A Study of JLC Preshower Detector

杉本 佳之

2000年2月10日

概 要

As a future linear collider project of Japan, studies of Joint Linear Collider (JLC) have been proceeded.

In order to deal interesting physics target by JLC, which includes Higgs-searching and searches of new particles, JLC calorimeter is required to be good energy resolution, e/h ratio and good e/π separation ability.

By the test beam experiments at low energy, JLC calorimeter group performed required performances by lead / scincillator sampling calorimeter.

We performed the test beam experiment to measure energy resolution and e/h ratio at high energy. We also provided the test of the preshower detector at the same experiment.

In this paper, the performances of preshower counter will be described. We measured e/π separetion power of preshower counter and position resolution of showermax detector.

目 次

第1章 **JLC** **1**
1.1 The Project of JLC 1
1.2 Physics at JLC 2
1.2.1 Physics of Higgs Boson 2
1.2.2 Search for Super Particles 3
1.2.3 Physics of Top Quark 3
1.3 The JLC Detector 4
1.3.1 Vertex Detector(VTX) 6
1.3.2 Central Drift Chamber (CDC) 6
1.3.3 Calorimeter (CAL) 6
1.3.4 Muon detector (MUON) 7

第2章 **Calorimeter and Preshower Detecter** **9**
2.1 Showers 9
2.1.1 Electromagnetic shower 9
2.1.2 Hadron shower 10
2.2 Calorimeter 10
2.2.1 Calorimeter 10
2.2.2 Preshower datector 11

第3章 **Studies of Photodevices** **12**
3.1 Gain Stablity for Temperature 13
3.2 Linearity 14
3.3 Results 17

第4章 **T912 Beamtest** **22**
4.1 Setup 22
4.1.1 Calorimeter test module 22
4.1.2 Setup of beamline 23
4.2 Beam Line 23
4.2.1 Beam composition 24
4.2.2 Beam momentum 24
4.3 Calibration 26
4.4 Event Selection 31

4.5 e/π Separation 34

4.5.1 Pion rejection 34

4.6 Position Resolution 36

4.6.1 pre-analysis of showermax detector 36

4.6.2 position resolution 37

第5章 Monte Carlo Simulation 48

第6章 Summary 53

図 目 次

1.1 schemetic view of JLC 1
1.2 Feynman diagram of Higgs production 3
1.3 view of JLC detector 5

3.1 systematic view of Hybrid Photodiode 13
3.2 systematic view of photomuliplier 14
3.3 maltianode PMT 15
3.4 shematic view of measurement of temperature charactristics . . 15
3.5 shematic view of linearity measurement 16
3.6 shematic view of divider curcuits 18
3.7 linearity of H7195 19
3.8 linearity of R5900-01 20
3.9 linearity of HPD 21

4.1 schematic view of beam line2 24
4.2 hadron calorimeter for t912 25
4.3 tile-fiber system of hadron calorimeter 26
4.4 preshower counter 27
4.5 showermax detector 28
4.6 schematic view of beam line1 29
4.7 distribution of momentum 29
4.8 distribution of moun events 30
4.9 cut for single-track selection by tpsd 32
4.10 cut for single-track selection by SWDC 32
4.11 ratio of tower 13 v.s. all. 33
4.12 distribution of SRD signals 35
4.13 distribution of signals on preshower detector 37
4.14 distribution of Spread value 38
4.15 distribution of Length value 39
4.16 pion rejection by preshower and Spread value 40
4.17 cross talk at the readout system of showermax. 41
4.18 correction of showermax detector. 42
4.19 scatter plot of SWDC position v.s. showermax position. 43
4.20 diviation for SWDC position and showermax position 1. 44

4.21 diviation for SWDC position and showermax position 2. 44
4.22 results of diviations 45
4.23 a picture of MT6 46
4.24 a picture of preshower detector 47

5.1 pion rejection by preshower counter 51
5.2 pion rejection by S and L value 52

表 目 次

1.1 elementary particles in SUSY model 4
1.2 performances of JLC detector 8

3.1 results of temperature stablirity 16

4.1 number of channels of calorimeter module 24
4.2 assumed and actual beam momentum 31
4.3 status of the beam 31
4.4 conditions of e, pi identification 34
4.5 score of the pion rejection by preshower counter 1 36
4.6 score of the pion rejection by S and L value 36

5.1 score of the pion rejection by preshower counter 1 (Monte Carlo) 49
5.2 score of the pion rejection by S and L value (Monte Carlo) . . . 49
5.3 score of the pion rejection by preshower counter 1 (Monte Carlo) 49
5.4 score of the pion rejection by S and L value 1 (Monte Carlo) . 50

第1章　JLC

1.1　The Project of JLC

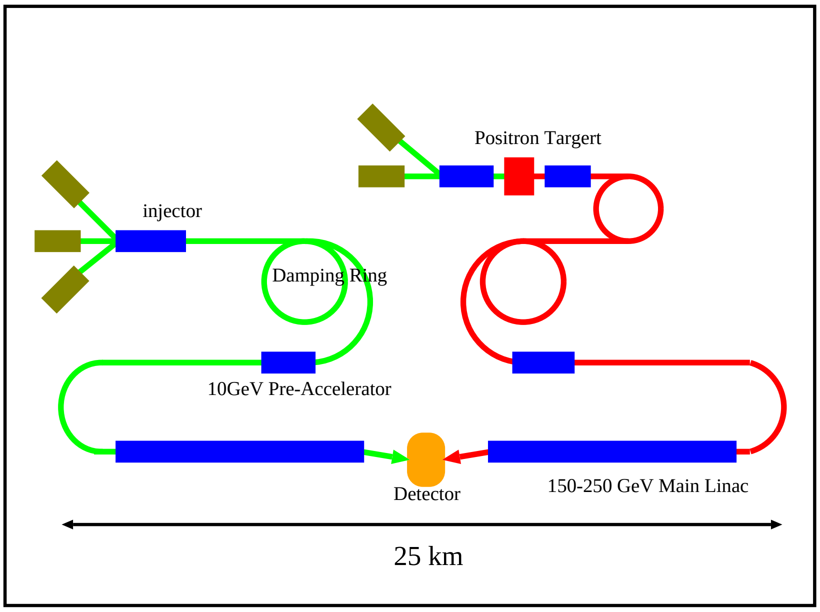
Positron Targert
injector
Damping Ring
10GeV Pre-Accelerator
Detector
150-250 GeV Main Linac
25 km

図 1.1: JLC の概要

現在、高エネルギー加速器研究機構を中心として、より高いエネルギーでの素粒子実験を行うために次世代線形加速器 JLC (Joint Linear Collider) が計画されている。JLC は電子・陽電子衝突型の線形加速器で、メインライナックと衝突部を合わせた全長は 25~30km になる。

電子・陽電子の重心系エネルギーは第 1 期計画では 500GeV で運転され、その後 1.0TeV 以上に増強される。従って標準模型の中で唯一残されたヒッグス粒子の質量が予想されている通り 1TeV/c^2 以下の質量ならば、ヒッグス粒子は JLC で発見し、その性質を測定することが出来る。

また、電子・陽電子衝突は陽子・反陽子の衝突に比べ終状態の粒子の数が比較的少なく新粒子の発見に適している。このような特徴から JLC では超対称性粒子の発見も期待されている。

その他にも、$10^{34}/\mathrm{cm}^{-2}/\mathrm{s}^{-1}$ と言う高いルミノシティーから得られる多くの事象を使ってトップクォークの精密測定など様々な物理的成果を上げることを目標としている。

1.2 Physics at JLC

自然界の 4 つの相互作用のうち重力相互作用以外の電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用の 3 つをゲージ原理と量子論にを基にしてて統一的に記述した標準模型は現在までの全ての高エネルギー実験の結果と一致し、矛盾点は発見されていない。この標準模型に於いて、1994 年の CDF によるトップクォークの発見以後唯一未発見の基本粒子はゲージ対称性を破り粒子に質量を与えるスピン 0 のヒッグス粒子である。このヒッグス粒子は標準模型の 18 のパラメータのうちの半分の湯川力 (ヒッグス粒子と物質粒子の相互作用) の結合定数を決めるため、標準模型の完全な検証には欠かせない。

しかし、標準模型は弱い相互作用のエネルギースケールである 246GeV より上で電弱対称性の破れによって破綻する。このことは標準模型より高いエネルギーでの新しい物理の存在を示唆する。この新しい物理のうち現在最も有力な超対称性模型はボゾンとフェルミオンの間に超対称性を課すことで、標準模型では解決できないヒッグス場の質量項の 2 次発散を除去する。しかしこの超対称性模型の実験的証拠はまだ発見されていない。

また、CDF により既に発見されたトップクォークはその質量、崩壊幅等をより精密に測定することで、摂動 QCD の明解な検証が求められている。

このよう物理的背景から、JLC では以下のような物理を目指す。

1.2.1 Physics of Higgs Boson

電子陽電子衝突では標準模型のヒッグス粒子は主に $e^+e^- \to Z \to ZH$ という過程を通して生成されヒッグス粒子の質量によって ZZ,WW,bb 等に崩壊する。(図)

一方、Z ボゾンは qq,ll,$\nu\nu$ のいずれかに崩壊する。

このうち、ヒッグス粒子の質量が 120GeV/c^2 以下の時にはヒッグス粒子は主にボトムクォーク対に崩壊するため、ボトムクォークを検出することで Z ボゾンの崩壊による 3 種類の独立な解析をすることが出来る。

このようにして検出されたヒッグス粒子を含んだ事象からその崩壊分岐比、全生成断面積等を求めることで、標準模型の検証が可能となる。

また、超対称性が存在する場合にも複数存在するヒッグス粒子のうち最も軽いものについては同じ方法で検出が可能である。

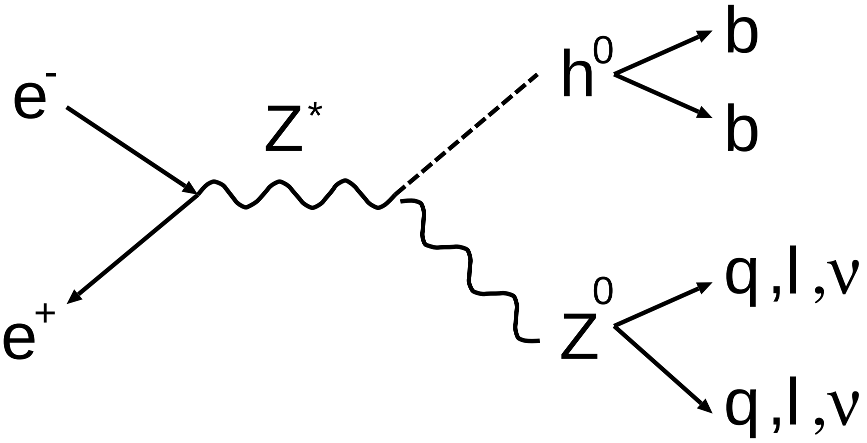

図 1.2: ヒッグスボゾンの生成過程

1.2.2 Search for Super Particles

超対称性模型では複数のヒッグス粒子が存在し、そのうち軽いヒッグス粒子の発見は先に述べたように JLC において可能である。

しかしながら、軽いヒッグス粒子の発見は超対称性模型の確実な証拠とは成り得ない。少なくとも 1 つの超対称粒子を発見することが超対称性の存在の証明となる。

R パリティーが保存し、最も軽い超対称粒子 (LSP) をニュートラリーノとして、それが安定であると仮定すると、最も軽い荷電超対称粒子となるのはチャージーノまたはスレプトンである。

一般にチャージーノは W ボゾン、レプトン、クォークをスレプトンはレプトンを伴って LSP に崩壊する。このとき LSP は測定器では捉えることは出来ないため、この事象は終状態に大きなエネルギー損失のあり、運動量にアンバランスがある事象を探すことで効率良く検出することが可能である。

1.2.3 Physics of Top Quark

CDF グループによって既に発見されたトップクォークはその崩壊幅が大きく、そのためトップクォーク対生成のしきい値付近のエネルギーで生成されたトップクォークは QCD の非摂動領域に達する前に bW に崩壊する。

このトップクォークの特徴がしきい値付近のトップクォーク対を用いた明解な摂動 QCD の検証を可能にする。

JLC では高いルミノシティーで多くのトップクォーク事象を生成しバーテックス検出器によるボトムクォークジェットの検出によってそれらの事象を効率良く検出できる。

spin	0			1/2			1
quark	scalar quark			quark			
	$\begin{pmatrix} \tilde{u_L} \\ \tilde{d_L} \end{pmatrix}$ $\tilde{u_R}$ $\tilde{d_R}$	$\begin{pmatrix} \tilde{c_L} \\ \tilde{s_L} \end{pmatrix}$ $\tilde{c_R}$ $\tilde{s_R}$	$\begin{pmatrix} \tilde{t_L} \\ \tilde{b_L} \end{pmatrix}$ $\tilde{t_R}$ $\tilde{b_R}$	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$ u_R d_R	$\begin{pmatrix} c_L \\ s_L \end{pmatrix}$ c_R s_R	$\begin{pmatrix} t_L \\ b_L \end{pmatrix}$ t_R b_R	
lepton	scalar lepton			lepton			
	$\begin{pmatrix} \tilde{\nu_{eL}} \\ \tilde{e_L} \end{pmatrix}$ $\tilde{\nu_{eR}}$ $\tilde{e_R}$	$\begin{pmatrix} \tilde{\nu_{\mu L}} \\ \tilde{\mu_L} \end{pmatrix}$ $\tilde{\nu_{\mu R}}$ $\tilde{\mu_R}$	$\begin{pmatrix} \tilde{\nu_{\tau L}} \\ \tilde{\tau_L} \end{pmatrix}$ $\tilde{\nu_{\tau R}}$ $\tilde{\tau_R}$	$\begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix}$ e_R	$\begin{pmatrix} \nu_{\mu L} \\ \mu_L \end{pmatrix}$ μ_R	$\begin{pmatrix} \nu_{\tau L} \\ \tau_L \end{pmatrix}$ τ_R	
Higgs	Higgs			Siggs			
	$\begin{pmatrix} H_1^0 \\ H_1^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_2^+ \\ H_2^0 \end{pmatrix}$			$\begin{pmatrix} \tilde{H}_{1L}^0 \\ \tilde{H}_{1L}^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{H}_{2L}^+ \\ \tilde{H}_{2L}^0 \end{pmatrix}$			
Gauge				Gaugino			Gauge
				$\tilde{\gamma}$ $\tilde{Z}\tilde{W}^{\pm}$ $\tilde{g}$			γ Z W$^{\pm}$ g

表 1.1: 超対称性模型の基本粒子

これらの事象を用いてトップクォークのパラメータを精密に測定すると共に摂動 QCD の検証を行うことができる。

1.3 The JLC Detector

JLC 測定器にはあらゆる物理を解析するための汎用性が要求される。また、新しい物理にも対応するため、全てのジェットの不変質量を再構成しニュートリノ以外の終状態の基本粒子全てを捉えるための高性能の測定器が必要である。

具体的には、

i まず、隙間の無い測定器で横方向の運動量とエネルギーの欠損を確実に測定するために、測定可能な角度領域を $\cos(\theta) < 0.98$ とする。

ii 次に、クォークジェットに崩壊した W ボゾンと Z ボゾンが識別可能である。つまり、２ジェット不変質量の分解能が、W ボゾンと Z ボゾンの質量の差 10GeV より十分に小さいこと。

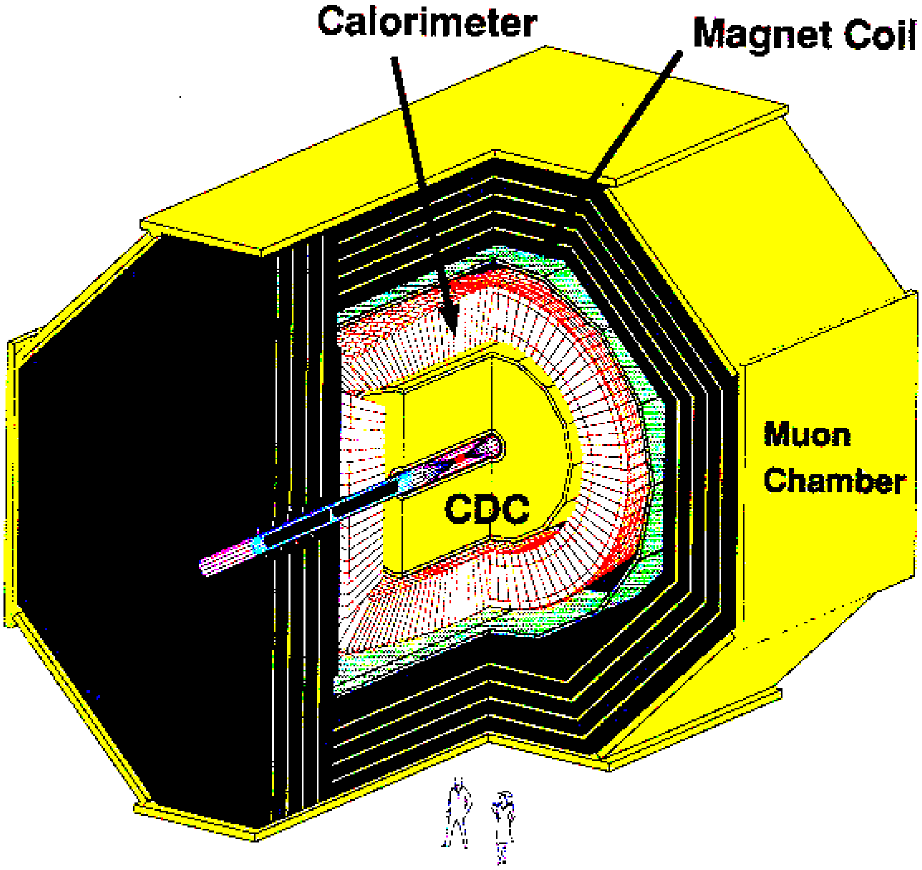
Calorimeter
Magnet Coil
Muon
Chamber
CDC

図 1.3: JLC 測定器

iii 更に、終状態の全ての基本粒子の識別をするために、チャームやボトムなどのクォークジェットが識別可能である。

iv そして最後に $\mathrm{e^+e^-} \to$HZ の Higgs の生成過程で Z 崩壊からのレプトン対を使って質量欠損法による Higgs ボゾンの質量を再構成したとき、その分解能が 200MeV 程度である。

以上のような要求を達成するために考えられた JLC 測定器の諸性能を表に示す。

μ 粒子検出器以外の全ての測定器はその不感領域を減らすために超伝導電磁石で作られたソレノイド磁場の中にある。

以下、各コンポーネントについて説明する。

1.3.1 Vertex Detector(VTX)

バーテックス測定器は衝突点の周りに置かれ、荷電粒子の飛跡を測定する。JLC において重要な物理課題である軽いヒッグス粒子とトップクォークはいずれも主に b クォークに崩壊する。バーテックス測定器はその飛跡情報から B 中間子や D 中間子の崩壊点を見つけ出すことで b クォークを効率良く、確実に識別する。

更に、バーテックス測定器の高い空間分解能を CDC の飛跡情報に加えることで、荷電粒子の運動量分解能を CDC 単独のときと比べて約 2 倍に高めることが出来る。

JLC ではバーテックス検出器にシリコン CCD を用いる予定である。

1.3.2 Central Drift Chamber (CDC)

中央飛跡検出器は磁場中を通る荷電粒子の飛跡を測定することでその粒子の運動量を同定する。ヒッグスボゾンの質量を正確に再構成するためには 50GeV のレプトンの運動量を 0.4% の精度で測定する必要がある。このため、CDC は CO_2 ガスを使用した小型ジェットセル構造を持った円筒型ドリフトチェンバーを使う予定である。

1.3.3 Calorimeter (CAL)

JLC に於ける最も重要な目的の一つであるヒッグス粒子は主に $e^+e^- \to HZ$ という過程で生成される。この過程は Z 粒子がレプトン対に崩壊するチャンネルを使って同定することが最も容易であるが、より高い精度での測定をするためには Z 粒子の崩壊比の約 70% を占めるクォーク対への崩壊チャンネルを効率良く検出することが重要である。

Z→qq チャンネルのバックグラウンドには $e^+e^- \to WW, ZZ$ があるが、WW についてはバーテックス測定器により b クォークを同定し、その横方向運動量を測定することで効率良く除くことが可能である。しかし、ZZ チャンネルに関

してはbbジェット対の不変質量を再構成することによってのみZ→bbとH→bbとの区別が可能になる。

JLCカロリメータではプリシャワー測定器、シャワーマックス検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータの4つの部分から成る測定器を考える。電磁シャワー、ハドロンシャワーのエネルギーをそれぞれ$15\%/\sqrt{E} \oplus 1\%, 40\%/\sqrt{E} \oplus 2\%$の分解能でで測定し、プリシャワー測定器と電磁シャワーの最大値に置かれたシャワーマックス測定器を使ってe/piの分離、シャワーの位置測定を行う。

ハドロンカロリメータ、電磁カロリメータ、プリシャワー測定器はプラスチックシンチレータと鉛のサンプリング型とし、ハドロンシャワーと電磁シャワーのエネルギーに対する応答を等しくするためそのサンプリング比はそれぞれ、2:8,1:4,1:4mmとする。

ハドロンシャワー、電磁シャワーを充分に吸収できる厚さとして、ハドロン、電磁カロリメータの厚さはそれぞれ$5.6\lambda_0$,$29X_0$とする。また、プリシャワー測定器の厚さは$4.3X_0$とする。

シャワーマックス検出器はシリコンパッドで1つのパッドのサイズは1cmとする。

更に、シャワーの位置分解能を高めるためにハドロンカロリメータを20cm、電磁カロリメータとプリシャワー測定器を10cmのセルに分ける。

1.3.4 Muon detector (MUON)

6層のスーパーレイヤーのシングルセルドリフトチェンバーを使い、より確実な新粒子探索のために出来るだけ大きな立体角を有効にする。

detector	type	configration	performance
VTX vertex detector	Silicon CCD	pixel size : $25\mu m$ Num. of layers : at least 3 layers Layer position : $r = 2.5, 5.0, 7.5cm$ Thickness : $500\mu m$ / layer $\vert\cos\theta\vert < 0.95$	Position resolution : $\sigma = 7.2\mu m$ Impact parameter resolution $\delta[\mu m]$ $\delta^2 = 11.4^2 + (28.8/p)^2/\sin^3\theta$
CDC Central Drift Chamber	Small-cell Jet Chamber	Radious : r=0.3 2.3m Length : l=4.6m Num. of smapling = 100 $\vert\cos\theta\vert < 0.70$ (full samplings) $\vert\cos\theta\vert < 0.95$ (20 samplings)	Position resolution : $\sigma_x = 100\mu m$ (/ axial wire) $\sigma_x = 2\mu m$ (/ stereo wire) Momentum resolution $\sigma_{P_t}/P_t = 1.1 \times 10^{-4} P_t \oplus 0.1\%$ $\sigma_{P_t}/P_t = 5 \times 10^{-5} P_t \oplus 0.1\%$ (with Vertex constraint)
CAL	Lead+Plastic scintillator sandwish (compensated)	EM part : thickness = 29 X_0 cell size = 10 cm × 10 cm HAD part : thickness = 5.6 λ_0 cell size = 20 cm × 20 cm Si pad : pad size =1 cm × 1 cm $\vert\cos\theta\vert < 0.95$	Energy resolution : $(e\&\gamma)$ $\sigma_E/\sqrt{E} = 15\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$ $\sigma_E/\sqrt{E} = 40\%/\sqrt{E} \oplus 2\%$ (hadron) Si pad position resolution : σ = 3 mm Si pad e/π rejection = 1/50
MUON	Single Cell Drift Chamber	Num. of superlayers : 6 $\vert\cos\theta\vert < 0.99$	Position resolution : $\sigma = 3mm$ $P_t > 3.5$ GeV

表 1.2: JLC 測定器の諸性能

第2章　Calorimeter and Preshower Detecter

2.1　Showers

2.1.1　Electromagnetic shower

物質に電子、陽電子、光子が入射すると、原子内の電子との衝突 (原子のイオン化) の他に原子核との電磁相互作用によって制動幅射、電子対生成が起こり、光子、電子対が生成される。電子、陽電子は幅射長 X_0 進むと持っているエネルギーの半分を制動幅射によって光子として放出する。また、光子は X_0 進む間に約半分が電子対生成によってエネルギーを半分ずつ電子、陽電子に与える。X_0 は以下の式で与えられる。

$$X_0 = \frac{716.4[g/cm^2]A}{Z(Z+1)ln(287/\sqrt{Z})}$$

ここで、A、Z は物質の原子番号と原子量である。入射粒子はこれらの過程を繰り返して粒子数を増やしながら粒子１個当たりのエネルギーを減らし、これが臨界エネルギー E_c となったところで終了する。臨界エネルギー E_c はイオン化によるのエネルギー損失と制動幅射によるエネルギー損失が等しくなるときのエネルギーで、次の式で表される。

$$E_c = \frac{800[MeV]}{Z+1.2}$$

また、EM シャワーの横方向の広がりはモリエール半径 (R_M) で表される。

$$R_M = \frac{21[MeV]}{E_C}X_0$$

図は鉛、銅、アルミ中での電磁シャワーの横方向の広がりをモリエール半径を単位としてプロットしたものである。
電磁シャワーの広がりは

$$t_{max} = ln(E_0/E_c) \pm 0.5$$

で最大になる。なお、定数項は入射粒子が電子のときは-、光子のときは+をとる。

2.1.2 Hadron shower

入射粒子がハドロン粒子の場合、粒子は主に原子核との非弾性散乱によって二次ハドロン粒子を数個生成する。この原子核反応を繰り返し、最終的には原子をイオン化するなどして停止する。原子核との非弾性散乱は強い相互作用を介して起こり、この過程が起こる確立には大きなふらつきがある。ハドロンシャワーの縦方向の広がりは原子核相互作用長 λ_0 で表される。

$$\lambda_0 = 35gcm^{-2}A^{1/3}$$

ここで A は物質原子の質量である。

2.2 Calorimeter

2.2.1 Calorimeter

カロリメータは物質中で入射粒子にシャワーを起こさせ、そのエネルギーを吸収し、物質が吸収したエネルギーを測定することで入射粒子のエネルギーを測定する装置である。

カロリメータには均質型とサンプリング型があり、均質型では入射粒子が物質に与えた全エネルギーを測定する一方、サンプリング型では物質量の大きい鉄、鉛などの吸収体と物質量の小さいシンチレータやチェンバーなどの検出体を組合せ検出体のみのエネルギーを測定することで全体をコンパクトにしている。

カロリメータの性能は一般に入射粒子のエネルギーの分解能 σ_E/E、同じエネルギーの電子とハドロンに対する応答の比、e/h 比等で表される。

エネルギー分解能

エネルギー分解能は

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{\sigma_{stocastic}}{\sqrt{E}} \oplus \sigma_{constant} \oplus \frac{\sigma_{noise}}{E}$$

第 1 項の $\sigma_{stocastic}$ はカロリメータの構造による応答の統計的なふらつきによる。この統計項は更に検出体で粒子が失うエネルギーの比のふらつきと、読みだしに使われる光電子増倍管での光電子数のばらつきに分けられる。

$\sigma_{constant}$ は測定系の非一様性、ハドロンシャワーの漏れ、キャリブレーションのずれによる系統誤差である。

σ_{noise} は ADC のペデスタルの幅など粒子のエネルギーに依存しないノイズによる。

e/h 比

EM シャワーとハドロンシャワーのエネルギー損失の過程の違いから一般にカロリメータの電磁シャワーに対する応答はハドロンシャワーに対するそれよりも大きい。

e/h が 1 より大きくずれるとハドロンシャワーで生成された π_0 粒子の $\gamma\gamma$ 崩壊からの電磁シャワーと元のハドロンシャワーとの間に応答の差を生じる。ハドロンシャワー中の電磁シャワー成分の割合は事象ごとに異なることからハドロンシャワーの応答のばらつきの原因となり、結果としてハドロンカロリメータの性能を悪くする。

このために e/h 比を 1 にしたカロリメータを補償型と呼ぶ。JLC カロリメータでは鉛とシンチレータの厚さの比を調節することで良い e/h 比を実現している。

2.2.2 Preshower datector

鉛の輻射長 X_0 は 5.6mm、原子核相互作用長 λ_0 は 171mm である。このシャワー発達のスケールの違いを使い、入射粒子の種類を同定するのが前置検出器である。電磁シャワーが最も発達する距離は物質が鉛のとき E_c=9.6MeV のため、$t_{max} = ln(E_0/0.0096) - 0.5$ で、これは入射粒子のエネルギーが 5GeV の時 5.8X$_0$、50GeV のとき 8.0X$_0$ となる。

一方、ハドロンシャワーの発達は π^0 中間子の生成のふらつきから比較的事象によるばらつきが大きい。JLC カロリメータグループの実験でハドロンシャワーの最大値は数 GeV のハドロンに対して $0.5\lambda_0$ 以下であると測定された。

このため、プリシャワー測定器は低エネルギーでハドロンシャワーと電磁シャワーの分離が難しくなることを考え、4∼6X$_0$ 程度の測定器を使うことが適当である。

シャワーマックス検出器は電磁シャワーが最も発達する深さに置かれ、シャワーの横方向の広がりから粒子の入射位置を測定する。

第3章　Studies of Photodevices

カロリメータの読みだし用光検出器として、JLC カロリメータグループではハイブリッドフォトダイオード (HPD) の R&D を進めて来た。

HPD を 今回のビームテストでのプリシャワー部の読みだしの候補の一つとして、温度特性を測定し、光電子増倍管と比較した。また、プリシャワー部読み出しのもう一つの候補である PMT とシャワーマックス部の読み出しの候補であるマルチアノード PMT の出力直線性を測定した。

以下、各検出器について簡単に説明する。

ハイブリッドフォトダイオード (HPD)

HPD は光電陰極と PIN ダイオードの 2 つの部分から構成されている光検出器である。光電陰極とダイオードの間に数 ~ 十数 kV の電圧を掛け、光電面からたたき出された光電子を加速する。加速された光電子はダイオード内の空乏層でそのエネルギーに比例した数の電子正孔対を生成して停止する。ダイオードに掛けられた逆バイアス電圧で生成された電子正孔対は両面の電極に吸収する。ゲインを得るための構造がシンプルなため最終的に得られる電子の数に統計的なばらつきが少ない、光電面とダイオードの距離が近いため磁場に強いなどの特徴がある一方、PMT と比べ数千とゲインが小さい、光電面の面積が小さい等の弱点もある。通常アンプなどを通して信号をみる。今回のテストにはフォトダイオードに比較的高い電圧を掛けることでそれ自身に 100 倍程度の利得を持たせることが出来るアバランシェフォトダイオードを使用した浜松ホトニクス社製のハイブリッドアバランシェフォトダイオード R7110U を使用した。

光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管は一般的な光検出器で、フォトカソード、アノードとその間に１０程度のダイノードをもつ。カソードからたたき出された光電子がダイノードに順に当たるうちにその間に掛けられた光電圧によって増幅される。今回のテストは温度依存性の測定には１２段のダイノードを持つ浜松ホトニクス社製の H1949-01 を出力直線性の測定には同社の H7195 を使用した。

マルチアノード PMT(MAPMT)

一度に多くのチャンネルを読み出すためにカソード、アノードを分割したPMTをマルチアノードPMTと呼ぶ。利得を得るための構造はPMTと同じであるが、数~数十チャンネルを１つのPMTで同時に読み出すことが出来る。今回のテストには１６チャンネル読みだし可能な浜松ホトニクス社製のR5900-01を使用した。

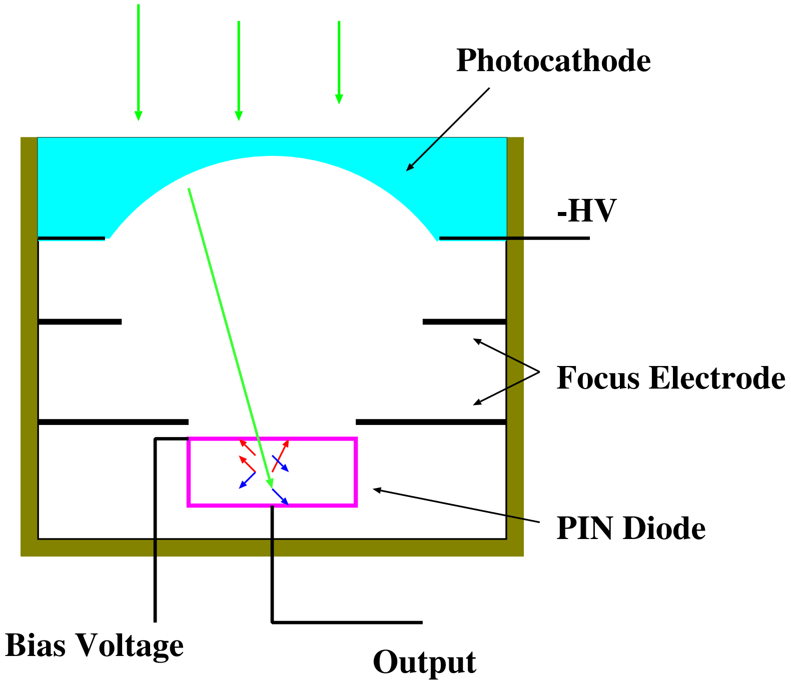
Photocathode
-HV
Focus Electrode
PIN Diode
Bias Voltage
Output

図 3.1: HPDの構造

3.1 Gain Stablity for Temperature

セットアップを図に示す。

LEDの光がクリアファイバーを通して検出器に入射される。

光源のLEDは断熱された箱にいれてあり、測定中の箱の中の温度変化は実験を通して $\pm 0.5^{o}C$ 以内であった。

検出器は恒温槽に入れ、$10^{o}C$ から $10^{o}C$ おきに $40^{o}C$ まで変化させた。それぞれの温度で温度設定をした後、充分経ってから5分又は10分おきに数十回測定し、次の温度を設定した。

$40^{o}C$ の後再び $10^{o}C$ ずつ $10^{o}C$ まで戻るサイクルを２回または３回測定しそれぞれのサイクルのゲインの変化率の平均値を取った。

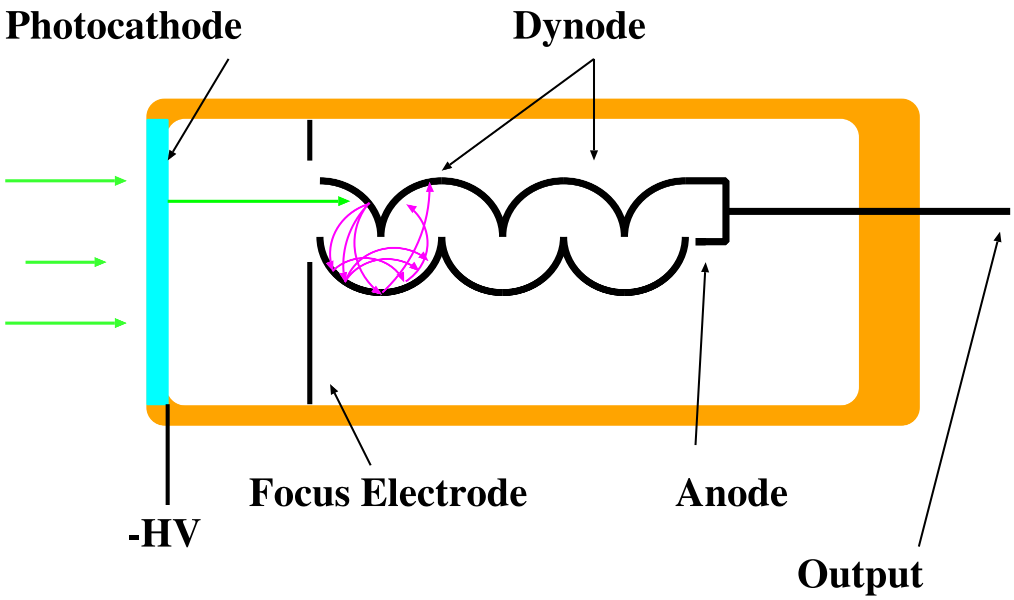

図 3.2: PMT の構造

HPD の測定の際はアンプも恒温槽に入れた。

恒温槽内と断熱箱内の温度は測温抵抗によってモニターしてあり、LED の光量は同じ断熱箱内に入れたフォトダイオードで同時に測定した。

HPD の信号は豊伸電子のピークホールド ADC を PMT の信号は豊伸電子のチャージ積分型 ADC を使って測定した。また、フォトダイオードの信号はアンプを通してピークホールド ADC で測定した。

測定結果を表に示す。

PMT については測定した 6 本それぞれについて示す。

3.2 Linearity

セットアップを図に示す。

LED を光源とする光の光量を光学フィルターで調節して測定した。光学フィルターによる光の減衰率はリニアリティーの優れたファインメシュPMT で測定した。

信号の読みだしには温度依存性の測定の時と同じ ADC を使ったが、光量が大きいときは信号を減衰器に通すことで ADC に収まるように調節した。

PMT のリニアリティーの劣化は入射光量が大きくなったとき終段付近のダイノードでデバイダ回路の電流値より大きな電流が流れることによる。入射光量が大きくなっても出力直線性を保つ方法として高電圧の分割回路にデカップリ

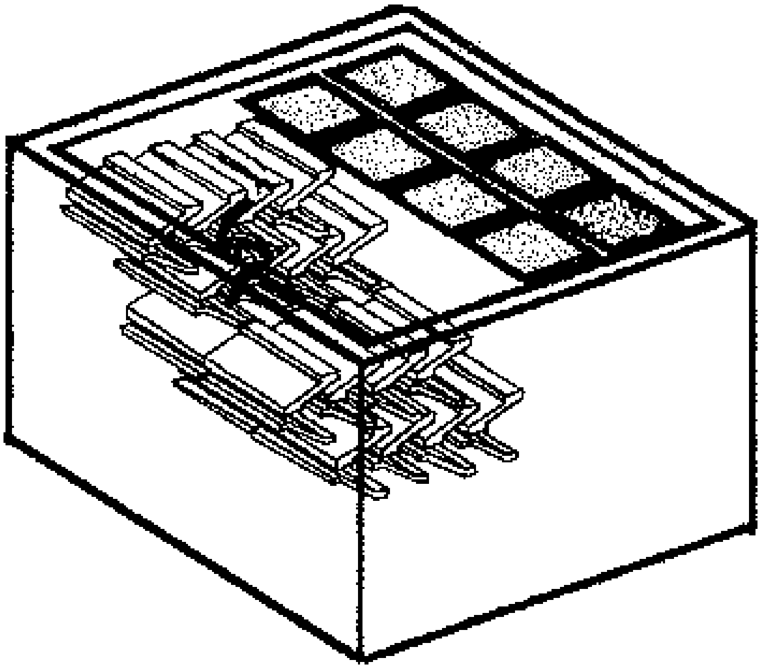

図 3.3: マルチアノード PMT

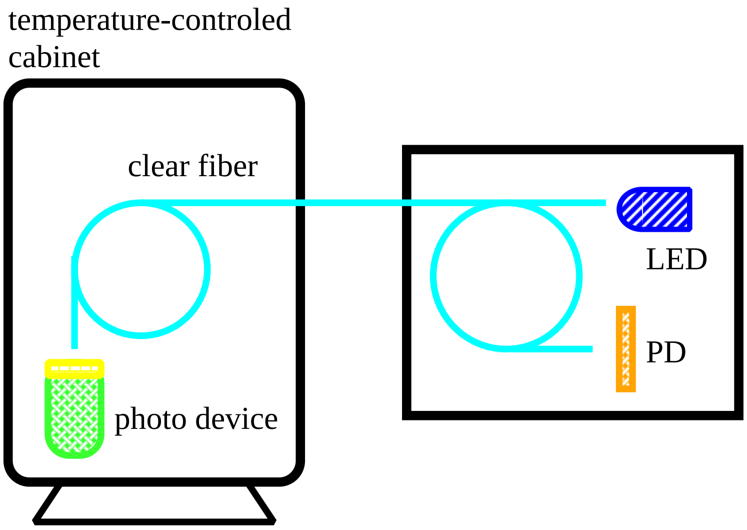
temperature-controled
cabinet
clear fiber
photo device
LED
PD

図 3.4: 温度依存性測定の概念図。

	temperature coefficient
HPD	$-1.14 \pm 0.11\%/^oC$
PMT1	$-0.27 \pm 0.03\%/^oC$
PMT2	$-0.33 \pm 0.03\%/^oC$
PMT3	$-0.28 \pm 0.03\%/^oC$
PMT4	$-0.39 \pm 0.01\%/^oC$
PMT5	$-0.49 \pm 0.01\%/^oC$
PMT6	$-0.48 \pm 0.01\%/^oC$

表 3.1: 温度依存性測定の結果。HPDの利得の温度依存は主にAPD部の温度変化、PMTは光電面の量子効率の特性によると考えられる。

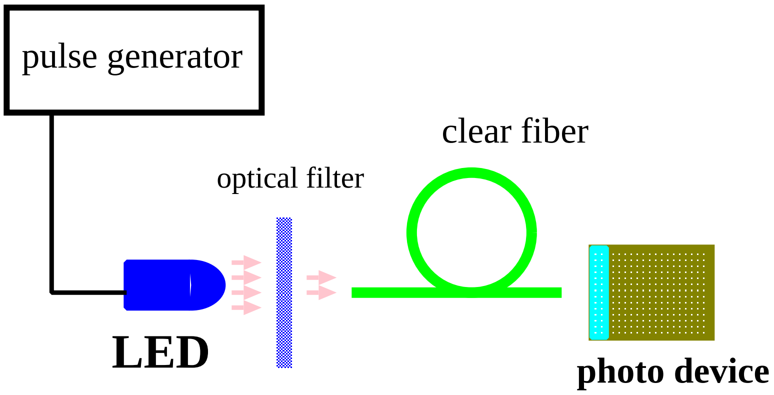

図 3.5: リニアリティー測定の概略図

ングコンデンサやテーパ型回路を使う方法がある。デカップリングコンデンサは終段付近のダイノードの抵抗と並列にコンデンサを配置する。入射パルス電流にこのコンデンサから電荷を供給して直線性を高める。

テーパ型分割回路は終段付近のダイノードの抵抗を大きくすることで、分圧比を増加させ、より大きなパルス電流を出力できるようになる。

今回テストしたPMTにはこの2つの対策が施されており比較的良い出力直線性をもっていた。

MAPMTにはデカップリングコンデンサのみが施されている。

HPDの場合、光電子の加速機構の仕組みがシンプルなためその出力直線性はフォトダイオードによって決まる。フォトダイオードの出力直線性は一般にPMTに比べて、非常に良いため出力直線性の良さはHPDの特徴の1つと言える。(図3.9)

3.3 Results

今回テストしたHPDに内蔵されているAPDの温度特性は逆バイアス電圧の強さに依存するが、140V時にはアバランシェに依る増幅率15に対して、$\sim -0.8\%/^{o}$Cである。また、光電面の感度の温度特性は一般に-0.2%/^{o}C$\sim -0.4\%/^{o}$Cであることが知られている。

ベンチテストの結果、HPD、PMTの両方に対して、この数値と一致する結果が得られた。

光検出器の温度特性はカロリメータのエネルギー分解能の定数項となって現れる。このため、大きな温度特性は特に高エネルギーの電磁シャワーのエネルギー分解能に大きな影響を与えることとなる。HPDの様に利得の温度変化の比較的大きな光検出器を使用する際には検出器の温度変化をモニターし、温度を出来るだけ一定に保つ必要がある。

また、JLCカロリメータではでは測定する粒子のエネルギーのレンジが大きいため大きな入射光量に対する出力の直線性が求められる。

具体的にはmip相当のエネルギーデポシットから、数100GeVの電磁シャワーに対してはプリシャワー測定器ではその約1000倍、シャワーマックス検出器でも約500倍のデポジットがシミュレーションによって見積もられている。

仮に良い光子統計を得るためにmip入射時の光量を10光電子とすると、数1000から10000光電子に対する直線性が求められる。

しかし、テストビーム実験に使う光検出器としては長期安定性、ノイズに対する強さ、温度依存性等を考慮し、プリシャワー部にはH7195 PMTを採用した。シャワーマックス部にも出力直線性に不満が残るものの、多くのチャンネルを容易に扱えるMAPMTを採用した。

JLCカロリメータのは測定器が磁場中に設置されるため、磁場に弱いPMTを使用することは困難になる。このため、

磁場に強い

充分な直線性を持つ

多くのチャンネルが安価でかつ容易に扱える

などの特徴を持つ光検出器の開発を行う必要がある。

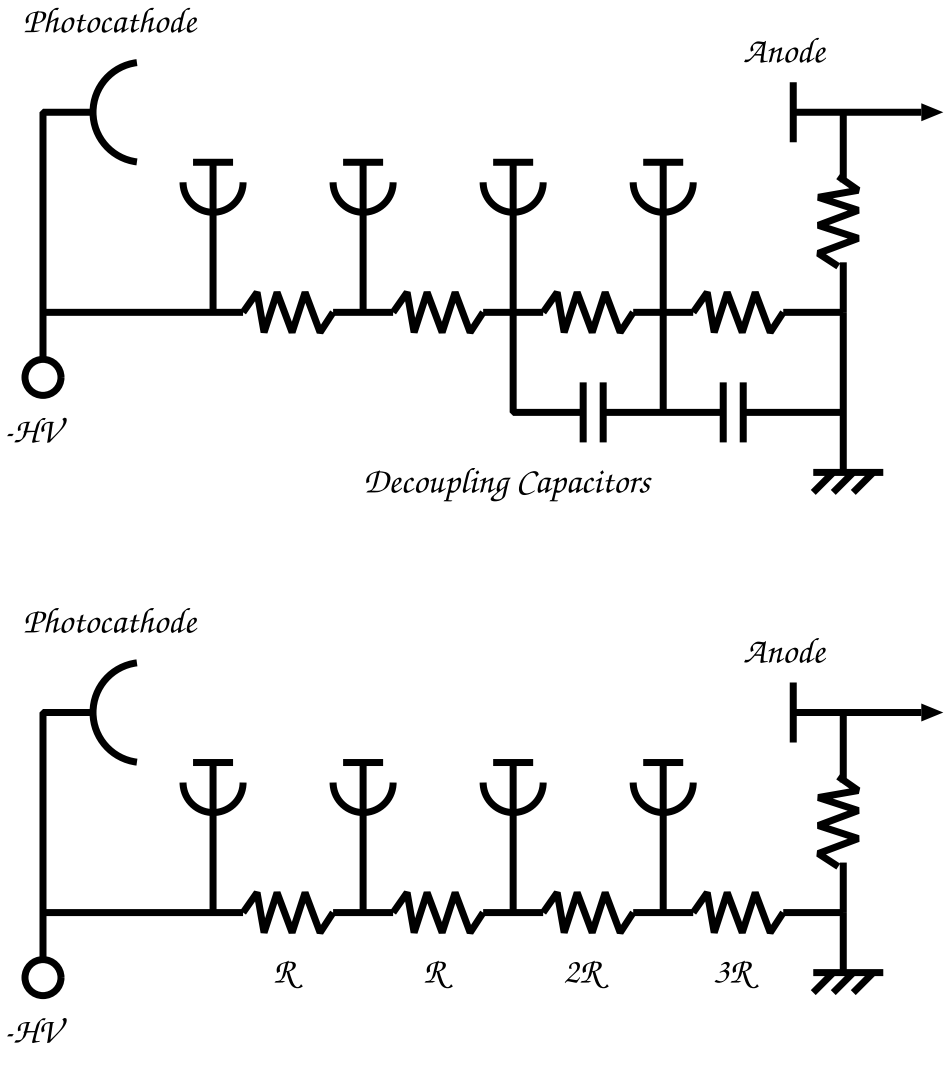
Photocathode
Anode
-HV
Decoupling Capacitors
Photocathode
Anode
R
R
2R
3R
-HV

図 3.6: デカップリングコンデンサ (上) とテーパ型回路 (下) の概念図。

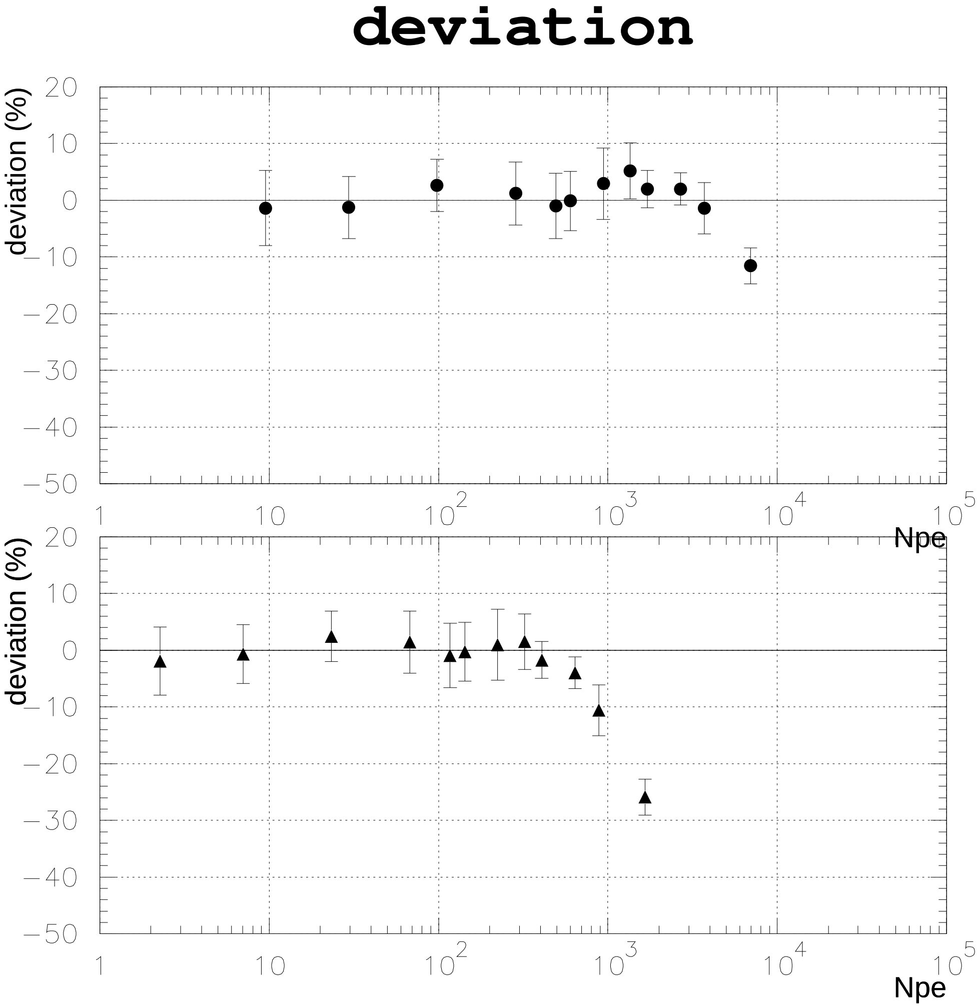

図 3.7: H7195 の出力直線性。横軸は光電子数。縦軸は下側 6 点を直線でフィットしたときのずれ。

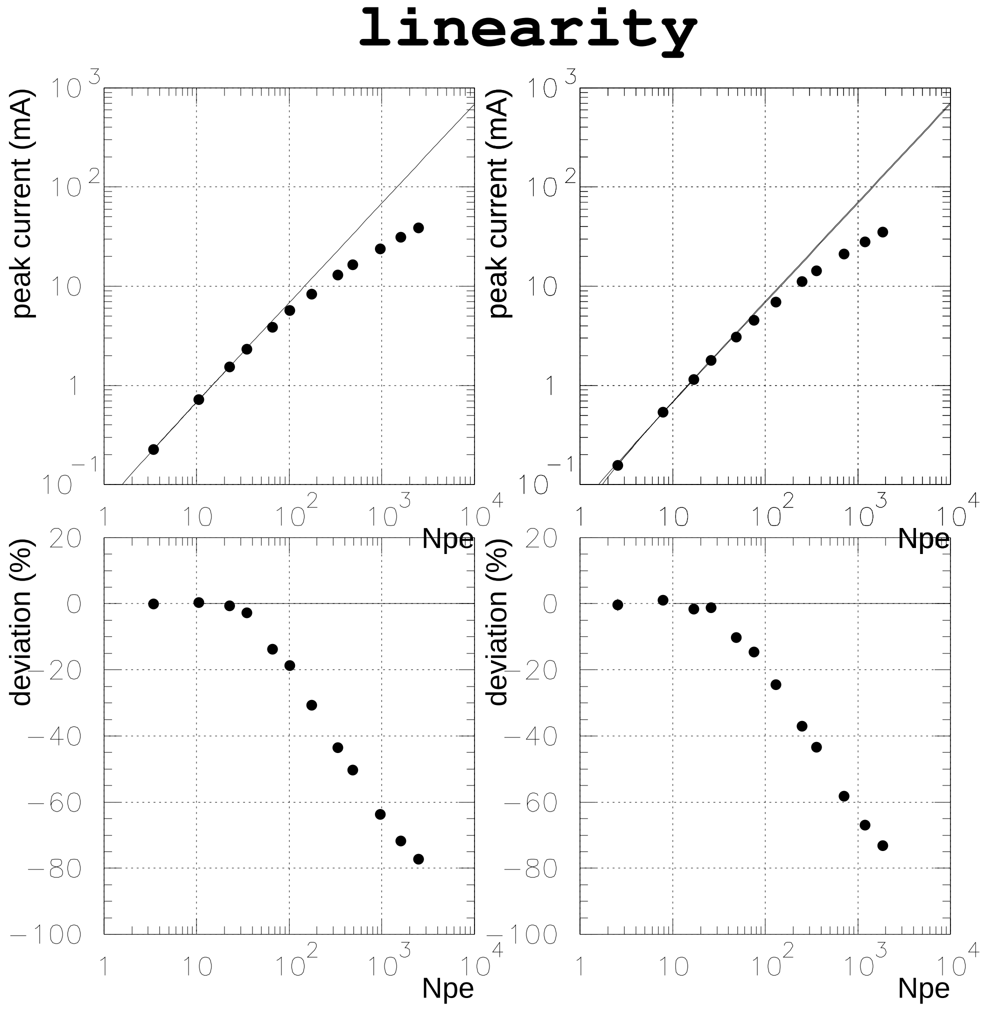

図 3.8: R5900-01 の出力直線性。横軸は光電子数。縦軸はアノード電流の最大値 (上段) と下側 3 点を直線でフィットしたときのずれ (下段)。

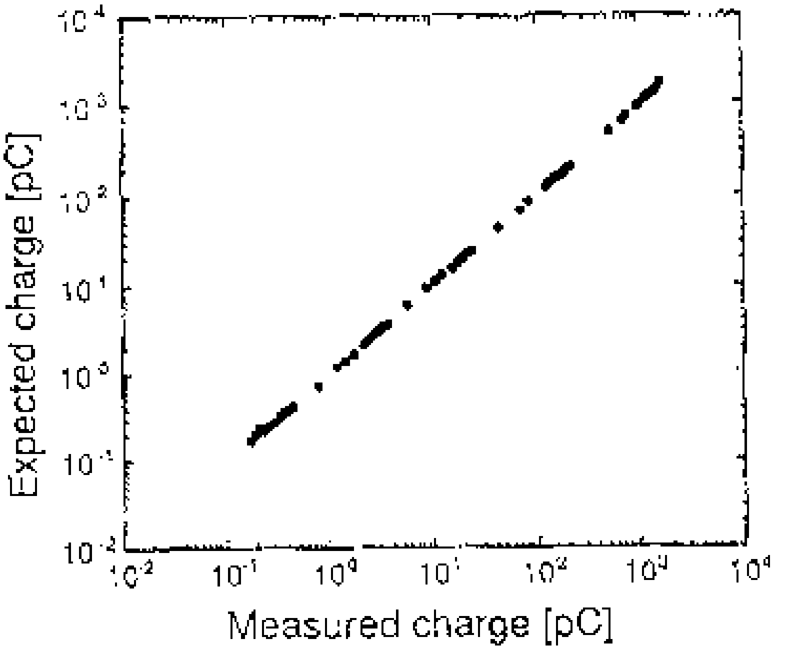

図 3.9: 典型的な HPD の出力直線性。

第4章　T912 Beamtest

1999年7月から9月までJLCカロリメータグループはフェルミ国立加速器研究所のMesonTest6(MT6) 実験室でテストビーム実験を行った。(t912) 入射粒子の運動量は10,25,50,75,100GeVで負に荷電した粒子を使った、このため、入射粒子中には負に荷電した電子、μ 粒子、π 中間子が含まれていると考えられる。

4.1　Setup

4.1.1　Calorimeter test module

テストモジュールは前置検出器とハドロンカロリメータからなる。また、前置検出器はプリシャワー測定器とシャワーマックス検出器から成り、ハドロンカロリメータはタイルファイバー部とストレートグルーブ部に分けられる。

前置検出器

前置検出器の概念図を図4.44.5に示す。

プリシャワー検出器は200mm × 200mm × 1mmのタイル型シンチレータと200mm × 200mm × 4mmの鉛板の6層のサンプリング構造である。6枚のタイルシンチレータにはそれぞれ6本のキーホール型の溝が直線上に掘ってあり、その溝に読み出し用のウェーブレングスシフター (wave length shifter , WLS) ファイバーを通す。WLSファイバーは更に減衰の少ないクリアファイバーを通して、PMTで読み出される。読み出しにはファイバーの両側で前後各3層ずつをまとめて合計4本のPMTを用いた。電磁シャワーの発達を効率良く検出するために全体の長さは$4.3X_0$である。

シャワーマックス検出器は200mm × 10mm × 5mmのストリップ型シンチレータをX、Y方向にそれぞれ20本ずつ並べたものである。各シンチレータには中央にキーホール型の溝が掘ってあり、プリシャワー測定器と同様に溝に通したファイバーを通して信号は読み出される。チャンネル間のクロストークを防ぐためにシンチレータは1本ずつ外側を黒く塗ったPETフィルムで遮光されている。信号はファイバーの片方から1本ずつ読み出し、ファイバーの反対側は光を反射させるためにアルミニウムを蒸着した。

ハドロンカロリメータ

ハドロンカロリメータの概念図を図 4.2 にしめす。

タイルファイバー部は 200mm × 200mm × 2mm のタイル型シンチレータを 25 枚、図 4.3 のように並べたメガタイルと 1000mm × 1000mm × 8mm の鉛板のサンプリング構造である。各タイルシンチレータにはキーホール型の溝が円形に掘っている。溝には WLS ファイバーが通してあり、前置検出器と同様にクリアファイバーを使って信号を PMT に運ぶ。25 枚のタイルは白色アクリルに固定されている。タイルファイバー部は 80 層から成るが、25 枚のタイルをそれぞれ 20 層ずつまとめて読み出す。

ストレートファイバー部は 1000mm × 1000mm × 2mm のシンチレータに 6 本のキーホール型の溝を掘り WLS ファイバーを通したものと 1000mm × 1000mm × 8mm の鉛板のサンプリングである。ストレートファイバー部は 45 層で 5 層ずつまとめて読み出す。

ハドロンシャワーを出来るだけ後方に漏らさないために全長は $5.6\lambda_0$ である。

表 4.1 に各コンポーネントの読み出しチャンネル数をまとめる。

扱う信号の大きさの幅が広いため、PMT の信号は LeCroy 社製の c2280 15bit 電荷積分型 ADC を使った。分解能は 50fc/count である。

又、ADC のゲートの幅は 500nsec に設定した。

4.1.2 Setup of beamline

ビームラインのセットアップを図 4.64.1 に示す。

ビームライン上には上流からシングルワイヤードリフトチェンバー (SWDC)4、SWDC51、MT5E 超伝導磁石、シンクロトロン輻射検出器 (SRD)、SWDC52、SWDC6、トリガーカウンタ 4(T4)、トリガーカウンタ 5(T5)、シングルトラックカウンタ (TPSD)、前置検出器、ハドロンカロリメータ、バックアップカウンタの順に配置されている。

SWDC6 以降の測定器が MT6 実験室にある。

ビームのトリガーは T4、T5 の 2 つのシンチレーショウンカウンタで行い、粒子の運動量、位置は 4 つの SWDC で決める。SWDC の構造を図??に示す。4 枚の SWDC を 1 組として、x、y 座標のそれぞれ 2 本ずつのワイヤーの信号のタイミングの差から通過した荷電粒子の位置を測定することが出来る。

SRD を電子の同定に使った。SRD は鉛ガラスと PMT を使った検出器で、磁場によって曲げられた電子の放出する光子を検出する。ハドロンの測定の際は TPSD の前に鉄ブロックを置いて電子を排除した。

4.2 Beam Line

テストビームによる実験の結果を議論する前に今回実験に使用した入射ビームの状態について簡単に説明する。

	rateral channel	section	channel
preshower	2	2	4
showermax	20	2	40
HCAL (tile-fiber)	25	4	100
HCAL (st.-groove)	2	10	20

表 4.1: カロリメータの各コンポーネントのチャンネル数。

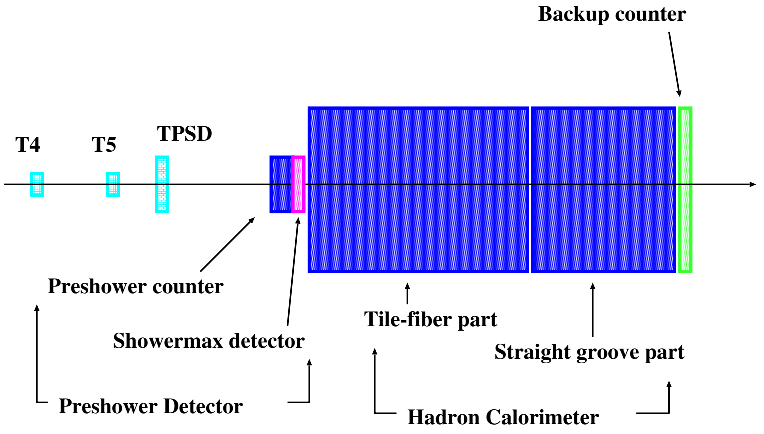
Backup counter
T4
T5
TPSD
Preshower counter
Tile-fiber part
Showermax detector
Straight groove part
Preshower Detector
Hadron Calorimeter

図 4.1: ビームラインのセットアップ 1

4.2.1 Beam composition

電子とπ 中間子は上流のターゲットとなる物質を替え、それぞれの粒子のビーム中での割合が多くなるように調節した。しかし、ビーム中には常に別の粒子が混じっているため、その大まかな割合をハドロンカロリメータを使って見積もった。

電子モードでのビームは 90%以上が電子で残りがπ 中間子とμ 粒子で数%ずつであった。

一方、π 中間子モードのビームでは電子、μ 粒子がそれぞれ 10%程度混じっていた。

4.2.2 Beam momentum

入射粒子のより正確な運動量とその分布を 4 つの SWDC と MT5 電磁石の電流を使って求めた。まず、上流、下流それぞれ 2 つずつの SWDC から粒子の通った飛跡を求めその 2 本の直線の角度を求めた。

運動量は磁場、$d\theta$ を使って、

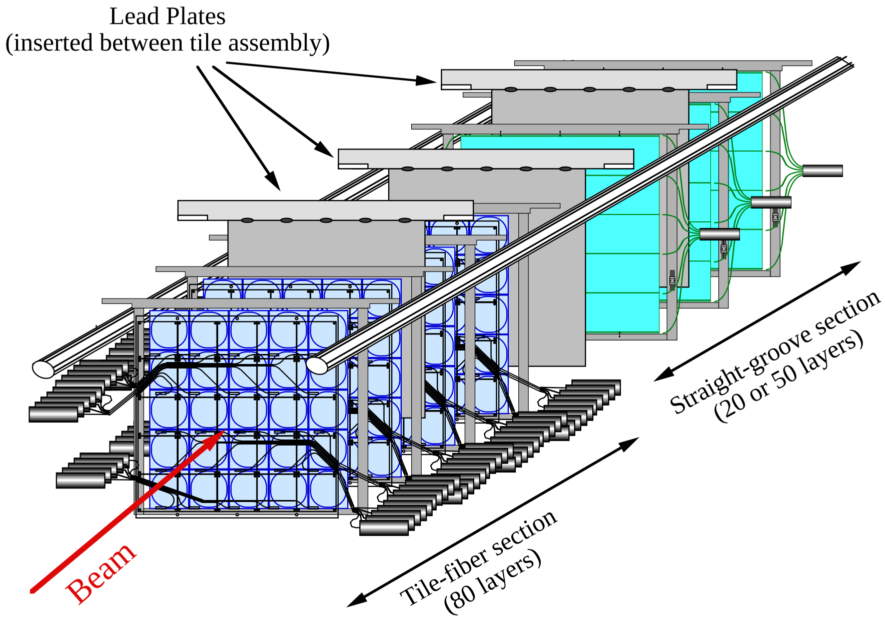
Lead Plates
(inserted between tile assembly)
Straight-groove section
(20 or 50 layers)
Tile-fiber section
(80 layers)
Beam

図 4.2: ハドロンカロリメータ テストモジュール

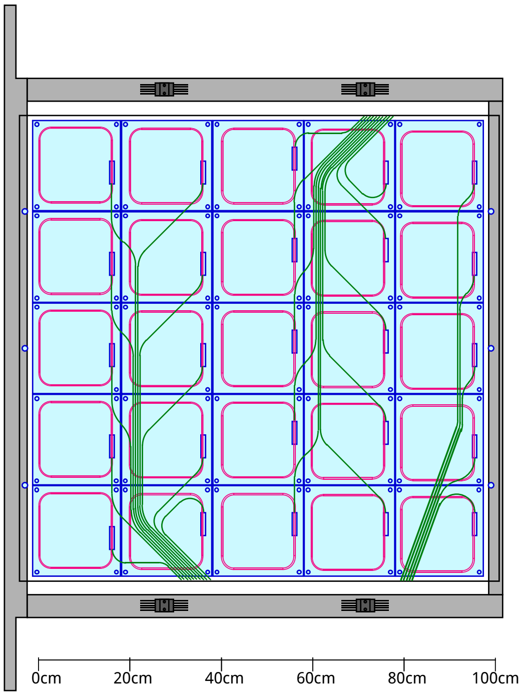

図 4.3: ハドロンカロリメータ用 タイルファイバー

$$p = c\int B * dl/d\theta$$

という式から求められる。
ここで $c\int B * dl$ は磁場の強さと粒子が磁場の中を通った距離で、MT6 ビームラインではこのパラメータは MT5 電磁石の電流との間に
$I > 0.9$ の時
$B_{field} = 4908.66 * I - 807.77 * I^2 + 1428.7 * I^3 - 775.48 * I^4$
$I < 0.9$ の時
$B_{field} = 4780.45 * I$
の関係があることが分かっている。この式から求めた 75GeV に設定した入射粒子の運動量の分布を図 4.7 に示す。実際の運動量と設定した運動量の違いを表 4.2 にまとめた。

4.3 Calibration

PMT のゲイン、シンチレータの光量、ファイバーの減衰率などのばらつきをビーム中のμ 粒子に対する各チャンネルの応答を使って校正するためにハドロン

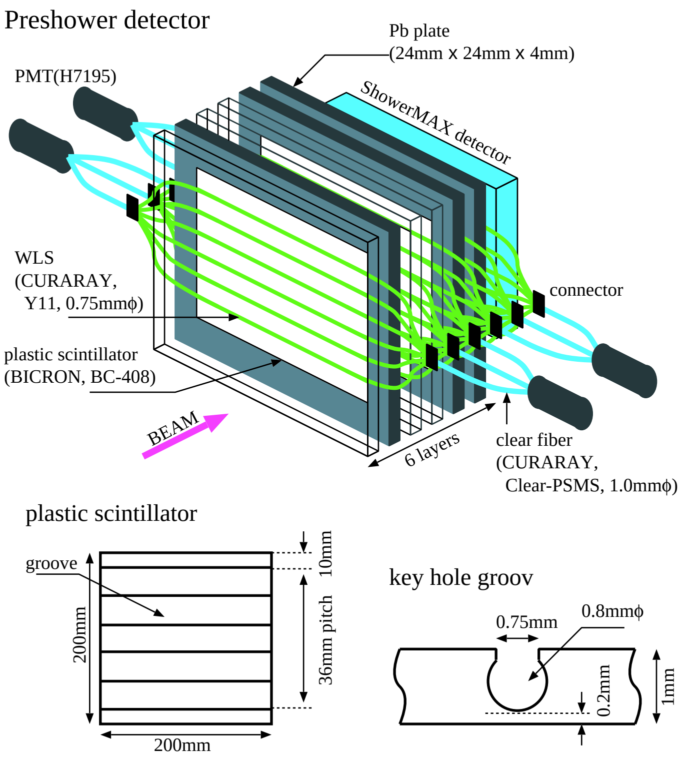
Preshower detector
Pb plate
(24mm x 24mm x 4mm)
PMT(H7195)
ShowerMAX detector
WLS
(CURARAY,
Y11, 0.75mmϕ)
connector
plastic scintillator
(BICRON, BC-408)
BEAM
6 layers
clear fiber
(CURARAY,
Clear-PSMS, 1.0mmϕ)
plastic scintillator
groove
200mm
10mm
36mm pitch
200mm
key hole groov
0.75mm
0.8mmϕ
0.2mm
1mm

図 4.4: プリシャワー測定器

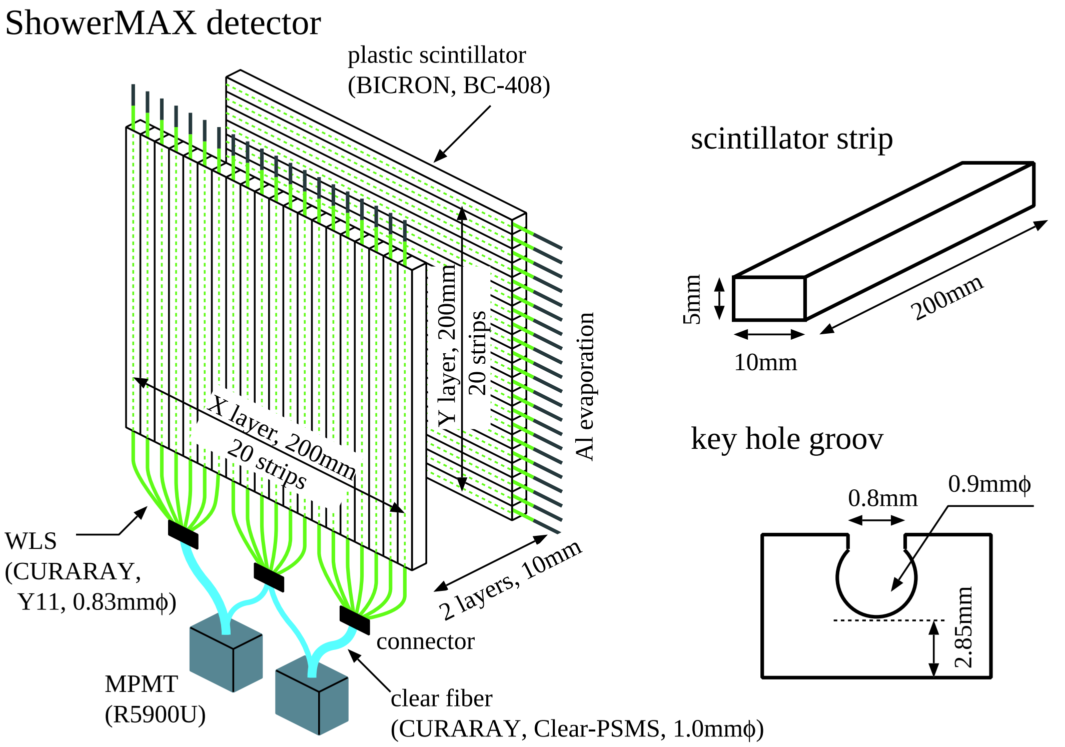
ShowerMAX detector
plastic scintillator
(BICRON, BC-408)
scintillator strip
5mm
10mm
200mm
Y layer, 200mm
20 strips
Al evaporation
X layer, 200mm
20 strips
key hole groov
0.8mm
0.9mmϕ
2.85mm
WLS
(CURARAY,
Y11, 0.83mmϕ)
2 layers, 10mm
connector
MPMT
(R5900U)
clear fiber
(CURARAY, Clear-PSMS, 1.0mmϕ)

図 4.5: シャワーマックス検出器

カロリメータの各タワー、シャワーマックスの全チャンネルにビームをあてた。

μ 粒子の選別には次の条件を使った。

1. tpsd の信号のパルスハイトが、mip 相当である。
2. 入射したタワーのすべてのセクションで mip 相当の応答がある。

選別された事象に対する各チャンネルの分布をランダウ分布

$$f(x) = Aexp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-B}{C} + exp(-\frac{x-B}{C})\right)\right)$$

でフィットし、ピークの値が同じになるようにコンポーネントごとに全チャンネルを校正した。

キャリブレーションに使ったイベントの典型的な分布とフィットした関数を図 4.8 に示す。

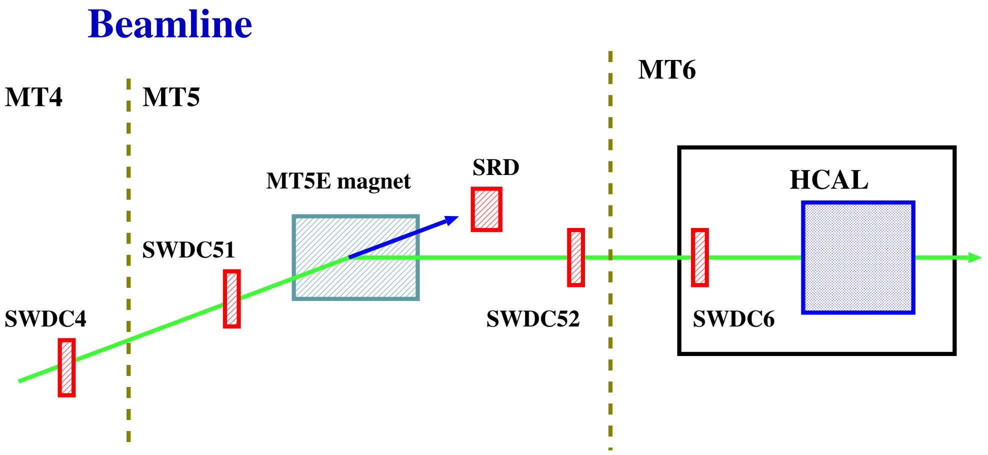
Beamline
MT4
MT5
MT6
MT5E magnet
SRD
HCAL
SWDC51
SWDC4
SWDC52
SWDC6

図 4.6: ビームラインのセットアップ 2

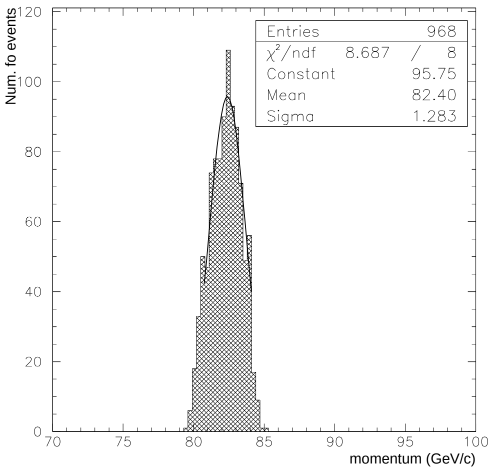

図 4.7: 入射粒子の運動量分布。フィットは 1 σ の正規分布

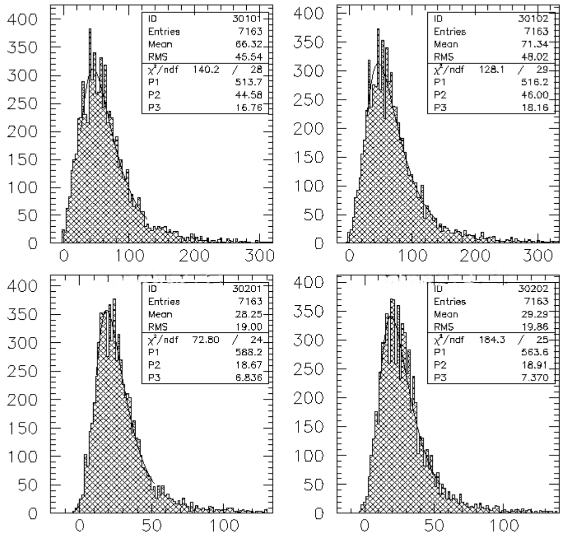

図 4.8: プリシャワー測定器での校正に使ったイベントの分布。横軸は ADC カウント。フィットはランダウ分布。

electron tune		pion tune	
assumed energy	actual energy	assumed energy	actual energy
100	100.3 ± 1.2	100	96.4 ± 1.2
75	82.2 ± 1.1	75	73.3 ± 1.1
50	54.9 ± 0.8	50	48.9 ± 0.8

表 4.2: 入射粒子の設定した運動量と実際の運動量。単位はGeV/c。

4.4 Event Selection

今回のテストビーム実験ではカロリメータモジュールに達する前にシャワーを起こして複数の粒子となって実験室に到達する事象が多く観測された。

そのため、カロリメータの前方においたTPSDとMT5E電磁石より下流にある2つのSWDCでカロリメータに1粒子しか到達していないものだけを選別した。

図4.9と4.10はシングルトラックカットの条件を示す。また、図4.11は

$$Ratio = \frac{\sum(\text{中心タワーの応答})}{\sum(\text{全タワーの応答})}$$

をtpsdで選別された事象(白)とSWDCとtpsdで選別された事象(ハッチ)である。SWDCを使うことで効果的に複数の粒子による事象を排除できていることが分かる。

なお、この条件を課すことで電子の事象は数%にπ 中間子の事象は30%程度に減少した。

		num. of trig.	beam composition(%)			selected ev.
			e	π	μ	
electron tune	100GeV	58035	92	5	3	682
	75GeV	61000	96	3	1	1591
	50GeV	50523	96	3	1	1735
pion tune	100GeV	120000	30	65	5	10133
	75GeV	101630	7	87	6	15806
	50GeV	81000	2	91	7	17947

表 4.3: 各入射ビームの状態。ビームの成分はカロリメータを使って概算した。

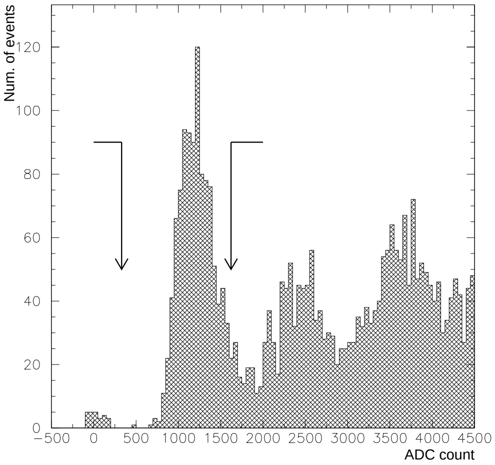

図 4.9: tpsd による 1 トラック事象の選別。横軸は ADC カウント。二つの矢印の内側をシングルトラックとした。

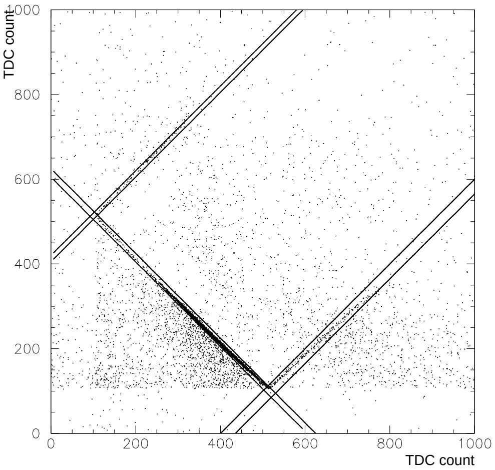

図 4.10: SWDC による 1 トラック事象の選別。縦軸、横軸はそれぞれ SWDC6 のワイヤーの信号の TDC カウント。三組の平行線の内側を残した。

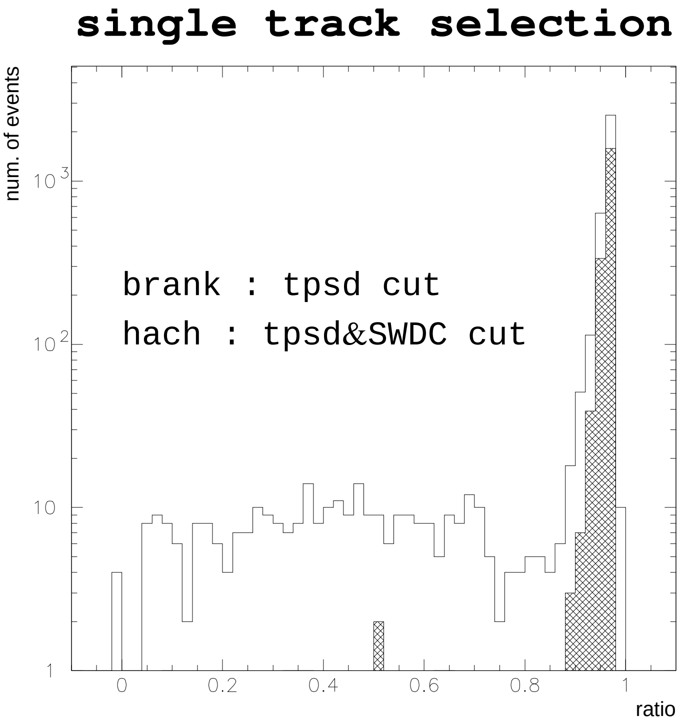

図 4.11: 中心タワーの応答の和と全タワーの応答の和の比。白抜きは tpsd のみによる 1 トラックの選別。ハッチはさらに 2 組の SWDC も使った時。

4.5 e/π Separation

カロリメータによるe/πの分離を行う前にビームラインの上のデバイスで入射粒子が電子の事象と入射粒子がπ中間子の事象を以下の条件で選別した。

電子

TPSDの前に鉄ブロックを置いていないRUNでSRDに信号があり、バックアップカウンタに信号が無い。

SRDの波高分布を75GeVの粒子について図4.12に示す。50GeV以上の粒子についてはSRDによる電子同定でのπ中間子の誤認率はπ中間子中の0.8%以下であった。10GeV,25GeVの粒子についてはこの方法では電子の同定はできなかった。

π中間子

TPSDの前に鉄ブロックを置いたRUNでバックアップカウンタに信号が無い。

電子、π中間子の選別に使った条件を表4.4にまとめる。

electron	Good track at SWDC52 and SWDC6. Only one hit on each wire of SWDC52 and SWDC6. Pulse height on TPSD is consistent with one of mip. Hit on SRD. No signal at the backup counter.
pion	Good track at SWDC52 and SWDC6. Only one hit on each wire of SWDC52 and SWDC6. Pulse height on TPSD is consistent with one of mip. No signal at the backup counter.

表4.4: 電子、π中間子の同定の条件

4.5.1 Pion rejection

ビームライン上のデバイスで選別された事象を使ってカロリメータのπ中間子の排除能を評価した。

プリシャワー測定器の信号の大きさ。

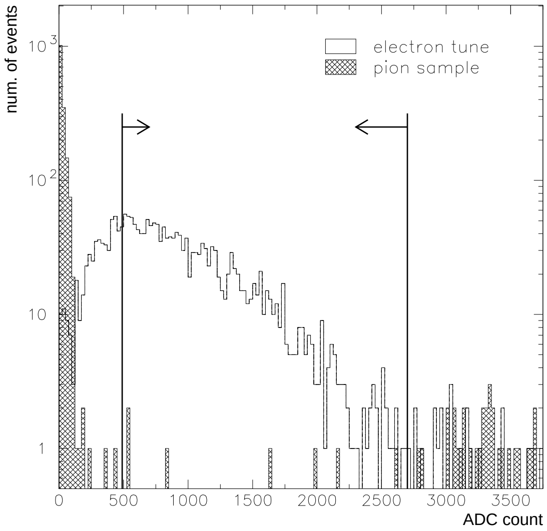

図 4.12: SRD の波高分布横軸は ADC カウント、縦軸はログスケールでイベント数。白抜きは電子チューンのビームで鉄ブロックは無し。ハッチはハドロンチューンのビームで鉄ブロック有り。いずれも TPSD で mip 相当の信号をおとした事象。

プリシャワー測定器の信号の大きさは 4 つの PMT 全ての和 (all) と下流側の 3 層を読みだしている 2 つの PMT のみ (lower) の 2 種類の値を使った。4 つを使った場合の電子、π 中間子の分布を図 4.13 に示す。

シャワーの広がり。

シャワーの横、縦方向の広がりを表す特徴的な値として次の 2 つの量を定義した。

$$Spread = \sqrt{\frac{\sum_i D_i^2 E_i}{\sum_i E_i}}$$

$$Length = \sqrt{\frac{\sum_i Z_i^2 E_i}{\sum_i E_i}}$$

ここで i は各タワーで、E_i 各タワーのパルスハイト、但し、S 値にはプリシャワー測定器、ストレートグルーヴ部は含まない。D_i はカロリメータの中心と各タワーの距離 (cm)、Z_i は前置検出器の前面と各セクションの中心との距離 (X_0) である。

更に、S 値とプリシャワー測定器のパルスハイトによって 2 次元的に e/π の分離を行った。

カロリメータに求められるπ 中間子の排除能は 1/200 程度である。L 値を使ったπ 中間子の排除によってこの目標は充分に達成することが出来ることが分かった。今後より低いエネルギーでのπ 中間子の排除能についても測定する必要がある。また、今回使用しなかった電磁カロリメータを使って多くの事象とよりきれいな電子、π 中間子のサンプルを使って、更に高い精度での e/π 分離のテストもする必要があるだろう。

	all	lower	all	lower	all	lower
beam momentum	90% e efficiency		95% e efficiency		98% e efficiency	
100GeV	14.8	18.6	11.3	12.5	9.5	10.3
75GeV	18.6	24.1	15.4	18.7	12.2	13.2
50GeV	18.7	26.4	14.0	16.5	11.2	11.9

表 4.5: プリシャワー測定器を使ったπ 中間子排除能。all はセクション 1,2 の和、lower はセクション 2 のみを使った。

	Spread	Length	Spread	Length	Spread	Length
beam momentum	90% e efficiency		95% e efficiency		98% e efficiency	
100GeV	38.2	3378	24.1	2027	10.1	1126
75GeV	39.6	1756	26.8	1581	11.5	1216
50GeV	27.5	1632	17.7	1282	10.7	945

表 4.6: S 値、L 値を使ったπ 中間子排除能

4.6 Position Resolution

4.6.1 pre-analysis of showermax detector

シャワーマックス検出器の位置分解能を評価する前に測定値の補正をした。まず、MAPMT の非線形性をベンチテストの結果を用いて補正した。それぞれのチャンネルで出力された電荷量から入射光量を見積もった。

更に、測定系のクロストークを補正した。クロストークは各チャンネルでその量にばらつきがある。また、同じチャンネルでも入射光量によってその割合が

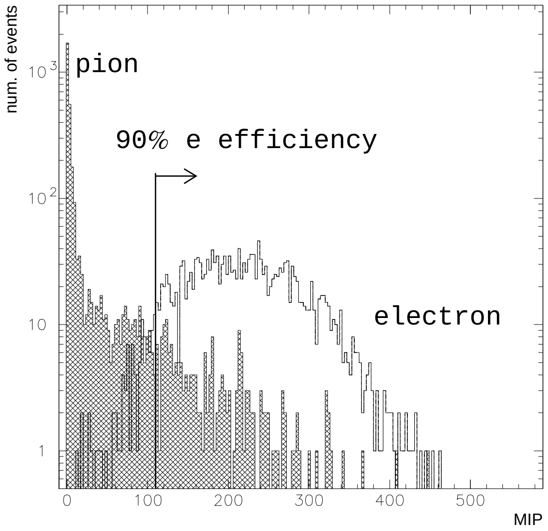

図 4.13: プリシャワーの波高分布。横軸は MIP の波高でノーマライズした。縦軸はログスケールでイベント数。白抜きは電子。ハッチはπ 中間子。いずれも 75GeV ビーム。

異なるために正確にクロストークの量を見積もることは現実的ではない。そのため、 MAPMT ごとに入射光量を足し、その値に比例した量を MAPMT の各チャンネルから引いた。

引く量の割合はシャワーマックス検出器の電子に対するヒット数がシミュレーションと等しくなるように調節した。

図 4.18 に各補正を行った後の電子の典型的なヒット分布を示す。また、図 4.17 は MAPMT 測定系のクロストークの測定値である。

4.6.2 position resolution

補正されたシャワーマックス検出器の応答から電子の位置を同定した。同定には

各チャンネルの光量の重心

光量分布の 1σ の正規分布によるフィット

の 2 つの方法を使った。

JLC では不変質量法によって粒子の不変質量を精密に再構成する必要がある。そのためには運動量、エネルギー分解能の良い測定器を使うと同時に測定された

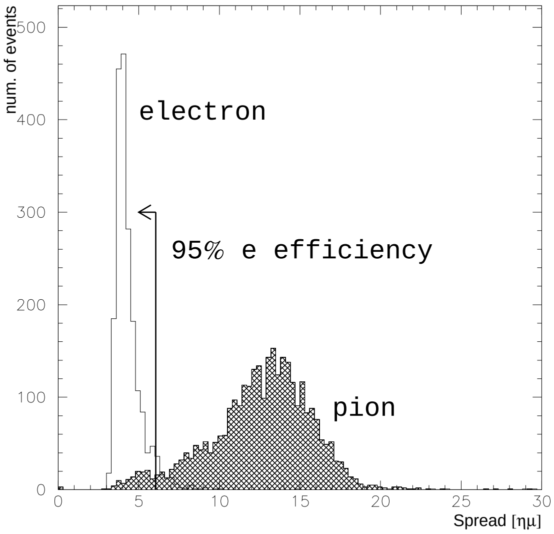

図 4.14: S 値によるπ 中間子の排除。横軸は S 値 (cm)。縦軸はイベント数。白抜きは電子。ハッチはπ 中間子。いずれも 75GeV ビーム。

運動量とエネルギーの組合せを正しく見付けることが重要である。CDC のビーム軸方向の位置分解能は $\sigma_Z = 2\mathrm{mm}$ である。CDC のトラッキング情報と電磁シャワーのエネルギーの組合せの為に、シャワーマックス検出器に必要とされる位置分解能はそれと同等の $\sigma = 3\mathrm{mm}$ である。

今回の測定では 1cm のシンチレータストリップによるシャワーマックス検出器でこの要求値とほぼ同程度の位置分解能が得られることが分かった。しかし、シンチレータ同士の遮光、光電面とファイバーの接続、などクロストークを起こす原因が多かった。また、光検出器として使用した MAPMT もクロストークの原因になり、出力の非直線性が大きく、改良の余地があることが分かった。

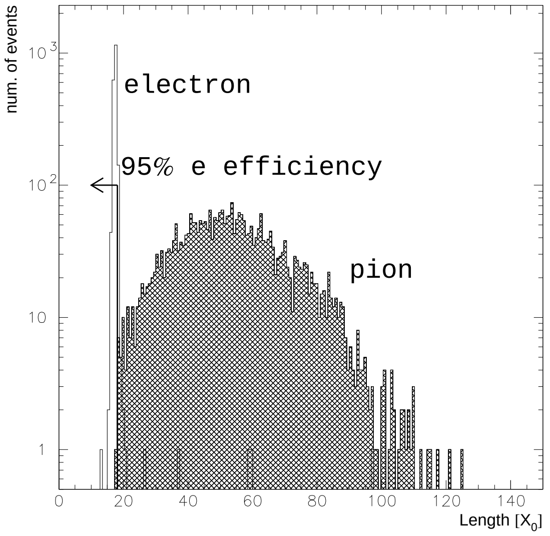

図 4.15: L 値によるπ 中間子の排除。横軸は L 値 (X_0)。縦軸はログスケールでイベント数。白抜きは電子。ハッチはπ 中間子。いずれも 75GeV ビーム。

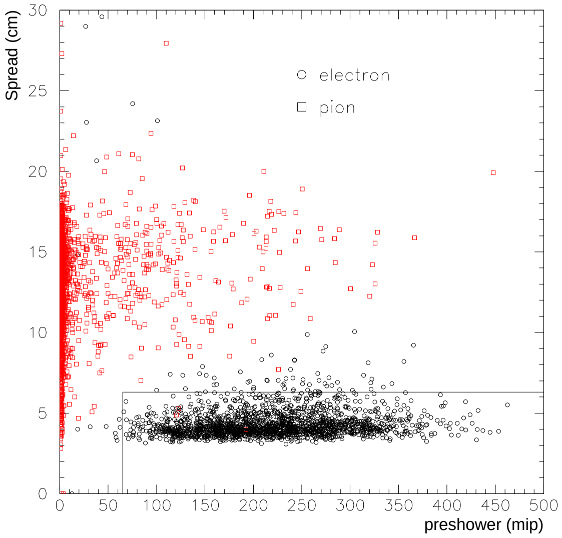

図 4.16: プリシャワー測定器とS値によるπ 中間子の排除。横軸はmipを単位としたプリシャワー測定器の応答。縦軸はS値(cm)。丸は電子。四角はπ 中間子。いずれも75GeV ビーム。上のラインでのカットで96 %電子検出効率でπ 中間子は1/565になった。

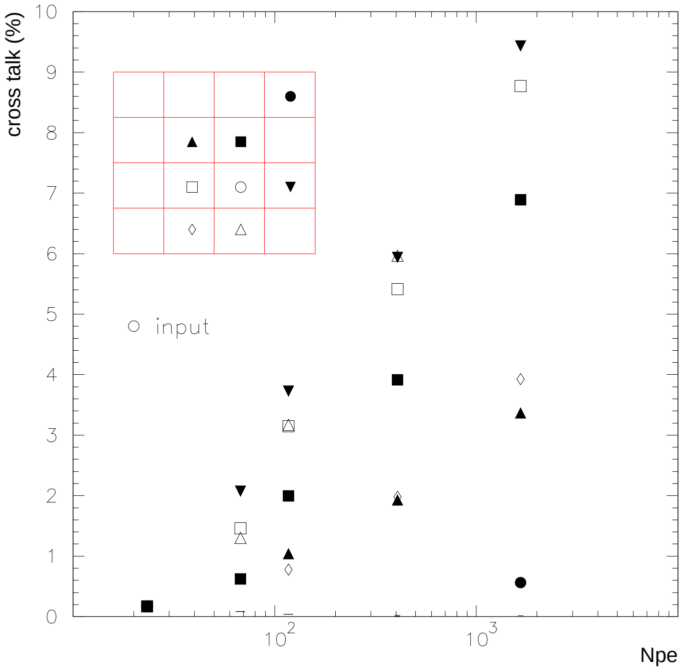

図 4.17: シャワーマックス検出器の測定系のクロストークの測定値。白丸印のチャンネルに光を当てた。

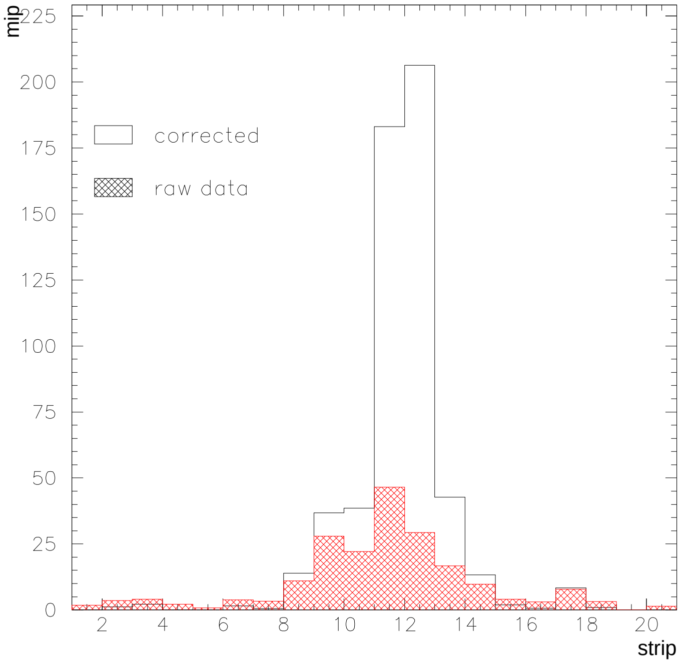

図 4.18: シャワーマックス検出器の光量の補正。

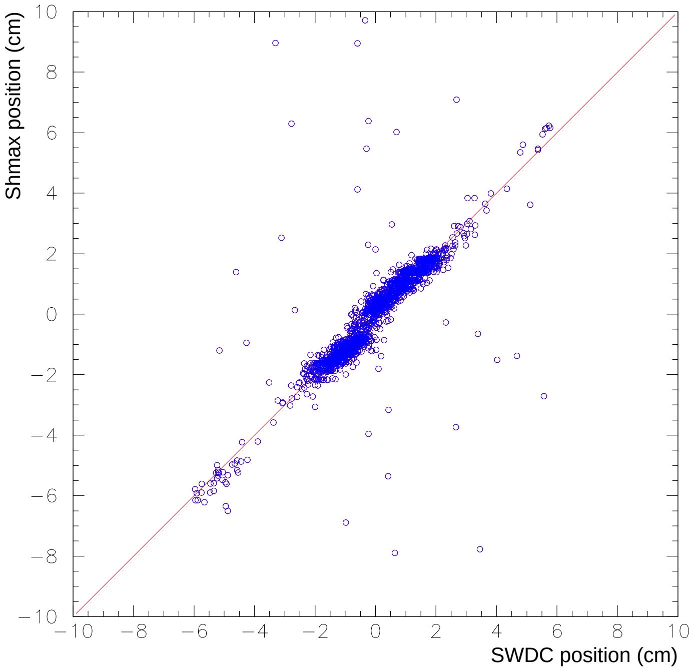

図 4.19: SWDC によって同定した位置とシャワーマックス検出器で同定した位置の散布図。

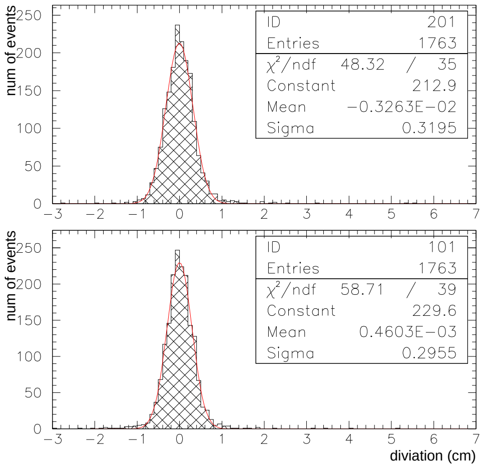

図 4.20: SWDC によって同定した位置とシャワーマックス検出器で同定した位置との差。シャワーマックス検出器は重心法で同定した。

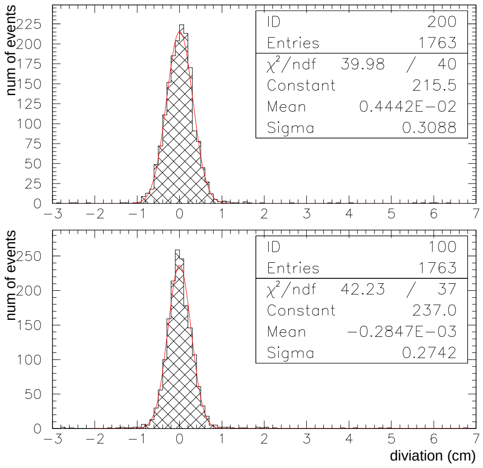

図 4.21: SWDC によって同定した位置とシャワーマックス検出器で同定した位置との差。シャワーマックスはフィットによって同定した。

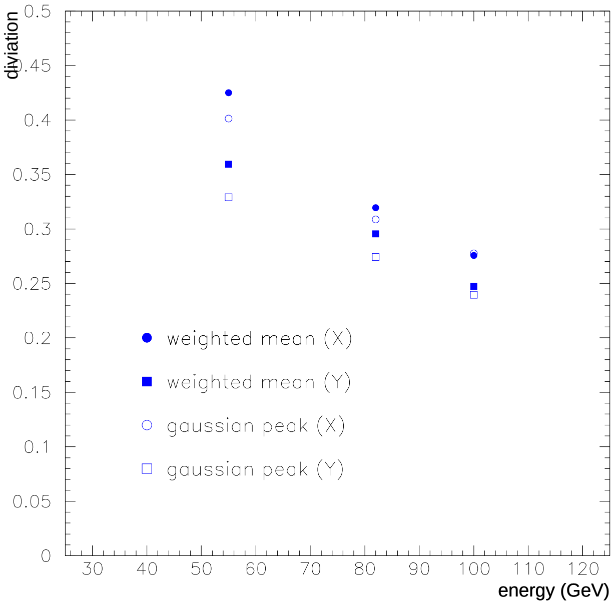

図 4.22: 各エネルギーでの 2 つの方法による解析の結果。

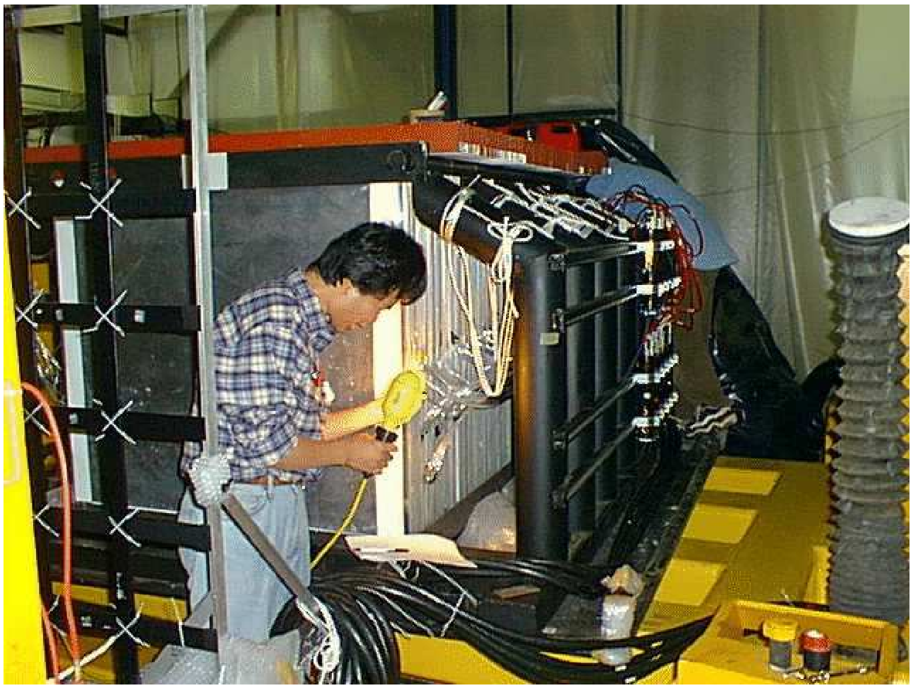

図 4.23: MT6 実験室での作業の様子。

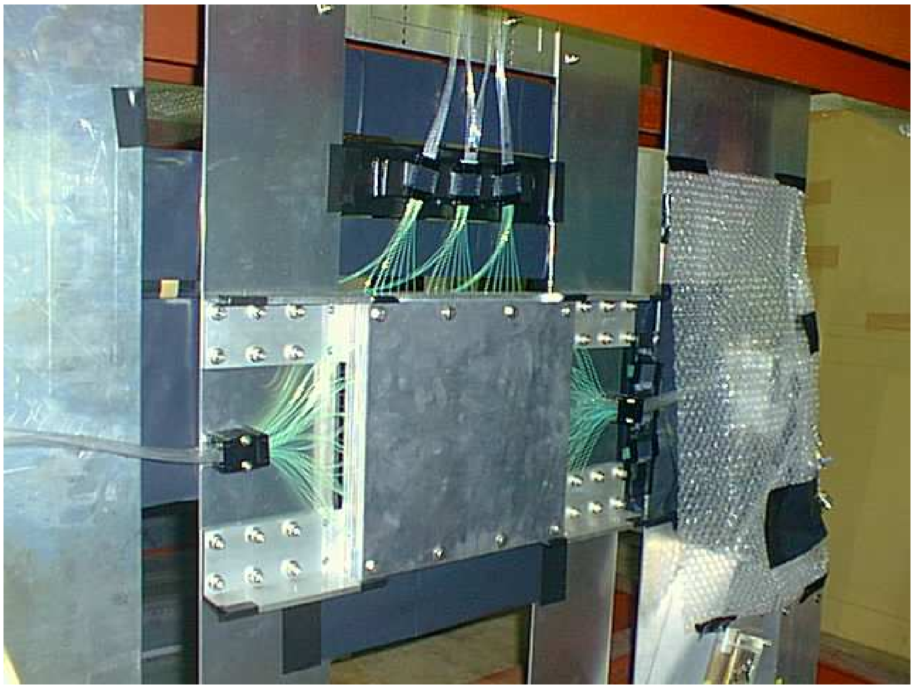

図 4.24: 前置検出器

第5章　Monte Carlo Simulation

今回のテストモジュールにはタイルシンチレータと鉛のサンプリング型として初めて前置検出器を用いたが、JLC測定器の実機には前置検出器とハドロンカロリメータの間には電磁カロリメータがある。
電磁カロリメータを用いたときのe/π分離能を評価するためにモンテカルロシミュレーションでt912テストビーム実験を再現した。
シミュレーションでのジオメトリのセットアップを以下にまとめる。

- ビームライン上には上流からtpsd、前置検出器、ハドロンカロリメータ、バックアップ測定器が設置されている。
- 必要に応じてtpsdの前に鉄ブロックが置かれる。
- 鉛とシンチレータタイルの間の隙間は一様に2mmとする。

EMカロリメータを使わないときのモンテカルロの結果を以下に示す。
入射粒子の運動量は平均値を実験での実際の運動量とし、その周りで正規分布にしたがってランダムに決めた。また、入射粒子の運動量をπ中間子の運動量に合わせたときの結果も示す。表中の$>$はカットによって残ったイベントの数が1または0の時につけた。
プリシャワー測定器による分離のシミュレーションでは比較的実験と一致した値が得られた。低エネルギーでは10GeVより下のエネルギーの粒子に対しては分離能が悪くなる。
S値による分離のシミュレーションでは実験とは大きく離れた値が得られた。これは、シミュレーションに使ったgeantパッケージがπ中間子の横方向への広がりを忠実に再現していないことが主な原因であると考えられる。
L値による分離のシミュレーションでは実験とほぼ一致する結果が得られた。高エネルギーでは非常に良い$e\pi$分離能を持つL値は低エネルギーでは急激に分離能が悪くなる。

	all	lower	all	lower	all	lower
beam momentum	90% e efficiency		95% e efficiency		98% e efficiency	
100GeV	13.9	20.0	10.9	14.4	8.52	10.1
75GeV	13.6	19.9	10.9	13.9	8.00	9.56
50GeV	15.7	20.6	12.4	14.2	10.0	11.0

表5.1: モンテカルロによるプリシャワー測定器を使ったπ中間子排除能。

	Spread	Length	Spread	Length	Spread	Length
beam momentum	90% e efficiency		95% e efficiency		98% e efficiency	
100GeV	>1278	>1278	>1278	>1278	>1278	>1278
75GeV	>1673	>1673	>1673	>1673	>1673	>1673
50GeV	361	>2164	1082	>2164	1082	>2164

表5.2: モンテカルロでのS値、L値を使ったπ中間子排除能

	all	lower	all	lower	all	lower
beam momentum	90% e efficiency		95% e efficiency		98% e efficiency	
100GeV	13.2	18.3	10.5	13.0	7.8	9.6
75GeV	12.1	17.2	9.7	12.0	7.7	8.7
50GeV	14.4	19.0	11.8	13.7	9.8	10.8
25GeV	12.5	16.5	10.3	12.1	9.0	9.7
10GeV	13.7	17.3	11.3	12.7	9.3	10.0
5GeV	7.8	10.5	7.2	9.0	6.7	7.7

表5.3: モンテカルロによるプリシャワー測定器を使ったπ中間子排除能。電子の運動量とπ中間子の運動量をそろえたとき。

	Spread	Length	Spread	Length	Spread	Length
beam momentum	90% e efficiency		95% e efficiency		98% e efficiency	
100GeV	>1278	>2164	>1278	>1673	>1278	>1278
75GeV	>1673	>2163	837	>2163	837	>1673
50GeV	541	>2164	541	>1278	361	>1278
25GeV	321	551	214	482	133	428
10GeV	76.7	89.3	50.9	75.4	32.4	63.4
5GeV	34.6	26.9	20.4	24.8	10.3	22.3

表 5.4: モンテカルロでの S 値、L 値による π 中間子排除能。電子の運動量と π 中間子の運動量をそろえたとき。

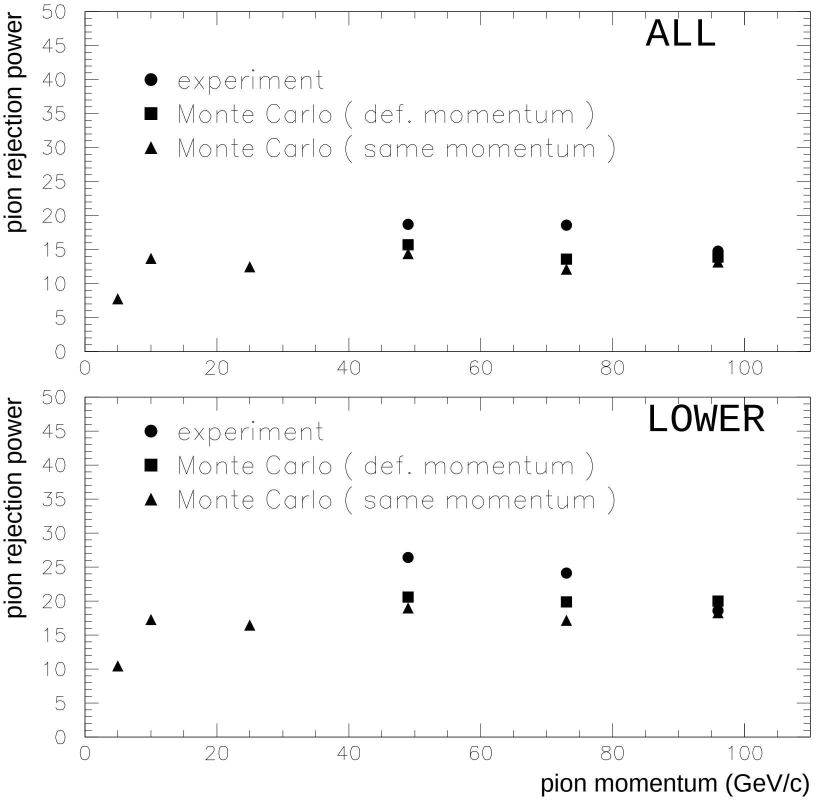

図 5.1: プリシャワー測定器によるπ 中間子排除能。上段は 6 層全て、下段は下流側の 3 層を使った。

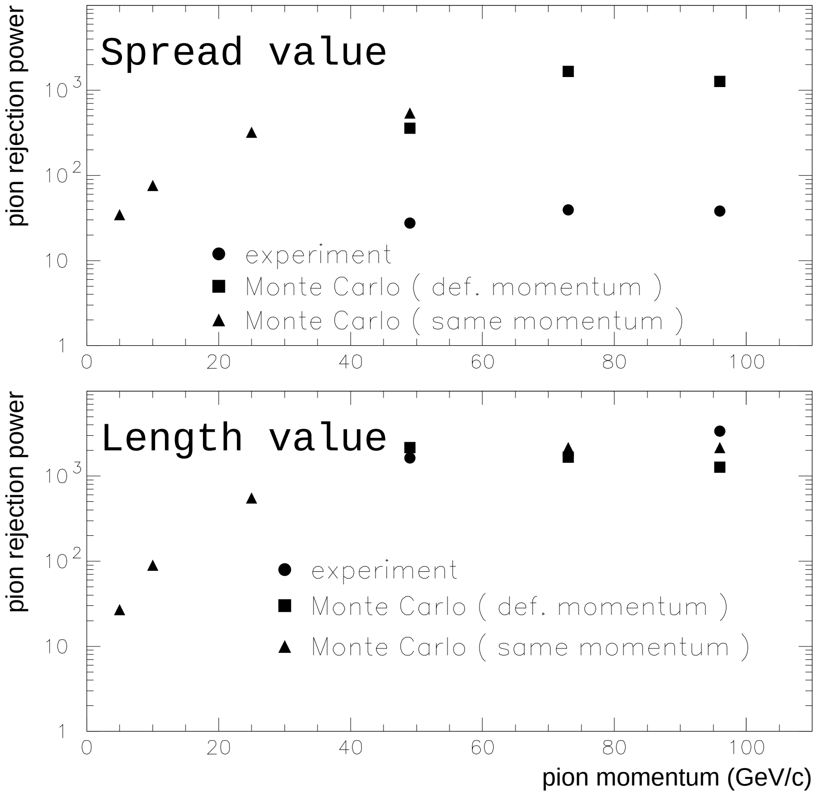

図 5.2: S 値、L 値によるπ 中間子排除能。上段はS 値、下段はL 値による。

第6章　Summary

JLCカロリメータ用前置検出器のテストモジュールを使ったテスト実験を行った。前置検出器はプリシャワー測定器とシャワーマックス検出器からなり、プリシャワー測定器は鉛とシンチレータタイルのサンプリグ構造、シャワーマックス検出器はシンチレータストリップを使った。

測定の結果、50GeV以上ではプリシャワー測定器はカロリメータ本体の情報と合わせせることで充分な電子とπ中間子の分離が出来ることが分かった。しかし一方で、シミュレーションでは低エネルギーに於いては同じ方法でのe/πの分離は難しいという結果も出ており、低エネルギーでのテスト実験が必要であると考えられる。

シャワーマックス検出器には今回の構造ではクロストークが大きく、また、光検出器の直線性も充分ではなかった。今後は充分な直線性を持つ多チャンネルの光検出器を開発すると共に測定系の各部でクロストークを抑えるような構造を考える必要がある。

位置分解能に関しては基本的には現在の構造で充分な性能が得られることが分かった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、適切な御指導及び御助言を与えて下さいました武田廣先生、野崎光昭先生、川越清以先生に深く感謝致します。また、テストビーム実験の準備、実験、解析を通して数々の御指導、御助言をいただいた高エネルギー加速器研究機構の藤井芳昭さん、神前純一さん、信州大学の竹下徹先生、筑波大学の大石竜太郎先生、テキサス A&M 大学の掃部輝機先生と同グループの皆様に深く感謝致します。また、光検出器の研究にあたり御協力、御助言を下さった金谷奈央子さん論文を書くにあたって御助言を下さった石井恒次先生、大学での研究活動に協力して下さった高エネルギー研究室の皆様に深く感謝致します。

関連図書

[1] JLC Group, KEK Report 92-16 (1992).

[2] 梶川良一 平成5年度科学研究費補助金 (総合研究A) 研究成果報告書 リニアコライダーの物理 (1994).

[3] 小林富雄 平成8年度科学研究費補助金 (基盤研究A) 研究成果報告書 電子陽電子リニアコライダー実験における測定器の開発研究 (1997).

[4] T.Suzuki, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 432(1999) 48-65.

[5] K.Ishii, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 385(1997) 215.

[6] S.Kim(CDF Collaboration), Nucl. Instr. and Meth. A 360(1995) 206.

[7] T.Hara, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 365(1995) 370-377.