメータを全吸収型カロリメータと呼ぶ。　一方、吸収体と検出体に異なる物質を用いて、それぞれを交互に重ねた構造をもつカロリメータをサンプリングカロリメータと呼び、入射粒子のエネルギーの一部を信号として検出する。吸収体として用いる物質は鉄、鉛、タングステン、ウラニウム等であり、検出体としてはプラスチックシンチレータ、ガスや有機液体、液化希ガス、シリコンなどの半導体等が用いられる。サンプリング型カロリメータは、全吸収型カロリメータと比べ、一般的に安価であるがエネルギー分解能としては劣る。また、サンプリング型では実験の目的に合わせたカロリメータ構造のデザインが可能である。

2.3　エネルギー分解能

一般にカロリーメータのエネルギー分解能は、E をエネルギー、σ_E をその分解能として以下のように表すことができる。

$$\frac{\sigma_E}{E} = a \oplus \frac{b}{E} \oplus \frac{c}{\sqrt{E}} \tag{2.1}$$

ここで、$A \oplus B = \sqrt{A^2 + B^2}$ を表す。a は定数項 (Constant term) と呼ばれ、読み出しチャンネルごとのゲインの不均一性やカロリメータのエネルギーの洩れに起因する。b はノイズ項 (Noise term) と呼ばれ、読み出し回路等からのノイズによる寄与で入射エネルギーにかかわらず一定なので上の式では、$1/E$ に比例する項になる。そして c は統計項 (Statistical term) と呼ばれる。統計項への寄与は大きく分けて以下の 3 つに分類でき、いずれも $\sqrt{E}$ に比例する項として寄与する。

- σ_{int} “: intrinsic ” な揺らぎ
- σ_{photo} ：検出される光電子数の揺らぎ
- σ_{samp} “: サンプリング ” による揺らぎ

σ_{int} はカロリメータに入射したシャワーそれ自身の揺らぎである。σ_{photo} は、シンチレータ、鉛ガラスなど読み出しに光を用いるカロリメータの場合、その光検出器などで検出される光電子数の揺らぎで、

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

のように表される。ここで $N_{p.e.}$ は光検出器で検出される光電子数である。また、サンプリング型カロリメータではシャワーを構成する荷電粒子が有感層でイオン化により損失したエネルギーのみを検出しているのでサンプリングによる揺らぎ σ_{samp} がエネルギー分解能に寄与を与える。

2.4 カロリメータに要求される性能

カロリメータの性能において重要なものに、エネルギー分解能、位置分解能、粒子識別能力、エネルギー応答の線形性、時間分解能等が挙げられる。ここで、エネルギー分解能に関して重要な項目を列挙すると、主に以下のとおりである。

- カロリメータ前物質量
- 1 粒子エネルギー分解能
- 補償の概念
- ジェットエネルギー分解能
- グラニュラリティ

2.4.1　カロリメータ前物質量

カロリメータのエネルギー分解能の場合、粒子がその測定器に入射する前に相互作用を起こすと、測定の精度が悪化する。このため上流の測定器群では、極力物質量を減らす努力がなされる。次世代線形加速器実験では上記理由により、荷電粒子の運動量測定に必要となるソレノイドコイルを、カロリメータの内側ではなく、その外側に置くことを想定している。よって、カロリメータは強磁場中へ設置されることになる。シンチレーション光を用いるタイプのカロリメータは、微弱光を読み出すため、光検出器が必要であるが、強磁場中でも問題なく動作するものでなければならない。

2.4.2　1 粒子エネルギー分解能

入射粒子のエネルギーを精度良く測定することは、カロリメータの基本中の基本と言える。サンプリングカロリメータの場合、エネルギー分解能は主としてサンプリング揺らぎによって決まる [1]。

これはエネルギー分解能の統計項として現れる。統計項にはこの他に光電子統計の揺らぎも効くが、通常カロリメータを設計する時には光電子統計が性能を劣化させることが無いように注意して光学系を設計する。またエネルギー分解能の定数項についても同様に、これが性能を左右することが無いように細心の設計・調整をする。従って結果的にこのサンプリング揺らぎがカロリメータの性能の最重要因子になる。

図 2.1 にパイオンに対するエネルギー分解能が、サンプリングの細かさによってどのように変っていくかを示す。これは鉛と 2mm 厚プラスチックシンチレータをサンドイッチにしたモジュールのビームテストの結果で、鉛厚を様々に変えて測定が行われている。これからわかるように、サンプリングが粗い時にはエネルギー分解能は鉛厚のルートにほぼ比例している。また鉛とプラスチックシンチレータで構成されるカロリメータの場合、サンプリングを細かくしていくと、 30%弱の統計項が得られるだろうと推定される。

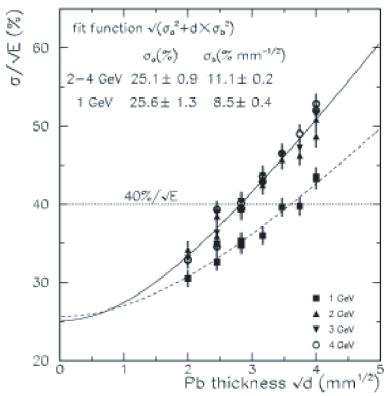


図 2.1: カロリメータの分解能とサンプリング数の関係。ここで得られたエネルギー分解能の統計項は、2 ~ 4GeV のπ 粒子で、$\sigma_{int} = (25.1 \pm 0.9)\%$、$\sigma_{photo} = (3.8 \pm 0.1)\%$ 、$\sigma_{samp} = (10.5 \pm 0.2)\%$ であった。

実際の次世代線形加速器実験に用いる場合は

- 電磁カロリメータ　$\dfrac{15\%}{\sqrt{E}}$

- ハドロンカロリメータ $\frac{40\%}{\sqrt{E}}$

が要求されている。

2.4.3 補償型カロリメータ

一般にカロリメータから得られる信号は、電磁シャワーによるものに比べて、ハドロンシャワーによる信号のほうが小さい。これは、ハドロンシャワーにおいては、核破砕反応によって核の結合エネルギーの分だけエネルギーが消費されることや、中性子がエネルギーをもって逃げていくことによる。また、ハドロンシャワーにおいて、π^0 粒子が生成されると、この π^0 粒子は電磁相互作用で、10^{-16} 秒程度の寿命で二つの光子に崩壊し、電磁シャワーの形でカロリメータにエネルギーを落とす。よって、ハドロンシャワーには、電磁シャワーの成分と純粋なハドロン過程によるシャワーの成分が含まれることになる。シャワー発達初期段階での π^0 粒子生成のふらつきはシャワー全体のエネルギーに大きなふらつきを引き起こす。従って、同じエネルギーの純ハドロンシャワーと電磁シャワーが同等の応答をするようにすれば、π^0 粒子生成のふらつきがエネルギー分解能に与える寄与を制限することができる。このように EM (電子、光子) とハドロンに対する応答の比 e/h が 1 であるようにしたカロリメータを補償型カロリメータと呼ぶ。e/h=1 を実現するためには、以下のような方法が挙げられる[1]。

- 吸収材に鉛等の重元素を用いることで、核反応でのエネルギー消費を減らす。
- 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等を用いることによって、中性子のエネルギーを逃がさないようにする。
- 吸収材の比率を増やし、電磁シャワーが検出体に落とすエネルギーを減らすようにする。

2.4.4 ジェットエネルギー分解能

カロリメータの性能として、1 粒子エネルギー分解能を挙げたが、物理的に重要なイベントの多くは、複数の粒子が同時に生成されるジェットと呼ばれるイベントを伴う。次世代線形加速器実験で期待されるヒッグス粒子生成事象等もジェットを伴うものがほとんどのため、このジェットのエネルギー分解能もカロリメータにとって極めて重要な性能といえる。図 2.2 は、$\nu\bar{\nu}W^+W^-$、$\nu\bar{\nu}Z^0Z^0$ 生成に伴う 4jet イベントを用いたジェット質量再構成のシミュレーション結果である。図左は、ジェットエネルギー分解能 $60\%/\sqrt{E_{jet}}$、図右は、分解能 $30\%/\sqrt{E_{jet}}$ の場合の $W^{\pm}$ 粒子 (80GeV)、Z^0 粒子 (91GeV) の質量の分布を示している。ジェットエネルギー分解能が $30\%/\sqrt{E_{jet}}$ であれば 2 粒子の事象を分離して観測できることがわかる。

2.4.5 Particle Flow Algorithm

Particle Flow Algorithm とは、衝突で生成されたジェットの質量を精度よく測定するための解析手段である。それは以下のような方法をとることによる。ジェット中の粒子のエネルギーは相対論により以下のように記述される。

[1] 鉛 + シンチレータの場合、体積比約 9:2 でほぼ e/h=1 を実現できる [1]

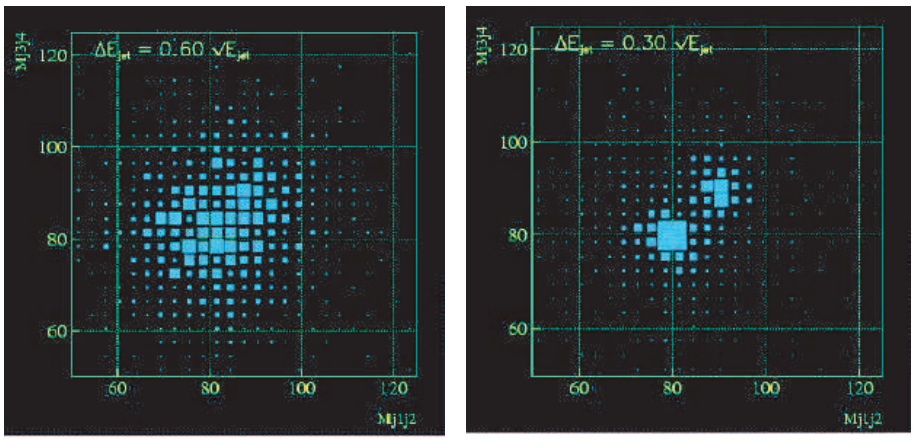


図 2.2: $\nu\bar{\nu}W^+W^-$、$\nu\bar{\nu}Z^0Z^0$ 生成 4 ジェットイベントを用いたジェット質量再構成シミュレーションの様子。ジェットエネルギー分解能は、図左で $60\%/\sqrt{E_{jet}}$、図右で $30\%/\sqrt{E_{jet}}$ である。

$$E^2 = m^2 + p^2 \tag{2.3}$$

ここで E は粒子のエネルギー、m は質量、p は運動量であり、自然単位系で表してある。また、それらの粒子は、そのほとんどが相対論的速度であるため以下の近似が可能である。

$$m \ll p \tag{2.4}$$

$$E \simeq p \tag{2.5}$$

ここで、一般にトラッキングチェンバーの分解能を、$\frac{\sigma_p}{p}$、カロリメータの分解能を $\frac{\sigma_E}{E}$ としたとき、多くの場合 $\frac{\sigma_p}{p} \ll \frac{\sigma_E}{E}$ であることが知られているので、上記の近似より、

$$\text{（トラッキングチェンバーで測定された運動量）} = \text{（その粒子のエネルギー）} \tag{2.6}$$

とすることが可能である。

荷電粒子の場合にかぎり、上記の測定が可能であるが、生成されたジェット中にはもちろん中性粒子も含まれているので、中性粒子のエネルギーはカロリメータによって測定されなければならない。そこで、ジェットのエネルギーを精度よく測定するためには、ジェット中の荷電粒子のエネルギーはトラッキングチェンバーで、中性粒子のエネルギーはカロリメータで測定すれば、良いエネルギー分解能でジェットのエネルギーを測定できることになる。これが Particle Flow Algorithm の考え方である。カロリメータにおいて Particle Flow Algorithm を適用するためには、カロリメータ中にジェットとして複数入射する粒子のうち、中性粒子の寄与と荷電粒子の寄与を分離する必要がある。また、ジェット中の荷電粒子がカロリメータ前方にあるトラッキングチェンバーで描いたトラックと、その粒子がカロリメータで落としたエネルギーを関連付けなければならない。カロリメータに入射したジェットのエネルギーを、入射した粒子 1 個 1 個のエネルギーに再構成していくことをクラスタリングと

呼ぶ。クラスタリングを行い、各粒子の寄与を分離するために必要とされる性能に、グラニュラリティと呼ばれるものがある。

2.4.6　グラニュラリティ

上述のように、実際の実験では 1 粒子が孤立してカロリメータに入射することは珍しく、多くの場合多数の粒子が近接したジェットとして入射する。これらの近接した多数の粒子を解きほぐして、1 個 1 個の寄与に分解することによって Particle Flow Algorithm を適用でき、前述のジェットエネルギー分解能が威力を発揮する。この解きほぐしを精度よく行うためには、グラニュラリティと呼ばれる信号の読み出し単位の細かさが重要になる。また、グラニュラリティの細かさはトラックとクラスターの対応づけやバックグラウンドヒットの除去にも威力を発揮する。
グラニュラリティについて、タイルファイバー型カロリメータ (検出体としてタイル状のシンチレータを用い、タイルに埋め込まれたＷＬＳ (ウェーブレングスシフター) ファイバーにより読み出しを行うタイプ) で考えた場合、この読み出し単位の大きさは、横方向にはタイルの大きさで、奥行き方向には主として光検出器の諸特性で決まる。タイルの大きさを小さくすればするほどジェットの解きほぐし性能は明らかに良くなるが、以下の理由から限界がある。

- ＷＬＳファイバーの曲げ半径をあまり小さくできない。
- 応答の一様性が悪くなる。
- ファイバーの数、ひいては読み出しチャンネル数が多くなり、費用がかかる。

今までに作られてきた電磁カロリメータでは、10cm × 10cm 程度のタイルサイズが大半であるが、次世代線形加速器計画のような超精密実験を目指す場合にはこれでは粗すぎると考えられている。奥行き方向の読み出し単位は、サンプリングカロリメータの場合、原理的にはシンチレータ 1 層 1 層まで細かくすることができる。しかし現実にはそのようなことがなされた例はない。これは、それを実現するためには光検出器のチャンネル数が膨大になってしまい、費用もまた膨大になってしまうことが大きな理由である。加えて、タイル 1 枚からの光量は小さすぎて良い S/N で測ることが難しいという理由もある。
最近の光検出器の急速な発展により、上記のような各層読み出しが夢ではなくなりつつある。現在光検出器の最有力候補としてスタディが行われて、本研究のテーマのひとつでもある、マルチチャンネル HPD、HAPD、SiPM などは、各層毎読み出しを可能ならしめるに足る感度、多チャンネル性、チャンネル単価を実現できると考えられている。我々カロリメータグループでは、タイルファイバー型カロリメータとして、4cm × 4cm サイズのもの、そして、1cm × 1cm × 20cm のストリップ型シンチレータを用いたカロリメータを試作し、読み出し光検出器として、マルチチャンネル HAPD をカロリメータの一部に用いてビームテストを行った。

2.5　これまでのカロリメータの開発研究

我々カロリメータグループは、上記の様々な要求に対し、カロリメータ R & D を進めてきた。以下にその経緯を述べる。

2.5.1 HCAL

1997 年の KEK におけるビームテスト、及び 1999 年の FNAL (Fermi 国立加速器研究所) におけるビームテストでは、補償型カロリメータ (図 2.3) を試作、テストし、鉛 8mm 厚、シンチレータ 2mm 厚の構成で、

$$e/h = 1.12 \pm 0.02 \tag{2.7}$$

また、その分解能は、ハドロンに対して、

$$\frac{\sigma_{hadron}}{E} = \frac{46.5 \pm 0.6\%}{\sqrt{E(\mathrm{GeV})}} \oplus 0.0\% \tag{2.8}$$

を得ている [7]。

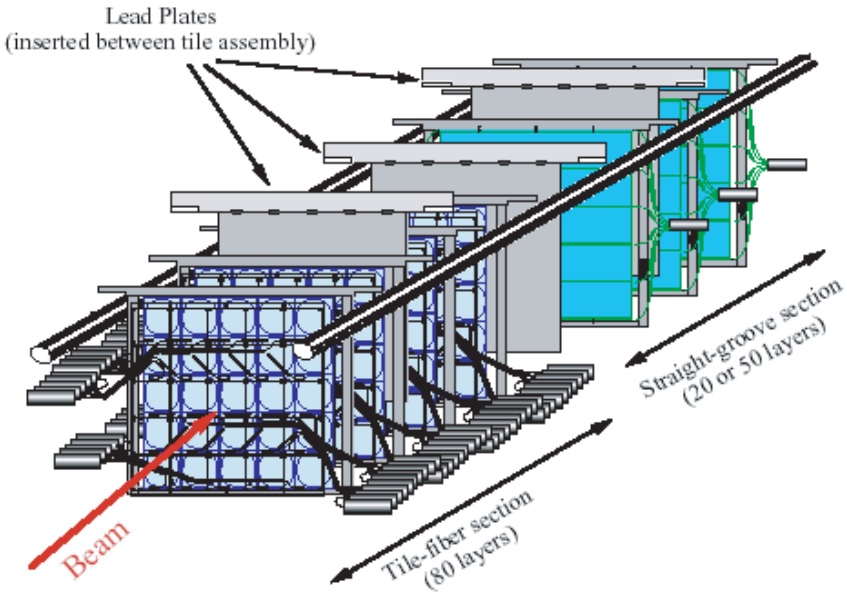


図 2.3: 補償型ハドロンカロリメータ

2.5.2 Fine granularity EMCAL

今回我々カロリメータグループは、上記補償型カロリメータに引き続き、以下に示すような電磁カロリメータを試作し、テストを行った。これらの電磁カロリメータは、上述の Particle Flow Algorithm を適用できるように、極めて細分割された電磁カロリメータである。

- 小タイルファイバー型カロリメータ
- ストリップ型カロリメータ

検出器	材質、厚さ	グラニュラリティ
プリシャワー検出器	鉛 4mm + シンチ 1mm、6 層 ($4.3X_0$)	20cm × 20cm
シャワーマキシマム測定器	シンチ 1cm × 3 層 (-)	X 層、Y 層の 2 層で 1cm × 1cm
ストリップ型カロリメータ	鉛 4mm + シンチ 2mm、24 層 ($17.1X_0$)	X 層、Y 層の 2 層で 1cm × 1cm
スモールタイル型カロリメータ	鉛 8mm + シンチ 1mm、10 層 ($14.3X_0$)	4cm × 4cm

表 2.1: 試作電磁カロリメータのパラメータ

- シャワーマキシマム測定器
- プリシャワー測定器

それぞれの構造について、以下の表 2.1 にまとめる[2]。また、それぞれのカロリメータについて、模式図を図 ??,fig:SHmax,fig:TEM,fig:NEM に示す。

これらのうち、本研究では、シャワーマキシマム測定器の性能について述べる。

2.6 シャワーマキシマム測定器

我々が試作したシャワーマキシマム測定器の模式図を図に示す。シャワーマキシマム測定器は、1 層、1cm × 1cm × 20cm シンチレータ 20 本からなり、これが縦に並んだもの (X 層) と横に並んだもの (Y 層) の 2 層を構成したものである。この測定器は電磁カロリメータ内で電磁シャワーが最も広がる位置に挿入され、電子または光子の入射位置の精密測定、及び、電子光子とハドロンの識別を目的としている。

[2]スモールタイル型カロリメータは、鉛 4mm + シンチ 1mm、24 層 ($17.1X_0$) の構成でもテストされた。

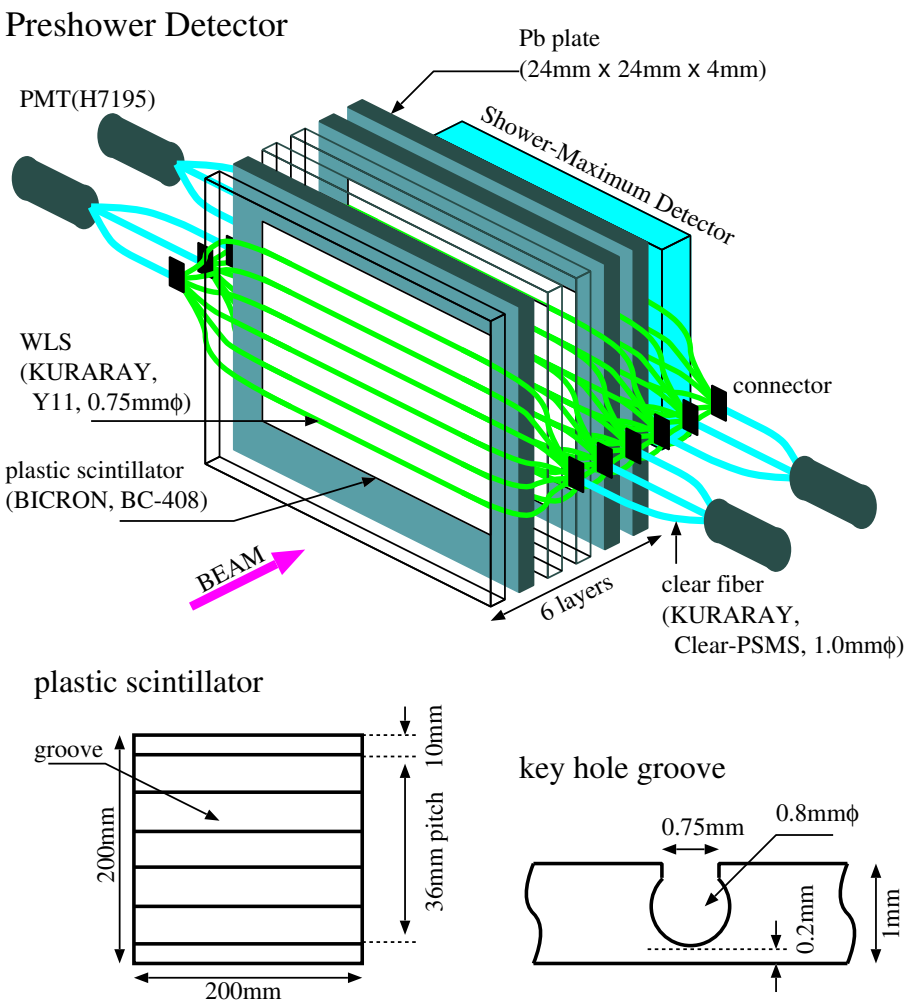


図 2.4: プリシャワーカロリメータ

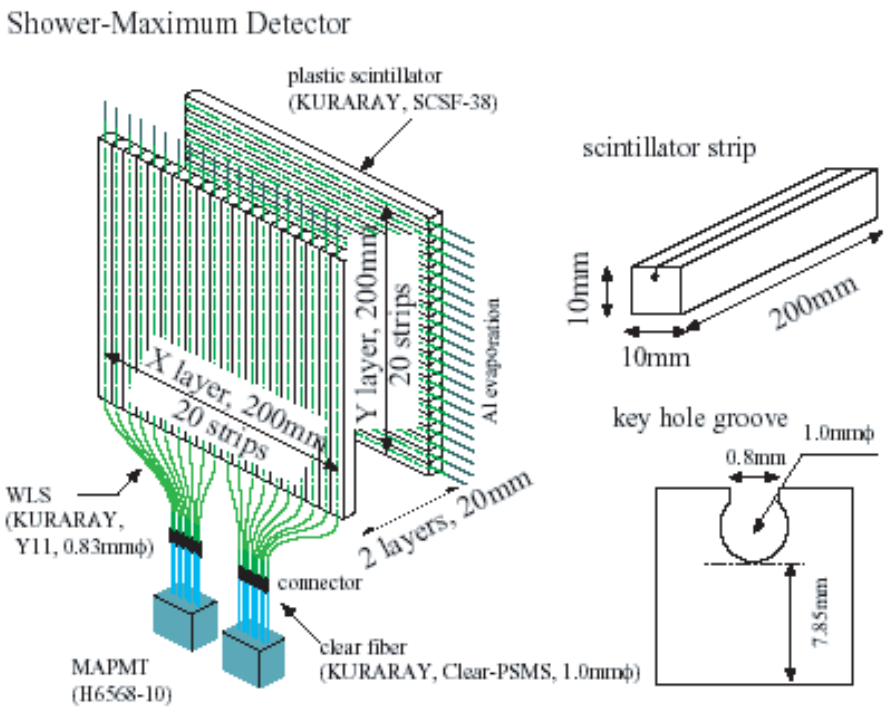


図 2.5: シャワーマキシマム測定器

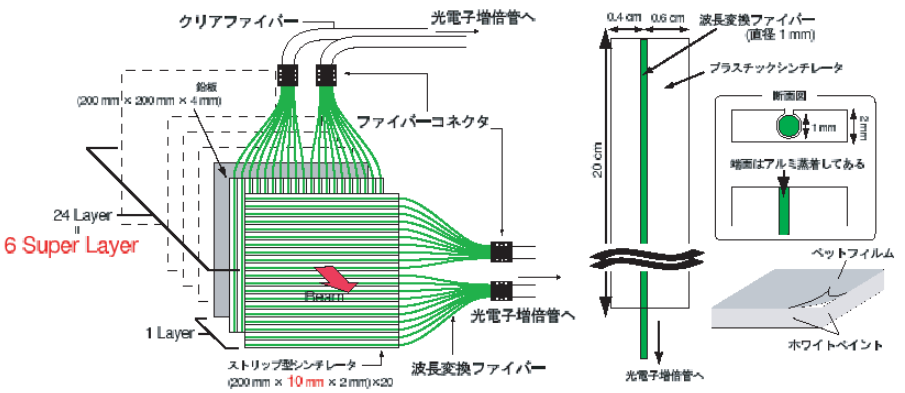


図 2.6: ストリップ型カロリメータ

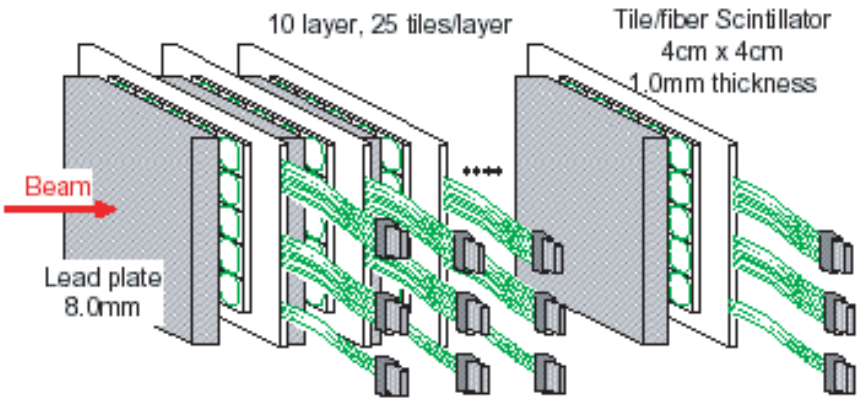


図 2.7: スモールタイル型カロリメータ

第3章　光検出器

我々カロリメータグループは、カロリメータとしてプラスティックシンチレータを用いたサンプリング型カロリメータを採用し、R&D を進めている。そのため、プラスティックシンチレータからの超微弱光を精度よく検出する光検出器の R&D も不可欠である。また、前述のように次世代線形加速器では高磁場中にカロリメータを設置するため、そのような環境下でも動作する光検出器が必要となる。以下に、我々がカロリメータのテストに用いた、あるいは最近開発された光検出器で、カロリメータにおいて今後の使用が期待されるものについて述べる。

3.1　MAPMT

光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube) は、光検出器の中でも極めて高感度、高速応答な光検出器である。図 3.1 に一般的な PMT の構造を示す。

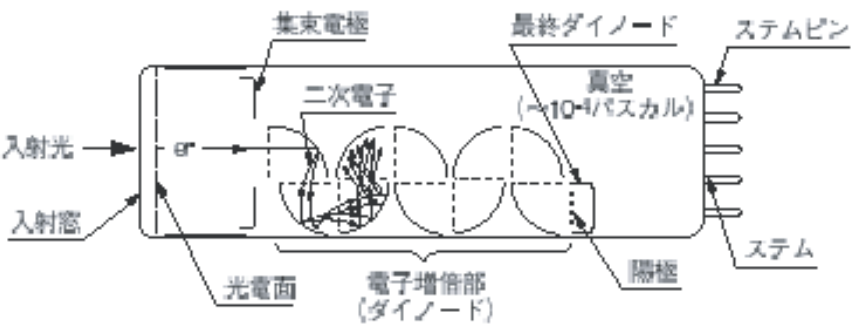


図 3.1: ヘッドオン型光電子増倍管 (ボックス型ダイノード) の断面図

これに示されるように、PMT は光を電子に変換する陰極 (光電面)、収束電極、電子増倍部 (ダイノード)、電子を集める陽極を真空の容器に納めたものである。光が光電面に照射されると、光電面は光電子を放出する。その光電子は収束電極によって電子増倍部に導かれながら加速されてダイノードにあたり二次電子を放出する。この繰り返しにより、約 10^6 に増倍され、増倍された電子が出力信号として陽極に収集される。この二次電子放出効果による増倍のため、光電子増倍管は、紫外線、可視光、近赤外線の放射エネルギーの測定につかわれる受光素子のなかでは、際立った感度を有している。また、拘束時間応答性、低ノイズ、受光面の大きなものができるなどの特徴がある。

一方、マルチアノード光電子増倍管 (MAPMT) は、アノード部分が分割されており、1 本で十数チャンネルから数十チャンネルの読み出しが可能である。

本研究で使用した MAPMT は浜松ホトニクス製 H6568-10 で、これは、メタルチャンネル型のダイノード構造

チャンネル数	4 × 4
ダイノード構造	メタルチャンネル
ダイノード段数	12
光電面材質	バイアルカリ
最大印加電圧	1000V
量子効率 (480nm)	15%
増幅率 (800V)	0.7×10^6

表 3.1: 浜松ホトニクス製 MAPMT H6568-10 の諸特性

を持つ光電子増倍管 R5900 に高電圧分割回路を組みあわせたモデル名である。メタルチャンネルダイノードはダイノード間が短く、高速応答を実現しており、位置検出にも適したダイノード構造である。このため、アノードを分割することによって、多チャンネルを実現している。H6568-10 の性質を表 3.1 にまとめる。

光電子増倍管は上記のように微弱光検出に優れた光検出器であるが、その増倍過程が長いため、一般に磁場中における動作は、磁力線を考慮にいれるなどの対応をしないかぎり、保証できない。次章で述べるビームテストにおいて、光電子増倍管を使用しているが、これは、カロリメータの性能自体をテストすることに重点がおかれており、次に述べるような、今後使用される磁場中動作可能な光検出器の R&D における参考データとなるためである。

3.2 HAPD

3.2.1 動作原理

HAPD(Hybrid Avaranche Photo Diode) は光電陰極と APD の 2 つの部分から構成されている光検出器である [3]。丸い軸対象の窓の上に光電陰極が生成されており、これと狭いギャップを隔てた位置に APD がマウントしてある。図 3.2 に簡単に動作原理を模式的に表す。

入射光はまず光電陰極で光電効果により光電子をたたきだす。光電陰極と APD の間には数 ~ 10 ｋＶの高電圧がかけられており、この電場によって光電子が加速される。光電子はまず APD 表面にある薄い電極を通過し、APD の空乏層に入射される。光電子は APD の内部でその入射方向にそって、電子正孔対を生成しながらやがて完全にエネルギーを失って停止する。APD には逆バイアス電圧がかけられており、電子正孔対はその電場によって、アバランシェ過程 (後述) による増幅をうけながら APD の両側の電極に収集される。シリコンのバンドギャップエネルギーは 1.12eV で、このエネルギー以上をもっていれば電子 1 つの信号を作ることができる。しかし荷電粒子がシリコンを通過する際のエネルギーは電子正孔対以外にも消費されるので、平均エネルギー損失 3.6eV で 1 電子正孔対ができる。このように、HAPD は (高電圧の加速によるゲイン) × (アバランシェ過程によるゲイン) で高ゲインを達成できる。

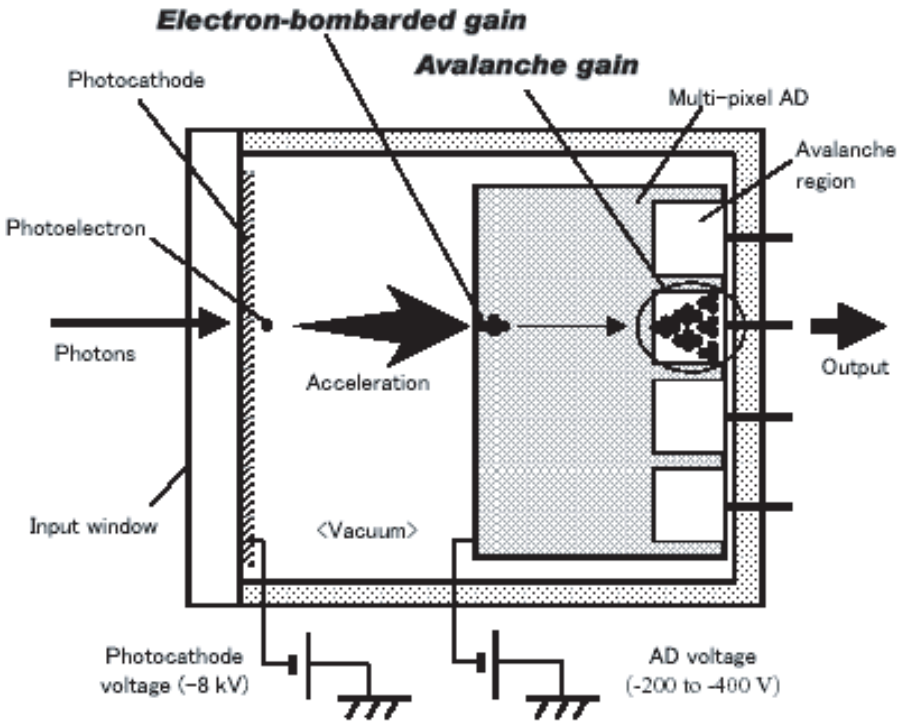

Electron-bombarded gain
Avalanche gain
Photocathode
Multi-pixel AD
Avalanche region
Photoelectron
Photons
Acceleration
Output
Input window
〈Vacuum〉
Photocathode voltage (−8 kV)
AD voltage (-200 to -400 V)

図 3.2: HAPD:

3.2.2 構造

高電圧とフォトダイオードを用いたハイブリッド型の光検出器は大きく分けて静電収束型と近接焦点型の 2 つに分類される。静電収束型はマイナスの高電位にある 2 つの収束電極の作用によって入射光で生成された光電子をフォトダイオード上に収集させている。これには非常に小さいフォトダイオードが用いられていて、その静電容量は数ｐＦ程度である。近接焦点型は光電陰極とフォトダイオードが狭いギャップで隔てられている。このため電子の飛翔距離が短く、また非磁性材料が使用されているため、高磁場の影響を受けない。今回使用した HAPD は近接焦点型である。

3.2.3 APD (アバランシェフォトダイオード)

フォトダイオードに高い電圧をかけて、アバランシェ過程 (なだれ過程) をおこし、シリコン内部に利得を持たせることができるものがある。なだれ過程とは生成された電荷キャリアが高い電圧によって十分加速され、電荷収集の方向に沿って新たな電子・正孔対を作る過程のことである。構造上はＰＩＮ型のと同じであるが、高い電圧をかけて使用するため、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、かつ検出器有感体積内に高電界を作れるような形状に設計する必要がある。なだれ過程は周囲の温度に大きく左右されるので増幅率の安定性という点ではＰＩＮタイプのものに劣る。しかしながらＡＰＤを用いれば小さいゲインを補うことができる。

3.2.4 VA/TA

ＶＡはＣＥＲＮ (欧州合同素粒子原子核研究機構) において、vertex detector に用いられるシリコンストリップ検出器などの小信号の読み出しのためのフロントエンドＬＳＩとして開発されたＡＳＩＣである。ＶＡはＣＭＯＳ回路により構成されており、マルチチャンネルの入力ラインに対しておのおの charge sensetive priamplifier, slow shaper, sample and hold の回路を構成する。最終段にアナログマルチプレクサがあり、最終的にマルチチャンネルの入力が 1 チャンネルにシリアル化され、電圧として出力される。この電圧が各チャンネルの電荷量に対応、すなわちエネルギー情報となる。

またＴＡは fast triggering 機能を備えたＡＳＩＣである。ＶＡ同様マルチチャンネルの入力に対し fast shaping を行い、level sensitive discriminator によりトリガーシグナルをつくる。この後段にＯＲ回路があり、最終的には全チャンネルのトリガーシグナルのＯＲが出力される。

われわれはＶＡとＴＡの機能をまとめて一つのパッケージにしたＩＤＥＡＳ社の”ＶＡ３２＿ＨＤＲ１１＋ＴＡ３２ＣＧ” をＨＡＰＤの読み出しに応用し、カロリメータ (一部) をテストした。このＶＡ／ＴＡは３２チャンネル入力であり、１つのＨＡＰＤ (６４チャンネル) に対して 2 チップ用いる。デイジーチェーンで用いることによりひとつのチップとしてコントロールされる。このＶＡ/ＴＡ ＡＳＩＣの基本特性を表に示す。

3.2.5 HAPD の一般特性

使用した HAPD は浜松ホトニクスの須山本比呂氏によって開発された、8 × 8 ピクセル HAPD である [3] 。また、読み出しのための VA/TA ボード及び、その VME モジュールは、K2K Scibar グループによって MAPMT H7546 用に開発された、6U ボードを使用している [4] 。それらの特性を以下の表 3.2、tab:VATA にまとめる。

フォトカソード	材質	マルチアルカリ
	量子効率	20% (400nm)
	供給電圧	-8kV
アバランシェダイオード	ピクセルサイズ	$2 \times 2mm^2$
	ピクセル数	8×8
	有感域	$16 \times 16mm^2$
ゲイン	アバランシェゲイン	30
	Electron-bombarded ゲイン	2200
	トータルゲイン	6.6×10^4
時間特性	Rise time	1.0ns
	Decay time	1.0ns
その他	2 光電子まで識別可	
	1 テスラ以上の磁場での使用可	

表 3.2: HAPD の諸特性

VA	
プロセス	0.8 μm N-well CMOS,double-poly,double metal
供給電圧	VDD=+2.5V,VSS=-2.5V
slow-shaper の peaking time	0.8 ~ 1.2 μs の範囲で可変
入力ダイナミックレンジ	-35pC ~ +25pC
ゲイン	5.8mV/pC 36 μA/pC (マルチプレクスされた出力)
TA	
プロセス	1.2 μm N-well CMOS,double-poly,double metal
fast-shaper の peaking time	75 ~ 150ns の範囲で可変

表 3.3: VA32_HDR11+TA32CG の諸特性

このVA/TAボード、ならびにVME読み出しモジュールは、上述のように光電子増倍管H7546の使用を前提とし、それに最適化されているため、これらを使用してHAPDを動作させる場合、ゲインが一桁程度足りない。

3.3 SiPM

3.3.1 動作原理

SiPM (Silicon PhotoMultiplier) はロシアで開発された光検出器である [2]。SiPMはシリコン上の狭い範囲 (~ $1\mathrm{mm}^2$) に形成された、数百から千数百ピクセルのフォトダイオードからなる光検出器であり、それぞれのフォトダイオードが、ガイガーモードと呼ばれる、降伏電圧を10~20%超えたバイアス電圧で動作する。光子が入射した際のふるまいは、上記のフォトダイオードとほぼ同じであるが、動作電圧がガイガーモードであるため、一つのピクセルにおける出力は生成された電子正孔対の数によらず、ガイガー放電による一定の信号であり、その増幅率はアバランシェフォトダイオードよりも高く、10^6 程度である。入射した光子により、ガイガー放電が起こると、それぞれのピクセルに付属している抵抗により、印加されたバイアス電圧が降伏電圧以下になり、ごく短い時間でガイガー放電は停止する。この放電時間は1ns以下であるため、よい高速応答性をもつ。SiPMからの出力信号は、この数百から千数百ピクセルから出力される電荷の和として出力される。SiPM上の同じピクセルに数個の光子が入射した場合、その出力信号からは、入射光子の個数は断定できないが、約 $1mm^2$ と狭い範囲に、数百から千数百ピクセルが形成されるという構造のため、$1mm^2$ の狭い範囲で1~1000くらいまでの入射光子を測定することができる。

3.3.2 構造

図3.3にSiPMの構造の模式図を示す。

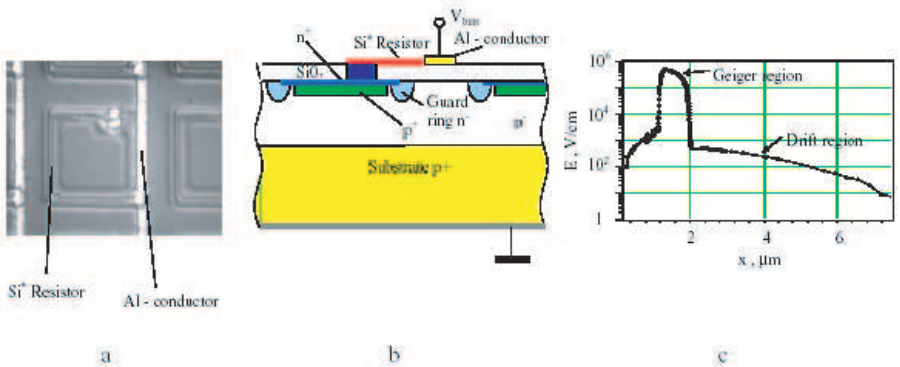


図 3.3: SiPM:abc

図aはSiPMの顕微鏡写真であり、中心の正方形が一つのピクセルで数十~数百 μm^2 である。図bはSiPMの断面図を模式的に表したものである。数 μm のエピタキシャル層がp層上に形成され、ここが電子正孔対のドリフト域になっている。図cは図bの上部から下部に向かっての電場の強さを示している。これより、表面から

1μm 程度の部分に $3\sim5\times\ 10^5$V/cm という高電場が形成され、ここがガイガー動作領域である。

3.3.3 ロシア製 SiPM の一般特性

我々がテストを行った SiPM は約 1mm^2 の範囲に 1156 ピクセルのダイオードが形成されているタイプのもので、以下のようなテストを行った。

フォトンカウンティングとゲイン測定 まず、SiPM のバイアス電圧に対するゲイン変化を測定した。図 3.4 にそのときのセットアップ図を示す。

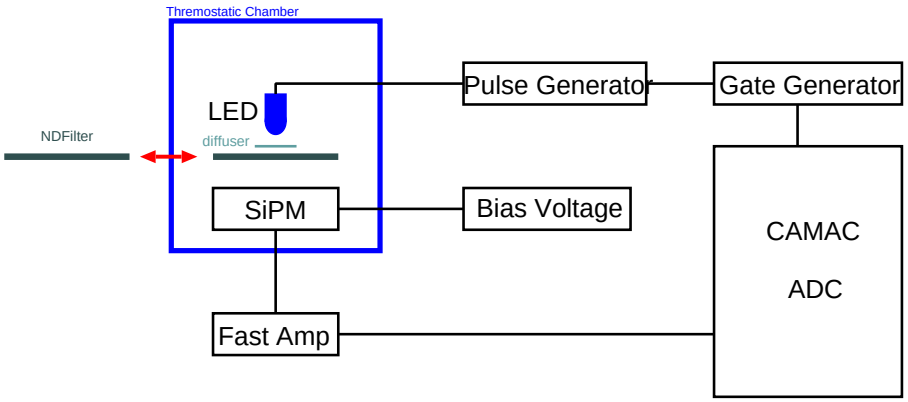


図 3.4: SiPM ゲイン測定のためのセットアップ

パルスジェネレータで作られたパルスを青色ダイオードに送り、そこからの光を ND フィルターで減衰させ SiPM に入射している。図では SiPM からの出力を、アンプ (ORTEC FT820) を通して 200 倍に増幅している。

ゲインの測定方法は、まずアンプを使用して 1 光子からの出力、つまり、1 ピクセル出力分の電荷量を算出する。次にアンプ、ND フィルターをはずし、光量を一定に保ちながらバイアス電圧を変化させながらその出力電荷をプロットしていく。これらを 6 つの SiPM について行った。図 3.5 にフォトンカウンティング時の ADC 分布を示す。一番左のピークはペデスタルである。ほぼ 4 光子分がきれいに分離され、平均値 $1\sim2$ のポアソン分布をしているのがわかる。しかし、それぞれのピークは等間隔になっていない。本来ならば等間隔になるはずであるが、これは、ペデスタル出力のノイズによる不安定性、出力パルスのオーバーシュート等が原因であると考えられ、ノイズの少ない読み出し回路、アンプなどに改善が必要である。ここでは、この分布の認められるピーク間電荷量の平均をとり、それを SiPM の 1 光子による出力電荷量とした。図 3.6 に 6 つの SiPM のバイアス電圧によるゲインの変化を示す。測定した 6 つの SiPM のゲインはほぼ 10^6 であることがわかる。

ゲインの温度依存性 次に SiPM ゲインの温度依存性を測定した。図 3.4 のセットアップ図では SiPM と LED は恒温槽内に置かれている。ゲインについては前述の方法をとり、温度を室温から-20 ℃まで下げながら測定した。図 3.7 に測定結果を示す。

図が示すとおり、全ての SiPM で、-20 ℃ではゲインが室温測定時より 10 図で 0 ℃と 10 ℃ではゲインの変化が少なくなっている。この間で、測定時間が 1 日あいており、そのとき恒温槽の温度を一度室温に戻している。

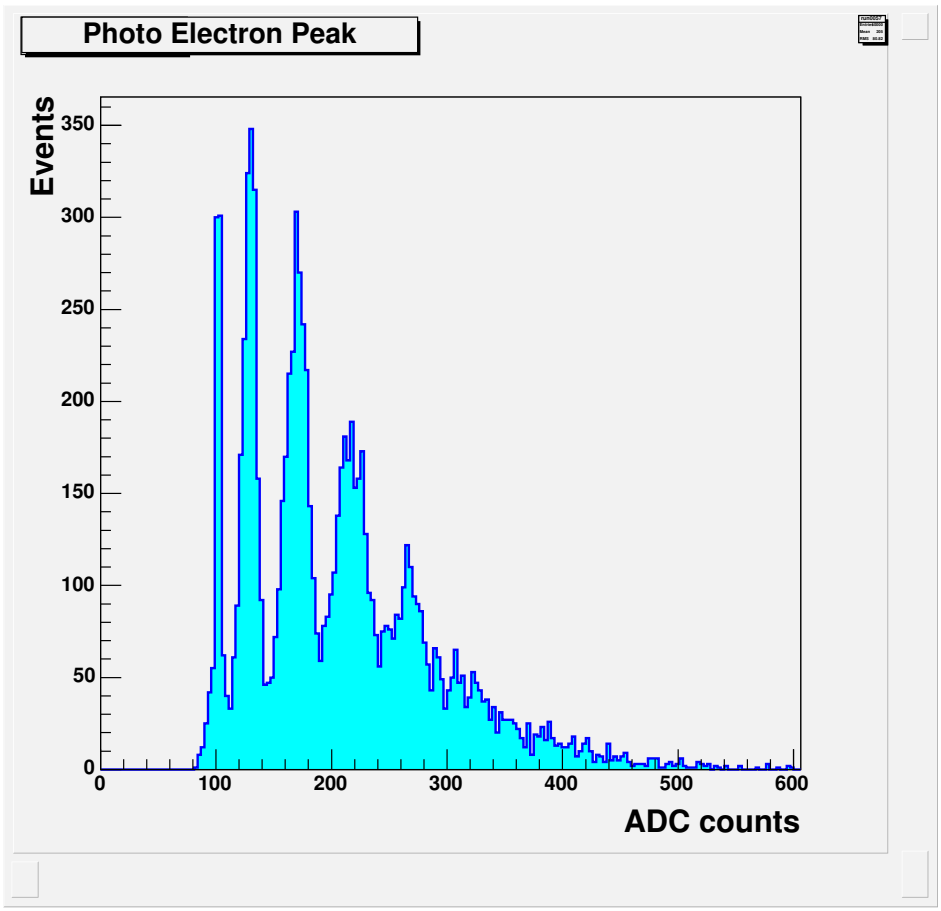


図 3.5: SiPM によるフォトンカウンティング。

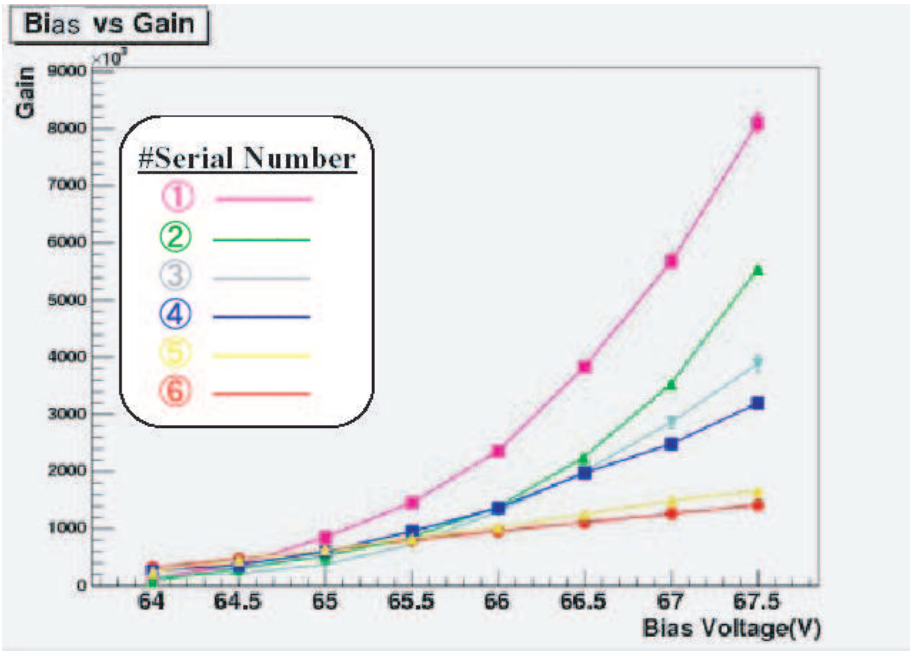


図 3.6: SiPM ゲインのバイアス電圧依存性。ほぼ 10^6 であることがわかる

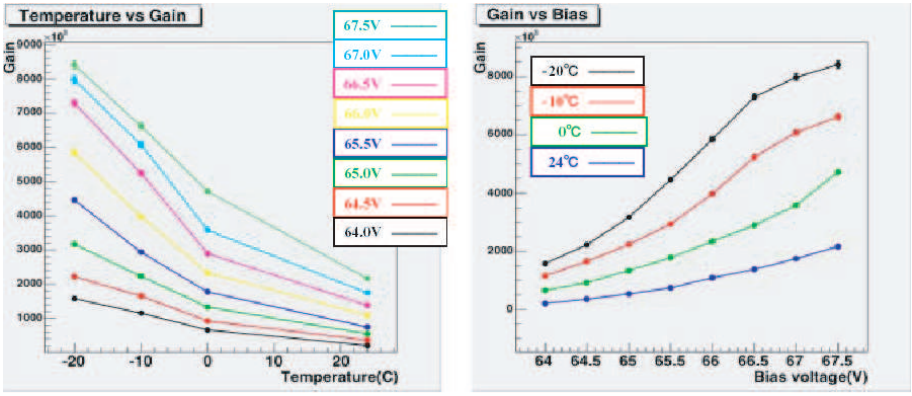


図 3.7: SiPM ゲインの温度依存性

ノイズ　SiPM は室温時でも約 1MHz の熱雑音がのる。この熱雑音は千個近くのピクセルがランダムにフラッシュするためである。そこで、ノイズのバイアス電圧による変化を測定した。図 3.8 にそのときのセットアップを示す。

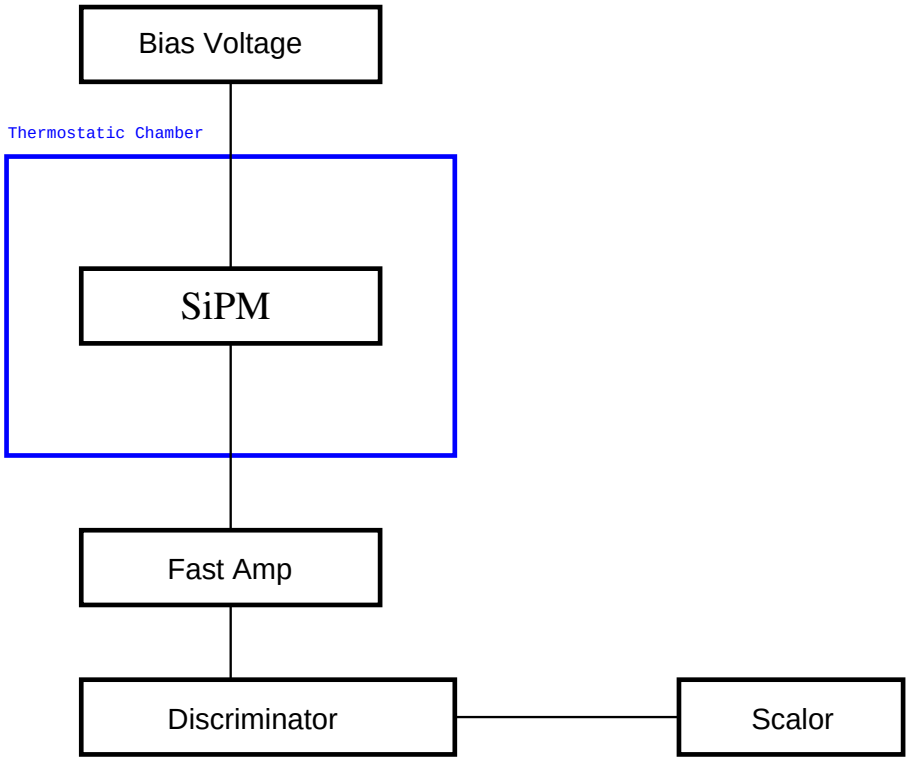


図 3.8: SiPM のノイズ測定時のセットアップ

　測定方法は、SiPM を暗箱に入れ、そこからの出力をディスクリミネータを通して、80MHz スケーラーで 10 秒間測定する。これを 6 つの SiPM について測定する。ディスクリミネータのスレッショルドは、読み出し回路が出すノイズと、SiPM からのノイズ出力が分離できる電圧にあわせている。図 3.9 にその結果を示す。
　ノイズレートはいずれの SiPM も数 MHz オーダーであった。

ノイズの温度依存性　次にノイズの温度依存性を測定した。恒温槽 (暗箱) 内に SiPM を設置し、ある温度ごとに電圧を変えながら、ノイズレートを測定した。セットアップはノイズレート測定と同じである。図 3.10 に結果を示す。
　温度が下がるにつれノイズレートが少なくなっていくことがわかる。

リニアリティ　ここでは、リニアリティ測定は、SiPM の出力電荷量の入射光量に対する変化量測定のことを示す。SiPM の入射光量に対する出力電荷量の関係はポアソン分布を使って、次式で示される。

$$Signal = N_{pixel}\left(1 - \exp\left(-\frac{< N_{p.e.} >}{N_{pixel}}\right)\right) \tag{3.1}$$

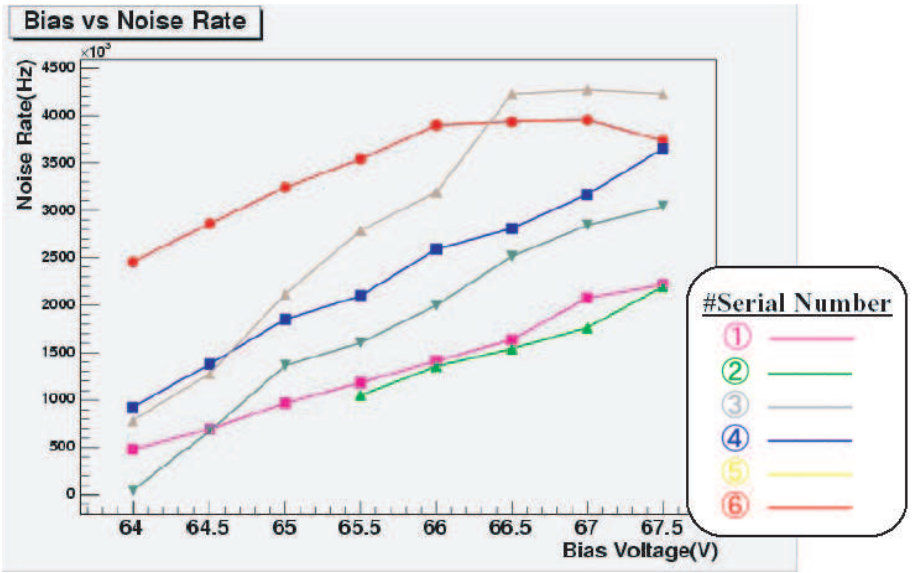


図 3.9: SiPM のノイズレートのバイアス電圧による変化

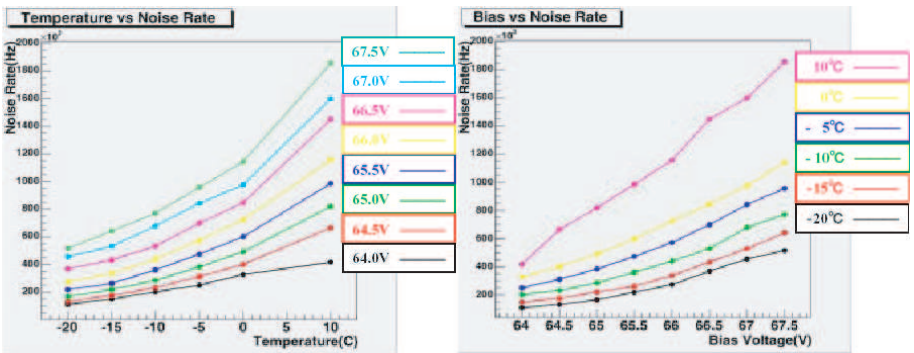


図 3.10: SiPM のノイズレートの温度依存性

ここで $Signal$ は SiPM の信号を出したピクセル数、$< N_{p.e.} >$ は平均入射光子数 N_{pixel} は、SiPM の総ピクセル数である。平均入射光子数が $N_{p.e.}$ のとき、あるピクセルが信号を出さない確率をポアソン分布から計算し、その余事象を求めることにより、この関係式を算出している。

図 3.11 にリニアリティ測定のセットアップを示す。

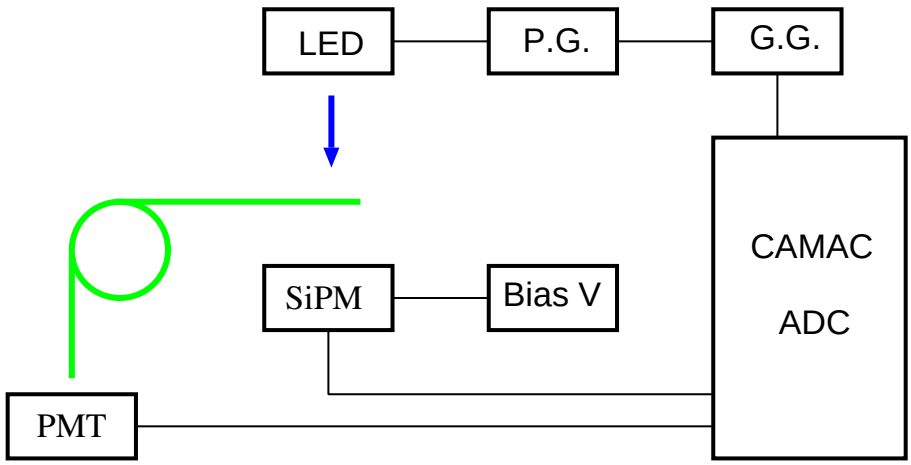


図 3.11: SiPM のリニアリティ測定セットアップ。

青色 LED からの光を SiPM に入射し、その間に WLS ファイバーをいれ、LED 出力光と同期した光が PMT に入射するように設置している。ここで PMT の入射光量と出力電荷は比例するとしている。

図 3.12 に結果を示す。PMT に比べ、SiPM にはサチュレーションが見られる。SiPM においては、上述のように各ピクセルがガイガーモードで動作するため、一つのピクセルに数個光子が入射されても、1 光子分の電荷量を出力するためであり、照射される光量が増すと、同一ピクセルに数個の光子が入射するようになるためこのような分布になると考えられる。

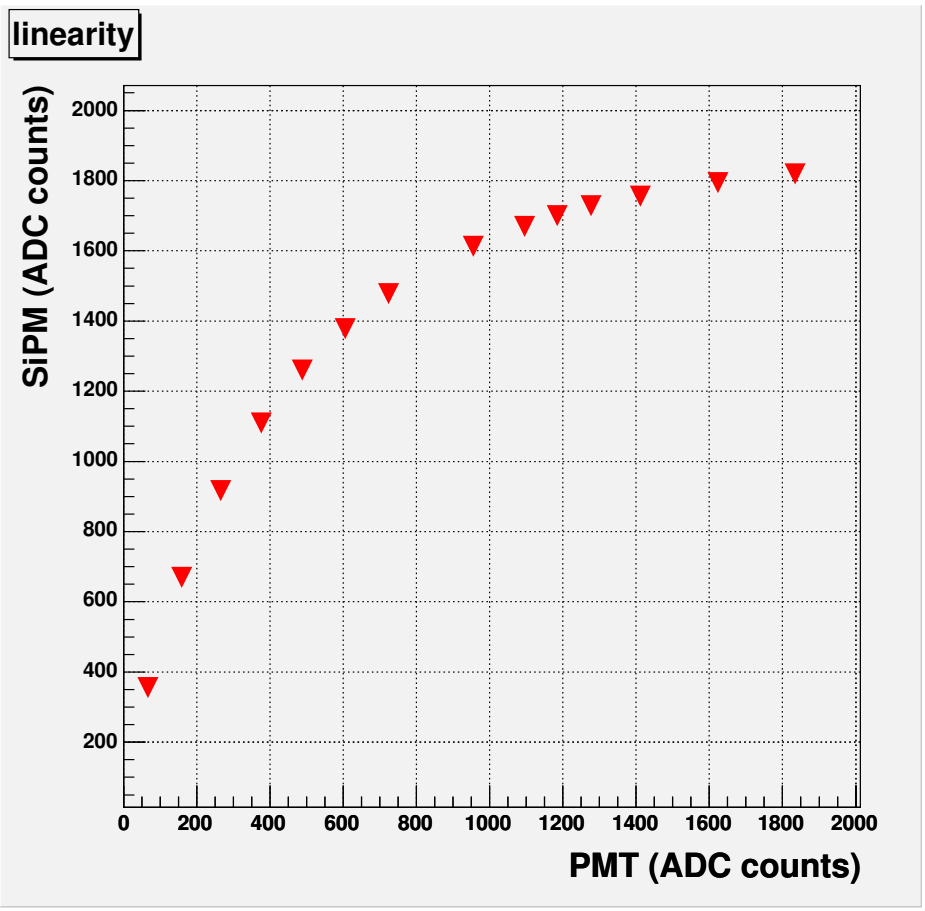


図 3.12: SiPM のリニアリティ測定。

第4章　ビームテスト

上述の光検出器のうち、MAPMT と HAPD を、カロリメータ、シャワーマキシマム測定器に使用しテストを行った。今回試作され、テストされたサンプリング型カロリメータはストリップタイプとスモールタイルタイプである。

ここでは、本研究のテーマであるシャワーマキシマム測定器について述べる。T517 ビームテスト、DESY ビームテストでは MAPMT を用いてシャワーマキシマム測定器の性能テストを行い、T545 ビームテストでは光検出器 HAPD をシャワーマキシマム測定器に用いてテストを行った。

4.1　T517 ビームテスト及び DESY ビームテスト

2002 年 10 月に KEK(高エネルギー加速器研究機構) のπ 2 ビームラインにて T517 ビームテストを行った。テストしたサンプリング型カロリメータは、ストリップタイプカロリメータ、スモールタイルタイプカロリメータ、シャワーマキシマム測定器× 2、プリシャワー測定器である。ビームは 1GeV ~ 4GeV の電子、π 、μ が使用された。また、T517 の結果をうけ、2003 年 10 月に DESY(Deutches Elektronen SYnctrotron) の ST21 ビームラインでビームテストを行った。テストした測定器は、プリシャワー測定器、シャワーマキシマム測定器の MAPMT 読み出しである。使用したビームは 1GeV ~ 6GeV の電子のみである。

4.1.1　目的

上記の測定器のうち、本研究ではシャワーマキシマム測定器を用いて、位置分解能、電子、π 粒子識別を行った。使用した光検出器は、16 チャンネル MAPMT(浜松ホトニクス製 H6568-10) である。

また、T517 ビームテストでは、シャワーマキシマム測定器の位置分解能が、同等の分解能を示すはずのストリップ型カロリメータの位置分解能より悪くなるという結果を得た。本研究における DESY ビームテストは、これの再検証を目的として行われた。

4.1.2　T517 セットアップ

T517 ビームテストにおけるビームラインのセットアップ図を図 4.1 に示す。ビームライン上に 3 層のトリガーカウンター (T1,T2,T3)、2 層のチェレンコフカウンター (C1,C2)、4 層のドリフトチェンバー (DC1,DC2,DC3,DC4)、1 層のμ カウンター (mu) が設置されている。測定器はプリシャワー測定器、シャワーマキシマム測定器× 2、スモールタイルカロリメータ、ストリップタイプカロリメータが moving stage 上に設置してある。

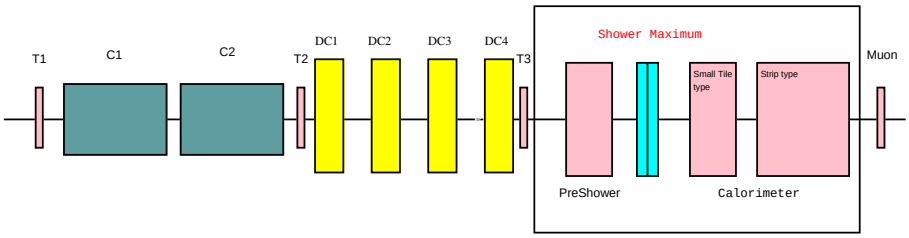


図 4.1: T517 セットアップ

4.1.3 T517 解析結果

キャリブレーション　テストに際し、まずキャリブレーションを行う。シンチレータを用いたサンプリング型カロリメータの場合、カロリメータ内で全てのエネルギーを落とした入射荷電粒子のエネルギーは、カロリメータ内の検出体であるシンチレータで観測された光量に比例する。そこで、シャワーを起こさず、シンチレータを通過した荷電粒子 (MIP) の出す光量でエネルギーを規格化する。図 4.2 に、シャワーマキシマム測定器で測定された、MIP 粒子による ADC 分布を示す。この ADC 分布をランダウ関数でフィットしたときのピーク値を 1 とする。これをシャワーマキシマム測定器の X 層 20 本、Y 層 20 本、計 40 本のシンチレータストリップ全てについて行う。

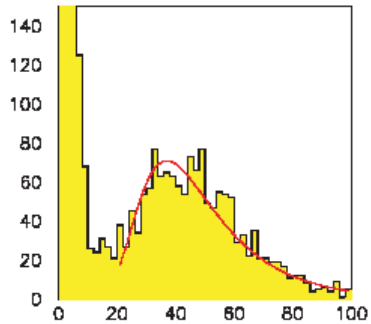


図 4.2: MIP の ADC 分布。横軸は ADC カウント、縦軸はイベント数この、光量の多い方へテールを引いた分布をランダウ分布と呼ぶ。これは、MIP 粒子がシンチレータを通過する際、シンチレータ内の電子などをはじきとばして、その電子がまたシンチレーション光を発生させる等の過程を含むためである

粒子選別　KEK π 2 ビームラインでは、電子、π 粒子、μ 粒子が混ざったビームが生成される (ほとんどがπ 粒子) が、テストすべき測定器の、電子のみの寄与による信号、またはπ 、μ 粒子のみの寄与による信号を得るために、混ざってやってくるビームのうち、電子のみ、あるいはπ 、μ 粒子のみによるイベントを選び出さなければならない。

ビームライン上流、中流に設置されている T1、T2、T3 は 3cm × 3cm のシンチレータからなるカウンタでこれらの出力信号の AND をとることによってその範囲を確実に通過した荷電粒子を選ぶことができる。また、C1、

C2 はチェレンコフカウンタと呼ばれ、内部に満たされている窒素の圧力を調整することにより、電子通過時のみ、チェレンコフ光として大きな信号を出力するトリガーカウンタである。ここで信号を出さないはずのμ 粒子や、π 粒子は、チェレンコフカウンター内で、窒素原子との衝突によるアクシデンタルな信号を出すことがあり、これを除去するため、C1 と C2 の AND 出力を電子識別に用いている。図 4.3 に C1、C2 からの ADC 分布を示す。図左は T1、T2、T3 の AND をトリガーに使用した場合の散布図であり電子、π 粒子、μ 粒子全てが含まれている。π 粒子、μ 粒子は C1、C2 では信号を出さないので、左下の赤枠内がπ 粒子、μ 粒子と考えられる。また、左図の中心付近に散在する信号は、ビーム中の電子の信号であると考えられる。一方、図右は C1、C2、T1、T2、T3 のトリガーで取った図で、電子が通過した時の信号とした。

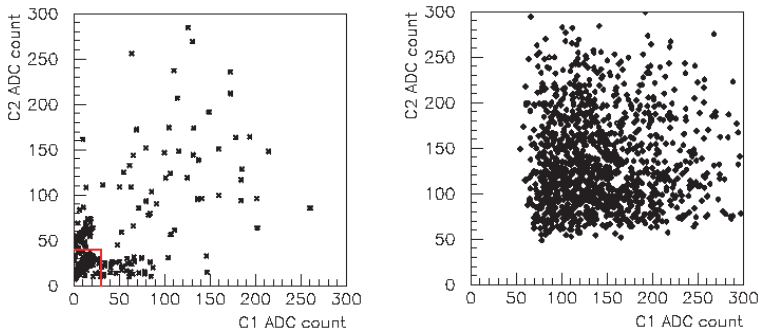


図 4.3: チェレンコフカウンターの ADC 分布。左図、右下の赤枠内はπ（μ）粒子信号。右図は電子による信号

シャワーマキシマム測定器解析　シャワーマキシマム測定器で実際に観測された電子イベント、π（μ）粒子イベントを図 4.4、fig:t517eevent に示す。製作したシャワーマキシマム測定器は X 層、Y 層の 2 層から構成されるため、それぞれの層のイベントを示した。また、電子イベント、π 粒子イベント双方、ビームエネルギーは 2GeV である。

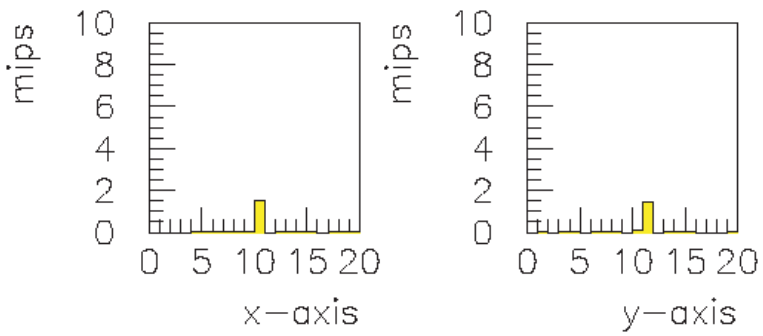


図 4.4: シャワーマキシマム測定器で観測されたπ（μ）粒子によるイベント。横軸はともにストリップ数（20 本）。縦軸は MIP で規格化されたエネルギー。π（μ）粒子は通過するのみの寄与なので落としたエネルギーは 1MIP である。

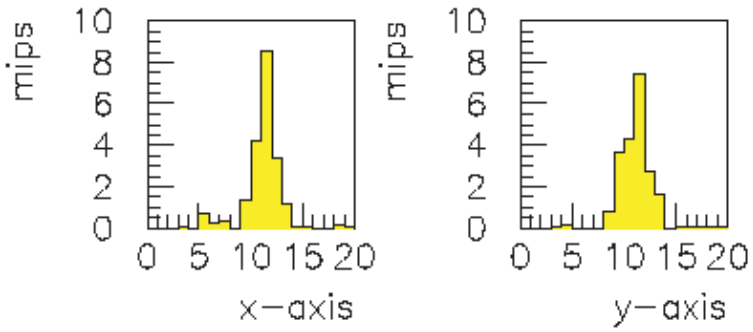


図 4.5: シャワーマキシマム測定器で観測された電子によるイベント。電磁シャワーによる広がりが確認できる。

π（μ）粒子によるイベントでは、たしかにシャワーを起こさず測定器を通過するのみの信号が確認でき、電子によるイベントでは、シャワーマキシマム測定器の前方に設置されたプリシャワー測定器内の吸収体である、鉛の寄与による電磁シャワーが観測でき、電子入射位置付近を中心として電磁シャワー構造がみられた。

これらの測定結果を用いて、シャワーマキシマム測定器の位置分解能、電子識別能の測定を行った。

電子識別能　電磁カロリメータの能力の一つに粒子識別能力がある。実際の実験では、高エネルギー粒子の衝突により、様々な粒子が生成され、カロリメータに入射されるので、このビームテストのように予め電子による事象とπ 粒子による事象を分けて測定することは難しい。電磁カロリメータにおいて、電子が入射した場合とπ 粒子などハドロンが入射した場合ではそれらのエネルギー分布はどちらもある広がりをもつので、エネルギー分布から電子が入射したことを完全には判断できず、いくらかπ 粒子を混入したまま、それらを電子と判断してしまう。このπ 粒子の混入率を測定した。図 4.6 にその解析結果を示す。図左はπ（μ）粒子イベントと電子イベントを一つのヒストグラムにまとめたもの。横軸は MIP を単位にしたそれぞれの粒子の Energy deposit、縦軸は規格化されたイベント数（ここでは、それぞれのイベント数の比率を同じにしてある）。図右は electron efficiency と pion rejection factor を、MIP の関数として表している。

T517 ビームテストで得られた電子識別能力は 20MIPs のカットで、electron efficiensy 85.0% 、pion rejection factor 23.9 を得た。

位置分解能　シャワーマキシマム測定器の位置分解能を測定するためには、シャワーマキシマム測定器より、高い精度で粒子通過位置を知る必要がある。T517 ビームテストで使用された位置測定器はドリフトチェンバーと呼ばれる測定器である [5]。ドリフトチェンバーとは、そこを通過した荷電粒子がドリフトチェンバー中を満たしている気体をイオン化させ、その電離電子をチェンバー内にかけられた電場によってセンスワイヤーと呼ばれる読み出し電極から読み出す装置である。電離された電子がチェンバー内の気体中をセンスワイヤーに向かって移動する速度が一定であることを用いて、時間情報から入射荷電粒子の通過位置を知ることができる。用いたドリフトチェンバーの位置分解能は 300 μ m 程度である。ここで得られたシャワーマキシマム測定器の位置分解能はカロリメータ前面から $4.3X_0$ の物質量の場所で、3.70 ± 0.05mm（4GeV/c 電子）であった [6]。詳しい解析方法は、次の DESY ビームテスト解析で述べる。

しかし、シャワーマキシマム測定器と、ビーム入射方向に同じ構造をもつストリップ型カロリメータによる、

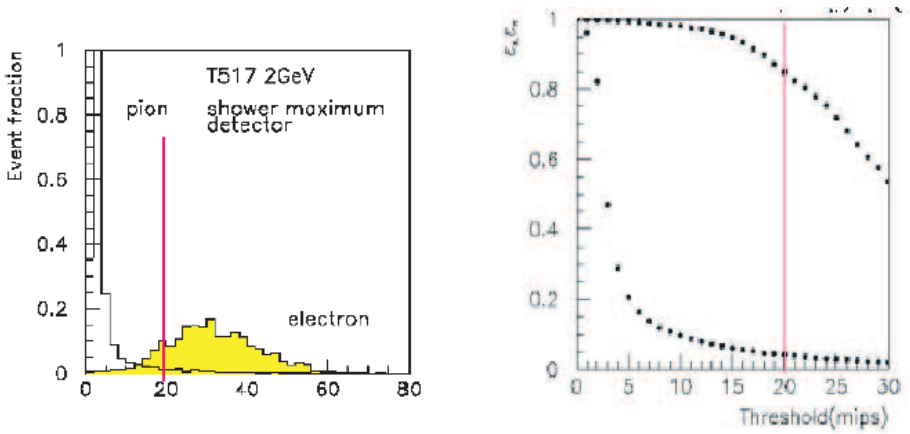


図 4.6: T517 シャワーマキシマム測定器の電子識別能力

ほぼ同じ物質量の場所での位置分解能測定では、 1.80mm ± 0.1mm (4GeV/c 電子) という結果を得、シャワーマキシマム測定器による位置分解能の方が悪いことがわかった。この原因として、シャワーマキシマム測定器の前方に設置されているプリシャワー測定器と、シャワーマキシマム測定器の間に約 5cm の隙間があり、シャワーが広がってしまったためであると考えられた。次に述べる DESY ビームテストでは、前方のプリシャワー測定器との距離を考慮にいれて、位置分解能を測定した。

4.1.4 DESY セットアップ

DESY ビームテストにおけるビームラインのセットアップ図を図 4.7 に示す。

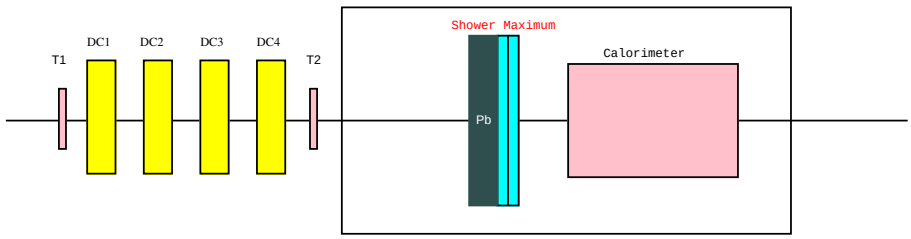


図 4.7: DESY ビームテストセットアップ図

ビームライン上に 2 層のトリガーカウンター (T1,T2) 、4 層のドリフトチェンバー (DC1,DC2,DC3,DC4)、そして架台上にシャワーマキシマム測定器、タイル型カロリメータが設置してある。

4.1.5　DESY ビームテスト解析結果

キャリブレーション　DESY ST21 ビームラインでは、ビームには 1GeV ~ 6GeV の電子のみが含まれる。そのためキャリブレーションは前方の鉛を取り除いて、ビームを照射した。図 4.8 に通過粒子の ADC 分布図を示す。

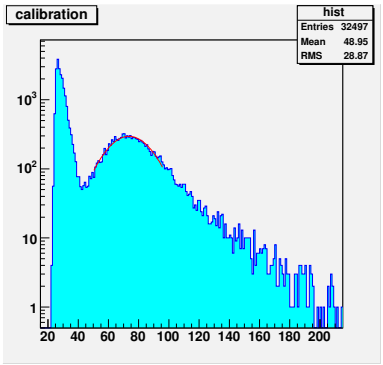


図 4.8: DESY ビームテストにおけるキャリブレーション

シャワーマキシマム測定器解析　シャワーマキシマム測定器で実際に観測された電子イベントを図 4.9 に示す。図のイベントにおけるビームエネルギーは 6GeV である。

T517 ビームテストと同様の広がりがみられる。T517 と同様、このビームの広がりから、電子の入射位置を算出する。このときとった方法は次の二つ。

1. 重心法：最大エネルギーが落ちたストリップの隣 2 本ずつ、計 5 本分のエネルギー重心を求め、その場所を入射位置とする。
2. ガウスフィット法：シャワーをガウシアンでフィットし、その mean をシャワーマキシマム測定器が測定した電子の入射位置とする。

位置分解能　T517 で使用したのと同じドリフトチェンバーを用いた。ドリフトチェンバーによる誤差を σ_{DC}、シャワーマキシマム測定器による誤差を σ_{SHmax} とした場合、測定全体の誤差を σ_{total} は、

$$\sigma_{total} = \sigma_{DC} \oplus \sigma_{SHmax} \tag{4.1}$$

となるが、ドリフトチェンバーの誤差はシャワーマキシマム測定器による誤差より十分小さいと考えられるので、

$$\sigma_{DC} \ll \sigma_{SHmax} \tag{4.2}$$

$$\sigma_{total} \simeq \sigma_{SHmax} \tag{4.3}$$

としてよい。次にドリフトチェンバーの解析方法を示す。

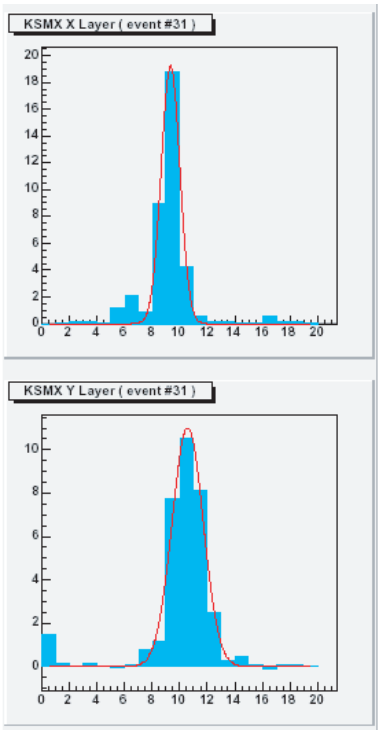


図 4.9: DESY ビームテストで観測された電子イベント上部が X 層、下部が Y 層

ドリフトチェンバーは 1 層で X 方向と Y 方向を読み出すことができ、それぞれ計 8 層用いている。まず、X 方向 4 層のうち、3 層を選び、それらで得られた 3 点で最小二乗法により直線を得る。そこで得られた直線を用いて、残りの 1 層から得られた X 位置との差を算出する。これを残差 (residual) と呼ぶ。図 4.10 にその分布を示す。右図は、χ^2 分布と呼ばれ、残り 1 層の X 位置測定のずれの度合いを示す分布である。χ^2 分布は、あるイベントにおいて、3 点による直線から得られた X 位置を X_i、残りのドリフトチェンバーから得られた X 位置を x_i とし、直線でのこり 1 点の位置をフィットする際の誤差を σ とすると、次式で表す。

$$\chi^2 = \sum \frac{(X_i - x_i)^2}{\sigma^2} \tag{4.4}$$

本実験では、ドリフトチェンバーから飛跡を再構成する際、適切な再構成が行われていないイベントを取り除くため、χ^2 分布が、8 より小さいイベントを選択している。

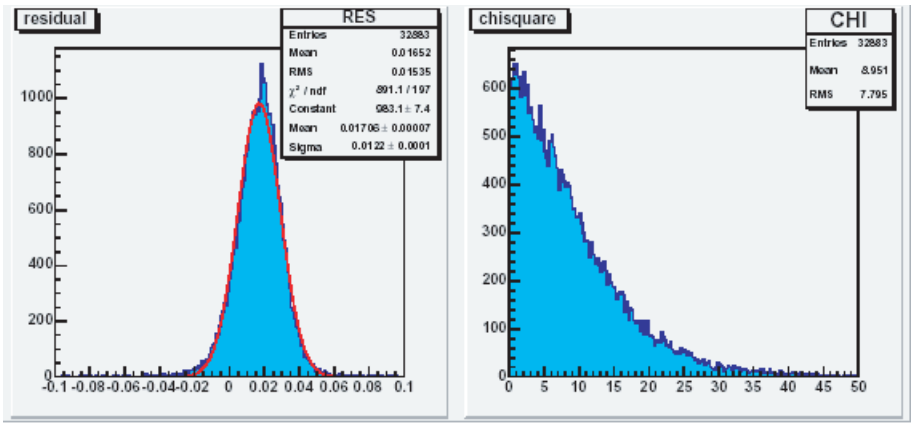


図 4.10: ドリフトチェンバーの解析の様子。図左は残差分布図右は χ^2 分布

上記イベント選択を用いて、実際にシャワーマキシマム測定器で得られた位置分解能を 1,2 の場合について図 4.11、??に示す。

ここで得られたシャワーマキシマム測定器の位置分解能は、4GeV 電子で、

1. 重心法：2.30mm ± 0.01mm
2. ガウスフィット法：2.03mm ± 0.01mm

であった。鉛を密着させたことにより、位置分解能が T517 のそれより改善し、同等の性能を持つカロリメータとのデータにも近い結果が得られた。

次に、鉛の位置により、位置分解能がどのように変化するかを測定した。ここでは位置分解能は重心法を用いている。その結果を図 4.13 に示す。鉛は T517 での予想どおり、密着させた方が良い結果が得られる。

S-shape 補正　位置分解能を測定した際、ドリフトチェンバーとシャワーマキシマム測定器の相関図では、特徴的な S 字型のうねりが見られる。これは、シャワーマキシマム測定器の構造が、1cm 巾のストリップを束ねた構造であることに起因している。上記重心法、ガウスフィット法ともに、1cm 巾ストリップの中心座標に対する光

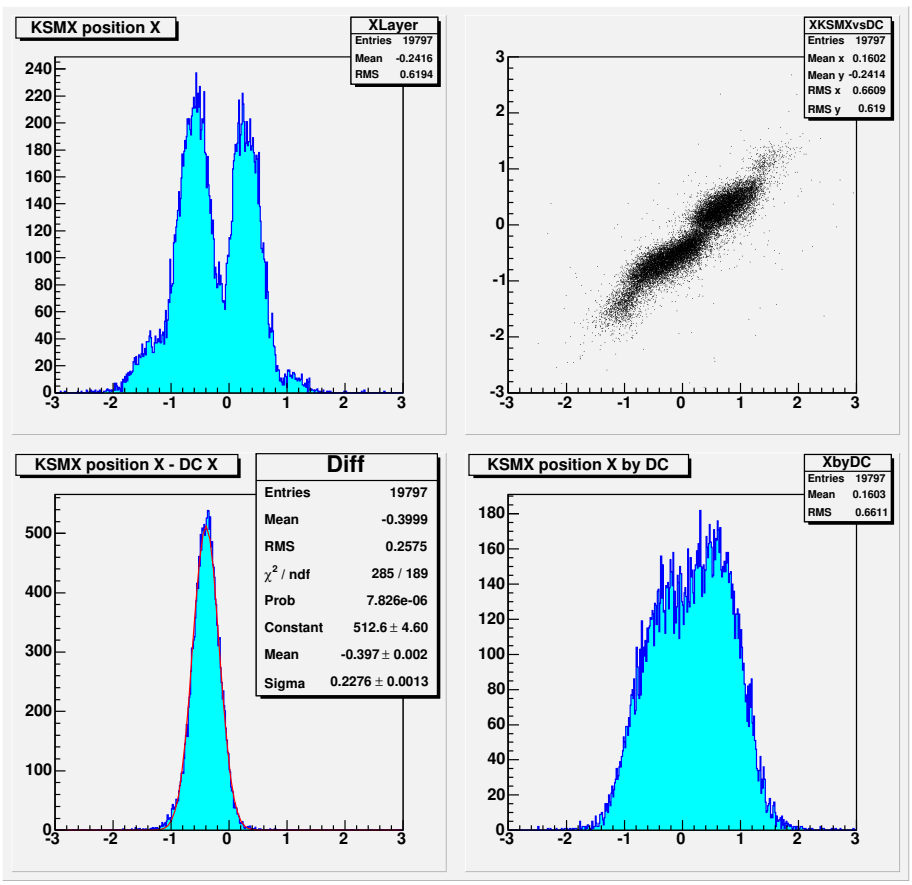


図 4.11: DESY ビームテストで得られたシャワーマキシマム測定器の位置分解能 (重心法)。図左上はシャワーマキシマム測定器で測定した電子の入射位置。図右下はドリフトチェンバーで測定した電子の入射位置。図右上はそれぞれの Scatter Plot。図左下はそれらの差をとったものでこの分布の広がりがシャワーマキシマム測定器の位置分解能を表す。

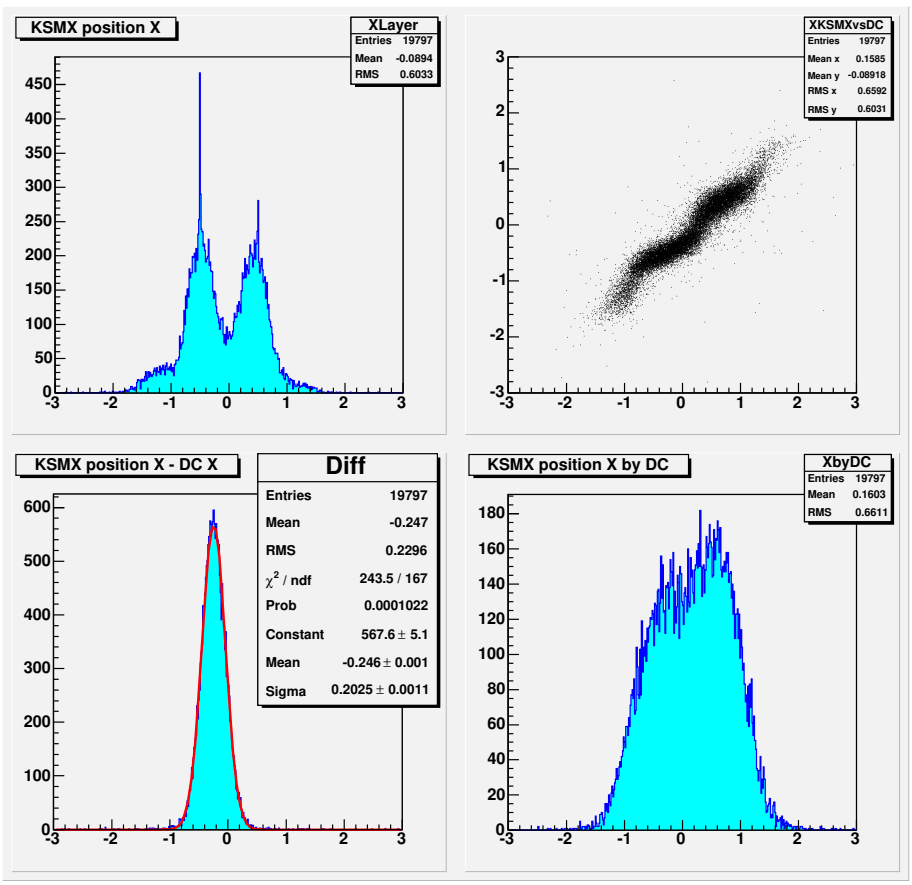


図 4.12: DESY ビームテストで得られたシャワーマキシマム測定器の位置分解能 (ガウスフィット法)。図左上はシャワーマキシマム測定器で測定した電子の入射位置。図右下はドリフトチェンバーで測定した電子の入射位置。図右上はそれぞれの Scatter Plot。図左下はそれらの差をとったものでこの分布の広がりがシャワーマキシマム測定器の位置分解能を表す。

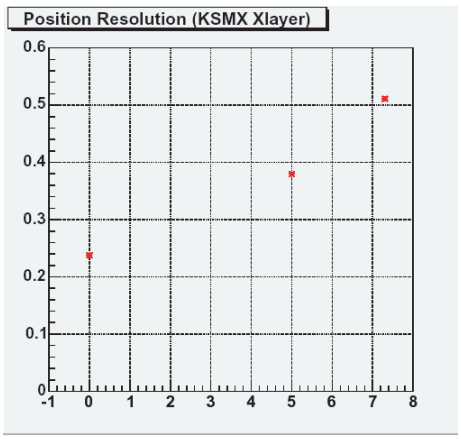


図 4.13: 鉛の位置による位置分解能の違い (重心法)。横軸はシャワーマキシマム測定器前面からの鉛の距離。(距離 5cm の点は T517 時の値)

量をもとにしているため、1cm 巾の両端に入射してシャワーを起こした電子と中心付近に入射してシャワーを起こした電子との違いを見分けることが困難であるからである。しかし、これを解析で補正することができれば、さらによい位置分解能を得ることができると考えられる。

図 4.14 に補正の様子を示す。

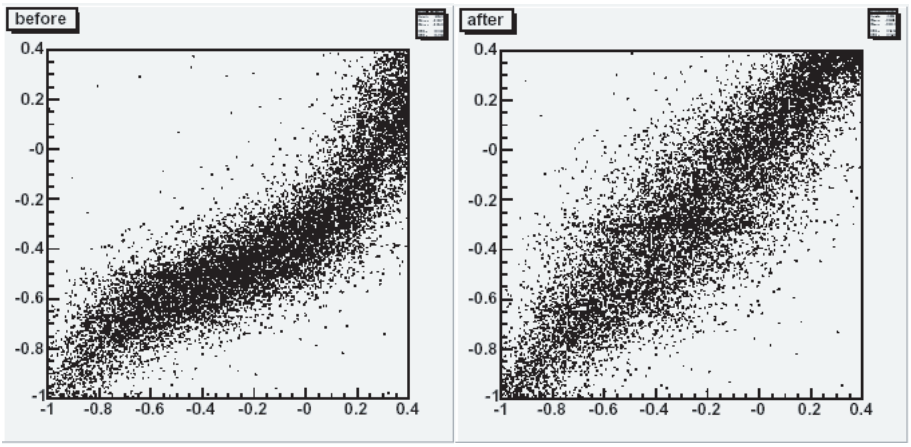


図 4.14: S-Shape 補正の様子。図左は補正前、図右は補正後

図左のうねりを関数 $tan(x)$ で補正した。結果が右図であり、きれいな正の相関がみられる。この結果を用いて、再度シャワーマキシマム測定器の位置分解能を求めた。ここではよりよい位置分解能を目指すため、重心法ではなく、ガウスフィットによる方法を用いた。図 4.15 にその結果を示す。

S-Shape 補正後、図左上のシャワーマキシマム測定器による電子入射位置は図右下のドリフトチェンバーによるそれに良く似た分布を示している。補正後の位置分解能は 2.02mm ± 0.01mm (4GeV 電子) であった。

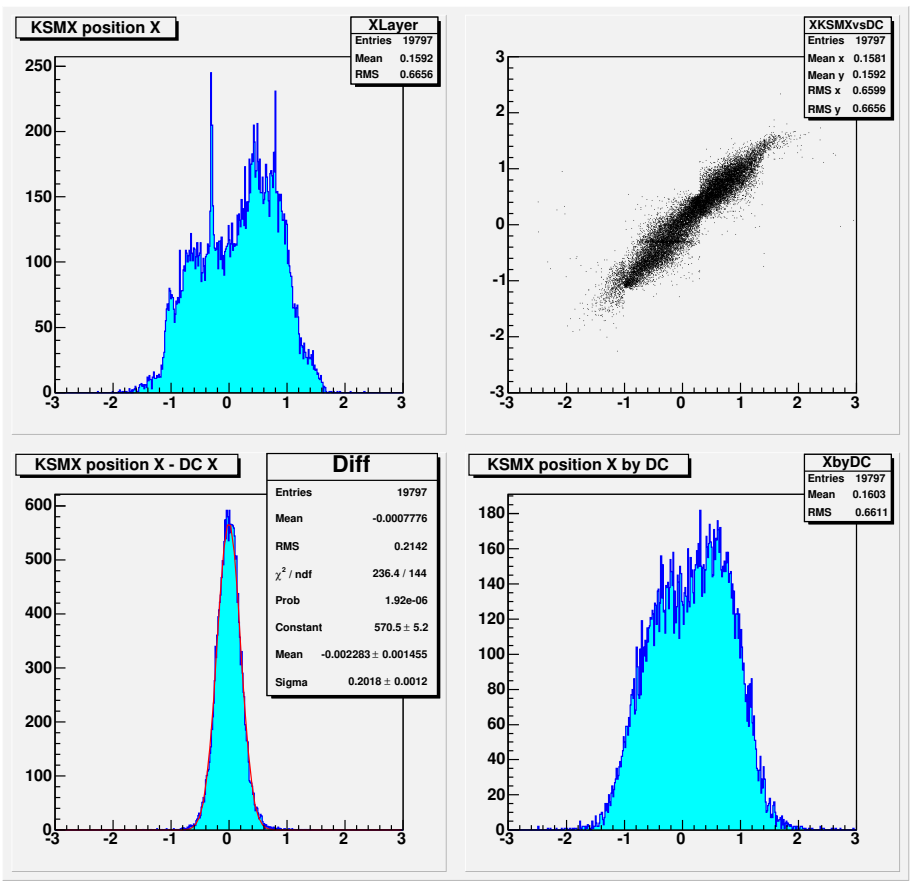


図 4.15: S-Shape 補正後の位置分解能。図左上はシャワーマキシマム測定器で測定した電子の入射位置。図右下はドリフトチェンバーで測定した電子の入射位置。図右上はそれぞれの Scatter Plot。図左下はそれらの差をとったものでこの分布の広がりがシャワーマキシマム測定器の位置分解能を表す。

4.2　宇宙線による HAPD テスト

上記 2 回のビームテストでは、光検出器として、MAPMT を用いて、カロリメータ中に設置されるシャワーマキシマム測定器の性能についての評価を行ってきた。次に 3 章で触れた光検出器、HAPD をシャワーマキシマム測定器の光検出器として用い、テストを行う。光検出器 HAPD をビームテストに使用するに際し、宇宙線によるテストを行った。

4.2.1　セットアップ

図 4.16 に宇宙線テストの際のセットアップを示す。

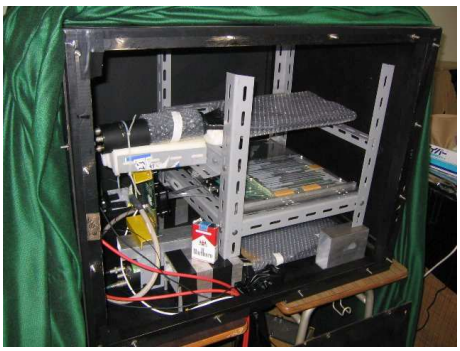


図 4.16: HAPD 宇宙線テストセットアップ写真

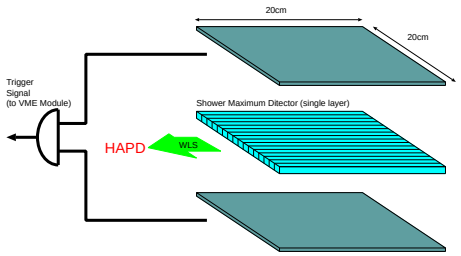


図 4.17: HAPD 宇宙線テストセットアップ模式図

シャワーマキシマム測定器の 1 層を、上下の 20cm × 20cm × 1cm のトリガーシンチレータではさみ、その出力の AND をトリガー信号としている。

HAPD は 8 × 8 の 64 ピクセル構造であるので、図 4.18 のようなファイバーアタッチメント治具を製作し、64 ピクセル中 20 ピクセルにシャワーマキシマム測定器からのシンチレーション光が入射されるようにした。

シャワーマキシマム測定器からのシンチレーション光は WLS ファイバーによって緑色に変換され、製作した治具のクリアファイバー部分 (接続コネクタで WLS とクリアファイバーを接続している) を通って HAPD に入射される。

4.2.2　読み出し回路からのノイズの取り扱い

HAPD の DAQ (Data Acquisition) システムは、前述のとおり、K2K Scibar グループによって開発されたものである [4]。そこで行われていたノイズ評価を本テストでも適用した。

一般にノイズは信号の入力形態同様その伝導モードにより以下の 2 種類に分けられる。

1. ノーマルモードノイズ : ディファレンシャルモードノイズとも呼ばれ、電源ライン間、シグナルライン間に発生する。このノイズの性質はシグナルと同じであり、ノイズ電流はそれぞれ逆方向である。よって原理的に除去できないので、各ラインにバイパスコンデンサ等のフィルタで対策する。

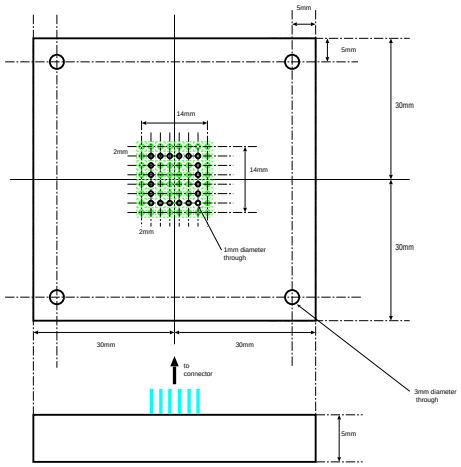


図 4.18: HAPD とシャワーマキシマム測定器からのファイバー接続構造。図の 20 個の黒点 (□ 形) にシャワーマキシマム測定器からのシンチレーション光を入射している。

2. コモンモードノイズ：シグナルライン、電源ラインとグラウンド間に発生するノイズ。ノイズ電流の方向はともに同じであり、入力端子間の電位差変らないために除去可能である。一般に低周波数である。

これらの概念図を図 4.19 に示す。

実際のコモンモード除去は、以下に示すようにオフライン解析により行った。イベント e に対する i チャンネルのデータサンプルを d_i^e と表し、総チャンネル数を N_c とすると、コモンモード d_{cm}^e は次のように定義される。

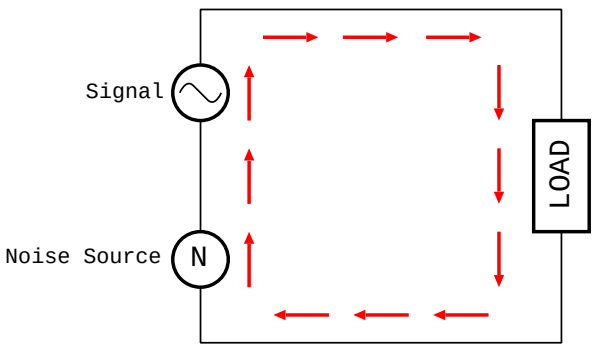
$$d_{cm}^e = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} d_i^e \tag{4.5}$$

このテストの場合、d_i^e は HAPD64 ピクセル中ファイバーの接続されていない 44 ピクセルのデータであり、$N_c = 44$ である。イベント e に対して、全てのピクセルのデータから d_{cm}^e を引くことにより、コモンモードノイズは除去できる。データの読み出しにかかる時間はコモンモードの周波数にくらべて十分短いため、このような取り扱いが可能である。

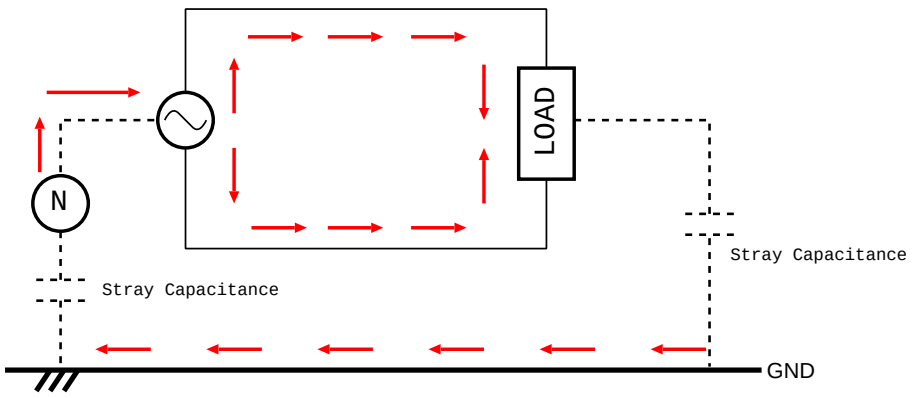
4.2.3 HAPD の宇宙線によるテスト結果

シャワーマキシマム測定器の HAPD による宇宙線テスト結果を図 4.20 に 64 ピクセル中 16 ピクセル分について示す。この 16 ピクセル中、ファイバーが接続されているピクセルは 6 ピクセルである。ファイバーの接続されていない 10 ピクセルにおけるペデスタル信号とは明らかに違う信号が、この 6 ピクセルで見られる。これらがシャワーマキシマム測定器を通過した MIP 粒子による信号と思われる。ここではまだコモンモードノイズは考慮していない。

図 4.21 に上記と同じ 16 ピクセルについて、コモンモードノイズを考慮にいれて解析を行った結果を示す。コモンモードノイズを考慮しない分布に比べ、MIP 粒子によるピークがペデスタルから分離されて見られる。また、ペデスタル分布も広がりが狭くなっている。



Normalmode Noise



Commonmode Noise

図 4.19: ノーマルモードノイズとコモンモードノイズの概念図。矢印はノイズ信号の流れを表す。

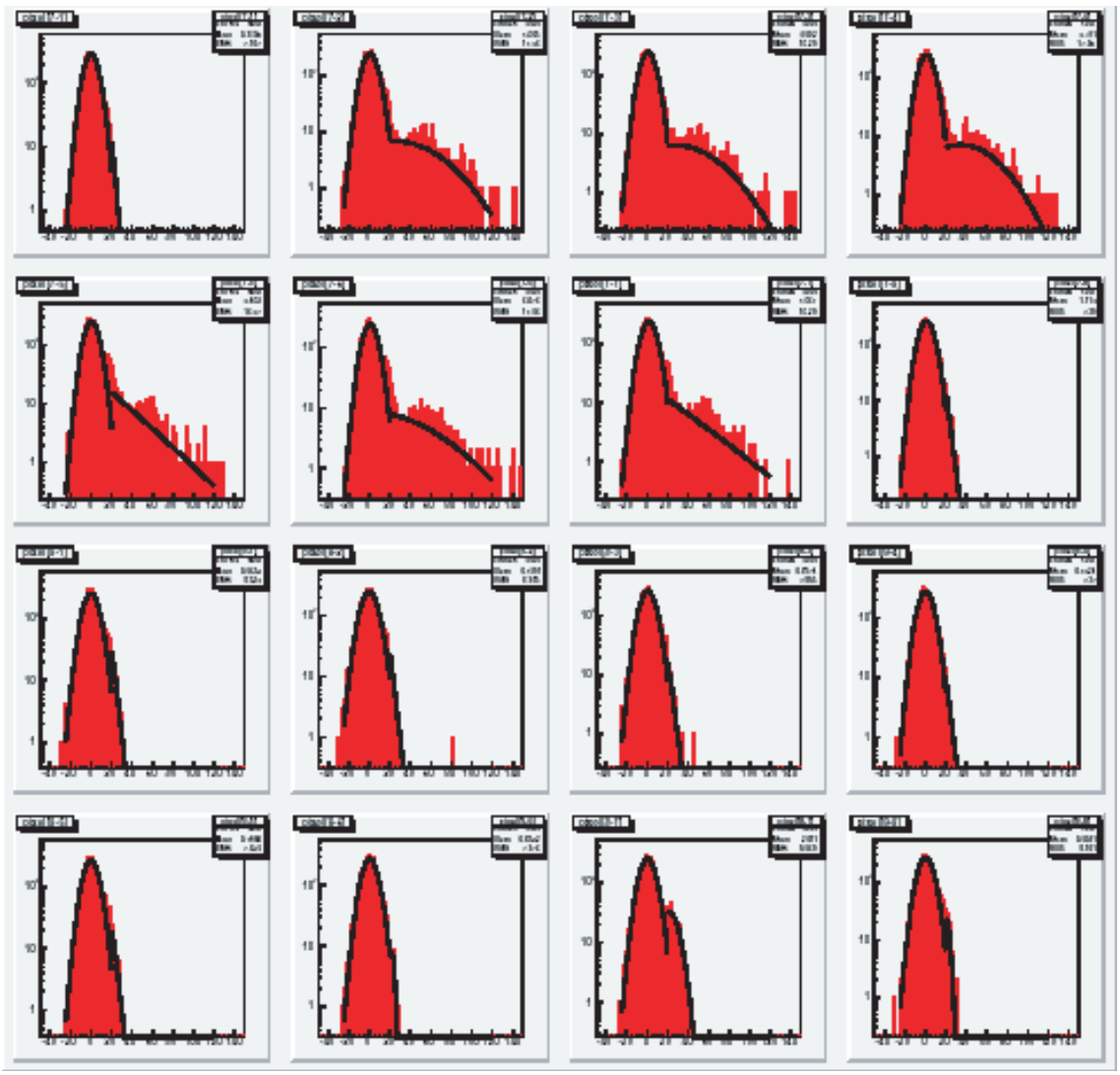


図 4.20: HAPD 宇宙線テストの結果を 16 ピクセル分表す。ここでは、16 ピクセル中、6 ピクセルにファイバーがアタッチされている。この 6 ピクセルでシャワーマキシマム測定器を通過した MIP 信号が見える。

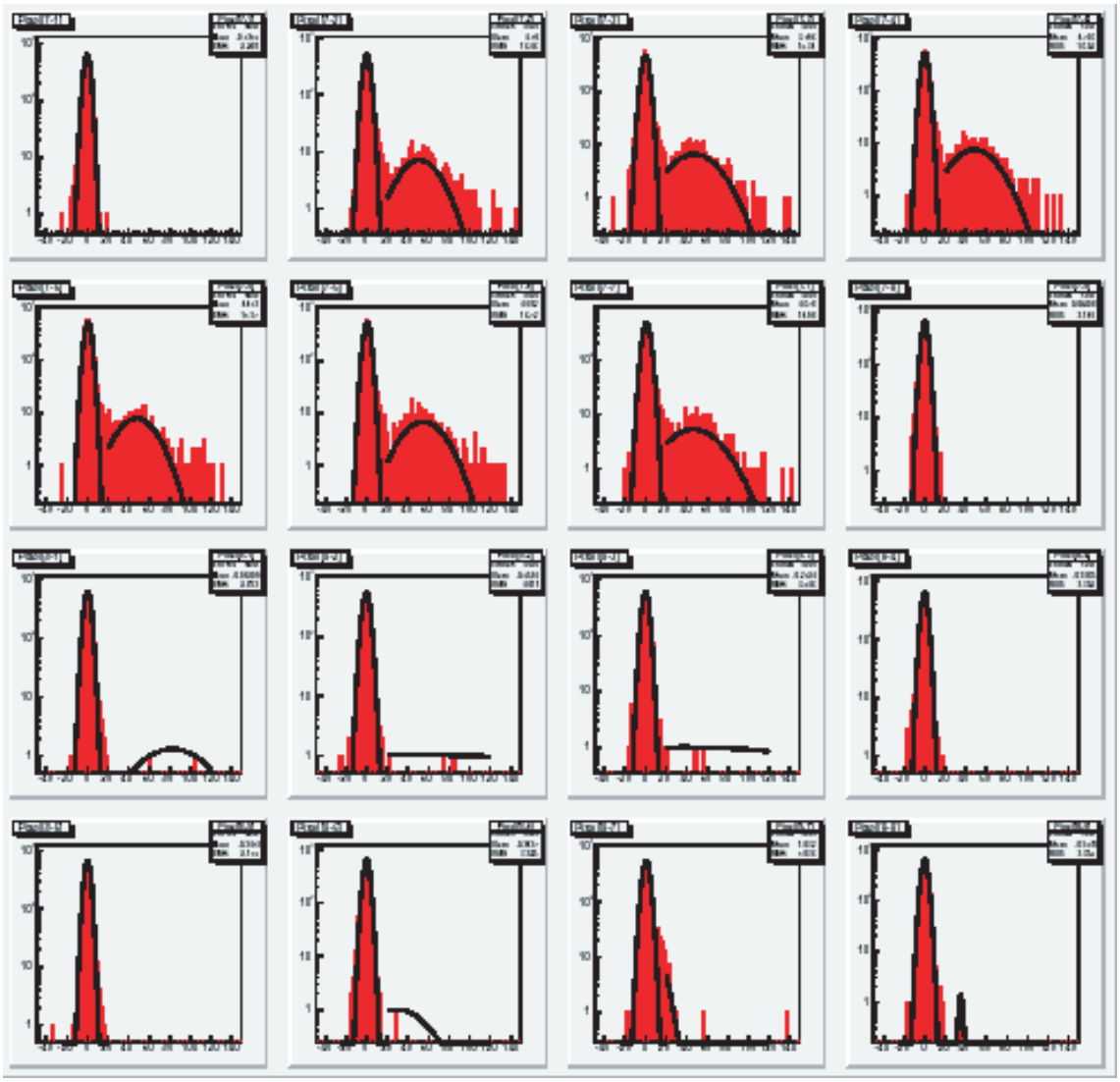


図 4.21: コモンモードノイズを考慮にいれて解析を行った結果。コモンモードノイズを考慮しない分布に比べて、MIP 粒子によるピークがみられ、またペデスタル分布の広がりも狭くなっている。

4.3　T545 ビームテスト

2004 年 3 月に KEK のπ 2 ビームラインで T545 ビームテストを行った。テストしたサンプリング型カロリメータは、ストリップタイプカロリメータ、スモールタイルタイプカロリメータ、シャワーマキシマム測定器× 2、プリシャワー測定器である。ビームは T517 同様、1GeV ~ 4GeV の電子、π 、μ が使用された。

4.3.1　目的

T517,DESY に引き続き、シャワーマキシマム測定器の性能評価を行った。T545 ビームテストでは、光検出器として、HAPD (第 3 章参照) を用いている。これは、次世代型カロリメータ用光検出器としての可能性を探るためである。

4.3.2　セットアップ

セットアップは T517 と同様である。ビームライン上に 3 層のトリガーカウンター (T1,T2,T3)、2 層のチェレンコフカウンター (C1,C2)、4 層のドリフトチェンバー (DC1,DC2,DC3,DC4)、1 層のμ カウンター (mu)、1 層のベトーカウンター (V1)、1 層のπ ベトーカウンター (pi1) が設置されている。測定器はプリシャワー測定器、シャワーマキシマム測定器× 2、スモールタイルカロリメータ、ストリップタイプカロリメータが架台上に設置してある。

4.3.3　T545 ビームテスト解析結果

前回、前々回と同様、まず MIP 粒子によるキャリブレーションを行った。4GeV のπ (μ) 粒子をシャワーマキシマム測定器に入射した際の ADC 分布を図 4.22 に示す。図左のストリップでは宇宙線によるテストと同様の分布が見られたが、図右のストリップでは、左のストリップの約半分の光量しか見られなかった。この傾向は、シャワーマキシマム測定器の 20 本ストリップのうち、右半分 10 本のストリップで見られ、左半分 10 本のストリップでは宇宙線テスト時と同様の結果が見られた。原因は次の事実によることが判明した。WLS ファイバーと、HAPD アタッチメント治具のクリアファイバーはコネクタにより 10 本ずつ接続される構造になっている。解析で見られた光量の減少は二つのコネクタの一方のコネクタにより接続されたストリップでしか見られなかったことから、光学系の接続ミスによるものであった。

図 4.23 にシャワーマキシマム測定器で見られた電子イベント、π (μ) 粒子イベントを示す。T517 実験と同様、電子イベントは電磁シャワーによる広がりが見られ、π (μ) 粒子イベントでは、MIP 信号が見られるが、上記ミスのための影響が見られる。

次に、シャワーマキシマム測定器の位置分解能をガウスフィット法により算出した。図 4.24 に結果を示す。HAPD + VATA 読み出しであるが、VATA ゲインが MAPMT H7546 に最適化されているために合わせたゲインが一桁ほど足りない影響と、光学系の接続ミスによる影響のため、$8.53mm \pm 0.15mm$ という結果であった。

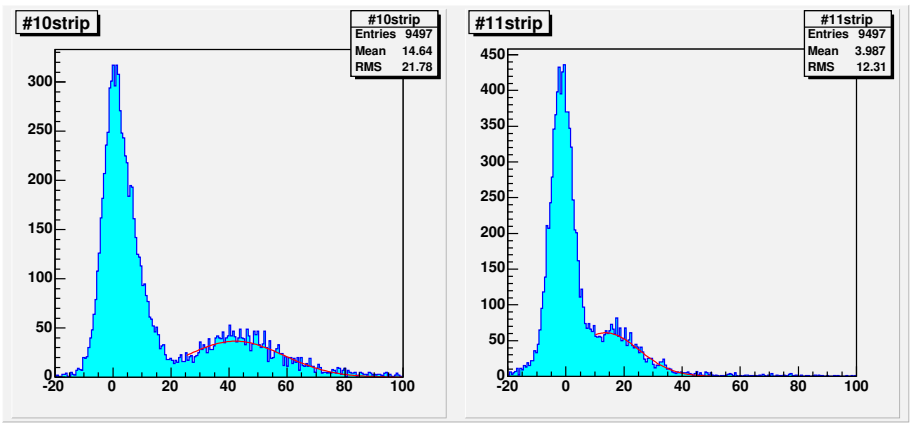


図 4.22: T545 ビームテストで見られた MIP 粒子の ADC 分布。

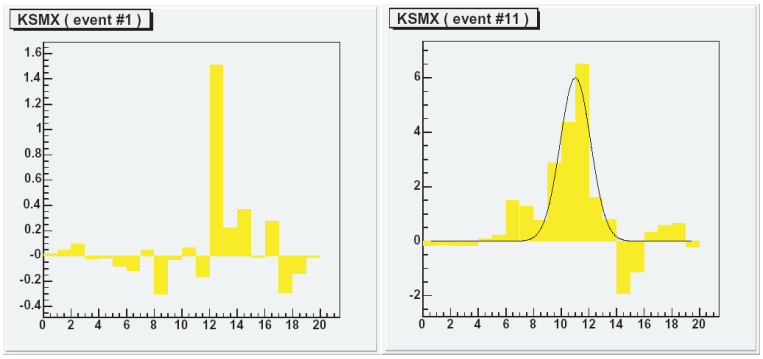


図 4.23: T545 ビームテストにおけるπ（μ）粒子イベント（図左）と電子イベント（図右）。

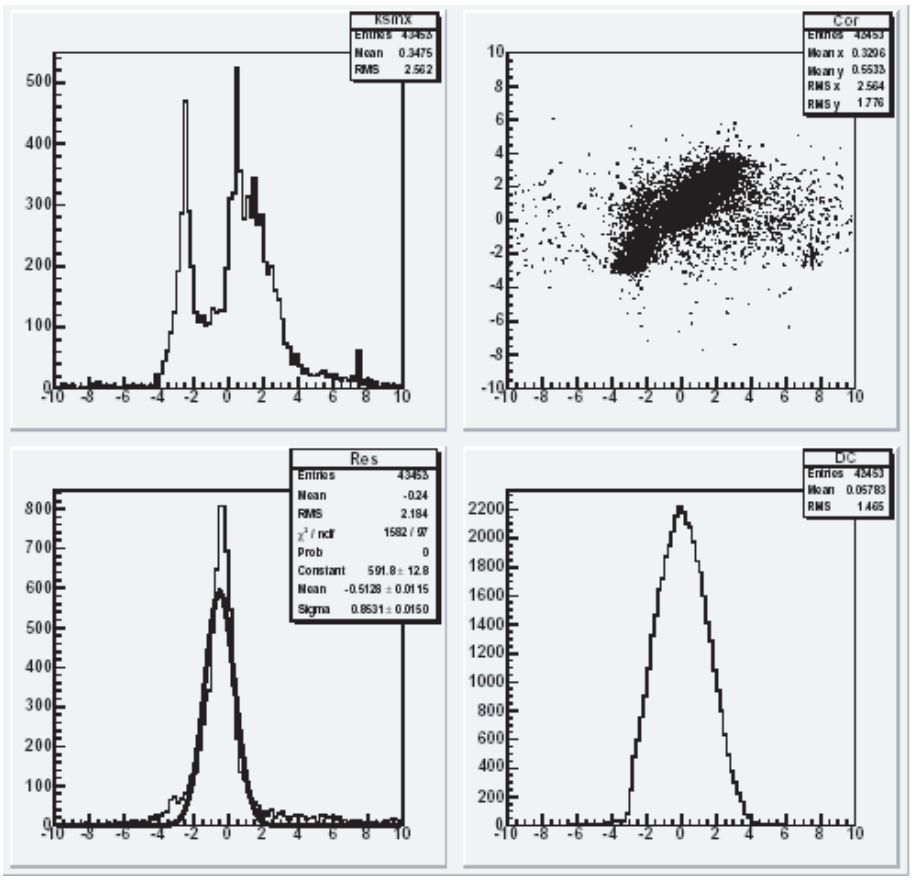


図 4.24: T545 ビームテスト HAPD 読み出しシャワーマキシマム測定器の位置分解能 (ガウスフィット法) 図左上はシャワーマキシマム測定器で測定した電子の入射位置。図右下はドリフトチェンバーで測定した電子の入射位置。図右上はそれぞれの Scatter Plot。図左下はそれらの差をとったものでこの分布の広がりがシャワーマキシマム測定器の位置分解能を表す。

第5章　結論

我々カロリメータグループは次世代線形加速器用電磁カロリメータ開発し、2002 年 KEK で T517 ビームテスト、2003 年 10 月に DESY ビームテスト、そして、2004 年 3 月、KEK にて T545 ビームテストを行った。また T545 ビームテストでは、新しい読み出し光検出器として HAPD を使用した。さらに、今後カロリメータの読み出し光検出器として非常に有望な SiPM について、一般特性の評価を行った。

5.1　シャワーマキシマム測定器

本研究では電磁カロリメータ内に設置し、粒子入射位置測定用シャワーマキシマム測定器を製作し、T517、DESY では光検出器として、MAPMT H6568-10 による読み出し、T545 では最近開発された HAPD + VATA の組み合わせ読み出しによる実験を行った。シャワーマキシマム測定器によって得られた位置分解能を次に示す。

- T517 : 3.70mm ± 0.05mm　4GeV 電子
- DESY : 2.03mm ± 0.01mm　4GeV 電子、(S-shape 補正後 2.02mm ± 0.01mm)
- T545 : 8,53mm ± 0.15mm　4GeV 電子　(光学系接続ミス)

5.2　SiPM の一般特性

ロシア製 SiPM の一般特性を測定した。測定項目は次のとおり。

- ゲインのバイアス電圧依存性
- ゲインの温度依存性
- ノイズレートのバイアス電圧依存性
- ノイズレートの温度依存性
- リニアリティ測定

6 つの同種 SiPM について、バイアス電圧 65V でゲインは、ほぼ 1×10^6 であった。また、温度依存性について、室温から-20 ℃の変化で、6 つの SiPM とも、ほぼ 4 倍になった。ノイズレートはバイアス電圧 $65.5V$ で、0.8MHz から 3.8MHz まで個体によってばらついた。温度依存性については、ほぼすべての SiPM で、-20 ℃では室温のほぼ 20 リニアリティ測定について、SiPM の構造に起因する特徴的なサチュレーションが見られた。

5.3 今後の展望

HAPD については今回の実験において、MAPMT に最適化された VATA ボードを使用したため、HAPD に最適化された VATA ボードを用いてテストを行う必要がある。また、HAPD 単体においては強磁場中の動作は保証されているが、VATA にマウントした状態での強磁場中の動作は保証されていないため、読み出し回路込の状態での強磁場中動作実験の必要がある。さらに、APD を使用していることから、ある程度の温度依存性そ示すものと思われるが、温度依存性の測定はまだ行われていない。

シャワーマキシマム測定器において、上記位置分解能は得られたが、この位置分解能でジェット中の粒子をどの程度解きほぐせるかについてはわかっていない。これについては、シミュレーションの結果を待つ。

SiPM は開発されたばかりのデバイスであるので、今後も引き続き基本性能の測定を続けなければならない。また、シャワーマキシマム測定器に SiPM を用いれば、ファイバーを引き回す必要がなく、シンチレータへの直接アタッチメントが可能である等の利点が挙げられる。さらに、量産されれば 1 素子あたりのコストがかなり下がることが予想されるため、1cm × 1cm のセル状シンチレータによるカロリメータなど、より野心的なカロリメータの開発も可能になってくる。このようなカロリメータを試作する場合、読み出しチャンネルが膨大になるため、これらのチャンネルからの信号をスムーズに処理する DAQ システムの構築も視野にいれておくべきであろう。

第6章　謝辞

本研究を進めるにあたり、適切な御指導、御助言を与えて下さった、指導教官である川越清以先生に深く感謝致します。また、ビームテストでお世話になった同カロリメータグループの筑波大学、信州大学、新潟大学の皆様、高エネルギー加速器研究機構の藤井芳昭さんに深く感謝します。そして、ＨＡＰＤの使用に関してご協力いただいた、神戸Ｋ２Ｋグループの皆様、Ｋ２Ｋ Ｓｃｉｂｅｒグループの皆様に深く感謝します。更に問題が発生するごとに協力してくれた同研究室の皆様、大変お世話になりました。有難う御座いました。最後に、長期に渡る私の学生生活を根本から支えてくださった両親に感謝致します。有難う御座いました。

図 目 次

1.1 次世代電子陽電子線形加速器概念図 4
1.2 ファインマン図 5
1.3 ヒッグス粒子の崩壊分岐比 6
1.4 粒子の反応断面積とエネルギーの関係 8
1.5 次世代線形加速器用測定器 9

2.1 カロリメータの分解能とサンプリング数の関係 12
2.2 4 ジェットイベントを用いたジェット質量再構成シミュレーション 14
2.3 補償型ハドロンカロリメータ 16
2.4 プリシャワーカロリメータ 18
2.5 シャワーマキシマム測定器 19
2.6 ストリップ型カロリメータ 19
2.7 スモールタイル型カロリメータ 20

3.1 光電子増倍管 21
3.2 HAPD 23
3.3 SiPM 26
3.4 SiPM ゲイン測定セットアップ 27
3.5 SiPM によるフォトンカウンティング 28
3.6 SiPM ゲインのバイアス電圧依存性 29
3.7 SiPM ゲインの温度依存性 29
3.8 SiPM ノイズ測定 30
3.9 SiPM ノイズレートのバイアス電圧による変化 31
3.10 SiPM ノイズレートの温度依存性 31
3.11 32
3.12 SiPM 33

4.1 T517 セットアップ 35
4.2 T517MIP の ADC 分布 35
4.3 T517 チェレンコフカウンターの ADC 分布 36
4.4 T517 π イベント 36
4.5 T517 電子イベント 37
4.6 T517 ビームテスト　シャワーマキシマム測定器の電子識別能力 38

4.7 DESY ビームテストセットアップ . . . 38
4.8 DESY ビームテスト キャリブレーション . . . 39
4.9 DESY ビームテスト電子イベント . . . 40
4.10 ドリフトチェンバー解析 . . . 41
4.11 DESY ビームテストにおけるシャワーマキシマム測定器の位置分解能 (重心法) . . . 42
4.12 DESY ビームテストにおけるシャワーマキシマム測定器の位置分解能 (ガウスフィット法) . . . 43
4.13 鉛の位置による位置分解能の違い . . . 44
4.14 S-shape 補正 . . . 44
4.15 DESY S-shape 補正後の位置分解能 . . . 45
4.16 HAPD 宇宙線テストセットアップ写真 . . . 46
4.17 HAPD 宇宙線テストセットアップ模式図 . . . 46
4.18 HAPD ファイバーアタッチメント . . . 47
4.19 ノイズモード . . . 48
4.20 HAPD 宇宙線テスト . . . 49
4.21 HAPD 宇宙線テスト (コモンモードノイズ除去後) . . . 50
4.22 T545 ビームテストにおける MIP 粒子 ADC 分布 . . . 52
4.23 T545 ビームテストイベント . . . 52
4.24 T545 ビームテストにおける HAPD 読み出しによるシャワーマキシマム測定器の位置分解能 (ガウスフィット法) . . . 53

表 目 次

2.1 試作電磁カロリメータのパラメータ 17

3.1 MAPMT H6568-10 22
3.2 HAPD 諸特性 25
3.3 VA/TA 諸特性 25

参考文献

[1] T Suzuki. *A systematic measurement of energy resolution and e/pi ratio of a lead/plastic-scintillator sampling calorimeter.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,1999 (A432) 48.

[2] B. Dolgoshein. *An advanced study of Silicon Photomultiplier.* ICFA Instrumentation Bulletin.

[3] Motohiro Suyama. *Development of a multi-pixel photon sensor with single-photon sensitivity.* KEK Report 2002-16 April 2003 H.

[4] 山本真平.「K2K 長基線ニュートリノ振動実験　シンチレータトラッカーにおける読み出し用エレクトロニクスの開発」.　京都大学 2003.

[5] 永野あい.　「JLC ストリップファイバー電磁カロリメータのビームテストによる応答一様性の研究」. 筑波大学.

[6] 岸本晋.　「JLC 電磁カロリメータの開発研究　シャワーマキシマム測定器の位置分解能」.　神戸大学.

[7] S.Uozumi *Performance of a Compensating Lead/Plastic-scintillator Tile/Fiber Calorimeter.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,2002 (A487) 291-307.