

# SiAPDを用いたSciFi Trackerの開発

大阪市立大学大学院理学研究科  
数物系専攻 高エネルギー物理学研究室

空 剛史

## 概要

現在の高エネルギー物理実験にとって最も主要な目的は Higgs 粒子の探索である。Higgs 粒子はゲージ理論の完成や電弱対称性の破れの説明、さらにフェルミオンの質量起源に関わる非常に重要な存在である。そのため、Higgs のみならず、Higgs が単体で存在したときの問題を解消するための超対称性粒子の探索をすすめていくためには、TeV scale のエネルギー、高輝度の実験を行わなくてはならない。こうした次世代素粒子実験の例として LHC(Large Hadron Collider) があるが、そこで Detector に求められる性能は非常に厳しいものであり、特に中央飛跡検出器では従来のようなガスチェンバーでは対応しきれず、ATLAS で使用予定の Straw chamber も苦しい感が否めない。

我々はこういった状況を打開するために、SiAPD を用いた SciFi Tracker の開発を行った。本研究では SciFi Tracker の性能評価、そして実際の素粒子実験での使用のための Simulation を行った。

# 第1章 Introduction

高エネルギー物理学とは、物質の究極要素とは何かを追求し、これら構成要素間に働く力（相互作用）の仕組みを調べる自然科学の一分野である。量子力学によれば、顕微鏡の解像度に関係する量である入射粒子の波長は  $h/p$  程度というように与えられる。つまり顕微鏡としての高エネルギー加速器の解像度は入射エネルギーに比例する。したがって、よりミクロな領域を探索するにはより大きな入射エネルギーをもった粒子を必要とする。実際、素粒子物理学史上重要な発見は、その時代の最高エネルギーの加速器に多くなされている。

素粒子物理学では、さまざまな理論が提唱されているが、そのうちこれまでの高エネルギー実験ではっきりと確立されているのは、電弱統一理論、量子色力学である。これらをあわせて標準理論というが、この理論は非常に有効な理論であり、これまで標準理論を破ることを明確に示した実験事実はない。

しかし標準理論では説明のつかない事が数多く存在し、とても標準理論は我々が求める最終理論とは思えない。そういった理論的困難を避けるため、超対称性理論や Extra dimension など様々な理論が提唱されている。

## 1.1 次世代素粒子実験の狙い

我々はこの標準理論の成功によりゲージ理論が正しい方向に進んでいることを確信しているが、ゲージ対称性が厳密に成り立つときには、すべての粒子の質量がゼロでなくてはならず、これは我々の現実の世界とは異なった描像である。この困難を解決するための最も有力な理論として Higgs mechanism が存在する。Higgs mechanism による  $SU(2) \times U(1)$  対称性の自発的な破れにより、局所ゲージ普遍性の下で現れるヒッグス場がフェルミオンとの相互作用により粒子に質量を持たせることができる。

しかしこれまでの実験では肝心の Higgs 粒子が見つかっていない。現在我々が Higgs について理解している事はユニタリー条件からの要請から 1TeV 以下に存在しなくてはいけないということと、LEP2の実験によってスタンダードヒッグスが confidence level 95% で 113GeV から 194GeV に存在するということである。

しかしたとえヒッグス粒子を発見したとしても、質量が大統一理論のエネルギースケールに比べて小さいために発生する階層性問題を解決するためには、ヒッグスが 1TeV 付近に存在するテクニカラーの複合体であるという解釈や超対称性粒

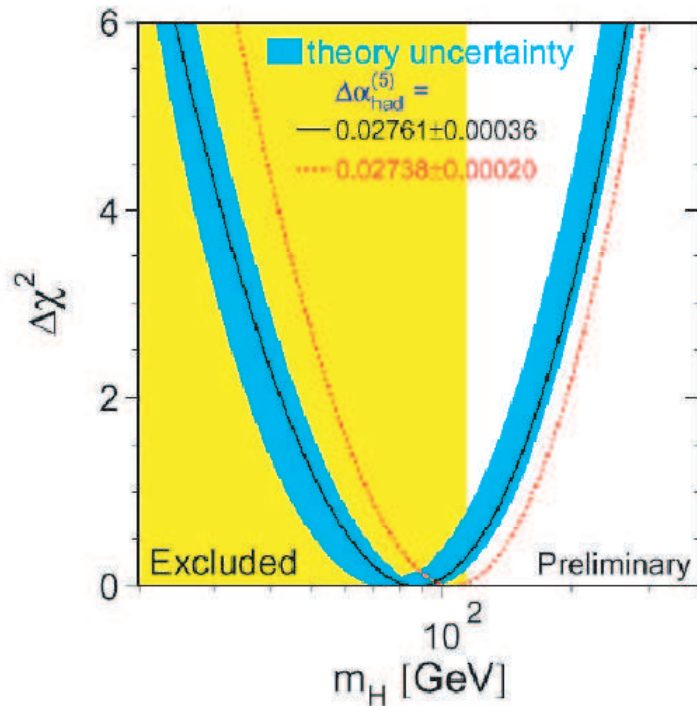


図 1.1: LEP2 の直接探索による Higgs の存在示唆

子の存在が言われている（現在では超対称性粒子の存在のほうが有力である）。また超対称性粒子（SUSY）が存在した場合、さらにヒッグス粒子の数は増えることになり、さらに状況は複雑になる。

しかしヒッグスや SUSY が存在したとしてもそれらは真空の安定性や質量補正を有効にするために、1TeV 付近またはそれ以下に存在しなければならないことが分かっている。すなわちヒッグス、SUSY の問題を解決するためには TeV scale の物理が必要になることが分かった。

TeV scale の物理を行うだけの技術を持った今、我々はやっとうい問題に対して明確な答えを与えることができる。ヒッグス、SUSY を発見し、そのメカニズムを理解して一気に GUT scale のラグランジアンを作ることができるのか、それとも予期せぬ発見をし、そこから New Physics が開かれるのか、どのような結果になるか分からないがいずれにしろ非常に興味深い結果が与えられる事は確かである。こういった意味で TeV scale の物理、すなわち次世代素粒子実験の役割は非常に重要である。

## 1.2 次世代素粒子実験に伴う問題

たしかに次世代素粒子実験は興味深い内容を持っている。しかし次世代素粒子実験は単にビームエネルギーをあげるだけで可能になるわけではない。ビームのエネルギーをあげることによって生じる膨大な数の飛跡粒子から精度の高い正しい情報を得るために求められる検出器への要求は一層きびしくなる。とくに中央飛跡検出器に関しては、詳細は後述するが従来まで主流であったガスチェンバーでは TeV の物理を行なうだけの十分な多重粒子分解能、高速応答性を持つことができないことがわかっている。また中央飛跡検出器の領域は比較的広いため、vertex detector に使用しているピクセル、シリコンストリップ検出器などでカバーしようものなら膨大なコストがかかってしまう。したがって、我々はそういった次世代素粒子実験のような厳しい環境下においても使用可能である中央飛跡検出器の開発をしている。まず、introduction として現在唯一 TeV の物理を行なえる LHC 実験の概要とそこでの中央飛跡検出器の現状などを踏まえながら、我々の研究する SiAPD を用いた SciFi Tracker の開発について見ていく。

## 1.3 LHC の概要

LHC(Large Hadron Collider) はジュネーブ郊外にある CERN(欧州合同原子核研究機構) で建設が始まっている。超伝導電磁石約 2 千台からなる陽子リングを周長 27 km の LEP(Large Lepton Positron Collider) で使用していたトンネルの中に設置して、高エネルギーの陽子・陽子衝突実験を実現させる。建設費約 5 千億円 で数年後に完成予定である。

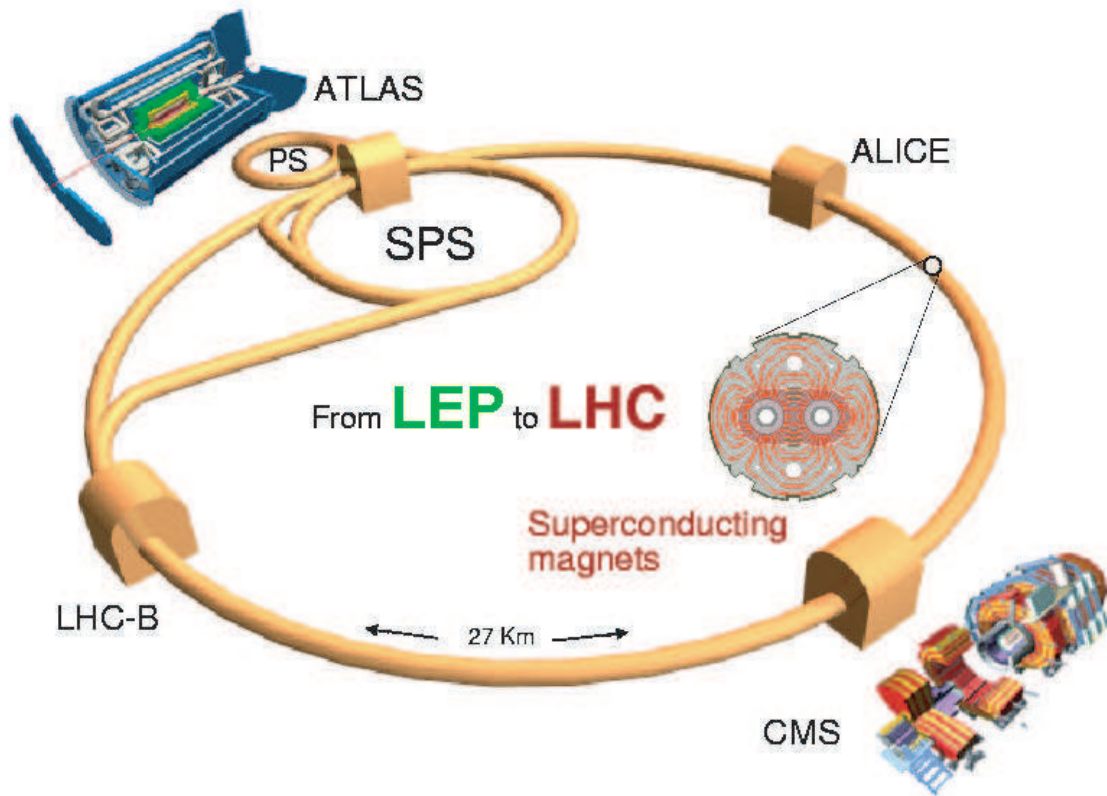
図 1.2 に示すように、LHC は 8 対称で 8 アーク部および実験に使う 4 衝突点と入射ビーム・ビームダンプなどのための 4 交叉点からなる。その中に Energy Frontier 実験を行う ATLAS(A Toroidal LHC Apparatus) と CMS、重イオン実験をおこなう ALICE、B クォークの実験をおこなう LHC-b がある。LHC の主要パラメータを以下に示す [1]。

## 1.4 エネルギーフロンティア実験 ATLAS CMS

LHC の主要な目的は統一された電弱相互作用の根幹をなす Higgs 粒子の探索である。Higgs は真空の安定性などから 1TeV 以下に存在すると理論的に予言されている。しかし Higgs が発見されたとしても、理論的な困難がまだ存在し、その解決のために超対称性理論などが提唱されている。超対称性粒子も存在するならば、1TeV 付近にあると予言されており、LEP2 や Tevatron はそのエネルギー領域の下端にやっと届く程度である。

LHC が Higgs, SUSY を発見するために、加速器がどのような要請をみたさなけ

# The Large Hadron Collider (LHC)



	Beams	Energy	Luminosity
<b>LEP</b>	$e^+ e^-$	200 GeV	$10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
<b>LHC</b>	p p	14 TeV	$10^{34}$
	Pb Pb	1312 TeV	$10^{27}$

☒ 1.2: LHC overview

表 1.1: LHC 主要パラメータ

主リング周長	26658.87 m	Number of Bunch	2835
Energy at collision	7 TeV	Bunch separation	24.95 ns
Energy at injection	450 GeV	Number of particle / bunch	$1.1 \times 10^{11}$
Dipole field at 7 TeV	8.33 T	Beam Emittance(r.m.s.)	$3.75 \times 10^{-6} \mu\text{mrad}$
Coil inner diameter	56 mm	Total crossing angle	300 rad
ビームの分離間隔 (1.9 K)	194 mm	Luminosity lifetime	10 h
Luminosity	$10^{-34} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	Energy loss per turn	7 keV
Beam beam parameter	$3.6 \times 10^{-3}$	Critical photon energy	44.1 eV
DC beam current	0.56 A	Total radiated power / beam	3.8 KW
Bunch spacing	7.48 m	Stored energy per beam	350 MJ

ればいけないのかみていく。

#### 1.4.1 ビーム粒子の選択

高エネルギー加速器につかえる安定な粒子は、いまのところ電子、陽電子、陽子、反陽子の4種類である。電子・陽電子加速器はLEPのような蓄積リング型加速器とSLACのような線形加速器がある。しかしリング型では、シンクロトロン放射光によるエネルギー損失が大きい。電子・陽電子加速器はLEPが現実的な限界に近い。これを定量的に考えると、LEPでのシンクロトロン放射光は、LEPパラメーター  $\rho = 4.3\text{km}, E=100\text{GeV}$  をいれと、

$$U_0 = \frac{2\alpha hc}{3\rho} \left(\frac{E}{m}\right)^4 = \frac{2 \cdot \frac{1}{137} [\text{MeV} \cdot \text{fm}] \cdot 2\pi}{3 \cdot 4300[\text{m}]} \left(\frac{100}{0.00051}\right)^4 = 2.07\text{GeV}$$

電子が一周するのに2%もエネルギーを損失し、それを補うためにはRF cavityを580m長くするか、加速勾配をさらに大きくしなければいけないが、これはどちらも現実的には無理な話であり、また実現したとしてもTeV領域までもっていくのは無理である。こういうことから電子・陽電子衝突型加速器はリニアコライダーの技術開発が進められ、JLCはまさに電子・陽電子のリニアコライダーでTeV scaleの物理をさぐるようとする計画である。

これに対し、陽子・反陽子のリング型加速器は、陽子が電子の1840倍の質量をもっていることから放射光のエネルギー損失は電子の $10^{13}$ 分の1である。そのためさらにエネルギーをあげることも、加速器の曲率半径も小さくすることができる。

そして加速器にとってLuminosityは大変重要な意味をもつ。エネルギーを高くしてもLuminosityが小さければ、断面積の小さな反応を有意に発見することは



きない。後述するが我々の主要目的である Higgs を探索するには  $10^{34}cm^{-2}s^{-1}$  というできるかぎり高い Luminosity を達成するべきである。そのためには、 $10^{14}$  という粒子数が必要である。しかし反陽子ビームの生成率は高々1秒間に  $10^8$  個なので、 $10^{14}$  個の反陽子を蓄積するには10日以上もかかる。また14TeVというエネルギー領域では陽子反陽子も陽子陽子の cross section もそれほどかわらない。したがって、Tevatronなどでやってきた陽子・反陽子実験にこだわる必要はなく、むしろTeVの物理を行なうには陽子・陽子コライダーしか他に解がないことが分かる。

### 1.4.2 ビームエネルギーの設定

陽子・陽子コライダーに高エネルギーを与えたとしても、実際の素過程は Drell-Yan process であるから、Eventの Total Energy はずっと小さくなる。したがって、今我々がみたい Higgs、SUSY をカバーする 100GeV ~ 1TeV という領域を探索するには、測定器の技術的な限界に近い  $10^{34}cm^{-2}s^{-1}$  という Luminosity を考慮に入れると、数 TeV 以上は必要となってくる。

また CERN での実験を考えると、LEP のトンネルを有効活用すべきであるから、そこから考えると、超伝導電磁石の実現可能な磁場の強さ  $B=8.6[T]$  によって、LEP の 27km 長のトンネルをまわる運動量は

$$p[GeV/c] = 0.3 \cdot 8.6[Tesla] \cdot 4300[m] = 11TeV$$

となるが、実際は四重極電磁石や実験室などの設備によるスペースのために、周長を 17km 程度にし、7 TeV の運動量を作り出している。

### 1.4.3 Luminosity

Luminosity  $L$  の定義は次のように与えられる。

$$n = L \cdot \sigma \cdot \epsilon$$

ここで  $n$  は1秒間あたりに衝突点でおこる特定の衝突現象の数、 $\sigma$  は散乱断面積、 $\epsilon$  は測定の検出効率である。

LHC での最も重要な目的は Higgs の探索であるから、一年間の RUN で十分な量の Higgs を見つけるために必要な Luminosity を考えてみる。400GeV Higgs  $\rightarrow ZZ \rightarrow ll\bar{l}l$  となる場合を考える。400GeV Higgs の生成断面積は  $\sigma = 10^{-36}cm^2[2]$  である。この場合の崩壊確率  $\epsilon$  は 0.1 % 程度であり、バックグラウンドもすくないた、100 個程度見つければ、十分有意になる。そこから逆に必要な Luminosity を見積ると、

$$100 = L \cdot 10^{-36} \cdot 0.001 \cdot 10^7 = 10^{-32} \cdot L$$

これより Luminosity が  $10^{34}cm^{-2}s^{-1}$  程度必要なことが分かる。



## 1.4.4 ATLAS,CMS Detector Overview

表 1.2: ATLAS,CMS Detector Overview[3]

	ATLAS	CMS
<b>Inner Detecotor</b>		
SC solenoid	B = 2T (2.4m $\phi$ $\times$ 5.3 m)	B=4T (6m $\phi$ $\times$ 13 m)
Tracker	Si-pixel Si-strip TRT	Si-pixel Si-strip
<b>Calorimetry</b>		
location	outside solenoid	inside solenoid
ECAL	PbLAr	PBWO <sub>4</sub> Crystal
HCAL barrel	Tile (Fe scinti)	Tile (Cu scinti)
endcap	Cu LAr	Tile (Cu scinti)
forward	Cu LAr	Quarts Fiber
<b>Muon Spectrometer</b>		
B-field	Toroidal magnet	Return yoke
Precision barrel	MDT	DTBX
endcap	MDT,CSC	CSC
Trigger barrel	RPC	RPC
endcap	TGC	RPC
<b>Overall</b>		
size	22m $\times$ 46 m	15m $\times$ 22m
weight	7,000t	12,500t
cost	$\sim$ 475 MSFr	$\sim$ 475MSF

## 1.5 ATLASでの中央飛跡検出器

ATLASではシリコンマイクロストリップ検出器の外側に中央飛跡検出器として Transition Radiation Tracker(TRT)が置かれている。TRTにはストローチューブ型ワイヤーチェンバーが採用されており、飛来粒子のヒットによる飛跡の再構成と Transition radiation からくる X線を Xe を使って  $\pi$  と  $e$  の分離を行なう。

### 1.5.1 Straw chamber

Straw の写真を以下にのせる。これは SUSY から 予言される Law Energy 現象である LFV を調べるための MECO 実験で使用される Straw である。MECO 実験では直径 5mm を使用するが、ATLAS では直径 4mm を使用する。

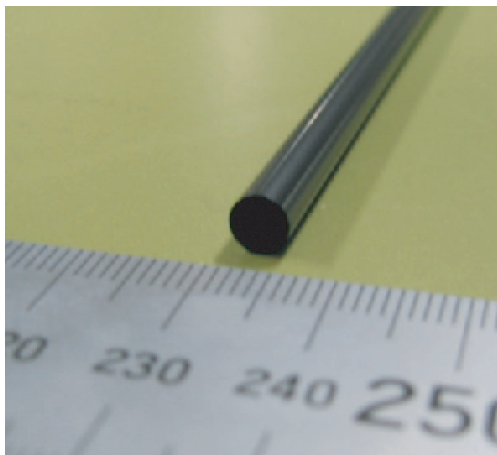


図 1.3: MECO 実験で使われている Straw の Figure (直径は 5mm)

表 1.3: Straw characteristics

Description	Specification
Inner diameter	$4.00_{0.00}^{0.02}$ mm
Wall thickness	72 $\mu$ m
Active length (barrel)	148 cm
Active length (end-cap)	39 cm (type A,B) and 55cm (type C)
Electrical resistance	$< 300 \Omega / m$
Weight	1.36 g/m
Width of film strips	$\sim 10$ mm
Overlap of two strips	$\sim 5$ mm

### 1.5.2 Layout

TRT は  $|\eta| \sim 0.5$  は Barrel 構造になっており、それ以上は end-cap 構造になっている。

- Barrel

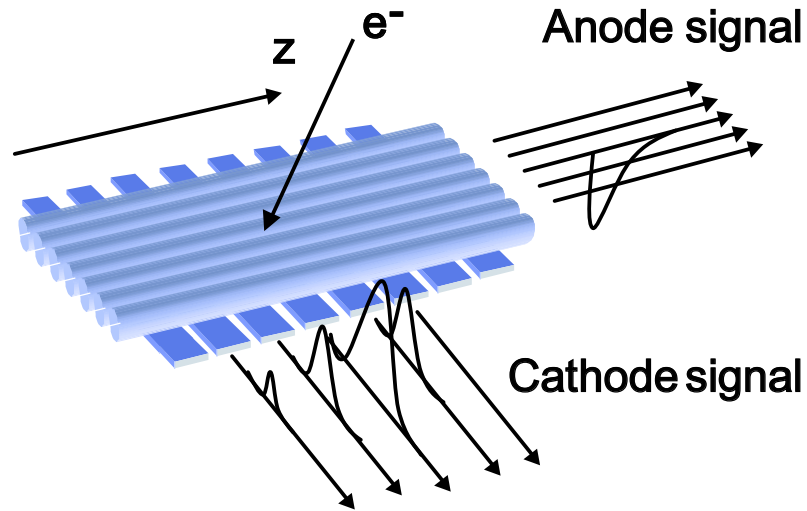


図 1.4: Straw chamber の読み出し

表 1.4: Main paramter of TRT Barrel

	$R_{min}$ (cm)	$R_{max}$ (cm)	$ z _{min}$ (cm)	$ z _{max}$ (cm)	Num Layers
Short	56	62	40	74	9
Long	62	107	0	74	64

Barrel 中の Straw は動径方向には 6.8mmstep で並べられており、角度方向も 6.8mmstep で並べられている。

- End-cap

表 1.5: Main paramter of TRT End-cap

	$R_{min}$ (cm)	$R_{max}$ (cm)	$ z _{min}$ (cm)	$ z _{max}$ (cm)	Num Layers
Short	64	103	83	278	160
Long	48	103	282	335	64

### 1.5.3 Hit occupancy

Hit occupancy SciFi Layer の cell に対する Hit event の比

LHC のバンチ間隔は 25ns と非常に狭いので、Detector からの Hit 情報は複数のバンチ衝突の重ね合わせとして得られる。磁場の影響により低エネルギーの荷電粒子は loop をし続け、次のバンチ衝突が始まって、まだ loop をし続ける。そのため 75ns 程度の読み出しの gate 幅が適当であったとしても、あまりに Hit 情報が多すぎるため、解析を行なうことができないため、さらに狭い Gate で複数回信号を読み出し、それらを使って、複数のバンチ衝突から生じる荷電粒子の Hit 情報を解析しなくてはならない。

以下 ATLAS の Occupancy に関する Simulation による study の結果 [4] を示す。ATLAS の Simulation は GEANT を用いて行なわれ、二次粒子のエネルギーが 100KeV を下回ったときに粒子が消滅するようになっている。

Hit occupancy を減らすため、straw の total drift time よりも小さい 12.5ns という gate 幅を採用したときのバンチ衝突 0 に対する前後のバンチ衝突の Hit occupancy に対する寄与は表 1.6 のようになる。

表 1.6: Straw hit occupancy from different beam-crossings at the design luminosity of  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  fo a gate width 12.5ns

Beam-crossing	-4	-3	-2	-1	0	1	2	All
Hit occupancy	~0.01	~0.03	~0.2	~5.0	~17.1	~5.0	~0	22.5

この結果から -4 から 2 までのバンチ衝突が Hit occupancy に寄与していることが分かる。とくに寄与が大きいのは、前後のバンチである。

さらに -4 から 2 までのバンチ衝突すべてを用いたときと、12.5ns の gate 幅で in-time bunch 信号のみを読み出したときの Straw chamber の Hit occupancy を表したものが図 7.4 である。これを見ると、straw chamber では high luminosity phase において、occupancy が 40 % 弱にもなることが分かる。occupancy は 10 % をこえると、tracking detector として十分な機能を果たすことができないことから、12.5ns の gate 幅で looper による寄与を減らしたとしても、straw chamber は LHC の tracking detector としてはまだ不十分である。また、図 1.7 によると、looper の寄与のため、-4 から 2 までのバンチ衝突を考慮した Hit occupancy は Minimum bias event が 32 イベントである衝突を見ることに相当することを示している。

そこで、Hit occupancy を減らすため、Threshold を 200eV から 5keV に変更した。これによって、検出効率はさがるが、Hit を減らすことができ、occupancy を下げることができる。また occupancy がさがることによって、gate 幅もさらに広げることができるようになった。そのことを示したのが、図 1.8 である。

さらに図 1.9 は、straw chamber からの信号を ASDBLR-chip('Amplifier, shaper, discriminator, base-line restorer') で読み出したときの、straw chamber の drift time accuracy と検出効率の operation rate の依存をみたものである。high luminosity phase では ASDBLR は平均 12MHz で動作し、このとき、drift time accuracy は

170 $\mu$ m、検出効率は 60 %程度になる。しかし、straw chamber は 36 層の layer によって構成されているので、 $36 \times 60 \% = 22$  より、まだ平均 22 個の Hit point が存在するので、そこから Track を再構成できる。

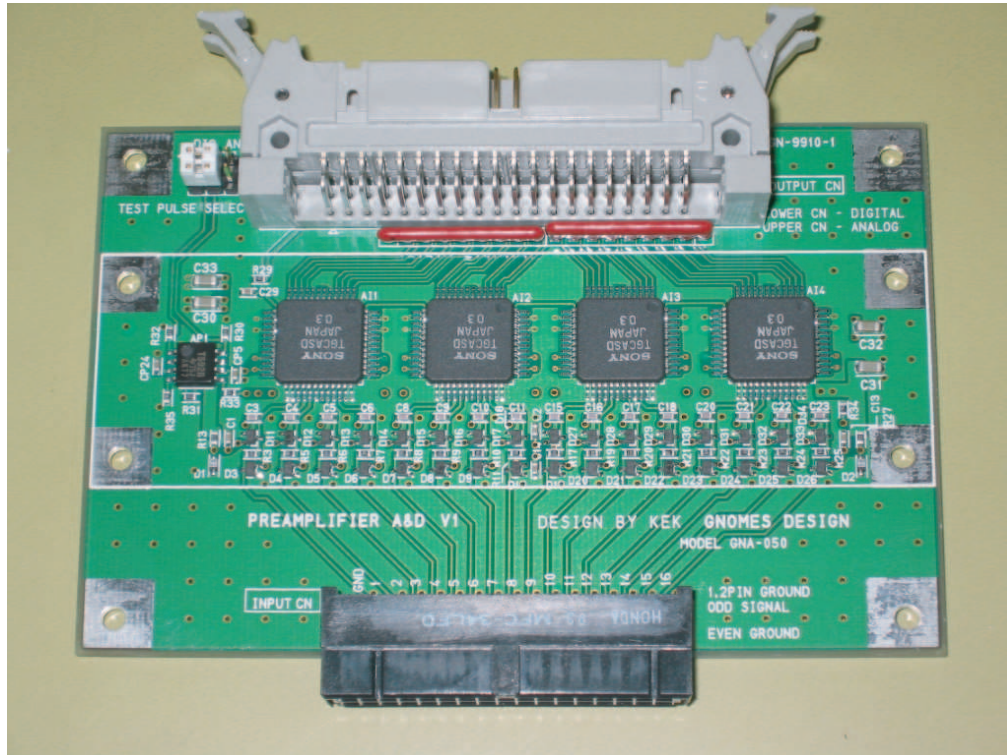
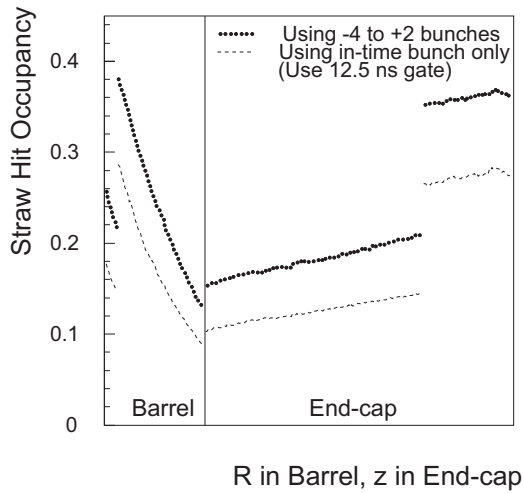
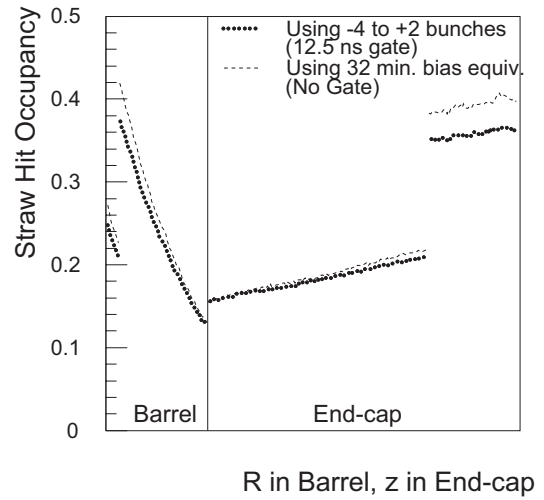


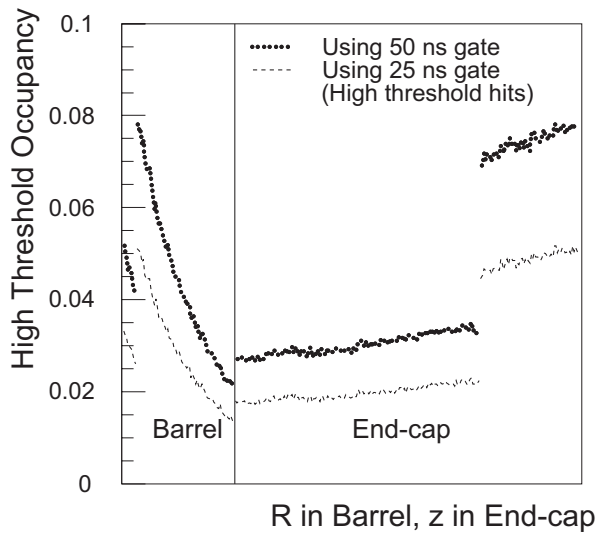
図 1.5: ATLAS で使用する ASD-chip の写真 ( 写真では 4ch/chip であるが、実際は 8ch/chip を使用 ) 設計 ATLAS JAPAN 佐々木 修 [5]



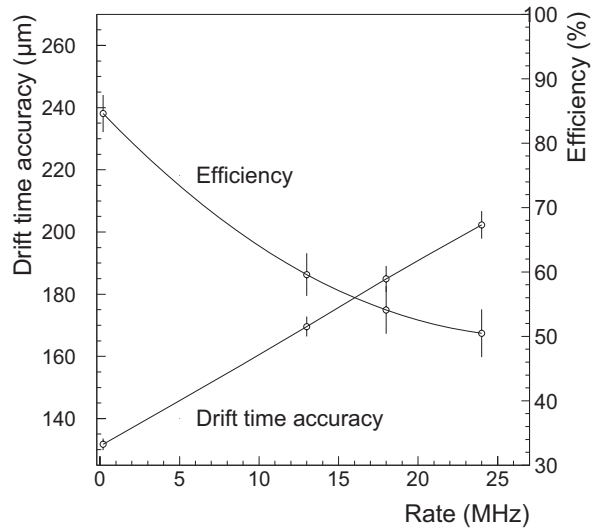
☒ 1.6: Straw hit occupancy in the TRT as a function of layer at  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



☒ 1.7: Straw hit occupancy using full simulation of time information from 7 beam-crossing each of 23 minimum-bias events and using 32 in-time events



☒ 1.8: TR hit occupancy in the TRT as a function of layer at  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

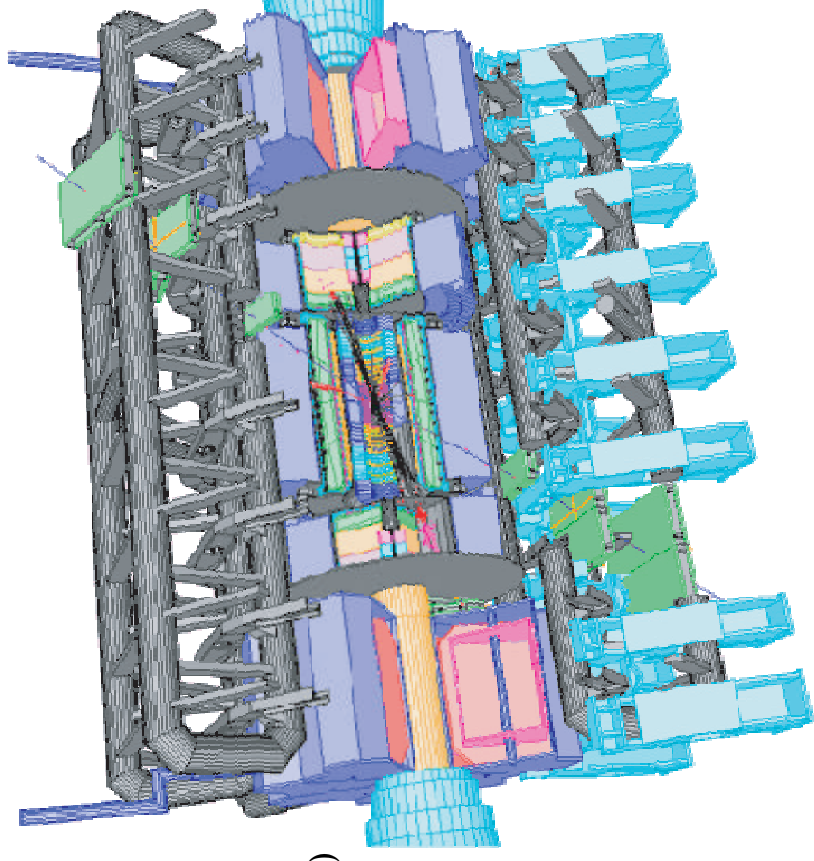


☒ 1.9: Drifttime accuracy vs. Rate and Efficiency vs. Rate for ASDBLR-chip (12MHz average at LHC peak luminosity)

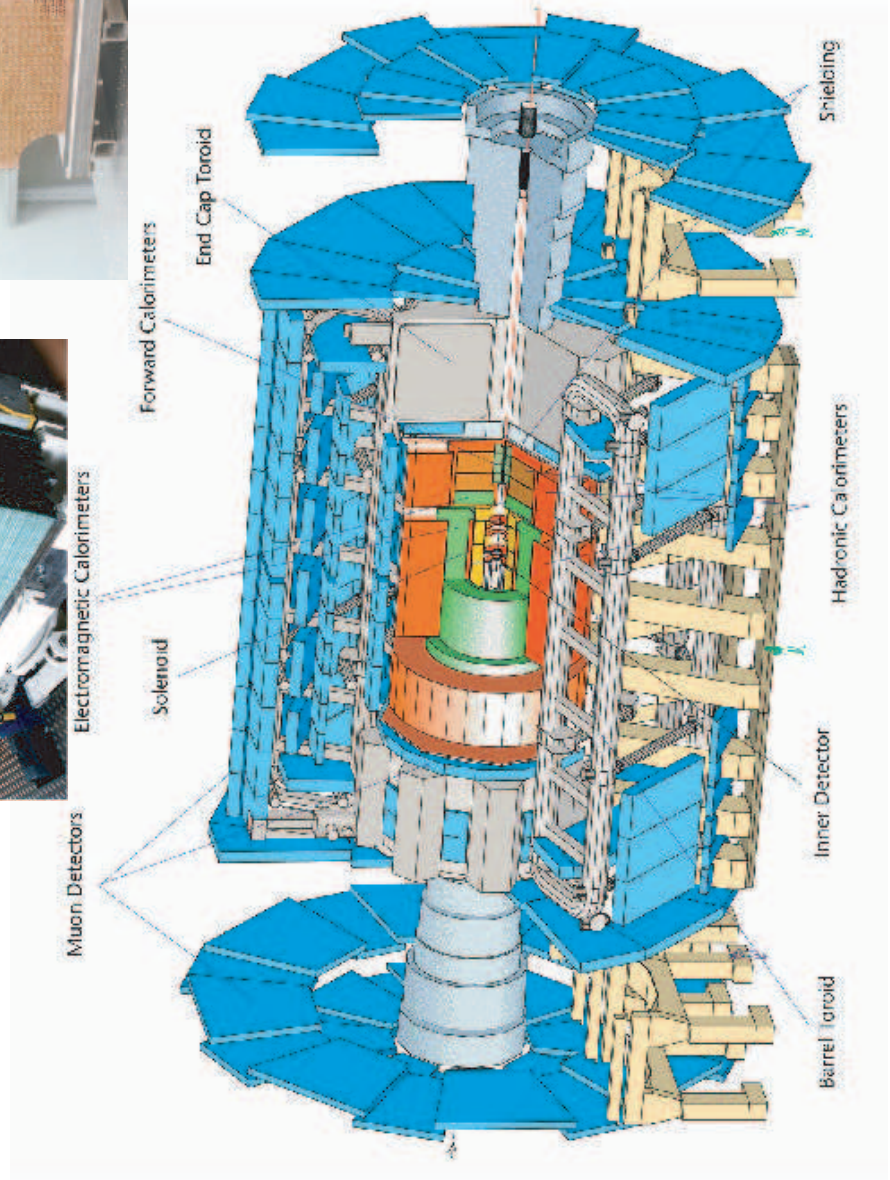
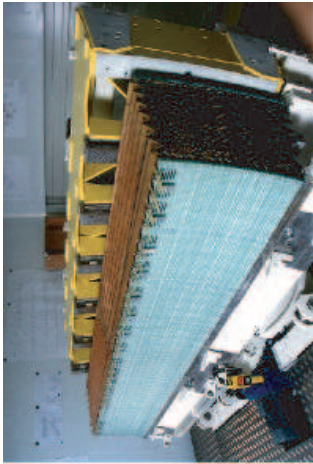




# ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)



- Liq. Ar EM calorimeter
- good  $e/\gamma$  id, energy,  $E_T^{\text{miss}}$
- muon spectrometer
- air-core toroidal magnet
- $|B_{\text{dl}}| = 2\sim 6\text{Tm}$  (4~8Tm)
- inner tracking system
- pixel, silicon strip, TRT
- 2T solenoid magnet
- good  $e/\gamma$  id,  $\tau/b$ -tag
- ATLAS detector
  - tracker  $|\eta| < 2.5$
  - calorimeter  $|\eta| < 4.9$



## 1.6 CMSでの中央飛跡検出器

CMSでは中央飛跡検出器としてMGSC ( Micro Gas Strip Chamber )を採用する予定であったが、Vertex detectorに使っている silicon stripを採用することになった。採用されなかった理由は資料では確認できなかったが、MGSCの説明をしながらMGSCの特徴を説明しながら、そういった理由にも触れていく。

### 1.6.1 Micro Gas Strip Chamber

図 1.11 は、CMSで採用予定だったMSGCのStructureである。MSGCは基本的に従来のガスチェンバーと同じ構造である。ただ、よりレスポンスを早く、そして精度よくといった要請から通常ガスチェンバーに比べてより小さくなっている。HighPtの粒子の空間分解能を50マイクロにするために、アノードピッチを200マイクロにし、z方向の分解能を1mm程度にするようにアノードピッチを二倍程度にしてチャンネルを減らしている。

図 1.12 の上の図は、図 1.11 の Field geometry を示している。ガス中を荷電粒子が通過するときイオン化された粒子は、磁場の影響で+の電気を持った粒子は cathode へ、-の電気をもった粒子は anode へドリフトしながらすすんでいく。こうしてイオンが粒子の飛跡に沿ってできることから粒子の位置に関する情報を得ることができる。MGSCは入射粒子の角度によって空間分解能が変わるので、ドリフト field はビーム軸に対して垂直になっている。

図 1.12 の下の図の縦軸は粒子が通過して十分時間がたったときの積分電荷量を1としたときの積分電荷量であり、横軸は時間を表している。LHCではBunch衝突間隔が25nsであることを考えると、MSGCが十分な電荷量を得るには短すぎる時間であろうと思われる。TDR[6]によると charge collection や signal formation のため50ns以下の読み出しは不可能であるとしてある。本来はもっと時間を必要としたらしく、そのためにガスの選択によりドリフト速度を上げたが、今のところ50nsでの読み出しが限界らしい。このためすくなくとも二つ以上のBunchが重ね合わせになり、中央飛跡検出器としては苦しい感がある。おそらく Silicon への変更はこういった原因もその一つであろうと思われる。

## 1.7 Layout

主なMSGCの geometey parater や electric channel については表 1.7 に与えられている。z方向を決定するための stereo angle をもった Layer はビーム軸に対して50mradの角度をもっている。

エンドキャップは11個のディスクからなっていて、半径700mmから1160mmに存在し、z方向は2760mmをカバーしている。

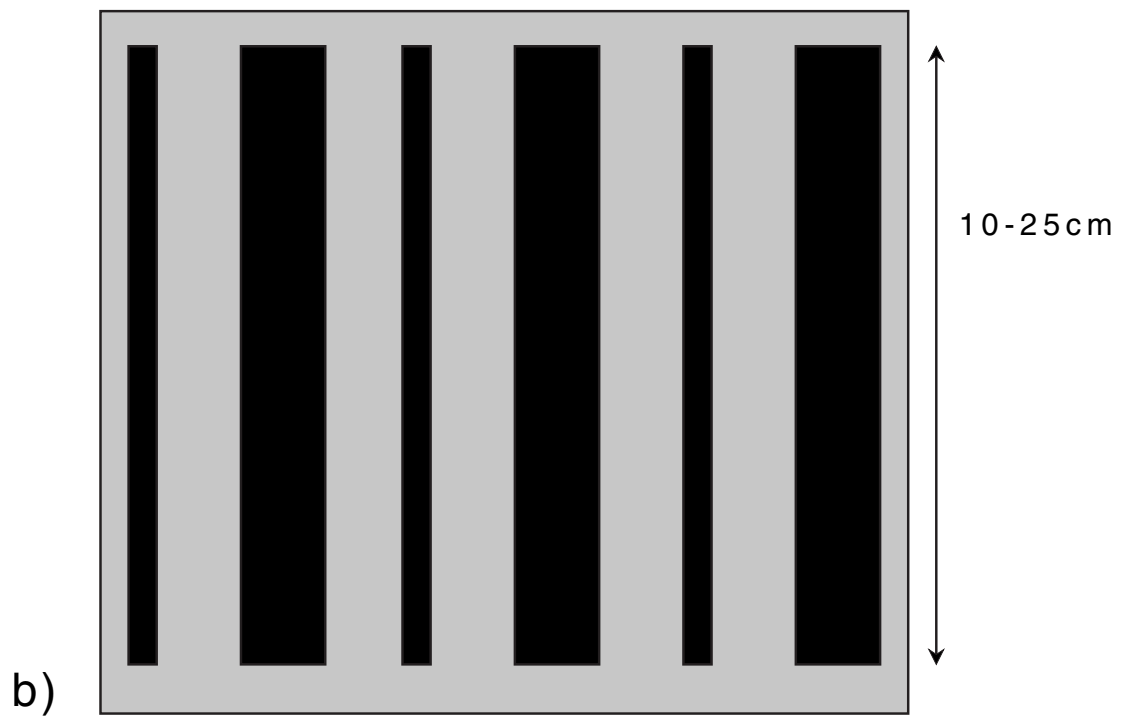
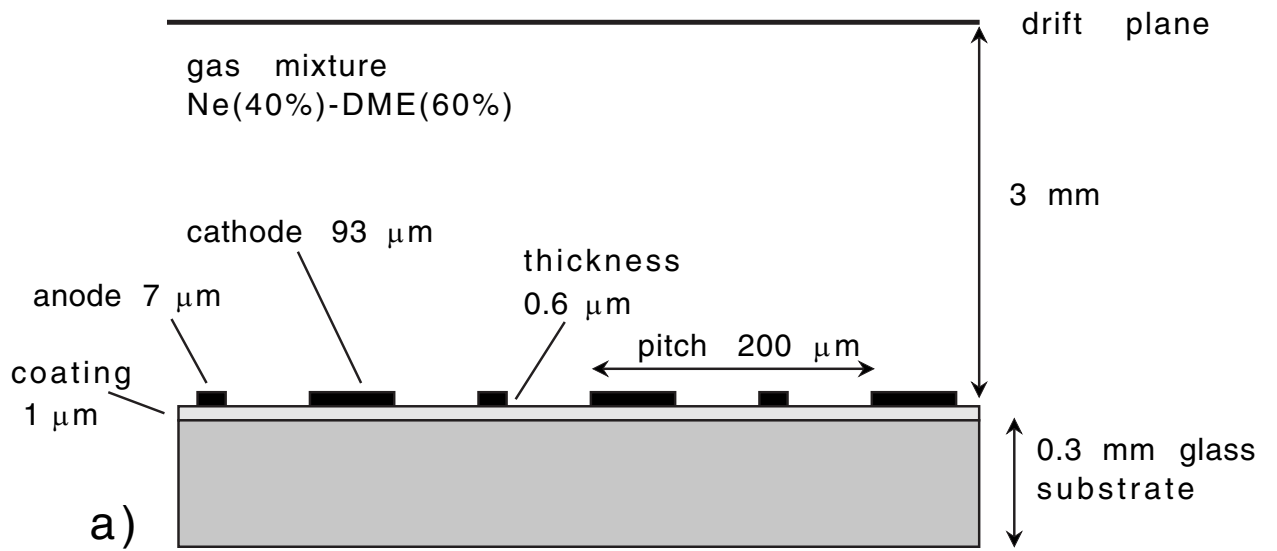


図 1.11: MSGC の Structure

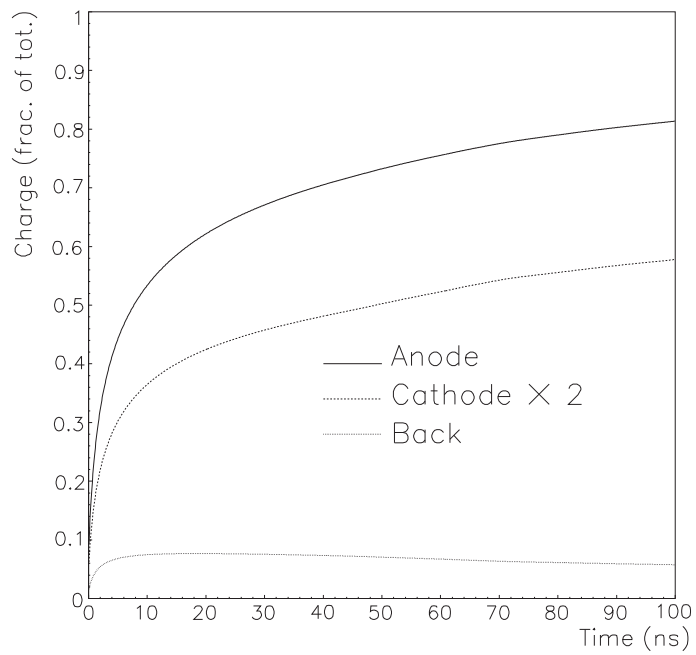
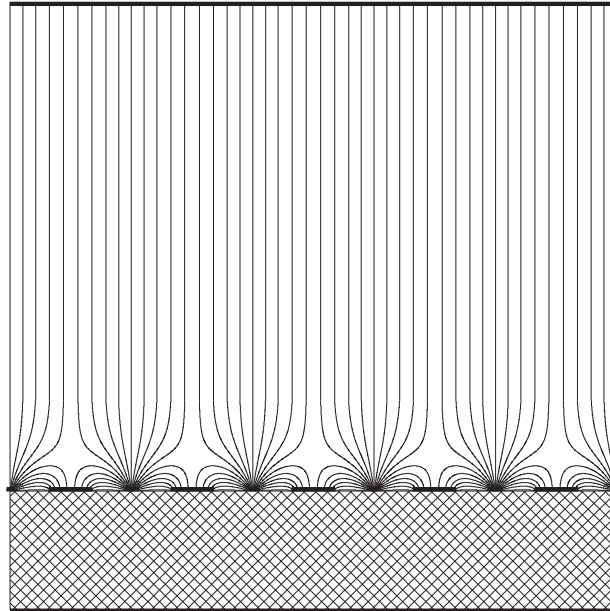


図 1.12: 上 : MSGC の Field Geometry、下 : 粒子通過時の anode と cathode に蓄積される電気量の時間依存性

表 1.7: Major parameters of the barrel MSGC tracker

total mass	617 kg
number of layers	6
minimum radius	700 (mm)
maximum radius	1200 (mm)
total length	2410 (mm)
total active length	2223 (mm)
overlap of active area in $z$	2.4 %
overlap of active area in $r - \phi$	1 % - 3 %
number of rods	736
number of MSGCs for $r - \phi$ information	3680
number of MSGCs for $r - \phi - z$ information	1860
number of readout channels	3511296
number of High Voltage control switches	109728

Layer	Radius (mm)	Measured coordinate	Number of rods	Number of modules	Number of RO or HV hybrid	Number of RO channels	Number of HV switches
1	747	$r - \phi z$	96	960	1728	663552	20736
2	827	$r - \phi$	108	540	972	497664	15552
3	907	$r - \phi$	118	590	1062	543744	16992
4	987	$r - \phi - z$	128	1280	2304	884736	27648
5	1067	$r - \phi$	138	690	690	353280	11040
6	1147	$r - \phi - z$	148	1480	1480	568320	17760
			736	5540	8236	3511296	109728

トラックパターンを決めるための Silicon からの MSGC への要求は最低二つの Hit を与えることであり、このために Layer1,4,6 と end-cap 11 と end-cap の最内と最外は double sided になっている。



# CMS (Compact Muon Solenoid)

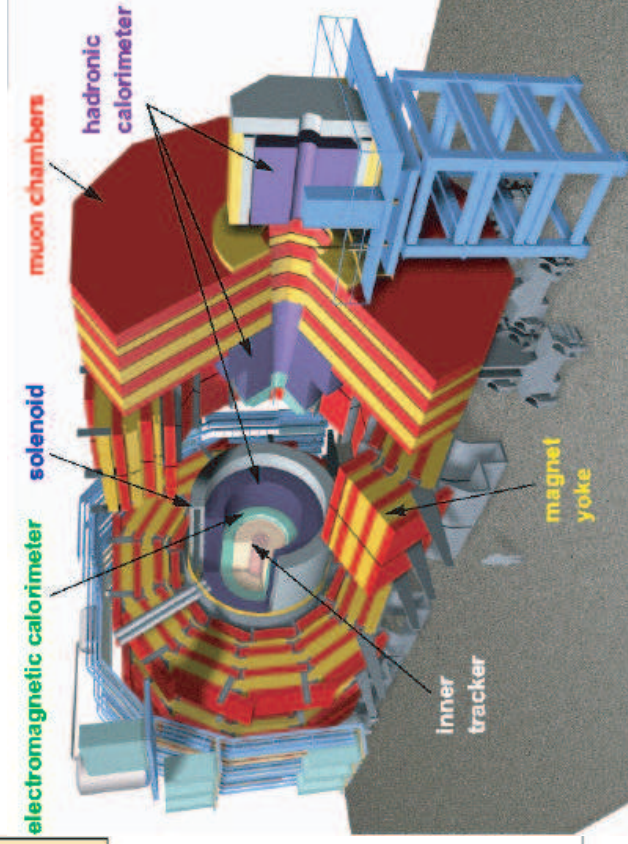


## Basic Design Criteria of CMS

A general purpose pp detector designed to run at the highest LHC luminosity but also well adapted for studies at the initial lower luminosities in order to fully exploit the discovery potential offered by LHC

- 4T solenoid
- Compact muon spectrometer
- EM calorimeter PbWO<sub>4</sub> for  $H \rightarrow \gamma\gamma$

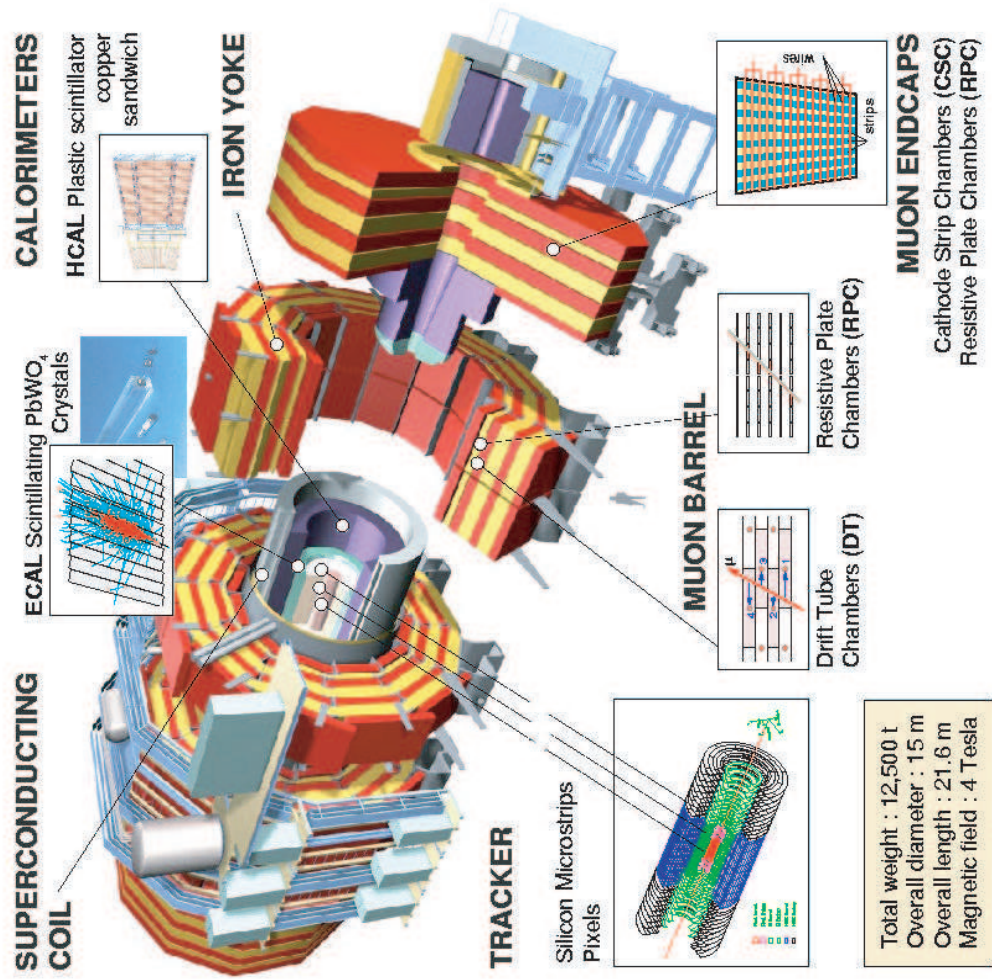
- 1) Very good muon ( $\mu^\pm$ ) identification and momentum measurement.
- 2) As precise as possible a measurement of the energies of photons ( $\gamma$ ) and electrons ( $e^\pm$ ) consistent with (1).
- 3) A central tracking detector that allows reconstruction of charged particle tracks and precise measurement of momenta to achieve (1) and (2).
- 4) A robust and cost effective detector.



<http://cmsdoc.cern.ch/picures/public/figure16.html>



# CMS layout and detectors



## 第2章 SciFi Tracker

SciFi Tracker は、荷電粒子が SciFi を通過したときに発生する Scintillating light を photosensor で読み出すことにより得られた Hit 情報により、荷電粒子の飛跡を再構成するシステムである。したがって、SciFi Tracker にとって、SciFi、photosensor の選択は SciFi Tracker の性能を大きく左右する決定する重要な役割を果たす。まず、SciFi、Photosensor の説明の後、実際我々が実験で使用した SciFi,Photosensor の紹介をする。

### 2.1 Scintillating Fiber

SciFi の役割は荷電粒子の相互作用による光子の発生とその伝播である。

まず光子の発生メカニズムについて説明する。荷電粒子は polystyrene, polyvinyltoluene, naphthalene といった環状の芳香族を含む有機物中を通過するときベンゼン中の電子を励起する。その後励起エネルギーの約 3% 程度に相当する optical photon を放出する [7]。のこりのエネルギーは格子振動やストークスシフトによって失われる。しかしそのままの光を伝送した場合、減衰長が短すぎて実際の Detector には使用できないので、Wave length shifter(WLS) を使用して、photon をより長波長側に変換する。

幾何光学的な SciFi 中での photon の伝播

一般に光ファイバーとは、屈折率の異なる 2 つの物質からなり、この 2 物質が同心円状に重なって構成される繊維状の伝送媒体である。中心部分は光が伝播する core と呼ばれる部分、それを取り囲む clad と呼ばれる部分で構成されている。clad は core にくらべて屈折率が低い。したがって、Fiber 中の光は core 内を伝播することができる。ここで相異なる媒質中を伝播する光の屈折・反射を用いて議論する。

まず、屈折率  $n$  の媒質中での光の速度  $v$  は

$$v = \frac{c}{n}$$

と与えられる。例として屈折率 1.5 のガラスでできた Fiber を挙げるとを挙げると、1m すすむのに 5nsec かかることが分かる。

さらに異なる屈折率をもつ2つの媒質 ( $n_1, n_2$ ) を考えると、図 2.1 のように反射光と透過光に界面において分離される。

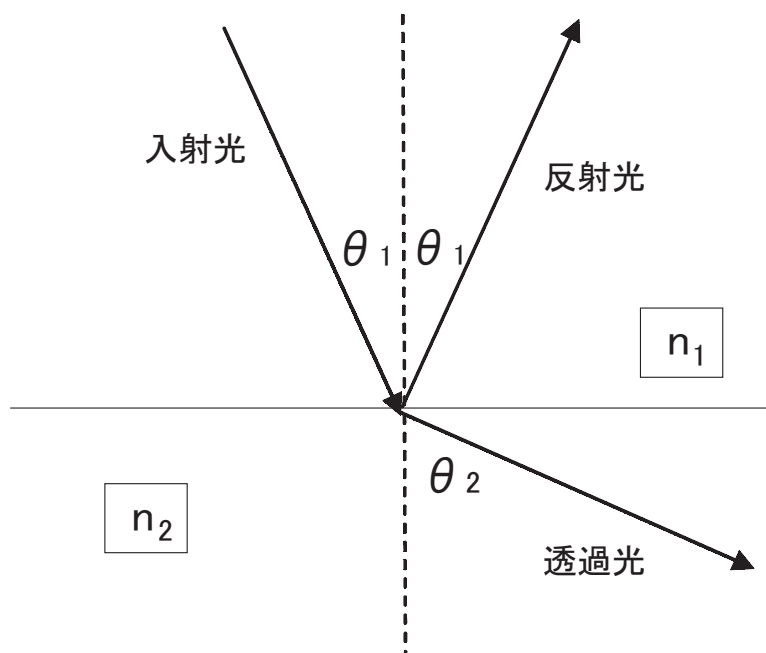


図 2.1: 界面における反射・透過

ここで反射角と透過角の関係は以下のように屈折率の比で決まる。

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

したがって、入射角をどんどん傾けていくと、透過角は界面と平行になり媒質 2 に伝播する光がなくなる。この現象を全反射といい、そのときの入射角度を臨界角  $\theta_{cr}$  という。

$$\sin \theta_{cr} = \frac{n_2}{n_1}$$

つまりこのことから photon は入射角度によって、透過したり、反射しながら伝播していく。(実際は全反射する角度で入射してもエバネッセント場という場のしみだしがある)

### 2.1.1 構造による Fiber の分類

Fiber を構造から分類すると大きく 3 つに分類することができる。

1. ステップインデックスファイバー
2. グレーデッド インデックスファイバー
3. シングルモードファイバー

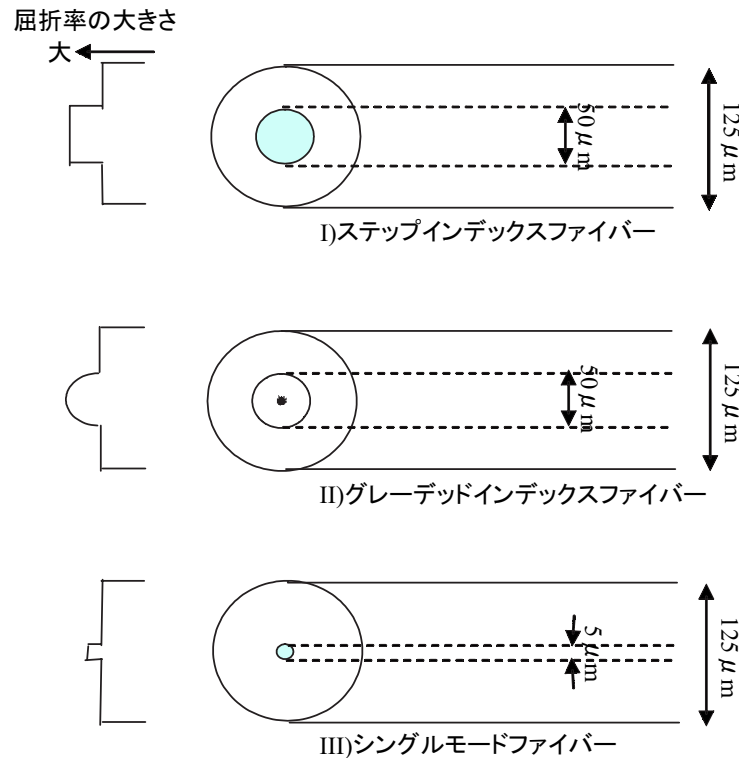


図 2.2: Fiber の構造による分類

シングルモードファイバーファイバーは、コア径が小さいため、伝送できるモードが1つになっているため、通信などでは好まれるが、素粒子実験では不感領域であるクラッド部分が大きすぎるため、SciFi Layer の Dead region による Efficiency の低下を生み出す。したがって、シングルモードファイバーは使用できない。ステップインデックスファイバーは、モード毎に伝播速度が異なるため、パルス幅が広がる。また出射光の空間分布は凸形になっている。グレーデッドインデックスファイバーはコア部の屈折率が中心に行くほど高くなっている。このため中心から遠ざかるような光跡を描く光も次第に進行方向が中心部にもどってくるような光跡を描くことによって伝播速度が異なることがなくなり、パルス幅の狭い信号を伝送しても、それほどパルス信号のなまりが小さくすむ特性をもっている。またモード分散が小さいため出射光は入射光に近い形をとる。

したがって、素粒子実験で使用するにはステップインデックスファイバーまたは、グレーデッドインデックスファイバーが望まれる。

## 2.1.2 Fiber 中での波動の伝播

さらに詳しい議論をするために光ファイバー中での光の伝播をマックスウェル方程式をつかって議論する。

まず、マックスウェル方程式は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0\end{aligned}$$

ここで Fiber 中には電荷が存在しないので

$$\begin{aligned}\rho &= 0 \\ \mathbf{J} &= \mathbf{0}\end{aligned}$$

透磁率を  $\mu$ 、伝導率を  $\epsilon$  とおくと、電場と電束密度、磁場と磁束密度の関係は

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}\end{aligned}$$

となる。そして伝播の時間成分が  $e^{i\omega t}$  とおけると仮定すると、マックスウェル方程式から

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -i\omega\mu\mathbf{H} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= i\omega\epsilon\mathbf{E}\end{aligned}$$

さらに rotation を加えて、計算をすすめると

$$\begin{aligned}\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} &= -i\omega\mu\nabla \times \mathbf{H} \\ \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} &= \omega^2\mu\epsilon\mathbf{E} \\ \nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2\mu\epsilon\mathbf{E} &= 0\end{aligned}$$

磁場についても同様の結果を得ることができる。ここで円筒座標系で議論し、光が進行する方向を  $z$  軸とおくと、 $z$  方向の伝播係数を  $\beta$ 、 $z$  成分を  $\exp(-i\beta z)$  と仮定すると

$$\left( \partial_r^2 + \frac{1}{r} \partial_r + \frac{1}{r^2} \partial_\theta^2 \right) \mathbf{E} + (\omega^2\mu\epsilon - \beta^2) \mathbf{E} = \mathbf{0}$$

ここで  $\mathbf{E} = E_r \mathbf{e}_r + E_\theta \mathbf{e}_\theta + E_z \mathbf{e}_z$ 、 $\chi^2 = \omega^2 \mu^2 \epsilon^2 - \beta^2$  とおくと、 $E_z$  に関する方程式は

$$\partial_r^2 E_z + \frac{1}{r} \partial_r E_z + \frac{1}{r^2} \partial_\theta^2 E_z + \chi^2 E_z = 0$$

となる。そこで変数分離を行い、

$$E_z = C f(r) g(\theta) e^{i(\omega t - \beta z)}$$

の解を仮定すると、 $\theta$  の周期性境界条件から

$$g(\theta) = e^{i\nu\theta}, \nu \in \mathbf{Z}$$

よって、 $f$  の常微分方程式が導かれる:

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dr} + \left( \chi^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) f = 0$$

これはベッセルの微分方程式としてよく知られており、その解もベッセル関数をつかって記述できる。

ここで考慮しなければいけない重要な点は境界条件である。この方程式をとく目的はファイバー中を伝播する波動解を導くことなので、コアの内部での解の振る舞いは有限でなくてはならない。また、コアの外側では、離れれば離れるほど 0 に近づかなければいけない。

いまコアとクラッドの境界が  $r=a$  にあるとして、上記境界条件を満足するものはコア部では第一種ベッセル関数、クラッド部では第二種ベッセル関数となっている。これを書き下すと

1. コア部  $r < a$

$$f(r) = A J_\nu(\chi r) : \chi^2 = \omega^2 \mu_1^2 \epsilon_1^2 - \beta^2 = k_1^2 - \beta^2$$

1. クラッド部  $r > a$

$$f(r) = C K_\nu(\gamma r) : \gamma^2 = \beta^2 - \omega^2 \mu_2^2 \epsilon_2^2 = \beta^2 - k_2^2$$

となる。ここで透磁率、誘電率は各媒質の値を用いる。その積は媒質中の光速の逆数であり、角周波数との積が波数になることをつけた。つまり、 $k_1, k_2$  はコア、クラッドにおける波数を表している。

この  $\chi$  と  $\gamma$  の表す関係式から、 $\beta$  を消去すると、

$$\begin{aligned} \chi^2 + \gamma^2 &= k_1^2 - k_2^2 \\ &= (n_1^2 - n_2^2) k_0^2, \quad k_0 = \frac{\omega}{c} \end{aligned}$$

ここで、 $k_0$  は真空中の波数である。先に定義した規格化周波数  $V$  を用いると、

$$V^2 = (\chi^2 a)^2 + (\gamma a)^2$$

の関係を満足している。

ここまです、磁場も同様な手続きを踏んで、

1. コア部  $r < a$

$$E_z(r, \theta, z, t) = A J_\nu(\chi r) e^{i\nu\theta} e^{i(\omega t - \beta z)}$$

$$H_z(r, \theta, z, t) = B J_\nu(\chi r) e^{i\nu\theta} e^{i(\omega t - \beta z)}$$

1. クラッド部  $r > a$

$$E_z(r, \theta, z, t) = C K_\nu(\chi r) e^{i\nu\theta} e^{i(\omega t - \beta z)}$$

$$H_z(r, \theta, z, t) = D K_\nu(\chi r) e^{i\nu\theta} e^{i(\omega t - \beta z)}$$

が得られた。次に  $r=a$  でこれらの解を接続することをこころみるのだが、境界条件は、界面において電場及び磁場の接線成分が等しいことである。

$$E_\theta(r \rightarrow a - 0) = E_\theta(r \rightarrow a + 0)$$

$$H_\theta(r \rightarrow a - 0) = H_\theta(r \rightarrow a + 0)$$

これをつかって、 $E_\theta$  を求めることになるのだが、実はマックスウェル方程式

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu\mathbf{H}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = i\omega\epsilon\mathbf{E}$$

をつかって、 $E_r, E_\theta, H_r, H_\theta$  で書き下すことができる。円筒座標系で  $\nabla = \mathbf{e}_r \partial_r + \mathbf{e}_\theta (1/r) \partial_\theta + \mathbf{e}_z \partial_z$  より、上記マックスウェル方程式は、

$$\begin{aligned} i\beta E_\theta + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} &= -i\omega\mu H_r \\ -i\beta E_r - \frac{\partial E_z}{\partial r} &= -i\omega\mu H_\theta \\ -\frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r E_r)}{\partial r} &= -i\omega\mu H_z \\ i\beta H_\theta + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} &= i\omega\epsilon E_r \\ -\frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r H_r)}{\partial r} &= i\omega\epsilon E_z \end{aligned}$$



となり、これから、 $E_r, E_\theta, H_r, H_\theta$  を  $E_z, H_z$  でかくと、

$$\begin{aligned} E_r &= -\frac{i}{\chi^2} \left( \beta \partial_r E_z + \omega \mu \frac{1}{r} \partial_\theta H_z \right) \\ E_\theta &= -\frac{i}{\chi^2} \left( \beta \frac{1}{r} \partial_\theta E_z - \omega \mu \partial_r H_z \right) \\ H_r &= -\frac{i}{\chi^2} \left( \beta \partial_r H_z - \omega \epsilon \frac{1}{r} \partial_\theta E_z \right) \\ H_\theta &= -\frac{i}{\chi^2} \left( \beta \frac{1}{r} \partial_\theta H_z + \omega \epsilon \partial_r E_z \right) \end{aligned}$$

を得る。これを使って、 $r = a$  の境界条件である

$$\begin{aligned} E_\theta(r \rightarrow a - 0) &= E_\theta(r \rightarrow a + 0) \\ H_\theta(r \rightarrow a - 0) &= H_\theta(r \rightarrow a + 0) \end{aligned}$$

を解くことになる。言い換えると、この方程式が固有方程式になり、その固有値が光ファイバー中を伝播できるモードを与えている。ただし、これはベッセル関数で記述された複雑な式となり、直接解くのは容易ではない。実用上は比屈折率差の小さい弱導波近似の条件下で解くことになる。このとき、固有値方程式を頭から書き下すと、

$$\frac{J_\nu(\chi a)}{J_{\nu-1}(\chi a)} = -\frac{\chi}{\gamma} \frac{K_\nu(\gamma a)}{K_{\nu-1}(\gamma a)}$$

となることが知られている。

したがって、様々な  $\nu$  に対して、この固有方程式を満たす  $\chi, \gamma$  すなわち、 $\beta$  が光ファイバー中を伝播できるモードとなっている。

### 2.1.3 Fiber の伝送中における光損失

Fiber 中における光損失の原因は大きく分けて、光の吸収と散乱に大別できる。さらにこの吸収・散乱はそれぞれ材料固有のものと不純物の混入などの外部要因に起因するものに分けることができる。これを整理すると

#### I 吸収

- i) 材料固有
  - a) 紫外吸収
  - b) 赤外吸収
- ii) 外部要因
  - a) 遷移金属 (Cr, Co, V 等)
  - b) OH 基

## II 吸収

- i) 材料固有
  - a) レイリー散乱
  - b) ラマン散乱
  - c) ブリュアン散乱
- ii) 外部要因
  - a) 界面不整
  - b) 径変動
  - c) 気泡、異物、結晶、脈理
  - d) 屈折率分布の揺らぎ
  - e) マイクロベンディング

以下、各項目について説明する。

- 紫外吸収

石英の遷移電子による光の吸収である。そのピークが 120nm にあることから紫外吸収とよばれる。この吸収の影響は、1000nm 付近まで及んでいる。特に 850nm 帯では主要な損失原因のひとつとなっている。

- 赤外吸収

石英の Si-O の格子振動に起因する光の吸収である。そのピークが  $9\mu\text{m}$ ,  $12.5\mu\text{m}$ ,  $21\mu\text{m}$  にあることから赤外吸収と呼ばれる。この吸収も  $1\mu\text{m}$  近辺まで影響を与えている。

- 遷移金属

ガラスの中の不純物として含まれる遷移金属:Cr,Co,V は 400nm-1800nm の可視から近赤外領域で光を吸収する。ただし、現在の光ファイバー製造法では無視できるレベルまで低減されている。

- OH 基

OH 基による吸収は、基本振動の  $2.73\mu\text{m}$ 、及び高調波振動の  $0.95\mu\text{m}$ ,  $1.38\mu\text{m}$  にあり、不純物による損失の最大の原因になっている。

- レイリー散乱

ガラス中の微小な密度の揺らぎ、及び、ガラス組成の揺らぎによる光が散乱されることで生じる損失である。その波長特性は  $\lambda^{-4}$  で与えられている。このため、短波長帯ほど大きい。

- ラマン散乱

一般にラマン散乱は分子の振動・回転により生じる分極率の揺らぎにより生じる。光ファイバー中においては、レイリー散乱にくらべて、ずっと小さい。

- ブリュアン散乱

一般にブリュアン散乱はフォノンによる散乱である。これもレイリー散乱に比べて小さい。

- その他各種外部散乱要因

光が伝播する際に、これらの原因で散乱、伝播モードから放射モードに変換し損失する。一般に波長依存性を持たない。

以上をまとめると、短波長領域では、レイリー散乱が、長波長領域では赤外吸収が損失の主要因となっている。これに紫外吸収と構造欠陥による散乱が加わり、所々に OH 基のスパイク上の吸収が現れるのが、光ファイバーの損失特性の概要である。

## 2.2 Photosensor

まず photosensor として一般に求められる条件について整理すると、

- 広い周波数帯域にわたり高い検出効率をもつ
- ノイズの発生確率、つまり信号がないときに誤ってカウントする確率が小さい(ダークカレントが小さい)
- 前回の雪崩増幅により接合部に残ってしまった電荷が開放されるときに引き起こされるアフターパルスを避けるための回復時間(デッドタイム)が小さく、高いデータ処理能力をもつ
- 光子の吸収及びそれにより引き起こされる雪崩増幅の間の時間的ばらつきが少ないこと(タイミング不安定性が小さい)

このほかにシステムの組みやすさ、コスト、電子冷却のみで動作するデバイスであれば、非常に手軽にコンパクトなシステムを構築でき、なおよい。こういったことを踏まえたうえで、さらに SciFi Tracker の photosensor としての要請を満たすデバイスを選択する。

### 2.2.1 デバイスの選択

Photosensor の候補として一般に挙げられる候補は以下の 4 つである。

1. Multi Anode Photo Multiplier (MAPMT)
2. Image intensifier (IIF)
3. Visible Light Photon Counter (VLPC)
4. Avalanche Photo Diode (APD)

MAPMT や IIF は Gain が大きいので、比較的少ない photoelectron でも検出することが可能であるが、MIP が SciFi を通過したときに発生する photon は 20 個程度であり、量子効率が 25 % のとき、途中の減衰が全くなかったとしても photoelectron は 4 個である。平均 4 個の photoelectron を高い検出効率で得ることは通常の製品では至難の業であろう。最近では 1p.e. からのシグナル検出を謳っている MAPMT もあるそうだが、1p.e. でほぼ 100 % の検出効率が得られるかがまず疑問な上、photoelectron の数がポワソンに従うとすれば、 $1\sigma$  は 2 であり、 $2\sigma$  とれば 4 となるので、確率はそれほど大きくないが photoelectron が 0 という可能性が検出効率を低下させる。さらに IIF は Hit の残像が残るため、高いレートでの実験には使用できない。

我々の理想は、量子効率が高く、かつし Gain が大きいデバイスなのだが、そういった点で VLPC (図 2.4) というのは優れたデバイスである。量子効率は 80 % を超え、Gain は 20000 以上にもなる。そのため図 2.3 のように 1photon から読み出すことができる。しかし動作温度が 7K であるため、液体ヘリウムを使う上コストもかかり、精密な温度管理も必要とするためシステムが大規模になってしまう。

それに対し、APD は量子効率は高く、非常にコンパクトであるが、Gain が低いため SciFi のような微弱な光に対して十分な S/N を得ることができない。通常そのためにガイガーモード (第 2.4.1 節参照) で APD を使用するのだが、VLPC ほどではないがシステムが複雑化する上に、コストもかかる。そこで冷却することによって Gain が上昇するという APD の性質をつかって、ノーマルモードで動作させることにより安価で高性能なシステムを開発しようとするのが APD を採用した理由である。

### 2.2.2 APD の構造と動作原理

APD (Avalanche Photo Diode) の増幅原理は、空乏層内で入射光子を吸収することで原子がイオン化され、それにより生じた電子-ホール対が高電界により加速され、別の格子原子に衝突し、それをイオン化し、新たな電子-ホール対を生成する。発生した電子-ホール対がまた加速され、同様の衝突、イオン化をくりかえす

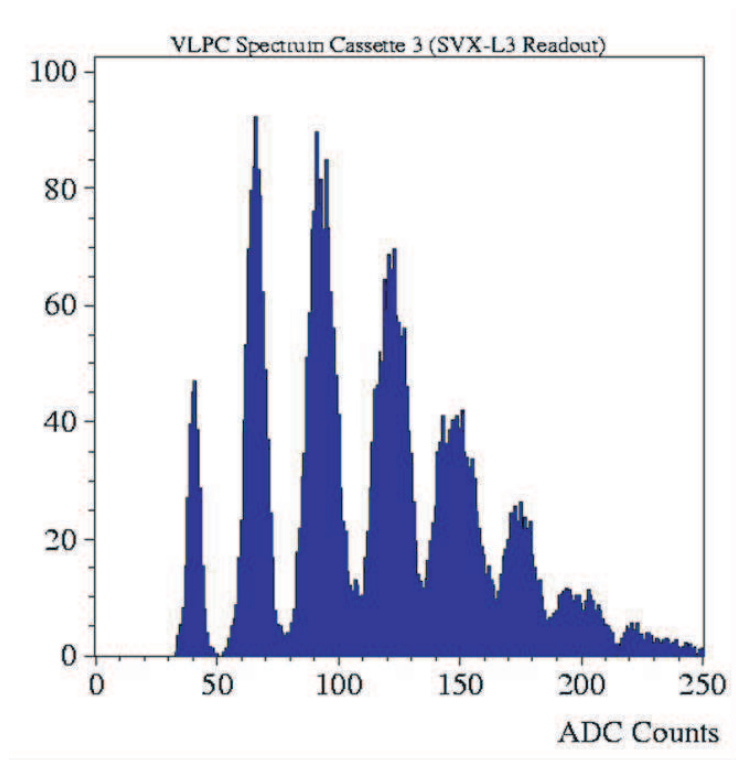


図 2.3: VLPC による Signal Histogram

ことによって増幅効果が得られる。これを Avalanche とよぶ。原子のイオン化率と素子構造によって最適な増幅率と周波数帯域を決めることができる。

増幅原理をさらに詳しく説明したのが下の図 [9] である。

図の左のほうで光励起により電子-ホール対が発生し、空乏層内の電場によりドリフトをはじめめる。通常は図中 A のように格子原子や不純物原子に衝突してその運動エネルギーを失うので、ほとんどの場合、禁制体を飛び越えるようなエネルギーには至らない。これに対して B のようにたまたま衝突をせず、大きな運動エネルギーを電解から受け取る電子があり、このエネルギー  $E_m$  をもった電子が衝突電離することにより、新しい電子-ホール対を生成する。禁制体ギャップよりも大きな運動エネルギーを得るために必要な自由工程は電界に逆比例し、したがって衝突電離する確率は電界に依存する。説明上、電子を用いたがホールのほうも大きなエネルギーを持てば衝突電離する。

次に APD の電流 - 電圧特性を図 2.2.2 で定性的にみる。図中の右側の  $I_{ph}$  が雪崩増幅により生じる電流であり、そのさらに少し右の電圧値  $V_B$  がブレークダウン電圧である。また中央の  $I_d$  はいわゆる暗電流と呼ばれるもので光の照射がない場合も流れる電流である。

後述するが、今回の実験で使う APD は SiAPD であり、Si の場合、電子のほうがいオン化率が大きいので電子の雪崩増幅が支配的になる。したがって、SiAPD で

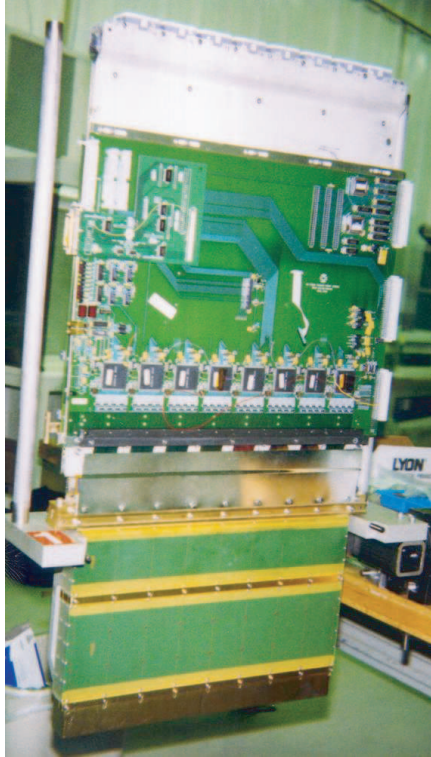


図 2.4: VLPC と Amp と Discriminator

はなだれ増倍領域に電子のみが注入されるように設計される。電子注入型 SiAPD とは、空乏層で発生した電子がドリフトにより増倍領域に流れ込んで雪崩増倍が生じ、このように光吸収領域となだれ増倍領域を分散し、なだれ増倍領域には電子のみが注入される。

## 2.3 APD の性能上のトレードオフ

ダイオードの伝導帯の中に作られるキャリアによって引き起こされる雪崩降伏は光子に反応するばかりでなく、望ましくない場合にも反応する可能性がある。

その原因として、例えば温度やバンドからバンドへのトンネル過程、ダイオードの中に流れた電流の一部が留まってしまい、不定期にその拘束された状態から開放される場合が考えられる。

このうち最初の二つは入射光子に依存しないダークカレントの揺らぎとして現れ、避けることはできないが適切なノイズを exclude する Threshold を決めれば、ある信頼度のもとでの情報として議論できる。

三番目のものは前回の雪崩増幅が原因で引き起こされるアフターパルスと呼ばれるので、不感時間 (dead time) を大きく取れば抑えることができる。しかし当然

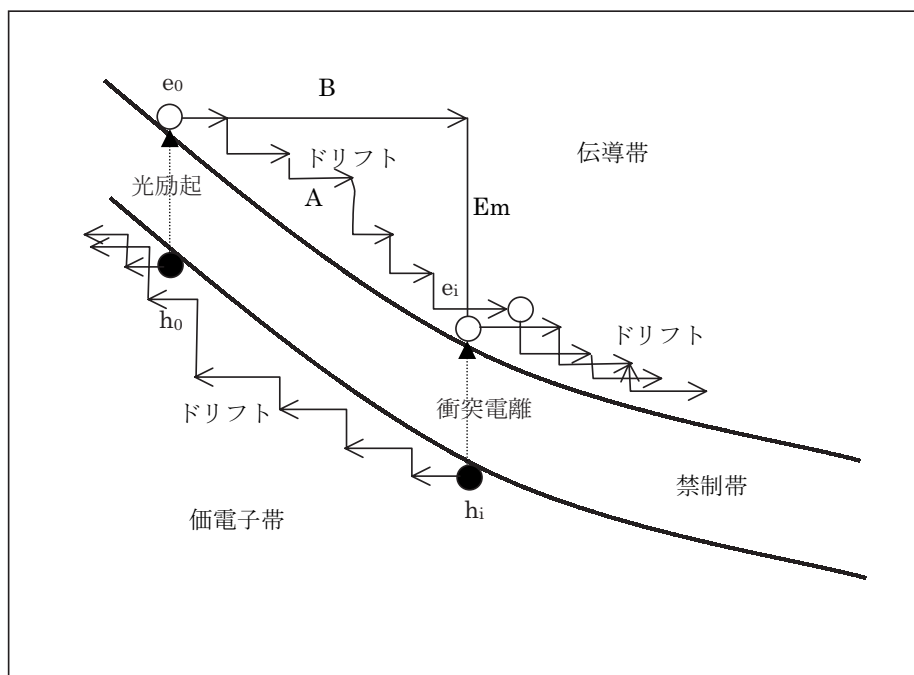


図 2.5: APD の増幅原理

素子の動作が遅くなる。つまり高カウントレートと低アフターパルスの間にはトレードオフが存在する。

またアフターパルスの指数関数的な減少をもたらす時間はダイオードの温度が高いほど短くなる。しかし高温での APD の動作は温度ノイズによる大きな揺らぎをおこし、ダークカウントを増やしてしまう。ここにもまた最適化されるべきトレードオフが存在する。

さらにバイアス電圧を増加させると大きな量子効率を得られ、またタイミング不安定性は小さくなるが、これにもノイズ増加という代償が伴う。このように APD の動作パラメータ、電圧、温度、不感時間などがあるが、これらは全てアプリケーションに依存して決定されるべきものである。

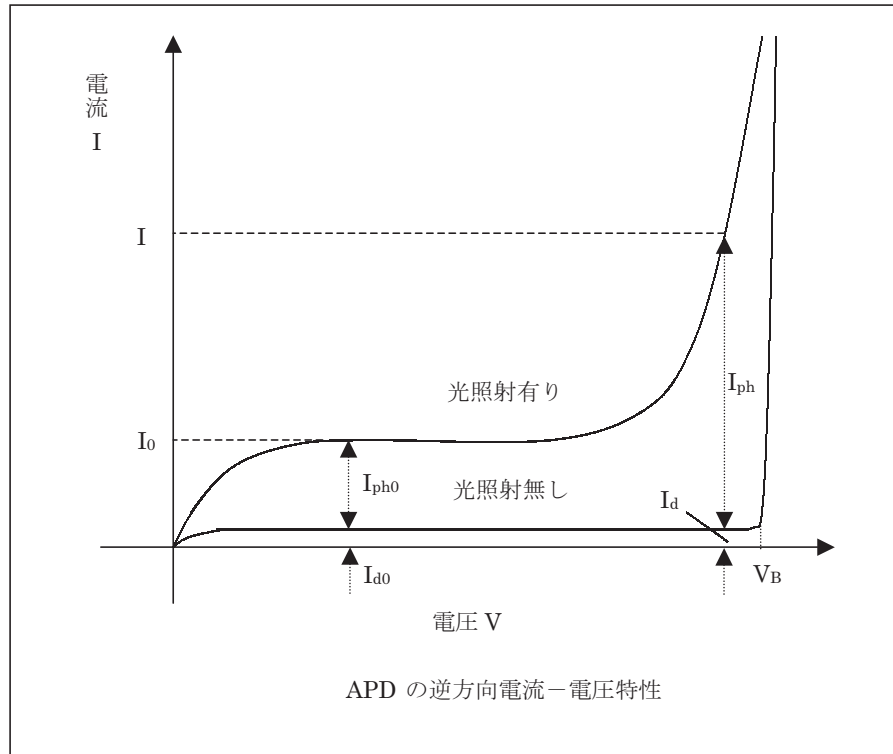
このように APD の性能は結局相対的なものであり、温度ノイズとアフターパルスについては半導体の物性のタイプにより変化し一般的な解はない。

## 2.4 半導体素子の選択

現在主に APD には 3 つの異なる半導体が波長に応じて使用されている。

1. シリコン APD :  $1\mu\text{m}$  以下の波長の光子検出に使用





2. ゲルマニウム APD :  $1\mu\text{m} \sim 1.4\mu\text{m}$  の光子検出に使用
3. インジウムガリウム砒素 APD :  $1.2\mu \sim 1.5\mu\text{m}$  の光子検出に使用

これに関しては、SciFiからの伝わる光子の波長のことを考えると必然的に SiAPD を選択せざるを得ない。上述したが光子の波長が短いとファイバー内での伝送のロスがおおきくなる。

### 2.4.1 APD の動作モード

通常、微弱な光を検出するためには、大きな Gain が必要となるため、ブレークダウン電圧よりも小さな電圧で APD を動作させるというノーマルモードではなく、ガイガーモードで使用する。ガイガーモードというのは、バイアス電圧をダイオードのブレークダウン電圧以上に設定することにより意図的に不安定な平衡状態を作り出し、何らかのエネルギーの入射があると、それを契機として一気にブレークダウンを引き起こすモードのことである。電圧の降下は APD の接合間電圧が、ブレークダウン電圧になるまで続く。このときパルス電流が発生し、それがさらに雪崩増幅され、非常に大きなパルス電流として検知され、光子の入射があったことを知覚できる。ガイガーモードにおける光子入射イベントとパルス電流発生の後、制御回路を用いて一時的にバイアス電圧をブレークダウン電圧以下

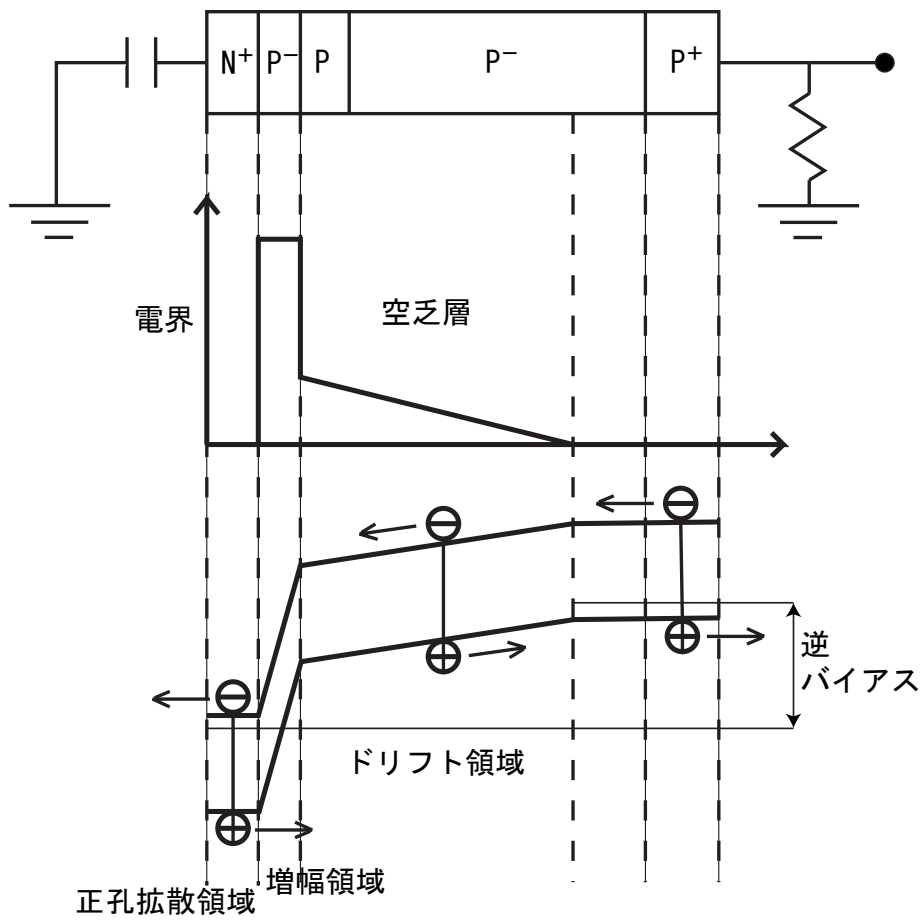


図 2.6: 電子注入型 SiAPD の動作原理

に下げることにより、巨視的な電流放出を止めるなどの雪崩増幅をコントロール (クエンチング) できる。その後、APD のバイアス電圧を再び元の値まで上げる。この制御回路の方式には主に次の 3 種類がある。

- パッシブクエンチ回路 (passive-quenching circuits)

大きな抵抗 ( $50\text{k}\Omega$  -  $500\text{k}\Omega$ ) が APD に直接接続されている。これによりできるだけ早く雪崩増幅が始まるように APD の電圧を降下させている。その電圧がブレークダウン電圧を下回ったとき、雪崩増幅は止まりダイオードが再チャージされる。ダイオードの回復時間はその容量と抑制する抵抗により決まる。この方式の最大カウントレートは数百から数メガヘルツ程度である。

- アクティブクエンチ回路 (active-quenching circuits)

雪崩電流の最初のきっかけが検出されたら、できるだけ早くバイアス電圧をブレークダウン電圧よりも低くする方式。この方式は passive-quenching 回路 (せいぜい数 10 メガヘルツ) に比べ高速なカウントレートを実現する。したがって不感時間 (dead time) を数 ns よりも短くすることができる。しかしこのように高速な電子フィードバックシステムである active-quenching 回路は passive-quenching 回路に比べていっそう複雑なものになってしまう。

- ゲーテッドモード (gated mode)

光子がくると思われるごく短時間だけ、バイアス電圧をブレークダウン電圧よりもしたにするもので、一般的にはその時間は 2~3ns、最大カウントレートは active-quenching 回路と同じであるが、回路はそれほど複雑ではない。

しかし、ガイガーモードにはいくつかの問題点がある。それはまず一般的にアフターパルスにより Dead time が長くなってしまふということが挙げられる。この問題を上記の制御回路を用いて解決したとしても非常に多くのコストがかかる。したがって、ガイガーモードでの使用は高エネルギー加速器実験において適当とはいえない。

## 2.5 本実験での SciFi , APD の選択

まず SiAPD の波長に対する量子効率のピークは多少動かすことができるから、減衰長のことを考えて、まずなるべく長波長の photon に変換する Wave Length Shifter (WLS) をつかうべきである。その候補として 3HF を WLS に使用したものが最も優れているだろうということになり、そして全反射の確率が高くなるように Multi cladding の SciFi が望ましいと思われる。以上の観点から SCSF-3HF(1500)M [Kuraray[10]] を採用することにした。以下 SCSF-3HF(1500)M の詳細を書いておく。

表 2.1: Scintillating Fiber Materials

	Material	Refractive Index	Density [g/cm <sup>2</sup> ]
Core	Polystyrene	1.59	1.05
inner clading	polymethylmethacrylate	1.49	1.19
outer clading	fluorinated polymer	1.42	1.43

表 2.2: Scintillating Fiber Formulation

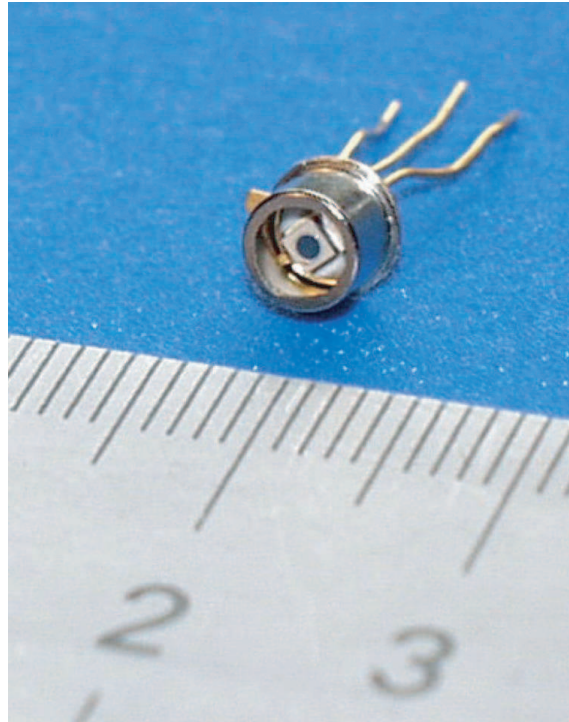
Description	Color	Emission Peak [nm]	Decay time [ns]
SCSF-3HF(1500)	green	530	7

使用する APD は市販品の中から選択することにし、選択条件として以下の条件を課した。

- 低ノイズであること
- 選択した SciFi の Emission Peak での量子効率が高い
- コンパクトな外形をしている

その結果、以上の条件を満たす APD として APD S5343 を選択した。以下写真とその特徴を書いておく。

## 短波長用 Si APD S5343



APD type	S5343
Manufacturer	Hamamatsu
Sensitive Area	1mm $\phi$
Quantum Efficiency at 530nm	77%
Breakdown Bias	150V
Dark Current	1nA at Gain 100
Junction Capacitance	15pF

図 2.7: S5343 の写真とその特徴

## 2.6 運動量の測定方法とその誤差

Tracker の役割は、飛跡粒子の運動量、電荷を測定することである。そのために通常超伝導ソレノイドコイルを用いて強力な磁場をかけ、そのローレンツ力による粒子の曲率半径を測定する。運動量は磁場、曲率半径を用いて、ローレンツ力が向心力になるという運動方程式から以下のように導き出される。

$$P_t [\text{GeV}] = 0.3 \cdot B [\text{T}] \cdot \rho [\text{m}]$$

しかし実際には飛跡は離散的な再構成点、多重散乱などの影響により、曲率半径の測定は誤差を伴ったものとなる。以下運動量測定の方法とその誤差について議論する。

### 2.6.1 三点による運動量測定

運動量は最低 Hit が三点存在すれば Track を再構成することが可能である。ここで sagitta  $s$  による運動量分解能を導出する。まずある軸  $y$  方向に測定器が等間隔  $d$  にならんでいたとする。そのとき  $x_1, x_2, x_3$  という再構成点が存在すると仮定すると、

$$s \equiv x_2 - \frac{x_1 + x_3}{2}$$

$xy$  平面で磁場中を回転する角度を  $\theta$  と、それが小さいときに  $\cos \theta \approx 1 - \frac{1}{2}\theta^2$  と近似すると

$$s = \rho(1 - \cos \frac{\theta}{2}) \approx \rho \frac{1}{8} \theta^2$$

一方  $\theta$  に関して、 $L = 2d$  を用いて、

$$\frac{L}{2\rho} = \sin \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2} \quad \theta \approx \frac{L}{\rho}$$

これにより、sagitta は以下のように近似される。

$$s = \frac{0.3 L^2 B}{8 P_t}$$

各測定点誤差  $\sigma(x)$  の伝播を考えると、

$$\sigma(s) = \sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x_i}\right)^2} \sigma(x) = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma(x)$$

$\sigma(P_t)$  から  $\sigma(s)$  への伝播は

$$\sigma(s) = \left| \frac{\partial s}{\partial P_t} \right| \sigma(P_t) = \frac{0.3 L^2 B}{8 P_t^2} \sigma(P_t)$$



したがって

$$\frac{\sigma(P_t)}{P_t} = \frac{\sigma(s)}{s} = \frac{8}{0.3} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sigma(x)P_t}{BL^2}$$

しかし実際の測定では3点のみ測定しているわけではない。等距離に並んでいる  $N$  個の点を測定した場合、運動量と誤差の関係は以下ようになる。[8]

$$\frac{\sigma(P_T)}{P_T} = \frac{\sigma \cdot P_T}{0.3 \cdot BL^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}}$$

## 2.6.2 多重散乱からの寄与

荷電粒子が電荷  $Z$  の原子核の付近を通るときに電磁相互作用を受けて、散乱する過程はラザフォード散乱としてよく知られている。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} = 4zZr_e^2 \left( \frac{m_e c}{\beta p} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (\text{Rutherford formula})$$

荷電粒子が媒質中を十分長い距離を通過する際、ラザフォード散乱を含めたさまざまな相互作用をおこし、それにより散乱される。それが Multiple Scattering である。

$$\theta_0 = \theta_{plane}^{RMS} = \sqrt{\langle \theta_{plane}^2 \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}} \theta_{plane}^{RMS}$$

さらに Radiation Length  $X_0$  を用いて、近似すると

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left\{ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{L}{X_0} \right) \right\} \quad (\text{accuracy} \leq 11 \% \text{ for } 10^{-3} < L/X_0 < 100)$$

運動量を測定する粒子が相対論的粒子であり、散乱角が十分小さいと考えると運動量誤差への寄与が計算できる。

$$\Delta p^{MS} = p \sin \theta_0 \approx p \cdot 0.0136 \frac{1}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

$$\frac{\sigma(p)}{p_T} \Big| = \frac{\Delta p^{MS}}{\Delta p_T} = \frac{0.0136 \sqrt{\frac{L}{X_0}}}{0.3BL} = 0.045 \frac{1}{B\sqrt{LX_0}}$$

$P_t$  は上記のような方法で測定できる。 $P_z$  は polar angle が分かれば容易に求めることができる。 $N$  個の等間隔に並んだ測定器で  $Z$  方向の運動量を測定した場合、 $Z$  方向の誤差  $\sigma(z)$  は

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma}{L} \sqrt{\frac{12(N-1)}{N(N+1)}} + \text{Multiple Scattering etc}$$

しかし Z 方向の誤差  $\sigma(z)$  は一般に小さいものであるから、通常運動量の測定誤差は

$$\frac{\sigma(p)}{p} \approx \frac{\sigma(p_T)}{p_T}$$

$$\frac{\sigma(p)}{p} \propto \frac{\sigma(x) \cdot p}{BL^2} \frac{1}{\sqrt{N}}$$

### 2.6.3 さらに詳細な運動量精度についての議論

ここまでは運動量測定に関して単純化してきたが、さらに詳細に数学的に議論する。

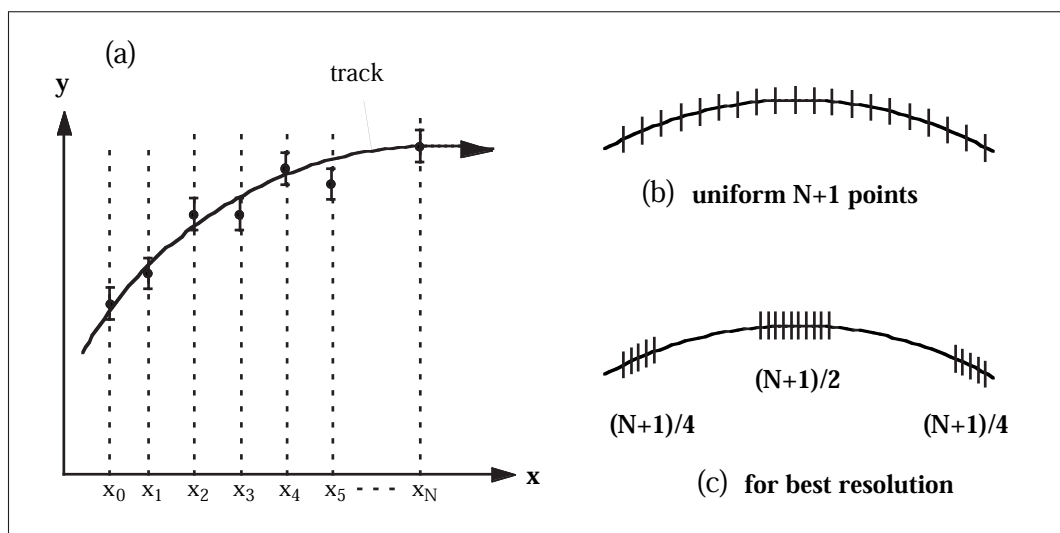


図 2.8: 磁場中での荷電粒子の飛跡測定

一様磁場の中で磁場に直角な方向での位置精度  $\sigma$  で荷電粒子の飛跡の位置  $(y_0, y_1, y_2, \dots, y_N)$  を

$N+1$  点  $(x_0, x_1, x_2, \dots, x_N)$  で測定したとする。これを二次の曲線で Fit することを考えるとすると、

$$y = \alpha + \theta x + \frac{1}{2}cx^2$$

が最小になるようなパラメータを探せばよい。ただしここで  $c$  は曲率に相当する。以下  $\chi^2$  を考え、最小二乗の方法に従い、パラメータによる偏微分により 3 つのパラメータの値を決定する。

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^N \frac{1}{\Delta y_i} \left[ \alpha + \theta x + \frac{1}{2}cx^2 - y_i \right]^2$$

$\Delta y_i$  は測定点での  $x_i$  での測定値  $y_i$  の誤差

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial \alpha} &= \sum_{i=0}^N \frac{1}{\Delta y_i} \left[ \alpha + \theta x + \frac{1}{2} c x^2 - y_i \right] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \theta} &= \sum_{i=0}^N \frac{1}{\Delta y_i} x_i \left[ \alpha + \theta x + \frac{1}{2} c x^2 - y_i \right] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c} &= \sum_{i=0}^N \frac{1}{\Delta y_i} x_i^2 \left[ \alpha + \theta x + \frac{1}{2} c x^2 - y_i \right] = 0\end{aligned}$$

$F_j \equiv \sum_0^N \frac{1}{\Delta y_i} (x_i)^j$  において、上の連立方程式を解くと

$$\frac{1}{2}c = \frac{\sum y_i Q_i}{\sum x_i^2 Q_i}$$

ここで

$$Q_i = \frac{1}{\Delta y_i} \left\{ \begin{vmatrix} F_1 & F_2 \\ F_2 & F_3 \end{vmatrix} - x_i \begin{vmatrix} F_1 & F_2 \\ F_2 & F_3 \end{vmatrix} + x_i^2 \begin{vmatrix} F_1 & F_2 \\ F_2 & F_3 \end{vmatrix} \right\}$$

測定  $y_i$  が独立な事象と考えれば、曲率  $c$  の誤差  $\delta c$  は

$$(\delta c)^2 = \sum_i \left( \frac{\partial c}{\partial y_i} \right) (\Delta y_i)^2 = \frac{4}{\left( \sum x_i^2 Q_i \right)^2} \sum Q_i^2 (\Delta y_i)^2$$

ここで簡単な例として、測定点が一様に並んでおり、測定誤差がみな同じだとすると

$$x_i = \frac{i}{N} \cdot L, \Delta y_i = \epsilon, Q_i = i^2 - iN + \frac{1}{6}N(N+1)$$

したがって曲率の誤差は以下のように与えられる。

$$(\delta c)^2 = \frac{\epsilon^2}{L^4} \cdot \frac{720N^3}{(N-1)(N+1)(N+2)(N+3)}$$

しかし測定点を一応にするのは最適な配置ではない。この場合の最小の誤差を得るには、測定範囲  $L$  内に三点を選択し、その周辺を  $(N+1)/4, (N+1)/2, (N+1)/4$  回細かく測定すれば、誤差は

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (\delta c)^2 = \frac{\epsilon^2}{L^4} \cdot \frac{256}{N+5}$$

と三倍程度小さくなる。

ここで第 2.6.2 節の結果とあわせると、

$$\frac{\delta p}{p} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon \cdot p}{0.3 \cdot B \cdot L^2} \sqrt{\frac{720}{N+5}}\right)^2 + \left(\frac{0.056}{B \cdot L \cdot \beta} \sqrt{\frac{L}{L_R}}\right)^2}$$

High  $P_t$  の粒子を見る場合、Multiple Scattering の曲率誤差への寄与は小さいので、近似的に

$$\frac{\delta p}{p} \propto \frac{\epsilon \cdot p}{B \cdot L^2} \sqrt{\frac{720}{N+5}}$$

となり、測定点の全長  $L$  の二乗に反比例、磁場の強さに反比例、運動量の大きさに比例する。

アトラスの内部検出器では測定点は決して一様ではないが近似的に一様分布としてピクセルとシリコン半導体検出器の測定から運動量を測定しようとする、 $\epsilon = 16 \mu\text{m}, L = 0.6\text{m}, B = 2 \text{ Tesla}, N = 6$  を代入すると

$$\frac{\delta p}{p} \sim \frac{16 \times 10^{-6} \cdot p}{0.3 \cdot 2 \cdot 0.6^2} \sqrt{\frac{720}{6+5}} \sim 0.0006 \cdot p [\text{GeV}] \sim 30 \% @ 500\text{GeV}$$

となる荷電粒子運動量測定精度が得られる。Higgs の質量が 110-200GeV であれば、終状態の 4 つのレプトンの transverse momentum をは 50GeV から 70GeV 程度までカバーすればよいので、測定可能領域に入っていることが分かる。

## 第3章 Readout of SciFi

SciFi 一本に対してと 1ch の photosensor を接続しなければ、SciFi の fine granularity が意味をなさなくなる。これは SciFi Tracker としての必須の要求である。したがって、ここでは SciFi 一本を接続したときの readout test を行い、APD による SciFi Readout の可能性の検証と性能を調べた [11]。実験は図 3.1 のような Set up で行った。

### Experimental Setup

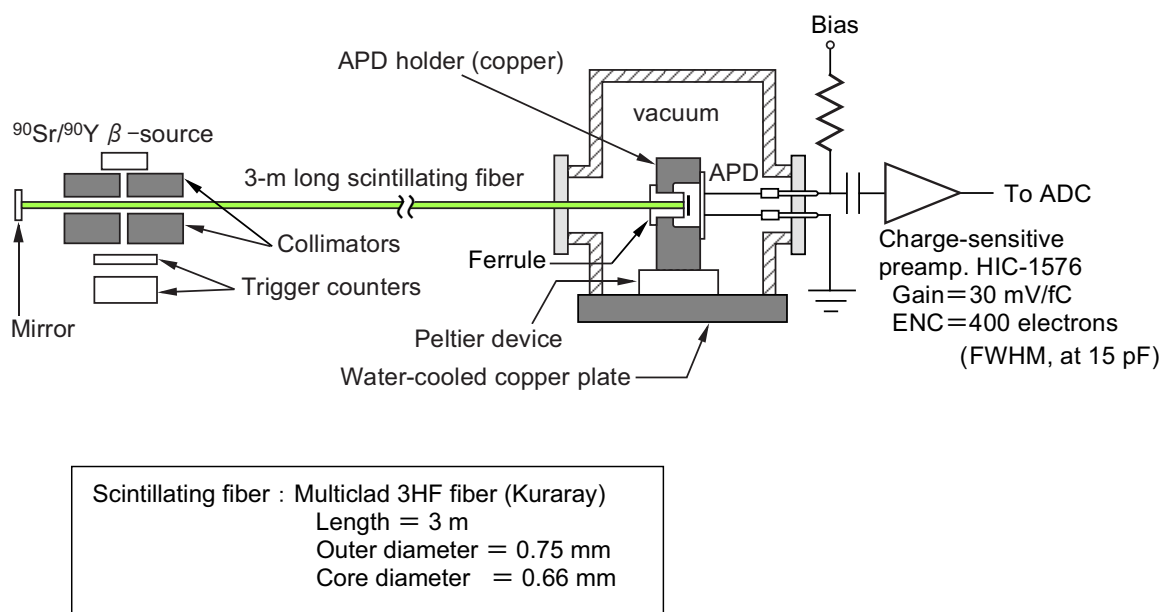


図 3.1: Readout test of SciFi by APDs configuration

予め両端を  $1\mu\text{m}$  のアルミナパウダーで研磨された SciFi の一端をアルミ蒸着されたポリエステルフィルムのミラーに接続し、もう一端を銅のホルダーを介して APD と接続する。このとき APD の受光面と SciFi の距離は  $0.2\text{mm}$  になるように設計されている。ミラーは APD と反対方向に進行する光子を反射されるために存在し、受光面との距離は APD に bonding されている wire に接触しないように、

研磨の技量による誤差を考慮して決められたものである。容器は冷却による結露を防ぐために  $10^{-2}$  程度の真空を保っている。そのため SciFi は真空容器に挿入後、アクリル窓との隙間はエポキシ系接着剤で塞がれる。

APD を冷却させるためのデバイスとして多段モジュールのペルチエ素子 ( K2M-05026A 小松エレクトロニクス [14] ) を用いた。これにより最大 -55 以下に冷却することができる。

APD の出力電荷はプリアンプ HIC-1576 によってパルス波高に変換される。この出力は ADC によってデジタル信号に変換されコンピューターに入力される。

検出する荷電粒子として最大エネルギー 2.28MeV の  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  の  $\beta$  線を用いた。 $\beta$  線は APD から 2.4m 離れた位置を照射するようになっている。この  $\beta$  線を SciFi に確実に照射させるために図 3.4 のようなコリメータを作成した。コリメートされた  $\beta$  線は、SciFi を発光させ、Trigger counter を貫通し、trigger 信号を発生させる。

SciFi での energy deposit は荷電粒子のエネルギーに依存する。したがってこの実験ではエネルギー損失を最小にするような粒子 ( Minimum Ionization Particle, MIP ) で実験することが望ましい。 $^{90}\text{Sr}$  からの  $\beta$  線は MIP に対応することがよく知られており、またこのことは GEANT3[12] でのシミュレーション [13] の結果からも、よくわかる。



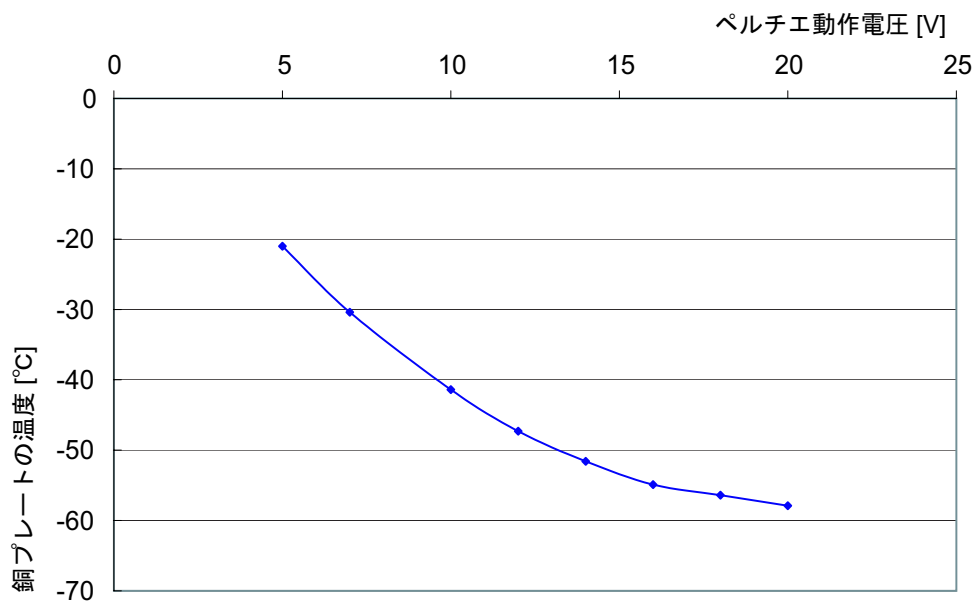
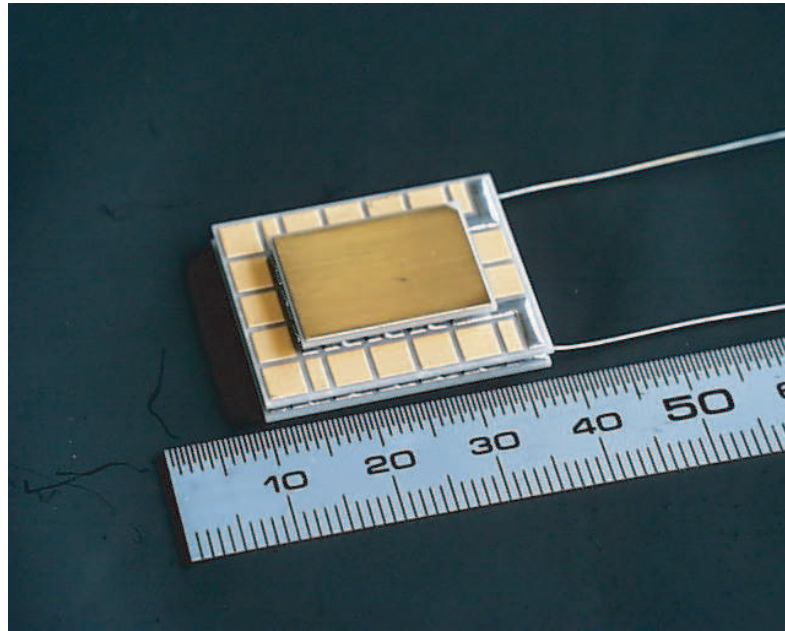


図 3.2: ペルチエ素子による冷却効果の動作電圧依存性 (多段重ねをしないで、直列につないだペルチエ素子三つによって冷却された銅プレートの温度を測定した。銅プレートの上には APD holder などはのっていない)

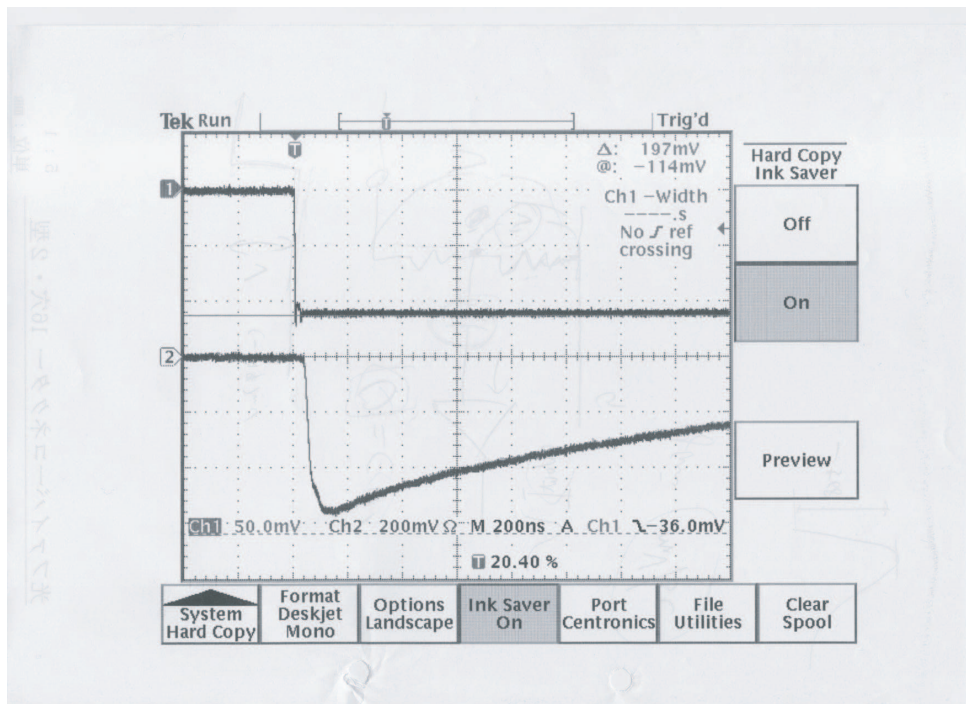
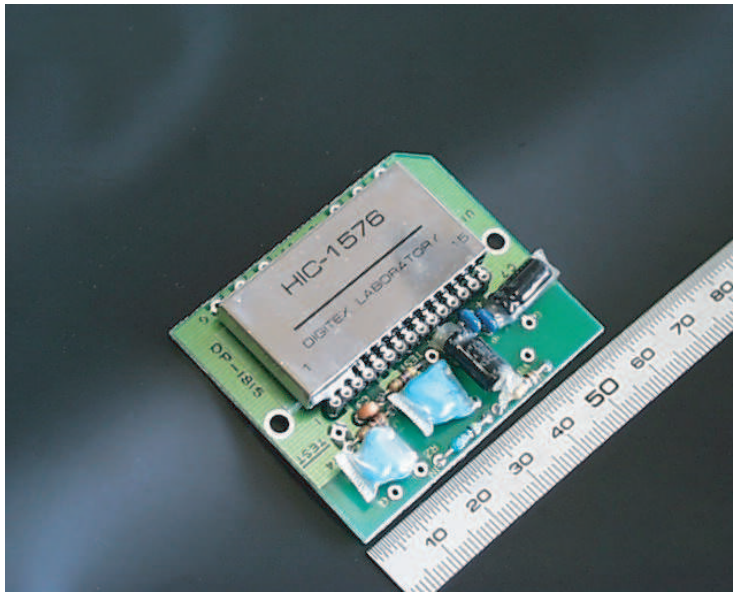
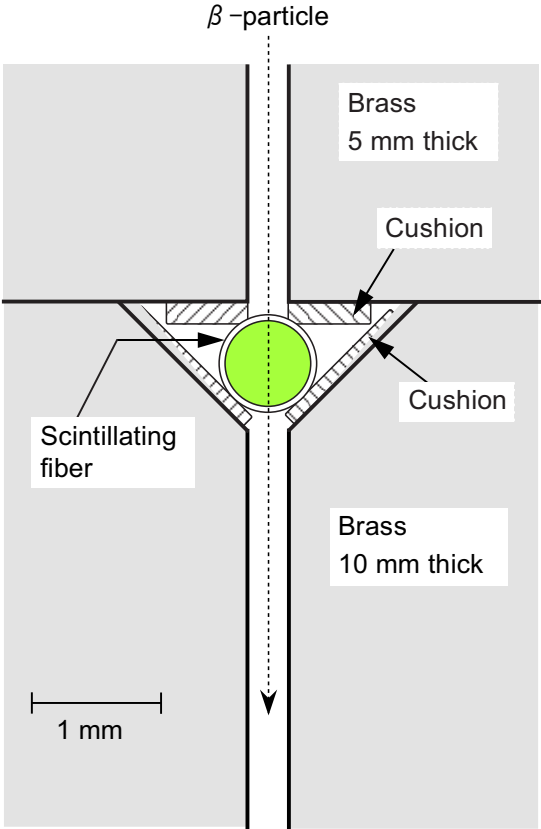


図 3.3: 上は入力信号、下は増幅後の波形。このとき input charge は約 20fC であり、実測 Gain は 28.3 mV/fC

Preamplifier	HIC-1576
Manufacture	Digitex Laboratory Co.,LTD. [15]
Amplification	charge sensitive
Charge Gain	30mV/fC
Noise	400electron/FWHM
Shaping Time	165 ns



☒ 3.4: collimeter

### Monte-Carlo simulation

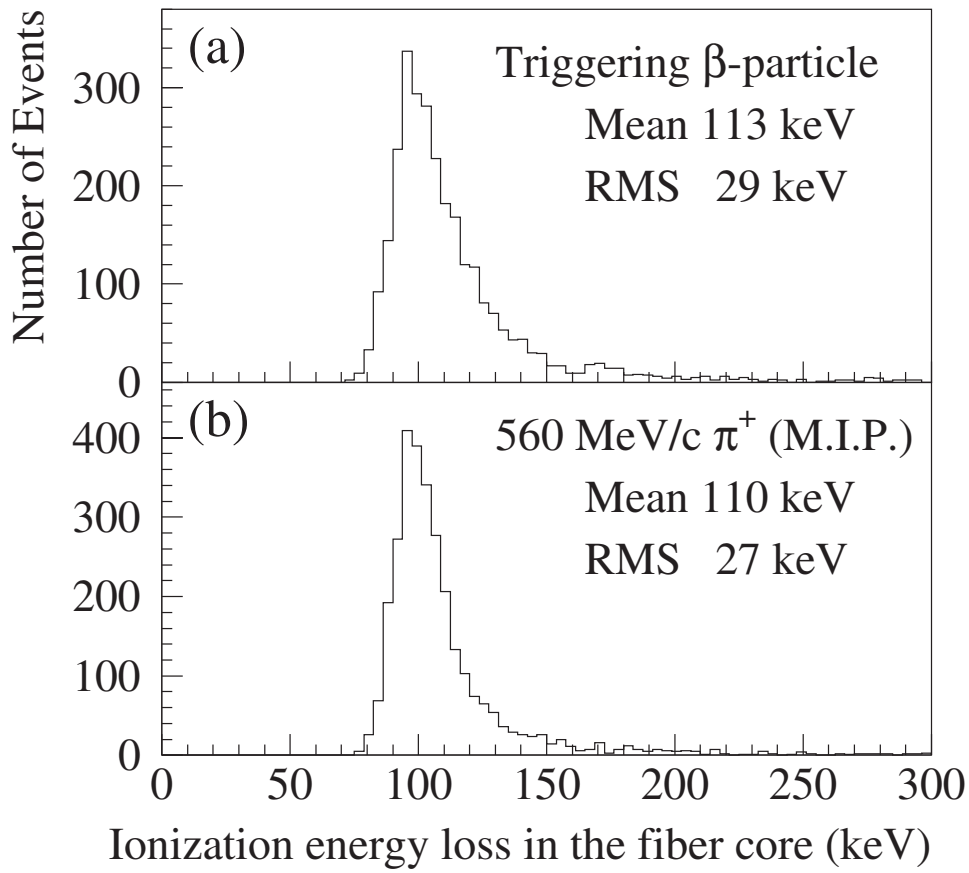


図 3.5: GEANT3 を用いた SciFi コア中での荷電粒子のエネルギー損失のシミュレーション結果 up: SciFi を通過し trigger counter を貫通した  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  からの  $\beta$  線 down: 560MeV/c の  $\pi^+$  (MIP)

### 3.1 冷却による検出効率の上昇

この実験での我々の目的は APD を用いた SciFi Tracker で高い検出効率を得ることである。検出効率とは信号を検出する確率であるが、ここではノイズをある確率で排他する Threshold を設定しその Threshold を超える波高値を持ったイベントをもって信号とみなし、その信号を検出する確率をもって検出効率と定義する。以下 Threshold は noise を 99.5 % 排他する値というように設定する。

Noise は通常ガウス分布をするため、信号の判断基準となる Threshold には Gaussian Fit による sigma を使って議論することができるが、今回の APD による読み出しにはそれは当てはまらない。

図 3.6 はノイズ波高分布であるが、APD の動作電圧がブレイクダウンに近づくにつれ sigma が近い値を示しているのに関わらず、Threshold の値が大幅にことなることがわかるであろう。これは Threshold の増加を決定するのは Noise の裾あたりに現れる付加的な Noise であり、ブレイクダウン近辺ではガウス分布とは異なった分布をするからである。これについての理論的には、通常は SiAPD は電子のみがアバランシェを起こすようにデザインされているが、バイアス電圧がおおきくなるにつれてホールが付近の格子原子を電離させる確率も高くなり、その電子がアバランシェを起こすことによりショットノイズが増幅され、こうして裾あたりに付加的な Noise が現れるとうように説明される。さらにバイアスが高くなると、こうした過程がより多く発生することになり、Darkcurrent が無限に大きくなる。これがブレイクダウンである。したがってこうした裾に現れる付加的な Noise はブレイクダウンの兆候を示したものである。

したがって、ここから高い検出効率得るには、Threshold の値と信号の平均値が問題となってくるのがわかった。そこで各温度で測定した信号の平均値、Threshold、検出効率について図 3.7 にまとめた。

図 3.7 について説明していくと、(a) は Premap. の平均波高値の温度変化による推移を示しているが、冷却によって平均波高値がより大きな値をとることが見て取れる。これは冷却によって Si の格子振動が弱まり、phonon の影響が小さくなったために、電場によるエネルギーを得やすくなり電子・正孔対を作りやすくなったためである。

(b) は Threshold のバイアス依存性の温度変化による推移を示しているが、これをみると冷却によりブレイクダウンの兆しを示す急激な Threshold の増加がぎりぎりまで抑えられるようになっているのがわかる。これは冷却されることによる熱的に価電子帯へ移れるキャリアの絶対数が減ったことにより、統計的な揺らぎもちいさくなり、すなわち shot noise が低下したからである。

(c) は検出効率のバイアス依存性の温度変化による推移であるが、冷却することにより検出効率が高くなり、ほぼ -40 程度から検出率はほぼ 100 % に達し、さらにそれ以上冷却することでプラトーがより長くなっていくのが分かる。これは冷却によって Threshold を抑えたまま、Gain のみを増幅したからである。

### Noise Spectra at -20°C

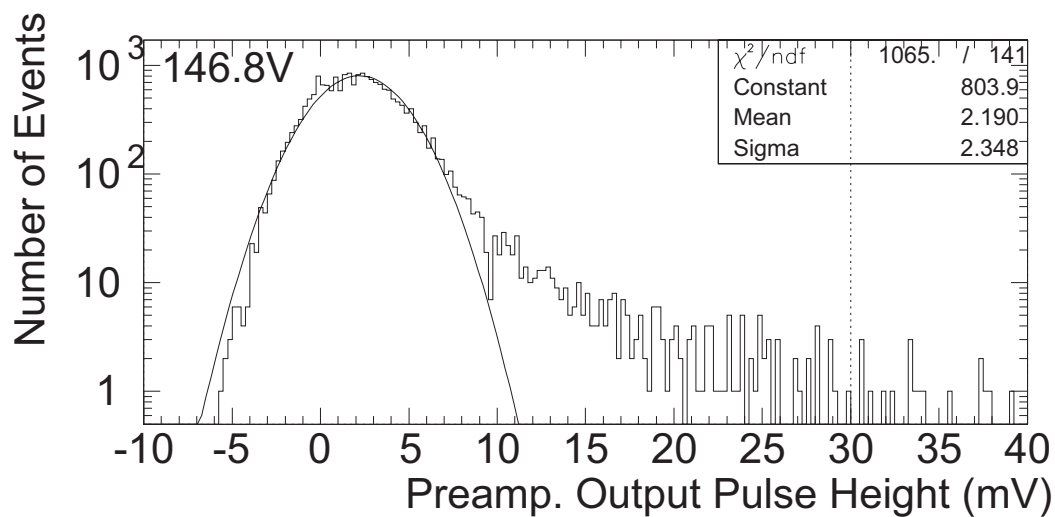
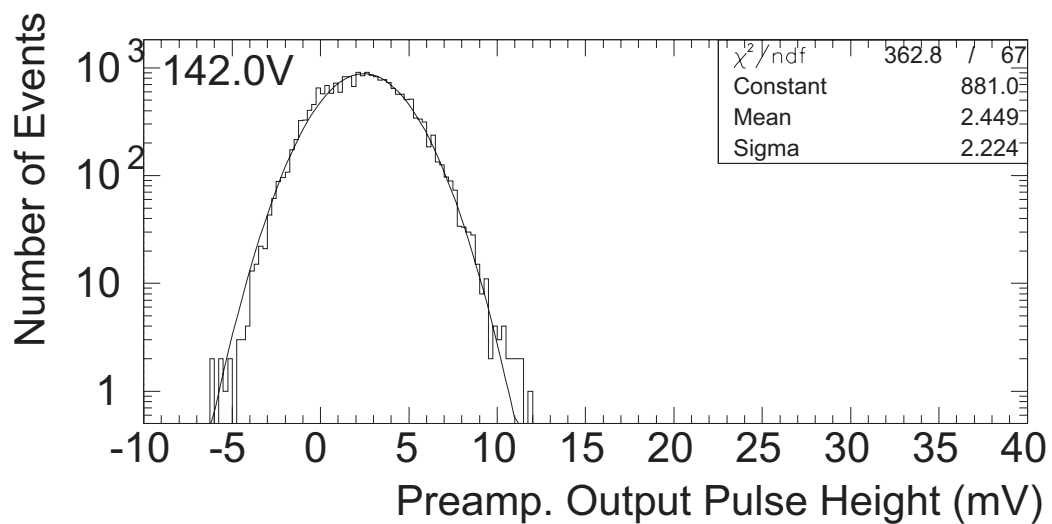


図 3.6: -20 における S5343 のノイズ波高値分布の例



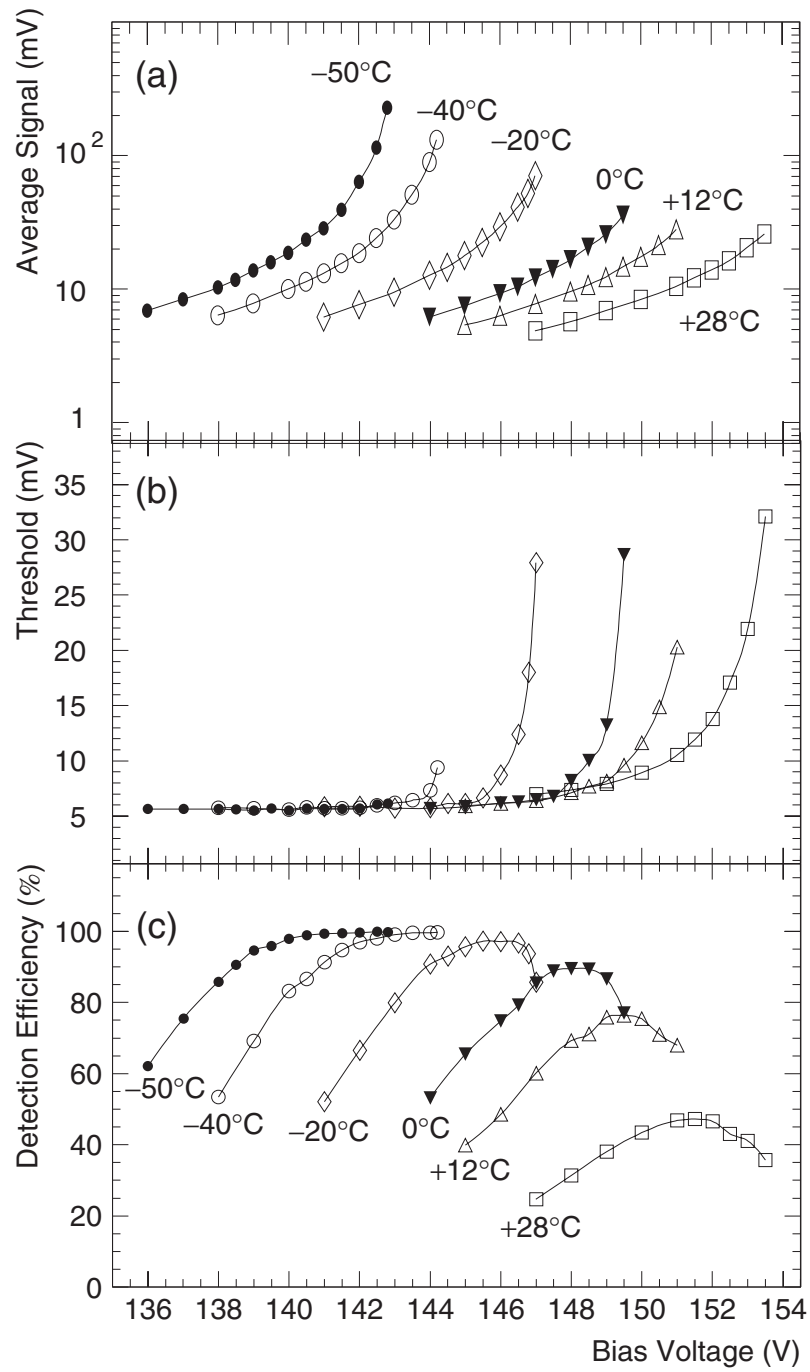


図 3.7: SciFi Tracker による  $\beta$  線検出の、(a) Preamp. 平均波高値、(b) Threshold、(c) 検出効率

## 3.2 Light Transmissionに関するParamterの決定

実際の素粒子実験では図 3.1 の SciFi を clear fiber となんらかの方法で接着させて、その clear fiber からの光を APD が読み出すという形になる。clear fiber を使う理由はもともとそこで新たな Hit による photon の発生がないようにという理由であるが、clear fiber は減衰長が SciFi より長く非常に有利である。

一般に Light Transmission  $T$  は以下のように書かれる。

$$T = \left[ \exp\left(-\frac{z}{\lambda_{sc}}\right) + R \exp\left(-\frac{2L_{sc} - z}{\lambda_{sc}}\right) \right] \epsilon_{conn} \exp\left(-\frac{L_{cl}}{\lambda_{cl}}\right) \epsilon_{conn} \epsilon_{cass} QE$$

ここで、 $\lambda_{sc}$  は SciFi の Attenuation Length、 $z$  は照射位置、 $R$  はミラーの反射率  $L_{sc}$  は SciFi の全長、 $L_{cl}$  は clear fiber の全長、 $\lambda_{cl}$  は clear fiber の Attenuation Length、 $\epsilon_{conn}$  は connection efficiency、 $\epsilon_{cass}$  は fiber と APD の cassette transmission efficiency、QE は APD の量子効率である。これは fiber 内では光吸収におけるランバートの法則にしたがって fiber の減衰長の関数によって photon の減衰がおり、接続部分では接続効率  $\epsilon$  でつながっているという意味である。

反射板ありの平均の Photoelectron の数を  $Y_M$  とし、発生する平均 photon の数を  $N$  とすると、今は clear fiber に関する項は必要ないので

$$\begin{aligned} Y_M(x) &= N \epsilon_{conn} \epsilon_{cass} QE \left[ \exp\left(-\frac{z}{\lambda_{sc}}\right) + R \exp\left(-\frac{2L_{sc} - z}{\lambda_{sc}}\right) \right] \\ &\equiv Y_0 \left[ \exp\left(-\frac{z}{\lambda_{sc}}\right) + R \exp\left(-\frac{2L_{sc} - z}{\lambda_{sc}}\right) \right] \end{aligned}$$

反射板なしのときの平均 Photoelectron の数  $Y_{NM}$  については  $R=0$  に相当する

$$Y_M(x) = Y_0 \exp\left(-\frac{z}{\lambda_{sc}}\right)$$

となる。

Photoelectron の数は次のようにして求めることが可能である。

$$\text{Photoelectron} = \frac{\text{Preamp. の平均波高値}}{\text{Preamp. の平均 Gain} \times \text{電子素量} \times \text{APD の平均 Gain}}$$

ここまでの話で Preamp の平均波高値、平均 Gain については分かっている。APD の平均 Gain は Fiber を通じて一定量の光を LED を使って入射させ Gain を測定した。その結果が図 3.8 である。これらの結果を用いて  $\beta$  線の照射位置を変えながら、photoelectron の数を計算していった。その結果が図 3.9 である。

### Avalanche gain & Dark current (S5343)

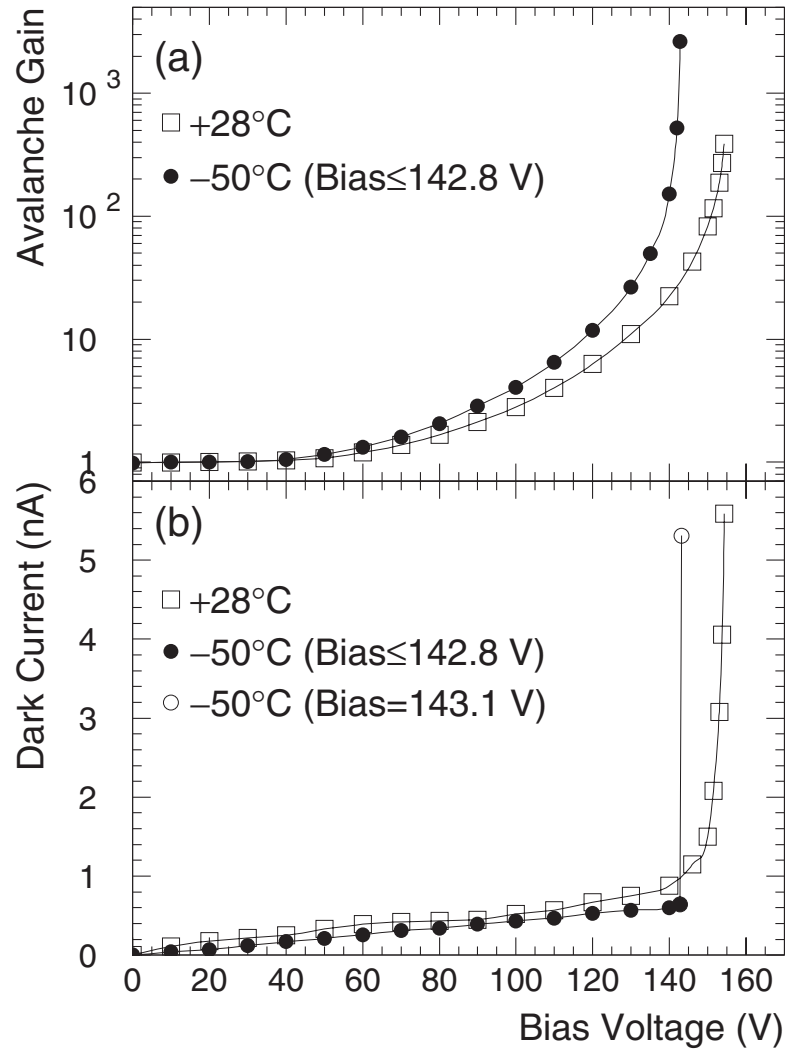


図 3.8: APD S5343 の DarkCurrent と Avalanche Gain

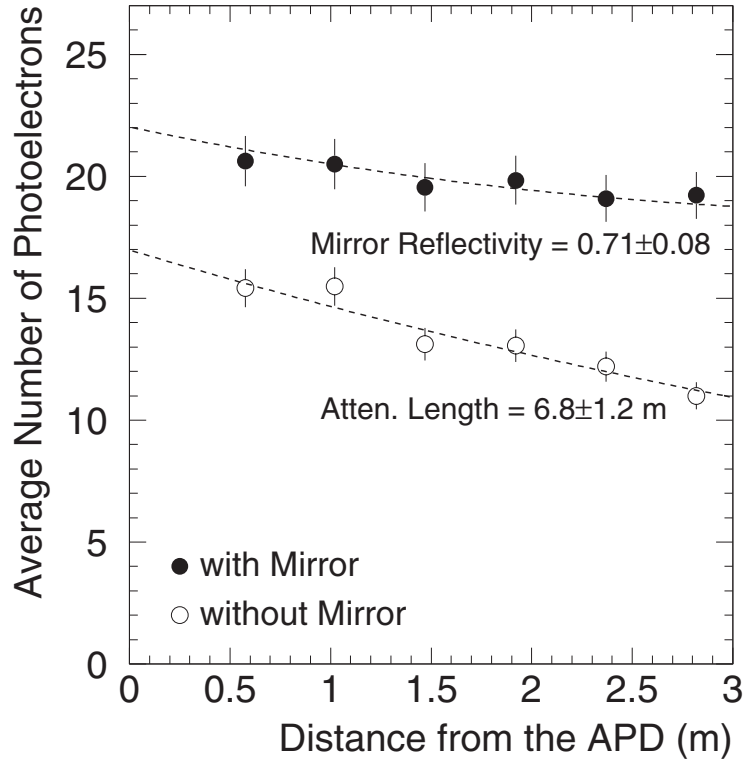


図 3.9:  $\beta$  線照射位置を変えたときの APD の photoelectron の数の変化

この結果を先ほどの関数で Fit することにより、Light transmission に関する parameter である  $\lambda$ 、 $R$ 、 $Y_0$  の値をもとめることができ、それぞれ以下のような結果となった。

$$\lambda = 6.8 \pm 1.2 \text{ m}$$

$$R = 0.71 \pm 0.08$$

$$Y_0 = 17.0 \pm 0.8$$

clear fiber についての減衰長などは他のグループからの結果があるので、後は SciFi と clear fiber の接合効率とさえ分かれば、Light transmission についてはすべて理解できることになる。

## 第4章 Readout of SciFi Layer

前章で1本のSciFiを1chのAPDを用いて高い検出効率で読み出すことが可能という事実が得られた。ここでは次のステップとしてHodoscope状のSciFi16本を16chのAPDで読み出すテストを行う。このTrackerの最小単位であるSciFi Layerの読み出しはTracking testへのstepとなる。

しかし単に前章のsystemを16個並列に並べてもそれほど意味はない。我々の目標は実際に加速器の中でSciFi Trackerを使用することであるから、100万本程度のSciFiを前章のような方法をもって読み出すというのは事実上不可能であると思われるからである。

したがって、ここでは実用化にむけて我々が越えなければいけないハードルである、モジュールの集積化と現在のAPDの工業的な生産の品質レベルに起因する各APDの特性のばらつきがプラトーに比べてどのくらいばらついているかという検証に取り組む。

前者はシステム自体のコンパクト化、後者も複数のAPDを同一バイアスで動作させることによるシステムを単純化につながる。これらは大量のSciFiを読み出す上で必要不可欠なことである。

### 4.1 Moduleの集積化

#### 4.1.1 APD array 製作へのstrategy

APD arrayの製作は、実用化にむけて必須の事項である。そのために我々が解決すべき事は、

1. コンパクト化の方法の確立
2. 大量生産の方法の確立
3. ArrayにするAPD素子の選択

である。

このうち、1,2に関しては、一個ずつのAPD素子を寄せ集めて作る方法であるハイブリット法ではなく、モノリシック法という始めからアレイの形に並んだものを一枚の大きなシリコン基板上に同時に大量に作り、それをアレイ毎に切り分

ける方法により生産し、その生産された APD 素子を一つのチップに集積するという方法をとることで解決される。しかもモノリシック法はより受光面の位置に関して精度よく製作できるのでなおよい。

3 に関しては、我々は前章ですでに使用した APD S5343 が SciFi の photosensor としてで十分な性能を示すことができたが、より性能の優れた APD を採用するため、さらに APD 選択のための性能に関する R & D を行った。すでに市販製品との比較は行っているため、Array のための APD の選択は、他の市販製品との比較によって決めるのではなく、S5343 の改良によって、最良の APD の選択を行うことにした。

S5343 は APD として優れた性能をもっているが、改良点も存在する。その改良点として我々が注目した事は次の 2 点である。

1. APD の反射防止面に塗布されている反射防止剤の改良による SciFi の Emission Peak に対する量子効率の向上
2. APD の空乏層を厚くすることによる静電容量の減少にともなうジョンソンノイズの低減

1.

通常、APD は通信などに使われており、通信は比較的長距離を伝達しなければならないなどの要請から、比較的長波長側に対して感度が高くなるように反射防止剤が選択されている。我々の目的はそれより低波長の SciFi からの光をキャッチすることであるから反射防止剤は SciFi の Emission Peak に対して感度が最大 ( 図 4.1 参照 ) になるように選択されるべきである。その結果として現れる量子効率の向上により、APD にやってくる光電子の数を増やし、Gain の増加を図る。

2.

Noise の原因となる Preamp. への input capacitance は、Preamp. 直前に置かれているコンデンサと APD の pn 接合面で生じる空乏層による静電容量の合成容量となる。一般に空乏層での静電容量のほうが小さいため、input capacitance は空乏層の静電容量が支配的になる。空乏層に厚みを加えることで、価電子帯から伝導帯への熱的に拡散する電子の数を減らすことができ、APD 内のノイズ電荷減らし、静電容量をさげることで Noise の減少を図る。

1,2 の改良案に基づいて、改良型 APD を ( 株 ) 浜松ホトニクス [16] への依頼により製作を行った。その結果、次のような特性をもった APD が開発された。

S5343MOD1 : 3HF 型 SciFi に発光に対する反射防止剤を使用。その結果、SciFi の Emission Peak に対して S5343 では 75 % ~80 % 程度であった量子効率が 90 % まで向上した。

S5343MOD2 : S5343 の空乏層を厚くすることで静電容量を小さくした。その結果、15pF であった静電容量が 4pF に下がる。



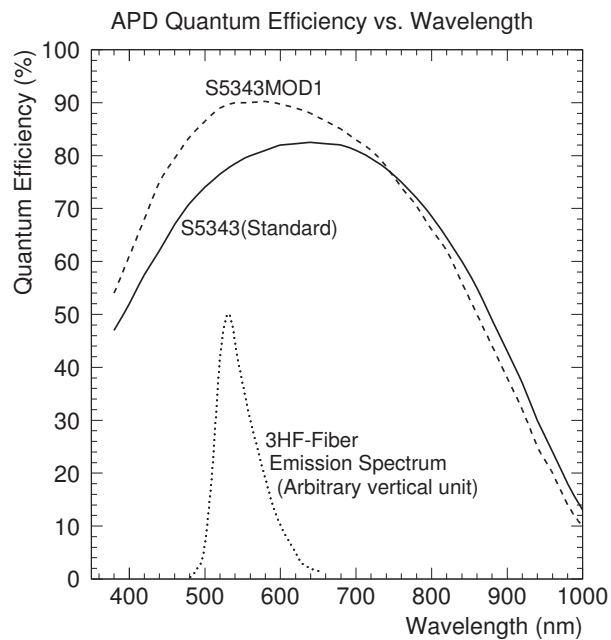


図 4.1: 3HF 型 SciFi の発光スペクトルと S5343 と改良型 S5343MOD1 の量子効率の波長依存

#### 4.1.2 改良型 APD の性能評価

性能の評価は以下の 4 点において行い、各改良型 APD の Standard S5343 に対する相対的な評価を与える。

1. 信号の平均出力の高さ
2. Threshold の値
3. S/T 比
4. 検出効率

Setup は S5343 のときに行った実験と基本的に同じである。

- S5343 と S5343MOD1 との比較

まず、期待される量子効率の向上による Gain の増加であるが、その効果が若干信号の平均出力に現れている。また反射防止剤を変えただけなので、Noise 特性はそれほど変わらない。したがって、S/T 比が向上している。この S/N 比の向上効果

が反射板なしの検出効率に現れている。Standard に対して、S5343MOD1 は反射板なしでもプラトーが見えている。これは Gain の増加により、より早くプラトー領域に到達できるようになったせいである。反射板ありでははっきりとした効果は見えないものの、Gain の増加は我々がさらにコア径のちいさな SciFi を採用できる可能性や、Radiation Damage による SciFi の Attenuation Length の低下に対する耐久性という点で効果があると期待される。

- S5343 と S5343MOD2 との比較

まず、Threshold についてみていくと、期待されるような Threshold の低下が見られない。ジョンソンノイズは低下しているはずであるにもかかわらず、Threshold は S5343, S5343MOD1 と同様の値を示している。ここでジョンソンノイズについて大まかに計算してみると、

$$\begin{aligned} \text{ENC} \times \text{Input Capacitance} \times \text{Gain} &= (170 + 2)/\text{pF} \times \frac{450 \cdot 15}{450 + 15} \text{pF} \times 30\text{mV/fC} \\ &\sim 1\text{mV (r.m.s.)} \end{aligned}$$

実際の Threshold は 5mV 程度であることから、Threshold を決定している主なノイズ要因はジョンソンノイズやショットノイズといった APD に起因するノイズというよりもプリアンプ自体のノイズであるといった可能性が高い。そして、バイアスの高いところでは Threshold の値が急に増加している。そのため、S/T 比もわるくなり、検出効率の低下がみられる。これは空乏層が厚くなることにより、本来電子注入型である SiAPD がホールによる電離電子生成が多くなり、かえってノイズを大きくしてしまう。

以上より、これまで試した APD の中で S5343MOD1 がもっとも優れた性能を持っていることが分かった。

Standard S5343 APD at  $-50^{\circ}\text{C}$

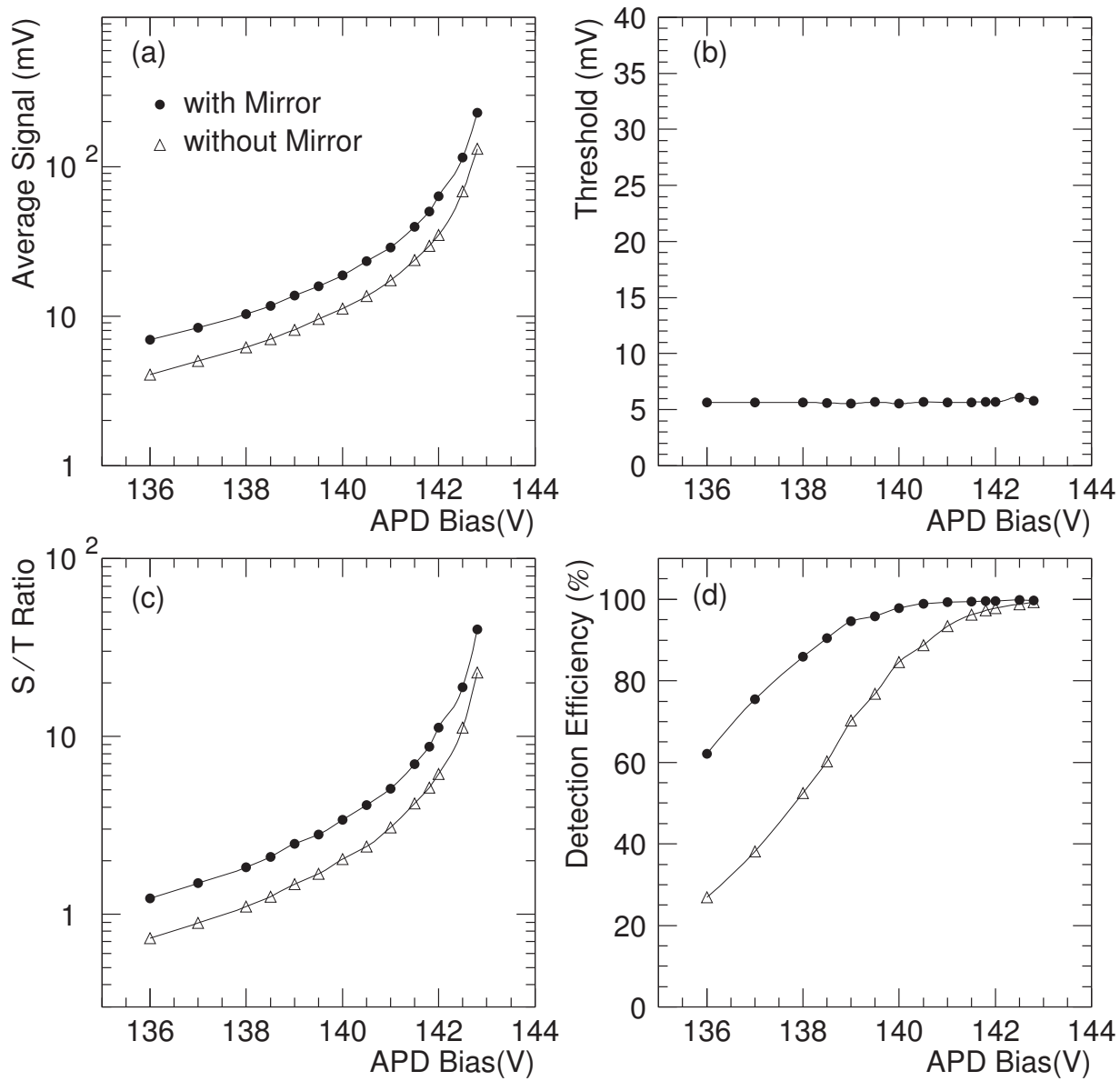


図 4.2:  $-50$  における S5343 の性能

Higher-Q.E. Type APD S5343MOD1 at  $-50^{\circ}\text{C}$

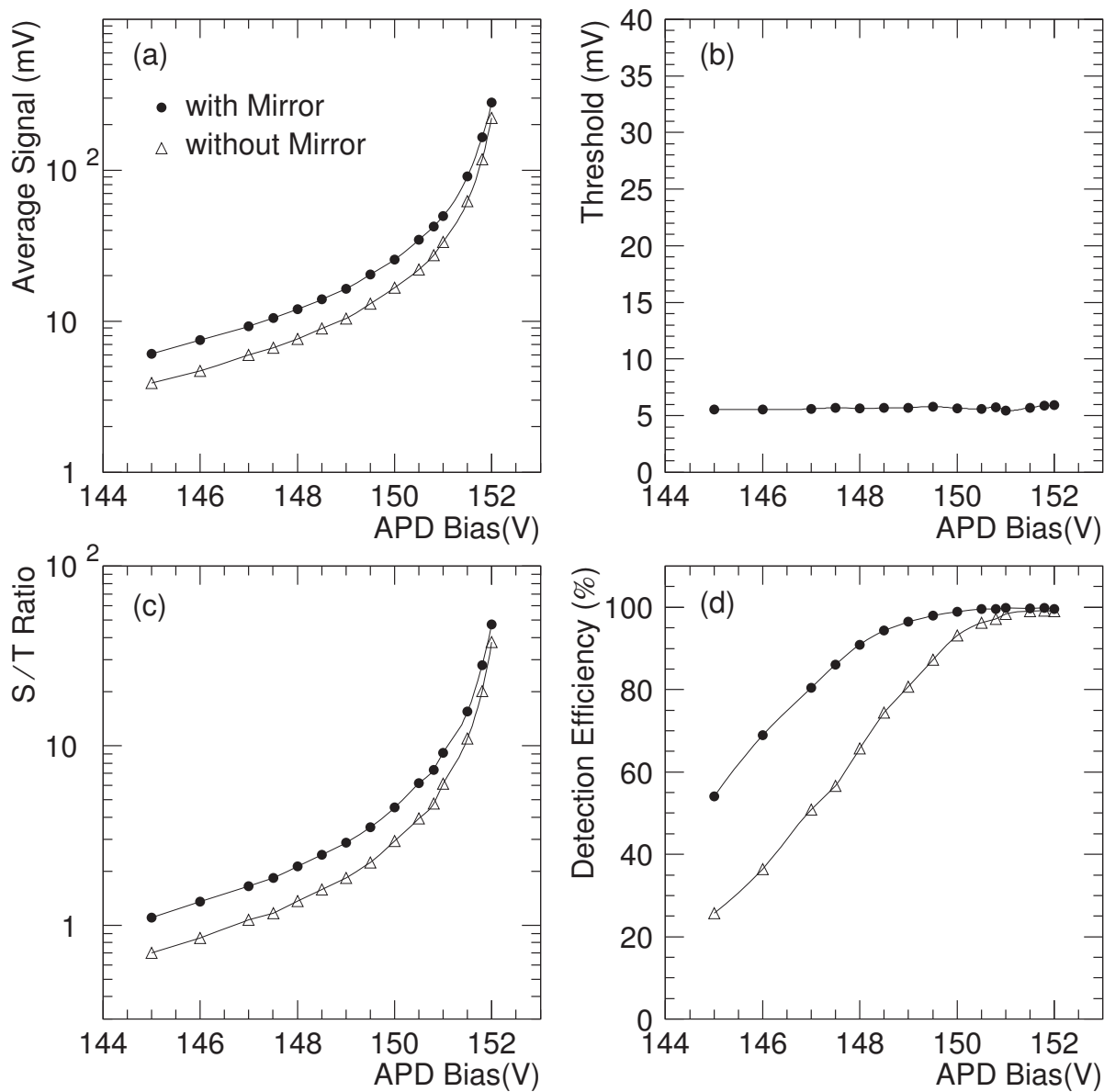


図 4.3:  $-50$  における S5343 の性能

Lower-Capacitance Type APD S5343MOD2 at  $-50^{\circ}\text{C}$

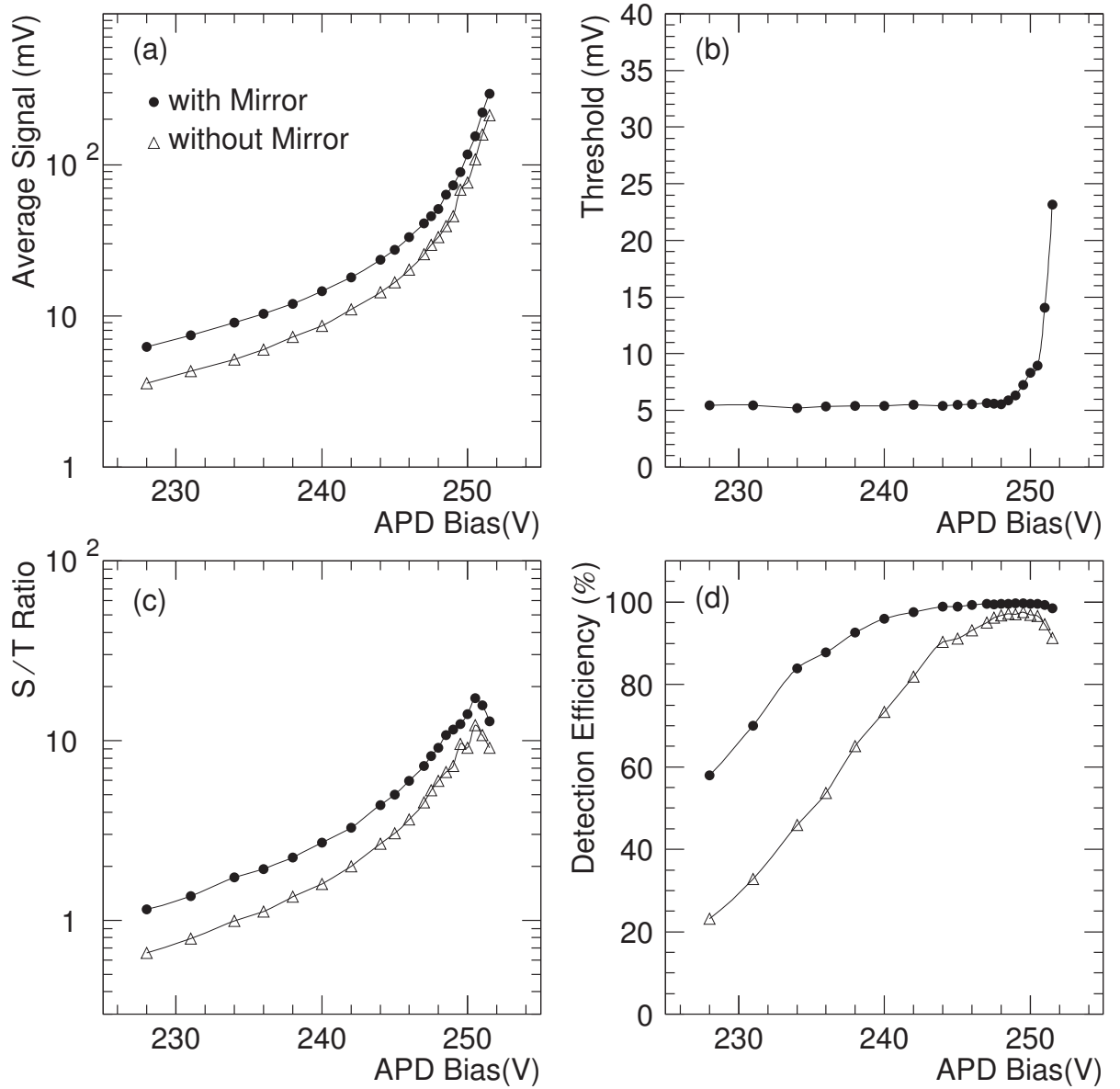


図 4.4:  $-50$  における S5343 の性能

### 4.1.3 APD Array の製作と評価

前節までの実験により、最良と評価された S5343MOD1 を Array 状した APD Array を再び (株) 浜松ホトニクス [16] へ製作依頼を行った。図 4.5、図 4.6 が APD Array 「SPL2368」の写真と図面である。

SPL2368 の受光面の大きさは S5343 と同じ直径 1mm であり、S5343MOD1 を 16 個搭載している。

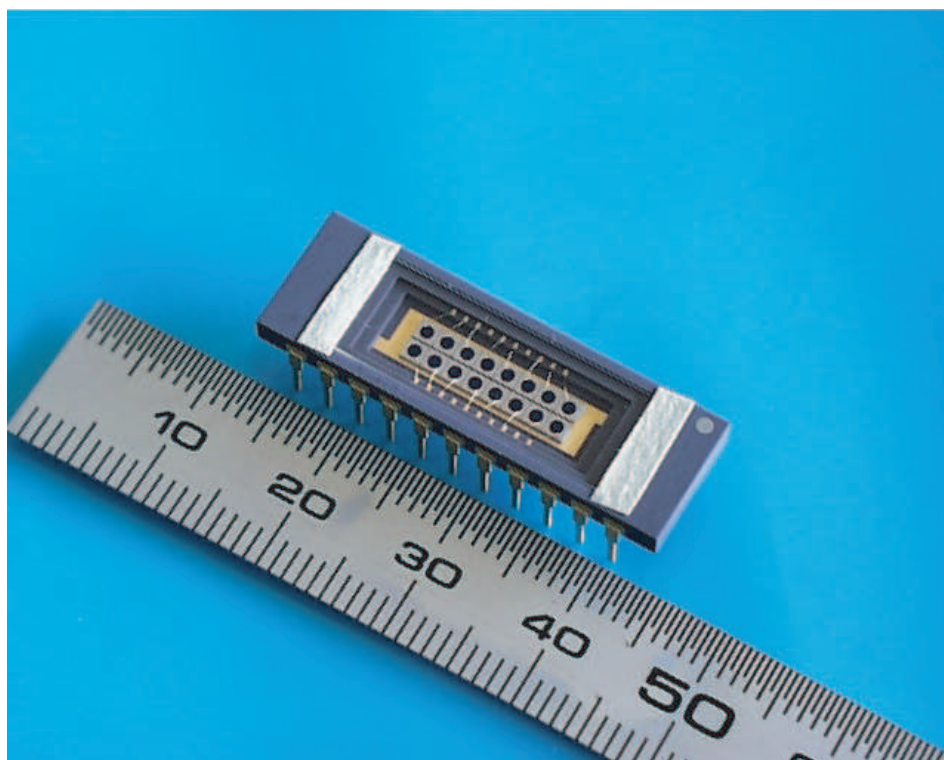


図 4.5: APD Array SPL2368

ここで我々は SPL2368 の試作品のうち、任意に二つ (APD 205, APD 206) を選択し、その特性を調べるべく、DarkCurrent の測定を行った。S5343 の実験より、我々はすでに DarkCurrent をみれば、おおよそ Gain や Noise を見積もることができるという意味で、DarkCurrent 測定は SciFi Tracker の Photosensor として APD が機能するかを簡単に評価できる重要な測定である。

以下二つの APD ( APD205, APD206) のダークカレントの測定を行った。図 4.7 はその結果をグラフにしたものである。

S5343MOD1 の結果により、ブレークダウン直前約 4V は 90 % 以上、直前約 3.5V なら 95 % の検出効率が得られることが保障されている。この観点から図 4.7 をみると、各 Array 毎で 0.5V 程度にばらつきが収まっている。異なる Array 間でも 1.5V 程度に収まっている。これでプラトーの長さに対して十分短いことが分かった。し

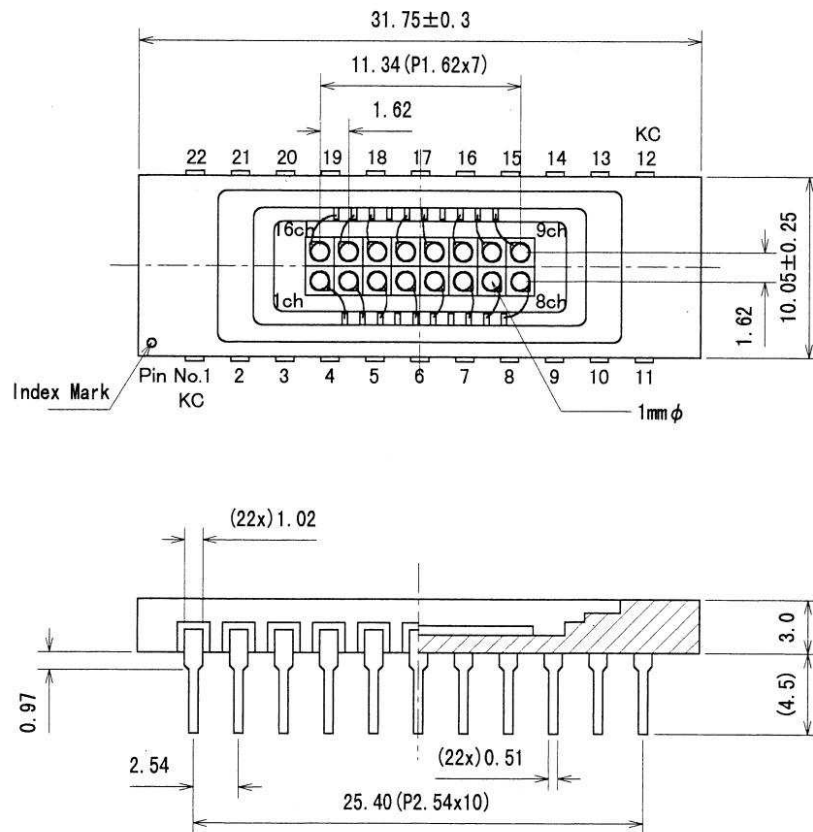


図 4.6: APD Array SPL2368

たがって、同じ Array 間はもちろん、異なる Array すべてを同一のバイアス電圧で高い検出効率を得られる期待が持てる。



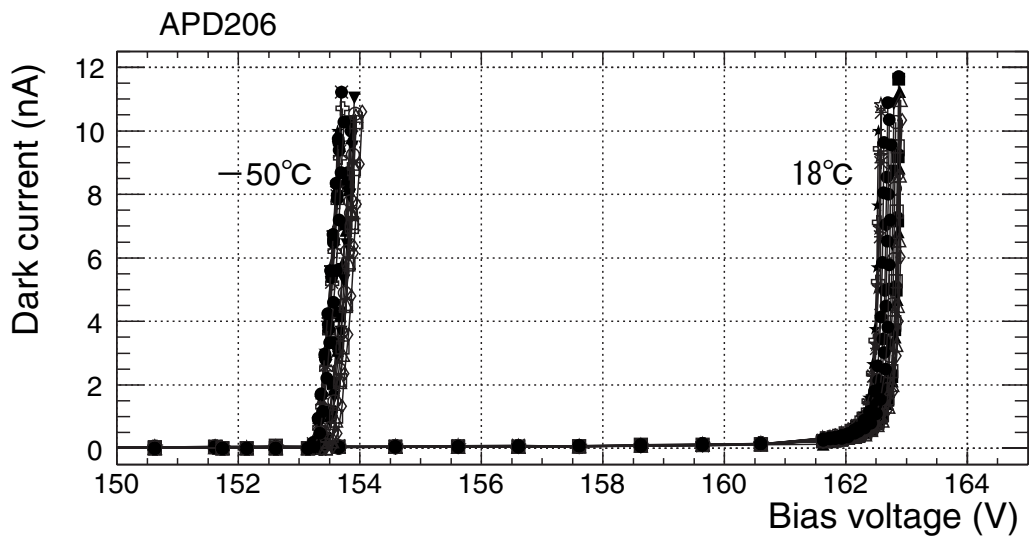
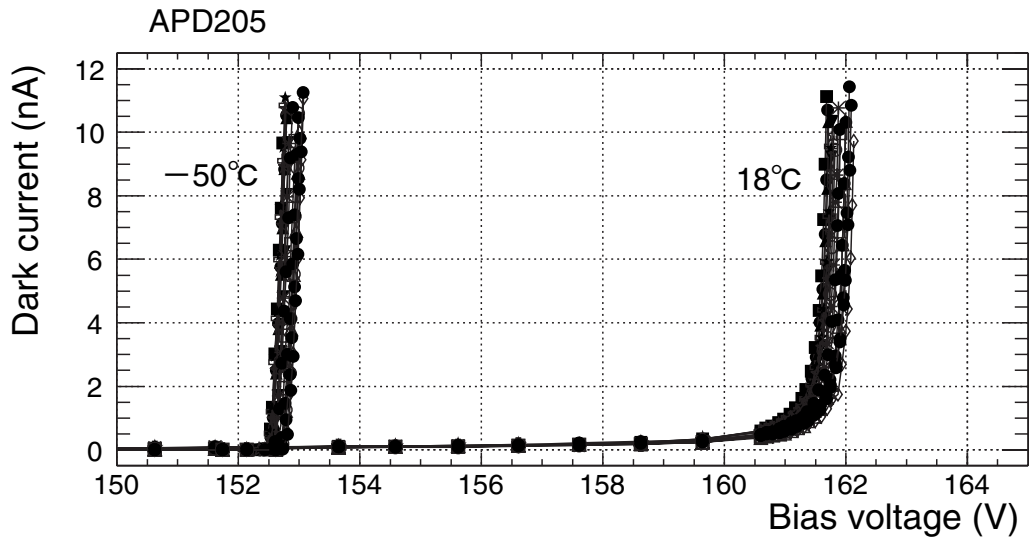


図 4.7: APD Array APD205,206 の Darkcurrent vs. biasVoltage

#### 4.1.4 Preamp.

高度に集積したアンプをしようするという問題にとりくむため、以前まで使用していた HIC-1576 ではなく、ノルウェー IDE AS 社 [17] の VA32C [18] を採用した。VA32C の写真を以下にのせる。1chip に 32ch が搭載され非常に集積してるのがわかる。

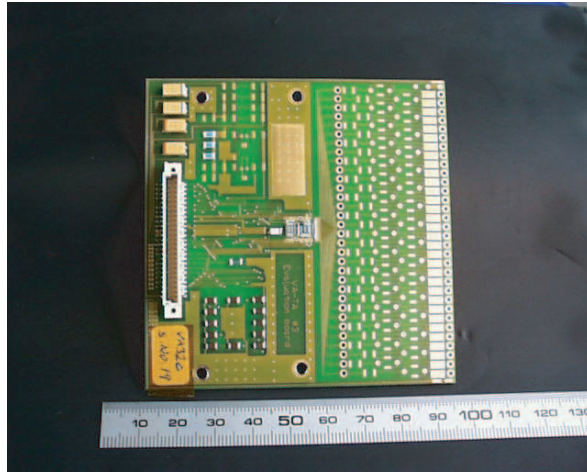


図 4.8: 32ch Preamp VA32C 搭載基板

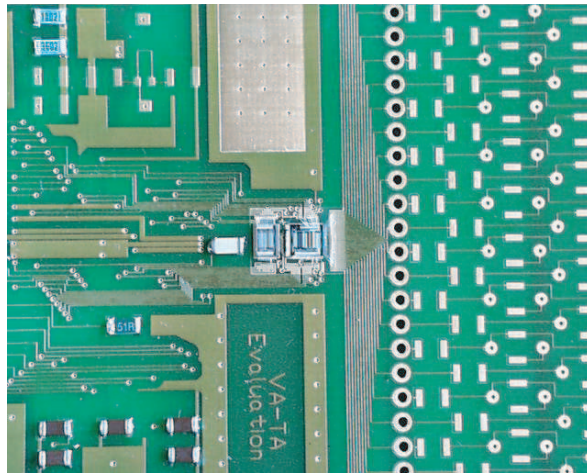


図 4.9: VA32C chip 付近の拡大写真

アンプのスペックは以下のようにになっている。比較のために Noise を r.m.s. で表した HIC-1576 のスペックも載せておいた。

Priamplifire	VA 32/75	VA32C
Manufacturer	IDE AS	
Amplification	charge sensitive	
Size	3mm × 4mm	
Charge Gain	15mV/fC	60mV/fC
Noise	400+25/pF e <sup>-</sup> r.m.s.for 75ns	40+12/pF e <sup>-</sup> r.m.s.for 2 μ s
Peaking time(nominal)	75ns	1.5 μ s
Peaking time(adjustable)	75-150ns	1-3 μ s

Priamplifire	HIC-1576
Manufacturer	Digitex Laboratory Co.,LTD.
Amplification	charge sensitive
size	42mm × 24mm × 6mm
Charge Gain	30mV/fC
Noise	170+2/pF e <sup>-</sup>
Shaping Time	165 ns

これを見てもらうと分かるように、VAchip は HIC-1576 に比べて高度に集積され、大きさも小さい上に 32ch の読み出しが可能であり、実測した Gain の値も大きい(次節参照)。

VAchip からの出力波高は VADAQ という VAchip に特化したシステムの ADC によってデジタル化され、コンピューターにより読み出され、Labview ベースの IDE AS 社のソフトウェアによって解析が可能となる。

## 4.2 VA-TA Evaluation System VADAQ

先に説明した高度に集積化された VA-chip の DAQ システムとして VADAQ というものを使う。VADAQ の VA-chip の読み出しは以下のようにになっている。

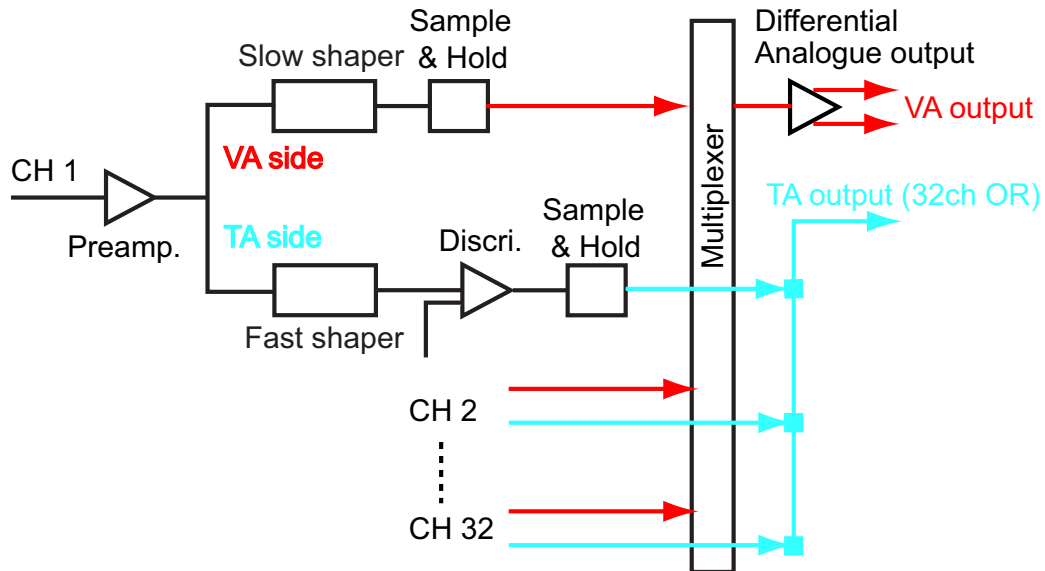
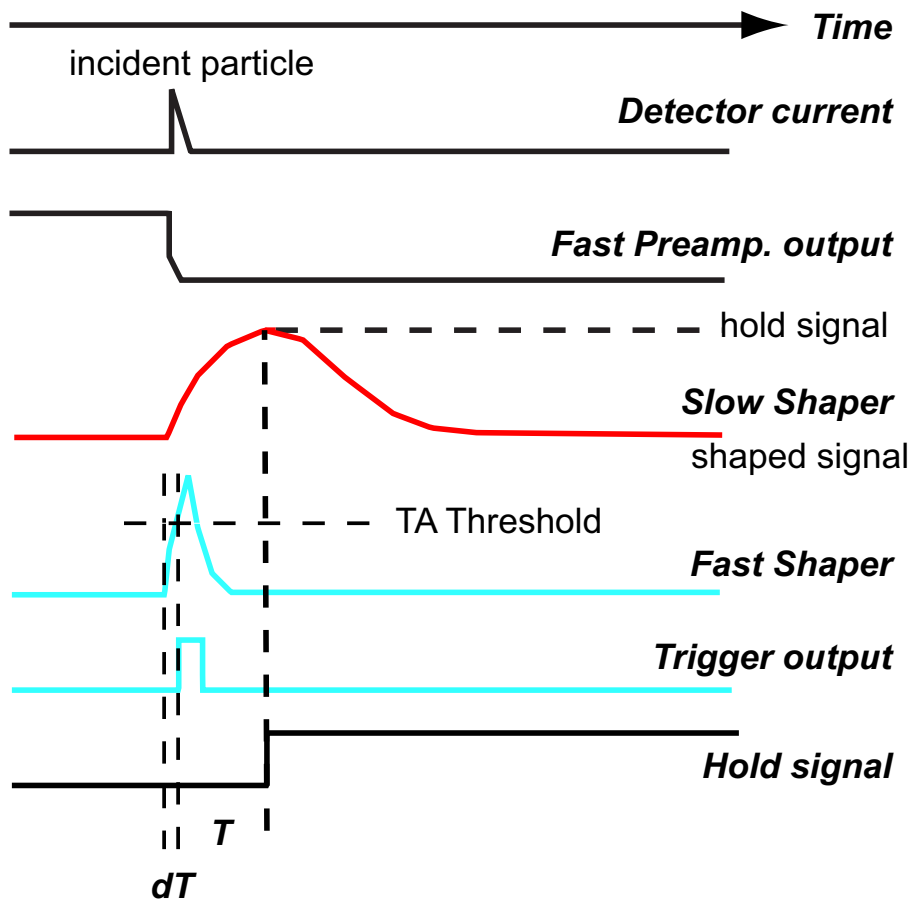


図 4.10: VA-chip の読み出し

PAD から入力された信号は、まず立ち上がりのはやい Preamp によって増幅される。その後信号は VA,TA side それぞれ異なった shaper によってパルスを作るが、TA のほうはユーザーが設定した TA Threshold の超えたときに Trigger 信号が発生する。そのため、TA side は VA よりも立ち上がりの早い shaper が使われている。その後 VA side は Multiplexer(MUX) による Serial Readout が行われる。出力は正の電流 (outp) と負の電流 (outm) に分けられている。最終的に得られる信号はその差 ( outp - outm ) となり、よりノイズに強いシステムになる。

TA に関しては 32ch の OR をとることにより、Trigger をかけるかどうかを決定する。あとは信号のピークで Trigger できるようにユーザーが内部の Hold delay を設定する。

今回は TA による Trigger は使用しないで、TTL 信号による External Trigger を使用して自分で Timing の調整を行った。



$dT$  Time jitter depending on threshold level and input charge

$T$  Fixed hold delay set externaly (peaking time tuned to the value)

図 4.11: VA-chip 内部の Timing Diagram

もうすこし詳しく読み出し部分をあらわしたものが、図 4.12 である。イベントが発生してプリアンプで増幅をされた後、Hold b が ON になり、すべてのチャンネルを読み出すまで Low Level を維持する。その後読み出し開始を表す shift in b が ON になり、読み出しのためのクロックである ckb が発生する。ckb は負論理であり、Low Level になったときに読み出しを開始し、High Level になったときに、読み出しを終える。読み出しが終了したら shift out b が ON になる。これは VA-chip をカスケード接続したときに shift in b となって、読み出し開始を表す。これら Logic Part はすべて  $\pm 2V$  の負論理となっている。

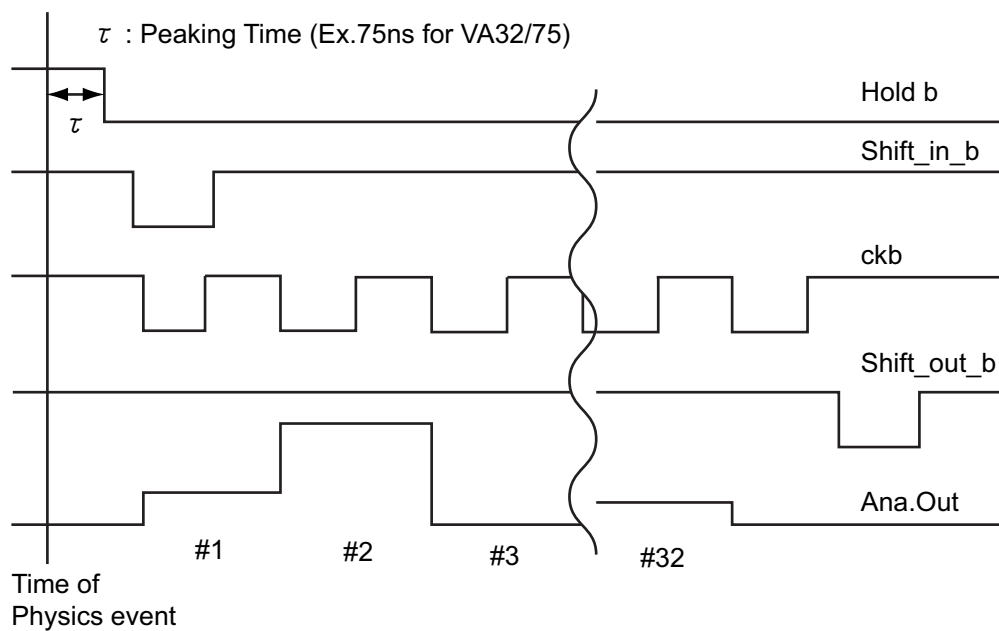


図 4.12: Reaout Timing of VA-chip ( Normal mode operation )

### 4.3 SciFi Layer

SciFi に関しては以下のように SciFi をならべた hodoscope を作成した。

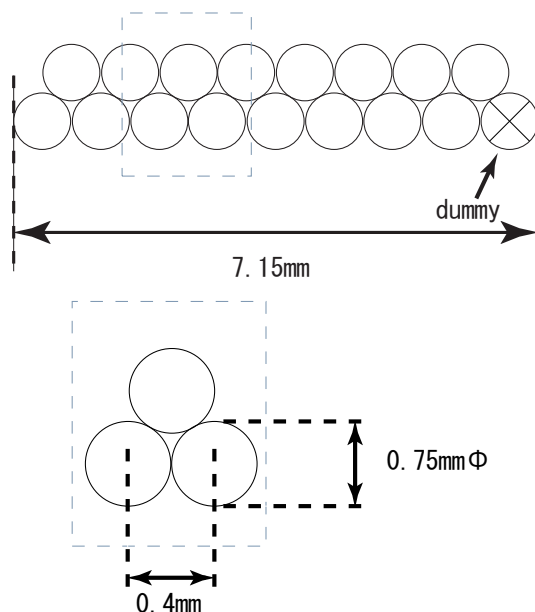


図 4.13: SciFi doublet layer

使用している SciFi はこれまで同様、core 径 0.66mm、外径 0.75mm の 3HF のマルチクラッドタイプである。本来ならば 16 本の SciFi で Layer を作ればよいのだが、制作上 17 本で図 4.13 のようにしなければ、安定した位置精度をもった Layer が製作できなかったため、17 本で Layer を作成した。もちろん、17 本目の dummy SciFi は、真空容器に入る前に途中で切断されている。各 SciFi は 0.4mm ピッチで上下交互に並べられ、それらは市販の白い水性アクリルペンキが塗布されることによって固定される。またこのペンキは SciFi 間のクロストークを防ぐのにも役立っている。

SciFi と APD との接続は以前同様に銅ホルダーを用いて行われる。SciFi を固定するフェルールも 16 本用に再設計され、APD との受光面との距離が 0.2mm になるようになっている。また SciFi と受光面との垂直面上のずれを小さくするために、銅ホルダーのフェルール、APD を固定する部分は  $50\mu\text{m}$  で製作依頼した。

SciFi のもう一端も入射光子数を増やすためにミラーが取り付けられている。このミラーに関する study はすでにされており、70% 程度の反射率が期待される。



## 4.4 Experimental Set up

以上のようなデバイスを用いて、図 4.14 のような prototype を製作した。

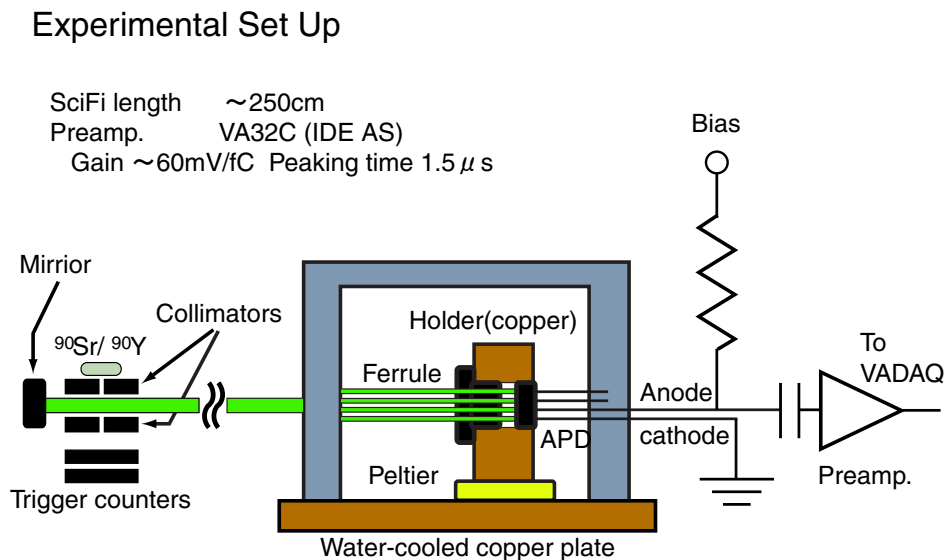


図 4.14: Experimental set up

基本的には前章の Set up と変わらない。複数の読み出しによって変化した部分だけを説明する。

collimate した  $\beta$  線を照射する部分は、図 4.16 のようになっている。コリメータの間隔は 0.4mm 開いている。コリメータの間隔は本来なるべくせまいほうがいいが、狭すぎると、十分なイベント数を得ることができないため、Trigger rate との兼ね合いで決定した。Fiber はコリメータの前後にある溝の掘ってあるプラスチックの板に固定されており、水平面で角度をもつことなく固定されている。したがって、コリメータは下部につけられているステッピングモーターによって水平方向に移動することで任意の場所に  $\beta$  線を照射することが可能である。

この実験の途中で Trigger Counter が故障するといったトラブルが発生したので、途中から図 4.17 の Type I から Type II に変更している。図の Scintillator や PMT の直径、Collimator との距離は実際と同じ比で書かれている。PMT の長さは便宜上適当な長さにした。

変更にとまなう Trigger rate の違いを以下にまとめておく。ちなみに Type I は SciFi 一本の読み出しに用いたものと同じである。

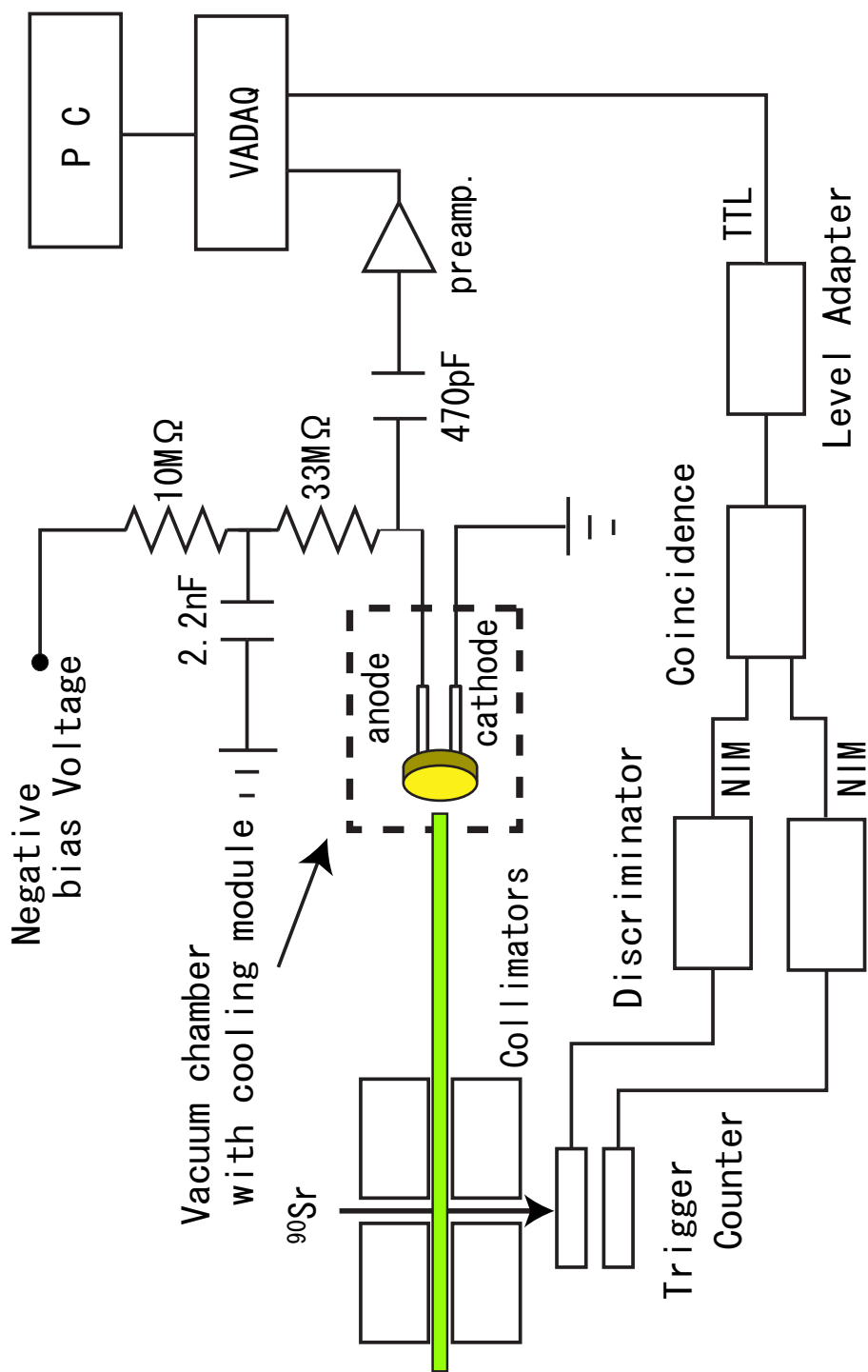


図 4.15: 測定器の電子学

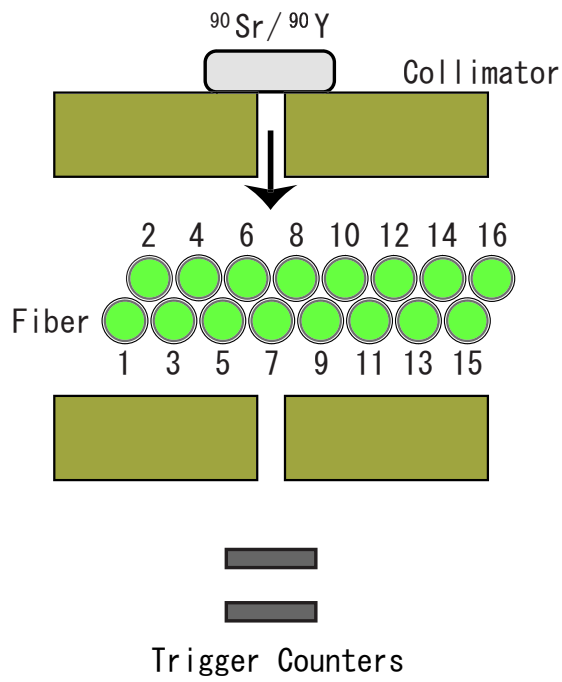


図 4.16: コリメータ部の拡大図

Trigger Counter I



Trigger Counter II



図 4.17: 実験で用いた 2 種類の Trigger Counter

表 4.1: Major Paramter of Trigger Counter

	Type I	Type II
上側 Scinti	4.0 mm × 22 mm × 0.5 mm	4.0 mm × 22 mm × 0.5 mm
下側 Scinti	8.5 mm × 24 mm × 14 mm	10.3 mm × 25.6 mm × 5.3 mm
上側 PMT	1100 V	1000 V
下側 PMT	1200 V	1000 V
コリメータ下端と PMT 中心間の距離	2 cm	0.4 mm + 0.5 mm ( PMT 半径 )
PMT 間隔	PMT 直径に相当 ( 1 mm )	蛍光板の間隔は 5 mm
上側 Disri. Threshold	20 mV	20 mV
下側 Disri. Threshold	50 mV	50 mV

表 4.2: Trigger Counter Type による Trigger Rate の違い

	$\beta$ 線 Trigger rate / min (with fiber bundle)	宇宙線 Trigger rate / min
Type I	~ 30	0.56 ([11])
Type II	~ 70	0.66

ここで接続されている APD と図 4.16 での Fiber 番号とプリアンプのチャンネルの関係についてまとめておく。APD の番号は浜松のカタログによって与えられている番号を使って区別している。

ここでのプリアンプのチャンネルは入力を手前、VADAQ へのケーブルを奥にしたときに、左から 1ch,2ch と数えている。

APD	Fiber	Preamp.	APD	Fiber	Preamp.
1ch	15	11ch	9ch	2	19ch
2ch	13	12ch	10ch	4	20ch
3ch	11	13ch	11ch	6	21ch
4ch	9	14ch	12ch	8	22ch
5ch	7	15ch	13ch	10	23ch
6ch	5	16ch	14ch	12	24ch
7ch	3	17ch	15ch	14	25ch
8ch	1	18ch	16ch	16	26ch

ペルチエデバイスに関しては 30mm 四方のペルチエデバイスを一段目に 2 つ横に並べておき、その上の二段目に 20mm 四方のペルチエデバイスを 3 つならべる。そして、三段目に 15mm 四方のペルチエデバイスを 3 つ並べた。またペルチエに電流が流れるためジュール熱が発生するが、これを最小限にするために以下のように計算を行った。

熱伝導量  $W_H$ 、発熱量  $W_R$  は以下のように与えられる。

$$W_H = \frac{KS\Delta T}{L}$$

$$W_R = \frac{\rho LI^2}{S}$$

ここで  $K$  は熱伝導率、 $\rho$  は体積抵抗率、 $S$  は断面積、 $\Delta T$  は温度差、 $L$  は導線の長さをあらわす。ここで簡単のために、発熱がすべて低音側に移ったと仮定すると、

$$W_{tot} = W_H + W_R$$

$$= K\Delta T \cdot \frac{S}{L} + \rho I^2 \frac{L}{S}$$

ここで  $x = S/L, a = K\Delta T, b = \rho I^2$  とおくと、 $W_{tot} = ax + b/x$  となり、 $W_{tot}$  は  $x = \sqrt{b/a}$  のときに最小値をとる。ここで

#### 1. 一段目と二段目の導線の長さ

$$\begin{aligned} 0 \text{ のとき } & \rho = 1.55 \times 10^{-8} \text{ } [\Omega \cdot m] \\ -195 \text{ のとき } & \rho = 0.2 \times 10^{-8} \text{ } [\Omega \cdot m] \end{aligned}$$

体積抵抗率や熱伝導率は温度によってそれほど変わらないので、この点に関しては大雑把に見積もってもかまわないとし、その変化がリニアであるとすると仮定し、一段目と二段目の平均温度を-40 くらいだとするならば、

$$\begin{aligned} \rho_{-40} &= 1.55 \times 10^{-8} + \frac{0.2 - 1.55}{195} \times 10^{-8} \times 50 \text{ } [\Omega \cdot m] \\ &= 1.20 \times 10^{-8} \text{ } [\Omega \cdot m] \\ K_{-40} &= 403 + \frac{420 - 403}{100} \times 40 \text{ } [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \\ &= 409.8 \text{ } [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \end{aligned}$$

ここで水冷による銅プレートの温度は 15 程度、ペルチエ二段積みで達成する温度は-45 程度なので  $\Delta T = 50$  である。

したがって、 $W_{tot}$  が最小をとるとき、

$$\begin{aligned} \frac{S}{L} &= \frac{\rho I^2}{K \Delta T} \\ &= I \sqrt{\frac{\rho}{K \cdot \Delta T}} \\ &= I \sqrt{5.8 \times 10^{-13} \text{ } [m^2/A^2]} \end{aligned}$$

実際ペルチエにとって-50 というのは限界に近い数字である。よって、許容最大電流の 70 % 程度で動作させることとなるので、4.0A 程度流れる。それ以上はあげることができたとしてもあまり冷却効果もなく、逆に温度があがるといったことが生じる。したがって、

$$\frac{S}{L} = 3.1 \times 10^{-6} \text{ } [m]$$

となる。これを満たす候補を考えると

導線半径 [mm]	断面積 [mm <sup>2</sup> ]	最適な長さ
0.235	0.173	5cm
0.35	0.385	12cm

設計上の問題から直径が 0.70mm の導線を 12cm の長さで接続することにする。

1. 二段目と三段目のペルチエをつなぐ導線の長さ

上でのべたように体積抵抗率と熱伝導率は上でもとめたものほとんどかわりがない。二段積みのみでのテストの結果より、 $I \sim 3.5\text{A}, \Delta T \sim 5$  であると分かったので、

$$\frac{S}{L} = 8.4 \times 10^{-6} [m]$$

ここから候補を探すと

導線半径 [mm]	断面積 [mm <sup>2</sup> ]	最適な長さ
0.235	0.173	2 cm
0.35	0.385	4.5 cm
0.5	0.785	9cm
0.675	1.43	17cm

よって、直径 1.0mm、長さ 9cm の導線で接続することにした。

以下ペルチエの多段積みによる冷却効果を載せる。一段積みに関してはペルチエの面に直接熱電対をプローブして測定したもので、二段積み以降はペルチエの上面に銅のプレートをおき、そのプレートを熱電対でプローブしている。ただし銅プレートの上には APD ホルダーなどはのせていない。



### 一段積み

電圧 [V]	電流 [A]	module 1 [ ]	module 2 [ ]
3.5	1.0	-15.6	-15.3
7.9	2.0	-30.3	-30.1
10.2	3.0	-39.0	-39.1
13.3	4.0	-41.4	-43.1

### 二段積み

電圧 [V]	電流 [A]	銅プレートの温度 [ ]
5.4	1.0	-24.3
10.8	2.0	-44.3
13.2	2.5	-47.6
16	3.0	-49.1
18.4	3.5	-48.9

### 三段積み

電圧 [V]	電流 [A]	銅プレートの温度 [ ]
6.7	1.0	-36.6
13	2.0	-55.1
15.5	2.5	-56.4
18.3	3.0	-56.6

## 使用したデバイス

- Trigger Counter 用 PMT

製造元	HAMAMATSU
製品	HAMAMATSU H3165
最大電圧	1200 V

- ステッピングモーター

製造元	駿河精機株式会社	
製品	D92 ステッピングモーター (K101-20)	
検査項目	規格	測定結果
位置決め精度	0.005 mm 以下	0.00116 mm 以下
繰り返し位置決め精度	± 0.002 mm 以下	± 0.00006 mm
バックラッシュ	0.002 mm 以下	0.00084 mm
平行度	0.010 mm 以下	0.007 mm

#### 4.4.1 APD Array 内の特性の違いと Threshold への反映

図 4.18 は DarkCurrent と Threshold の立ち上がりの関係を示したグラフである。この測定は同時期に測定したので、Threshold のグラフの横軸にはダークカレントが抵抗に流れることによって起こる電圧降下の補正も行ってある。これから同一 Array では 0.5V 程度の特性のばらつき、全体では 1.5V 程度ばらついている。

Threshold の増加は DarkCurrent の増加に起因する。したがって、図を見ても分かるように異なる Array 間で Darkcurrent に対するバイアス特性が 1V 程度異なっているが、これがそのまま Threshold にも反映され、Threshold も 1V 程度バイアス特性が変わってくる。また DarkCurrent の立ち上がりと Threshold の立ち上がりは完全とまではいかないが、全体的に対応している。したがって、APD は Darkcurrent を測定することで Threshold についての大きな特性を知ることができることがわかった。参考のために -50 付近での APD の Darkcurrent のバイアス特性の変化のグラフをのせておく (図 4.19)。

しかしこれが検出効率についてはどのように反映してくるのかまだ不明である。そのことを調べるため、各 Array の中から特性によって立ち上がりの早いもの、平均的なもの、遅いものの三つのグループに分け、そのなかから代表的な ch をそれぞれ選択し、Efficiency のバイアス依存をみる。

### 4.5 検出効率とその criteria

検出効率の測定結果の前に検出効率の定義と算出方法について説明する。検出効率は以下のように定義される。

$$Eff. = \frac{N_{Hit} - N_{Fake}}{N_{Trigger} - N_{FakeTrigger}}$$

ここで  $N_{Hit}$  は現在標的として考えている Fiber 内のいずれかに Hit があった回数であり、 $N_{Fake}$  は、Signal がないときに、偶然に Noise が Signal としてカウントされているイベント数である。現在の場合、Threshold を 99.5 % と設定しているので、Fiber1 本あたり 0.5 % の確率で発生する Noise が偶発的に Signal の出ないときに発生した場合のイベント数を表している。 $N_{Trigger}$  は Trigger counter を通過することによるカウントであり、 $N_{FakeTrigger}$  は、Fiber を通過することなしに、Trigger counter を通過したためにカウントされてしまったイベント数を表している。しかし我々が物理量として理解しえる量は、 $N_{Hit}$  と  $N_{Trigger}$  だけである。この  $N_{Fake}$  と  $N_{FakeTrigger}$  の扱いについて以下のように考えた。

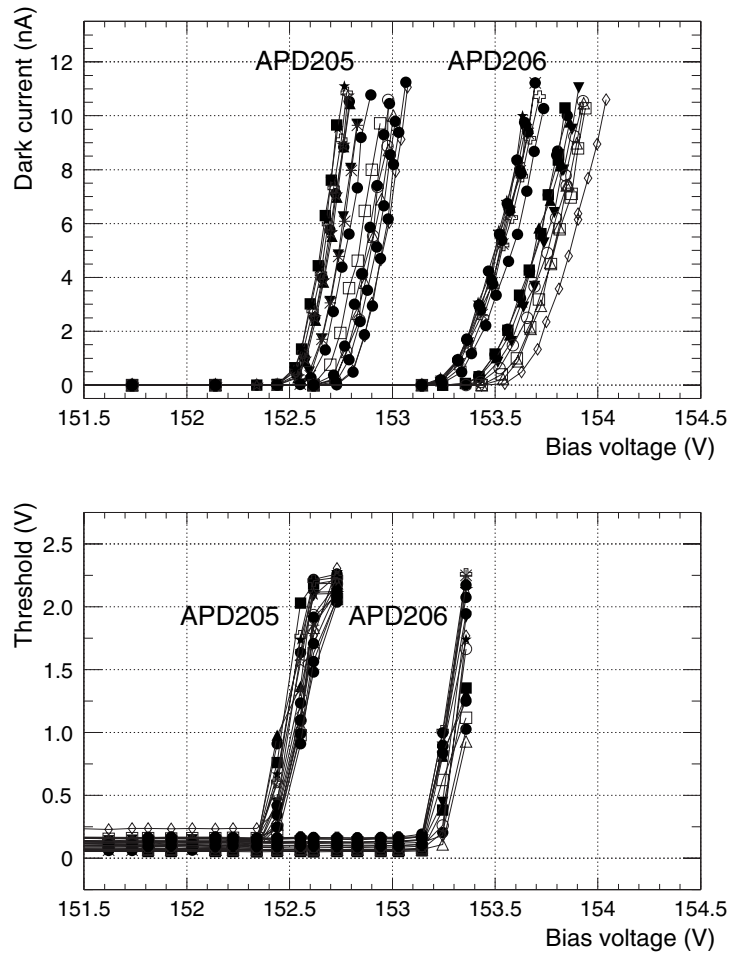


図 4.18: 上 Darkcurrent vs. BiasVoltage 下 Threshold vs. BiasVoltage (Threshold の方も DarkCurrent のデータを用いて抵抗分の電圧を補正済み)

#### 4.5.1 Fake Hit の扱い

正しい検出効率を  $E_r$ 、我々が BackGround を意識せず Fiber の Hit のみで考えた検出効率を  $E_{sur}$ 、Noise が Signal となる確率を  $P$  とすると、これらは次のような関係がある。

$$E_{sur} = E_r + (1 - E_r) \cdot P$$

検出効率の計算では Target 付近の 3 本の Fiber しか考慮に入れていないため、

$$P = 1 - (1 - 0.005)^3 \sim 0.015$$

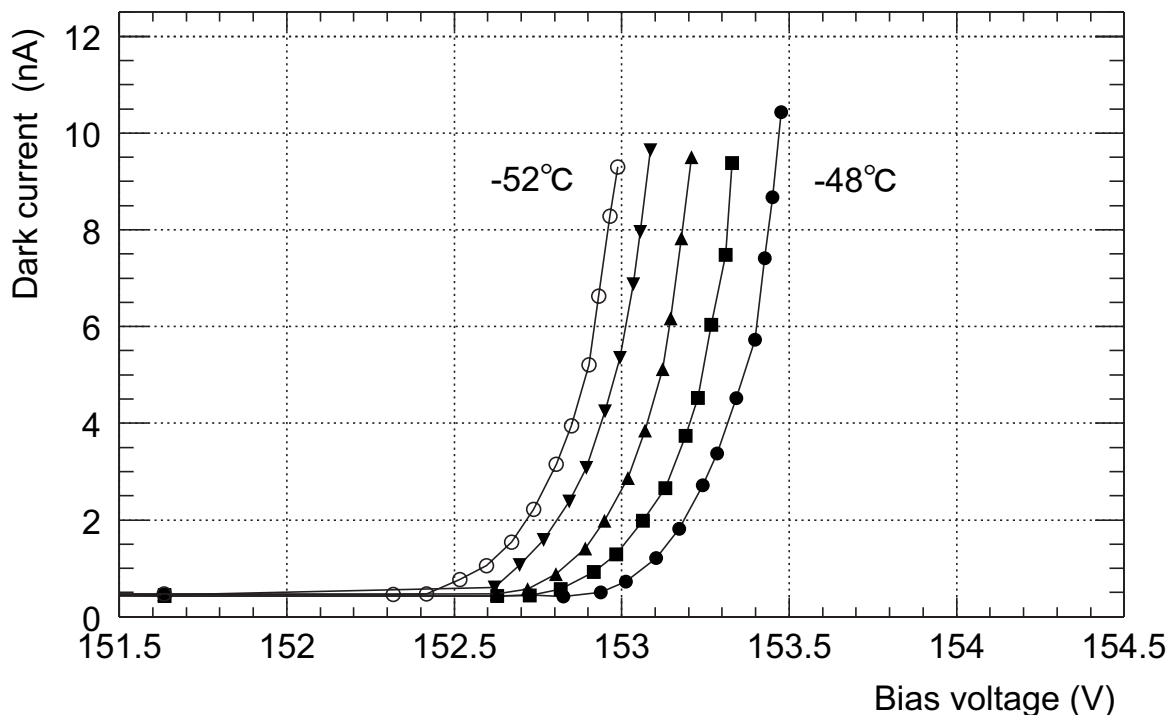


図 4.19: -50 付近における Darkcurrent のバイアス特性 ( APD 205 ch13 )

この 2 式を使って  $E_r$  を計算すると

$$\begin{aligned}
 E_r &= \frac{E_{sur} - 0.015}{1 - 0.015} \\
 &\sim (E_{sur} - 0.015) \cdot (1 + 0.015) \\
 &\sim E_{sur} - 0.015 \cdot (1 - E_{sur})
 \end{aligned}$$

ここで第二項目を  $E_{sur} = 95\%$  として計算すると、 $0.075\%$  となり、ほとんど寄与しない。したがって、検出効率の計算では Fake Hit の分を見積もって引き算をすることがは行わないことにする。

#### 4.5.2 Fake Trigger の扱い

Fake Trigger は当然、Trigger counter の geometry に依存しているので、図 4.17 の TYPE I, TYPE II について調べなければいけない。ただ TYPE I に関しては、すでに [11] で study されており、宇宙線の Trigger rate は  $34 \text{ event / hour}$  であり、そのほとんどが Fiber を通過することなしに、Trigger Counter を通過していると

いう結論になっている。そこで以降は TYPE II の Fake Trigger rate を見積もる。FakeTrigger がどの程度なのかを見積もるために、図 4.14 から  $\beta$  線源のみをはずして、VADAQ を一回の RUN の時間を 10 分に設定して 48 回の RUN、すなわち 480 分 APD に 151.5V をかけて -50 で測定を行った。コリメータの位置は図 4.16 でいえば、Fiber-6、APD でいえば、APD206 11ch の上にコリメータの隙間が来るように設置した。そして Fiber-6 周辺の合計 3 つの Fiber について、Hit があったのか、なかったのかを調べた。結果は以下ようになった。

	event	event / hour	rate
Total Trigger	237	29.625	
No Hit	230	28.75	97.04 %
Hit	7	0.875	2.95 %

ここから約 97 % は、Fiber の Layer を通らずに (また通ったとしてもターゲット周辺ではない)、Trigger Counter を通過していることが分かった。そして次に APD にバイアスをかけず、 $\beta$  線源も置かずに、Trigger counter を通過したもののみをスケーラーでカウントした。その理由は VADAQ は RUN の最中に Trigger を受けつけなくなり、つぎの RUN まで正常に Trigger を受けつけないということがあるので、正しい Trigger rate を求めることができるかどうか疑問であったからである。一回の RUN 時間を 10 分としたのはそういう経緯からくる。しかし Trigger を受けつけない時間帯があったとしても、上で求めた Hit と No Hit の比は正しいはずである。その結果を利用して、Fiber を通過せずに Trigger counter を通過する宇宙線の Rate を見積もる。3 時間 25 分 22 秒測定の結果、スケーラの値は 135 になった。よって

$$\text{宇宙線による Trigger rate} = 39.44 / \text{hour}$$

そしてこのうち 97.04 % が Fiber を通過せずに Trigger Counter を通過する event であるから、

$$\text{Fake Trigger} = 38.27 \pm 3.34 / \text{hour}$$

よって以下、TYPE II での検出効率の計算には Fake Trigger = 38.27/hour として計算する。

### 4.5.3 特性の違うチャンネルでの検出効率の違い

DarkCurrent や Threshold の立ち上がりによって決めた特性の違う 3 つのチャンネルで検出効率を測定したところ、図 4.20 のような結果となった。ここで検出効率は以下のように定義される。

この結果、測定した APD には確かに以前と同様に 4V 程度のプラトーが確認された。APD の特性はプラトーに比べて十分そろっている。これより十分同一バイアスで APD205,APD206 のすべてのチャンネルで高い検出効率を得ることが期待できそうである。

具体的に図 4.20 の 152.0V のときの APD205 ch5 のプリアンプの波高値分布を示したものが、図 4.21 である。APD205 ch5 は図 4.16 の Fiber 7 に接続されている。図をみると、Fiber7 から主に信号が出ていることがわかる。またその波高値をみると efficient な部分と inefficient な部分がはっきりと分かれているのを見て取ることができる。また Fiber7 の inefficient な部分のカウントがあったときの、Fiber6,Fiber8 の波高値は裾のほうののでている信号になっている。そしてそのまたとなりの Fiber5,Fiber9 に関しては信号はほとんど出ていない。よくみると多少出ている感じがするが、これはシグナルではなく、プリアンプ上のクロストークに相当しているだけである。これをみると検出効率が高く、またその結果が実際の geometry とよく対応していることが分かる。



Efficiency v.s. APD bias  
(spl-2368)

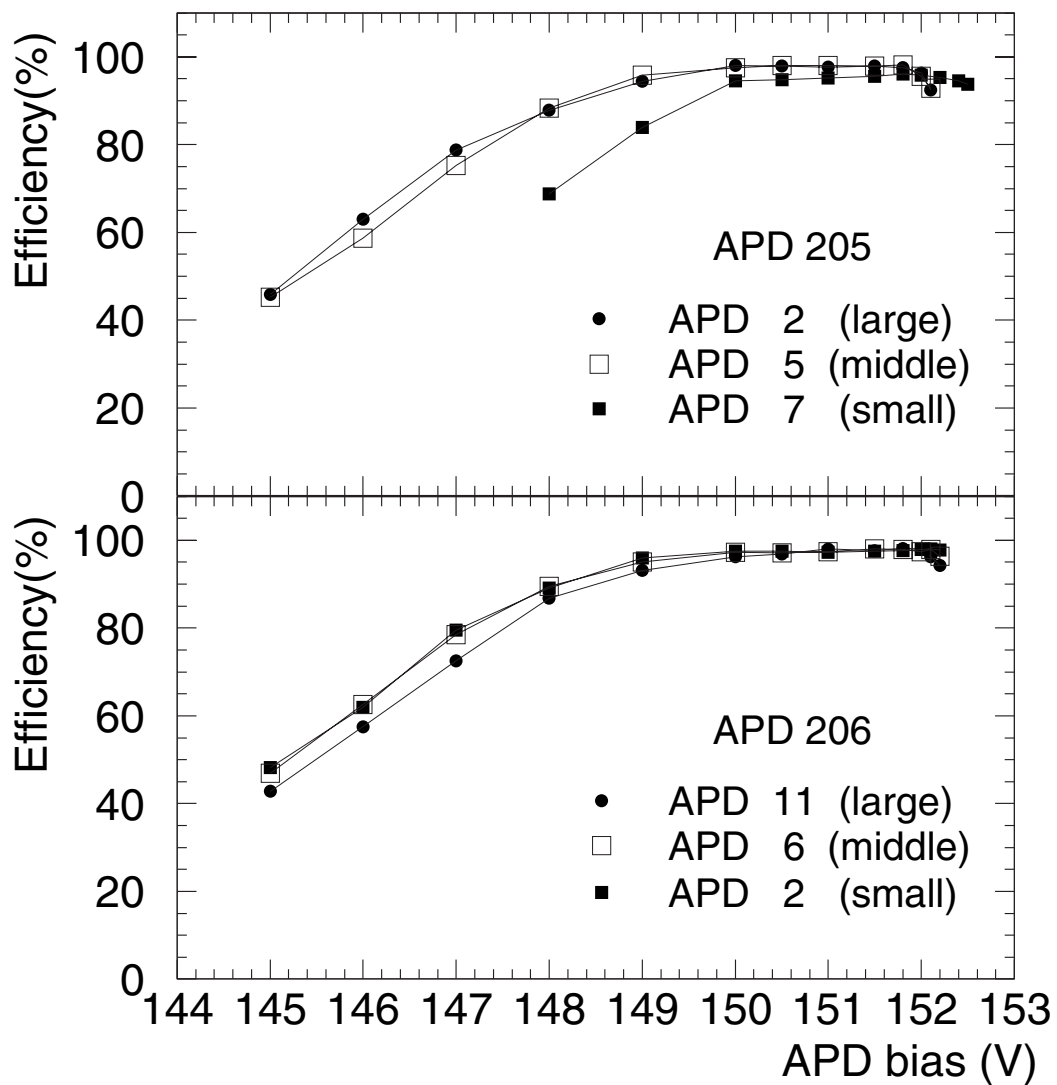


図 4.20: Array 内の特性の違いによって選択された ch で測定された Detection Efficiency vs. Bias Voltage

### 152.0V signal histogram (APD Array Sample1)

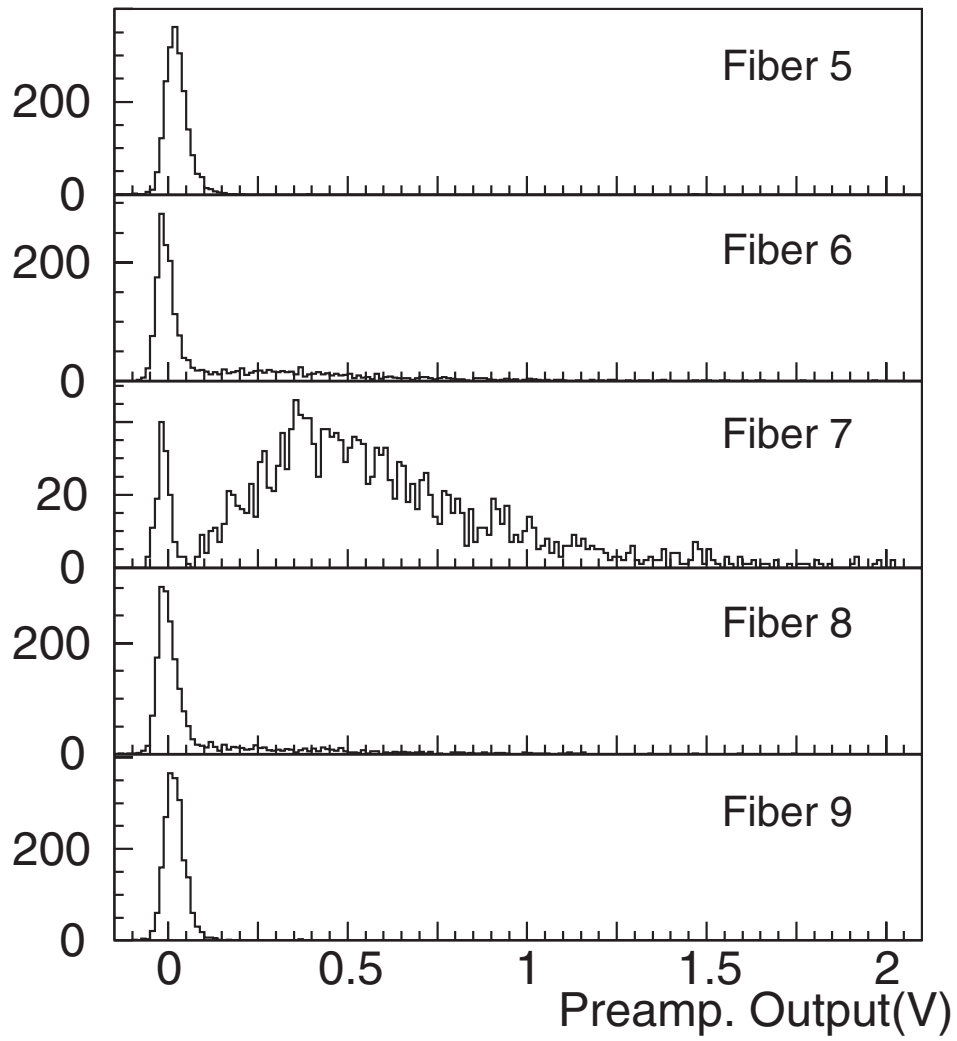


图 4.21:

## 4.6 同一バイアスにおける APD Array の読み出し

特性の違う三つのグループでの検出効率の測定より、測定したすべてのチャンネルでプラトーが APD の特性のばらつきに比べて十分長いことが分かった。したがって、我々は同一バイアスでの動作への見通しがついた。

図 4.20 をもとに、同一バイアスの測定として採用する APD の Bias Voltage の候補を探した。プラトーが十分長いため、すべての APD を動作させることができる Bias Voltage は複数存在するが、各 APD のプラトーがオーバーラップしている領域の真ん中あたりを選択するという理由で、ここでは 151.5V を採用することにする。ステッピングモーターを用いて、0.4mm ステップにコリメータを動かしながら、すべての SciFi に  $\beta$  線を照射していき、そのときの APD の応答をしらべ、検出効率を測定した。さらに、ここでは照射位置が Layer から離れたときの検出効率の低下をみるため、両端の SciFi からそれぞれ 0.4mm はなれた場所にも  $\beta$  線を照射している。したがって、合計 18ヶ所で検出効率を測定した。

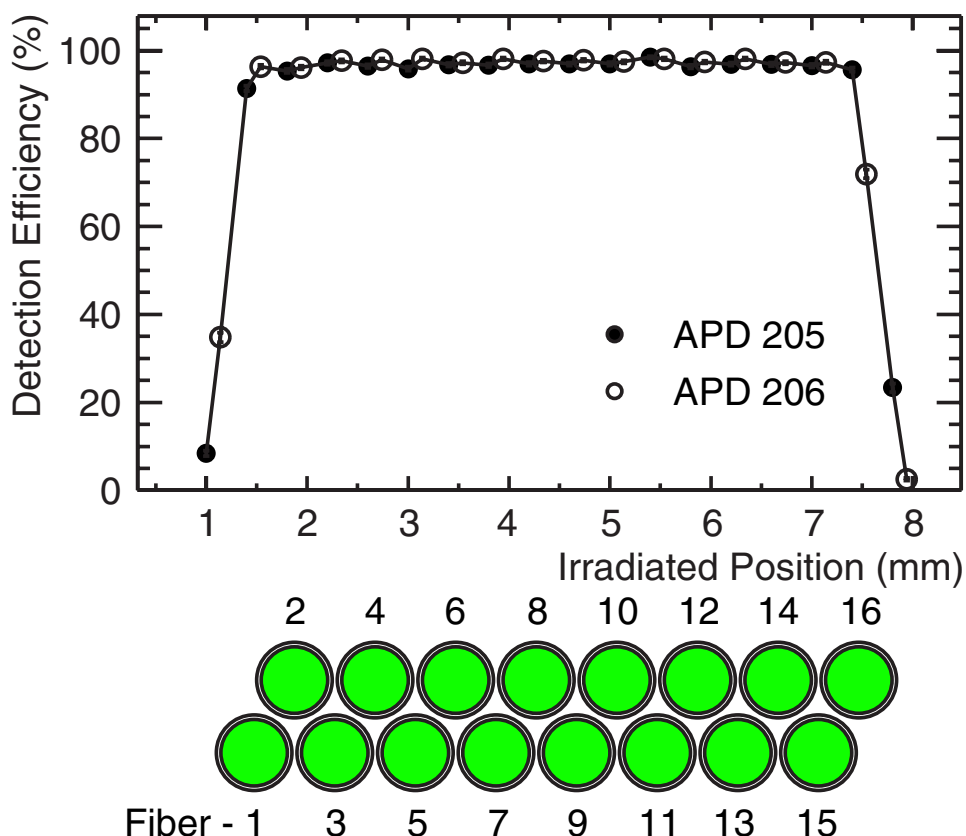


図 4.22: APD205, APD206 による Detection Efficiency vs. Irradiated Position (-50, 151.5V)

図 4.22 はその結果を示したものである。横軸は  $\beta$  線照射位置を示しており、mm

単位で表示されている。横軸の目盛りが 1,2,3,... とうってあるが、これは何かの基準点からの距離を意味したのではなく、相対関係を分かりやすく表示するために使われているだけである。

ステップモーターは、バックラッシュによる誤差が同一方向への移動時の誤差にくらべて大きいので、 $\beta$ 線の照射は、Fiber-1の0.4mm外側のほうから0.4mm(ステップモーターでは400pointに相当)ずつ照射位置を移動させていった。

APD205,APD206とも照射スタート時の座標が図4.22のIrradiated Position 1mmのところに来るようにして、Detection Efficiency vs. Irradiated Positionのグラフを書くと、両者のグラフは横軸方向に平行移動させた形になっていた。これを照射スタート時の位置が異なっていたためだと解釈し、APD205のスタート時の照射位置を1mmに固定したまま、APD206のグラフを横軸正の方向に平行移動させたところ、0.14mm移動させたときに、図4.22のように両者はほぼ一致した。また参考のためにグラフ下部には0.4mmピッチで並んでいるSciFi Layerの絵を載せた。

この結果から、両端のSciFiを除いたすべての位置で一様にほぼ100%の検出効率を得ることができた。両端についてもAPD205のFiber-1の外側とFiber-1での検出効率から内挿される点にAPD206のFiber-1での検出効率が存在している。また逆にAPD206のFiber-16とFiber-16の外側で内挿される点にAPD205のFiber-16での検出効率が存在している。このことは一般的にはAPD205とAPD206が検出効率に関して同レベルの性能をもっていると結論付けられるが、偶然の一致ではなく、他のSciFiでほぼ100%の検出効率を出していることから、Fiber-1,Fiber16に関しても通過した粒子に関してはほぼ100%の検出効率で検出されていることが予測され、これはそのことを示唆している間接的な証拠となっている。

さらにSciFi Layerの実際の照射位置をしらべるため、図4.22に通過するcoreの長さを重ね合わせたグラフをのせた。それが図4.23である。

このグラフも同様に横軸の1mmのところ、Nominalでは、Fiber-1から0.4mm外側の部分がきているはずだが、これはAPD205,APD206の検出効率の結果に対応しないものとなってしまふことから、SciFiの位置に関しても検出効率と対応した関係になるように、Nominalな位置から位置をシフトしていった、最適と思われる場所を決定した。そのグラフが図4.23である。最適と思われた位置へもっていくために、SciFiはNominalな位置から横軸正の方向に0.03mm移動させた。この計算を事前にしており、この結果を図4.22のSciFiの位置にすでに適応している。

さらにこのときの各APDの信号についてのstudyを深めるため、このときの各APDのGainについて調べた。それを表しているのが、図4.24である。

図4.24の横軸は今までのグラフ同様に $\beta$ 線の照射位置を示している。縦軸は、Threshold99.5%以上の波高値をLandau distributionでFitを行って、それによって求められたMPV(Most Probable Value)をもって、Gainの比較を行った。VAのGainのばらつきはそれほどないことから、これはAPDのGainのばらつきを

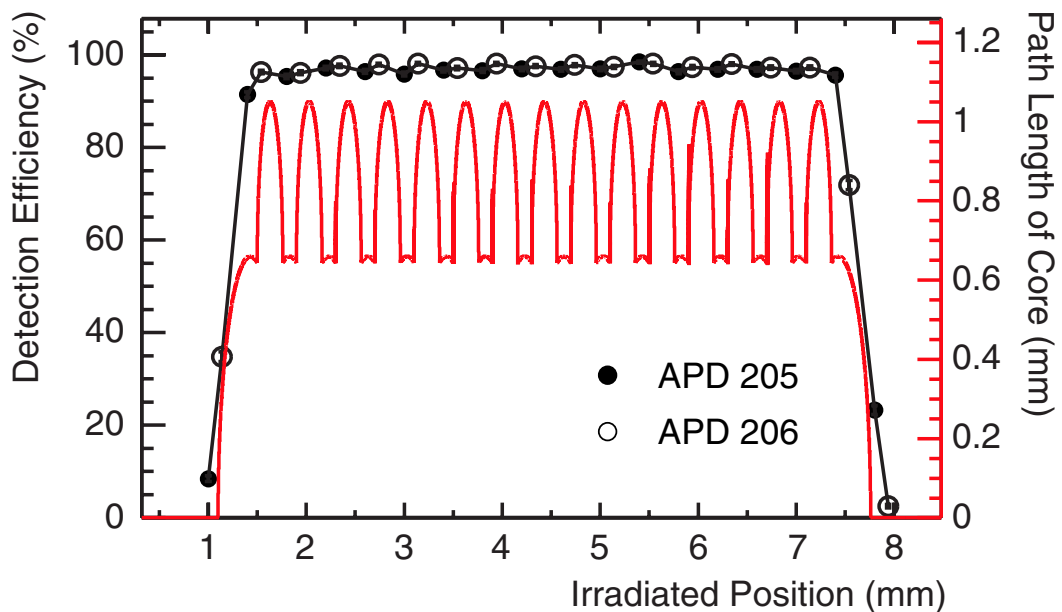


図 4.23: Detection Efficiency vs. Irradiated Position and Path Length of Core vs. Irradiated Position

みていることに相当する。両端の SciFi のさらにその外側に  $\beta$  線を照射したときの MPV はイベントが少ないため  $\chi^2$  があまりよくなかったので、図 4.24 には載せていない。

まず図 4.24 をみて分かることは、APD205 と APD206 について 2 倍程度の系統的な Gain のばらつきがあるということである。縦軸は間接的に APD の Gain のばらつきをみていることになるが、本来 APD205 のほうが、APD206 よりの DarkCurrent の立ち上がりが早いため、APD205 のほうが Gain が大きくなるはずである。

このことを確認するために検出効率を測定した際の Threshold の立ち上がりを図 4.25 に示した。ちなみに APD205 での測定は、2001/9/13 日、APD206 での測定は 2001/11/19 日である。これをみると、APD206 の方が立ち上がりが早くなっているのが分かる。この要因についての議論は第 9 章ですが、とにかく APD206 のほうが立ち上がりが早いので、Gain が APD205 に比べて全体的に大きくなり、図 4.24 のような結果となったと解釈するべきだろう。

また図 4.24 をみてわかることは、APD205 は通過するコアの長さが、小さいところで照射していることが分かる。また APD206 の照射位置は上の議論で APD205 よりも 0.14mm ずれていることから APD205 よりもより長くコアを通過していることも Gain の大きさのちがう原因のひとつであろうと考えられる。このことを別の角度から検討するために、 $\beta$  線を照射した箇所周辺の Hit 数を表にしてみた。それが表 4.3、表 4.4 である。ここまでの話で、APD205 には Target の両隣はほぼ同程度信号が出ており、APD206 は片方に信号が多くでているという予想されるが、表 4.3、表 4.4 には、若干そういった傾向が見られるものの大きな違いはない。こ

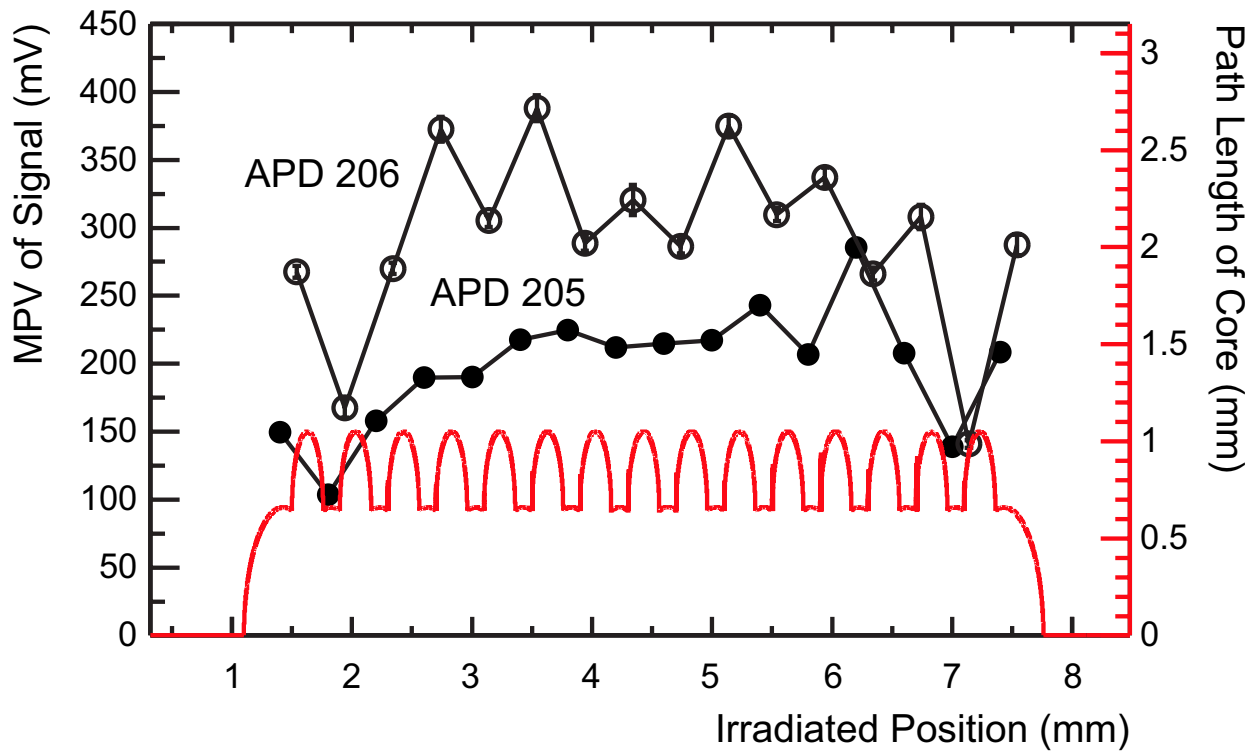


図 4.24: Most Probable Value (MPV) of Preamp. vs. Irradiated position

これはファイバーの製作の誤差からくるものであろうと考えられる。ファイバーの製作はまず、アルミの上に予め彫ってある溝にファイバーをならべ、singletのファイバーをつくる。そしてsingletを二つ人の手で組み合わせ、一つのLayerをつくるので、同一singletの水平方向の位置精度はいいものの、singlet-singlet間の垂直方向の位置精度はよくない。このことも表から読み取れる。したがって、特にAPD206のGainに関して、一つ飛ばしに大きなGainがでている理由の一つとして、Layerの上側singletは通過するコアの長さがピークに近いところに存在している。

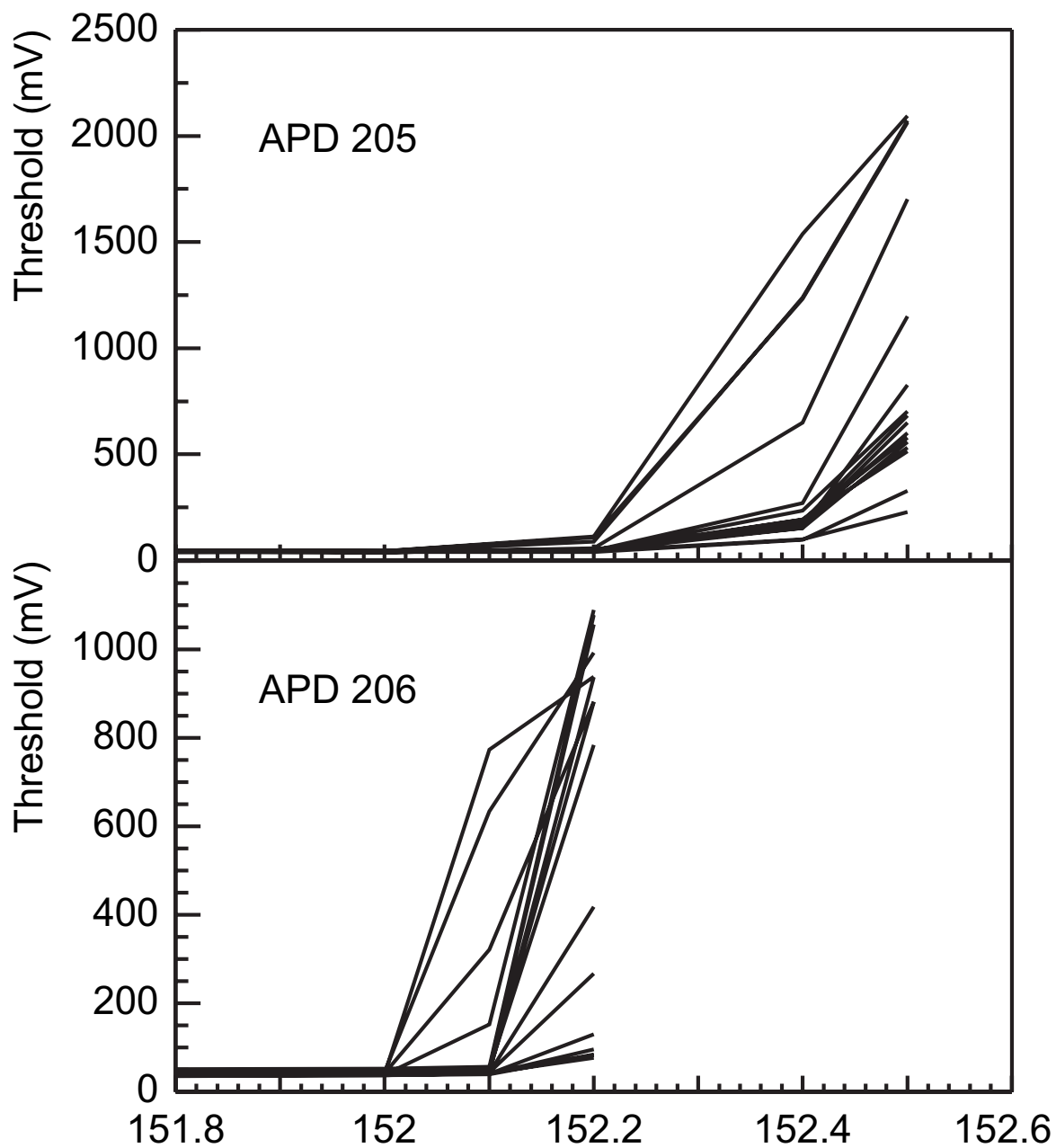


図 4.25: 同一バイアス (151.5V) での検出効率測定時の各 APD Array の Threshold

表 4.3: APD 205 の Target 周辺の Hit event 数と Multiplicity

Fiber	Hit	Left Hit	Right Hit	Multiplicity			
				0	1	2	3
1	1791	-	416	203	1387	410	-
2	1732	1191	301	130	708	970	192
3	1795	873	492	96	791	970	143
4	1808	1345	327	105	533	1139	223
5	1775	981	664	120	548	1124	208
6	1852	1313	211	98	490	1350	62
7	1855	594	689	102	783	990	125
8	1846	726	700	93	640	1169	98
9	1855	1059	461	96	572	1193	139
10	1818	1056	301	95	765	1010	130
11	1867	1003	637	64	529	1243	164
12	1830	1314	607	104	463	1011	422
13	1864	825	864	98	604	945	353
14	1844	919	579	94	741	894	271
15	1824	804	987	105	445	1180	270
16	1868	664	-	114	1240	646	-

表 4.4: APD 206 の Target 周辺の Hit event 数と Multiplicity

Fiber	Hit	Left Hit	Right Hit	Multiplicity			
				0	1	2	3
1	1879	-	1175	92	762	1146	-
2	1703	695	811	96	897	709	298
3	1904	985	1278	66	484	667	783
4	1798	773	809	60	765	910	265
5	1907	1047	1478	55	334	735	876
6	1719	674	889	72	707	1088	133
7	1857	740	1484	73	413	874	640
8	1614	484	1520	64	519	1152	265
9	1880	784	1296	61	443	971	525
10	1753	485	926	68	877	878	177
11	1906	686	1451	55	347	1098	500
12	1721	778	1172	69	594	934	403
13	1823	1148	1653	55	280	651	1014
14	1637	417	1204	72	801	924	203
15	1684	997	1685	71	288	865	776
16	1424	104	-	571	1330	99	-



表 4.5: DarkCurrent, Threshold の立ち上がり早い順 (APD の ch で与えてある)

order	DarkCurrent		Threshold	
	APD 205	APD 206	APD 205	APD 206
1	9	10	2	9
2	10	11	3	11
3	2	8	1	10
4	11	9	4	12
5	3	12	5	8
6	1	13	6	13
7	12	14	12	14
8	4	15	14	15
9	5	16	11	16
10	13	7	9	7
11	14	6	13	6
12	6	5	10	3
13	15	4	16	5
14	7	3	15	2
15	8	2	7	1
16	16	1	8	4

# 第5章 Additional study for tracking test

## 5.1 Cross talk on Preamp

粒子の Track を再構成する際、まず各 Layer の Hit 情報を用いて、Layer での Hit point を決定しなければならない。ここで、現在 Preamp として使ってきた VA32C には入力信号に対して Cross talk が存在することが分かっており、実際には各 Layer に最大 2 の Multiplicity しかないはずであるが、実際には Cross talk の影響で Multiplicity が増大することが予想される。解析に Cross talk を考慮するにしろ、しないにしろ、Cross talk の影響を知っていなければならない、よって、ここでは Cross talk が入力信号に対してどのような性格をもっているのかを調べる

### 5.1.1 Crosstalk study by experimental data

Tracking Test と同じ構成で実験を行い、そのデータを下に Cross talk について study した。

ここで注目することは、32ch ある Preamp の ch11 と ch22 はどこにも接続されておらず、それ以外のチャンネルは SciFi, APD に接続されているということである。従って、隣り合うチャンネルとの波高値の関係を見ることで Crosstalk について study することができる。

図 5.1 の上側は、横軸に信号を入力している ch10 の波高値、縦軸に ch11 の Preamp. 出力をみている。下側は、横軸に信号を入力している ch12 の波高値、縦軸に ch11 の Preamp. の出力をみている。どちらも入力側の信号が Threshold (99.5 %) を超えたときのみプロットしている。

図 5.2 は図 5.1 で Fit した直線に対する Residual 分布を見たものである。

ここからおよそ Cross talk は入力信号に対して 5 % 程度の大きさの信号が現れており、また信号の大きさについては 10mV 程度のばらつき存在することが分かった。

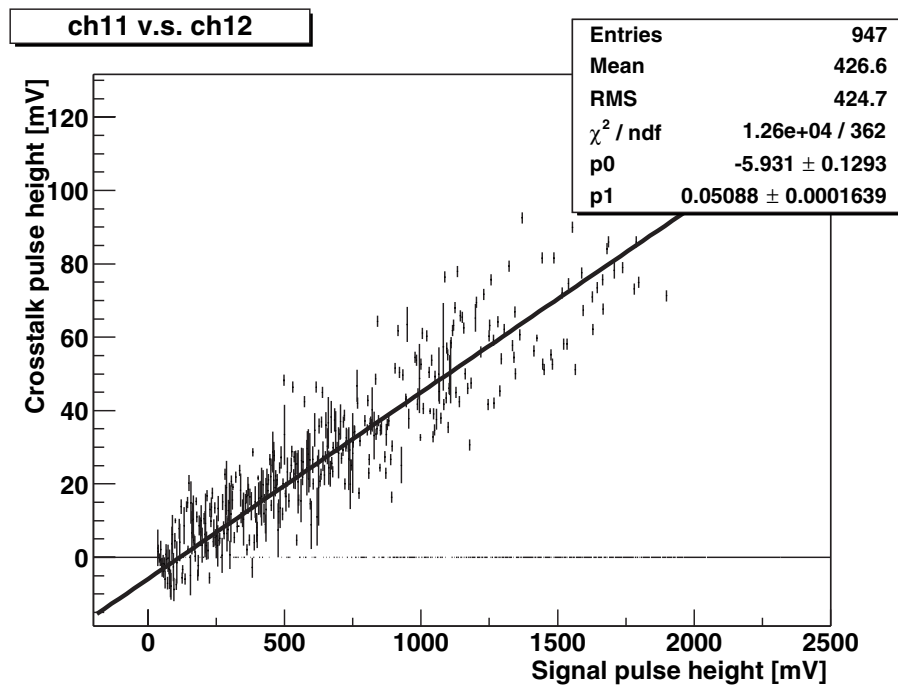
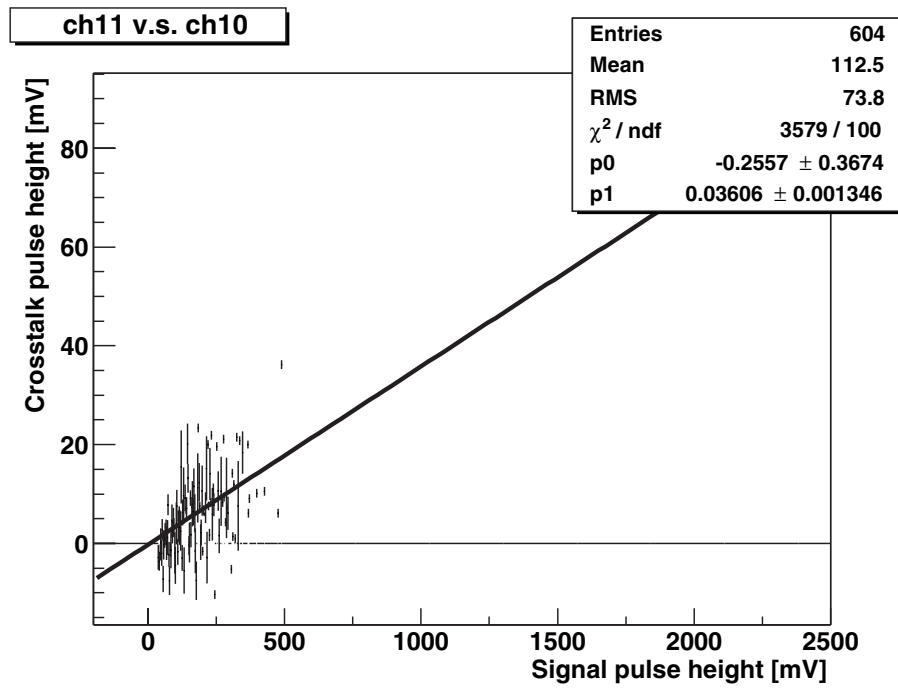


図 5.1: 上側 : Crosstalk vs. ch10 output、下側 : Crosstalk vs. ch12 output

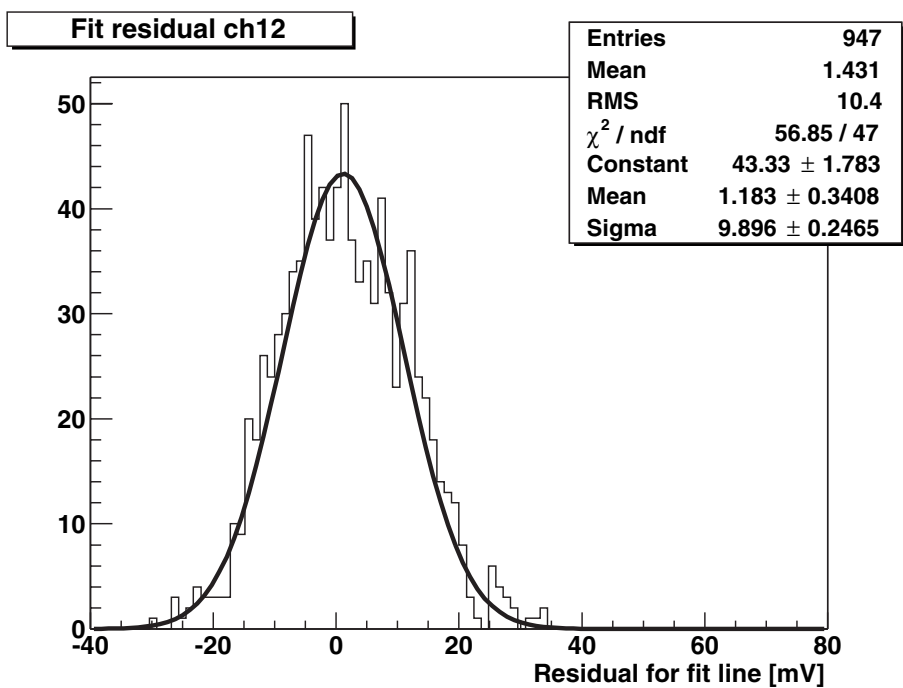
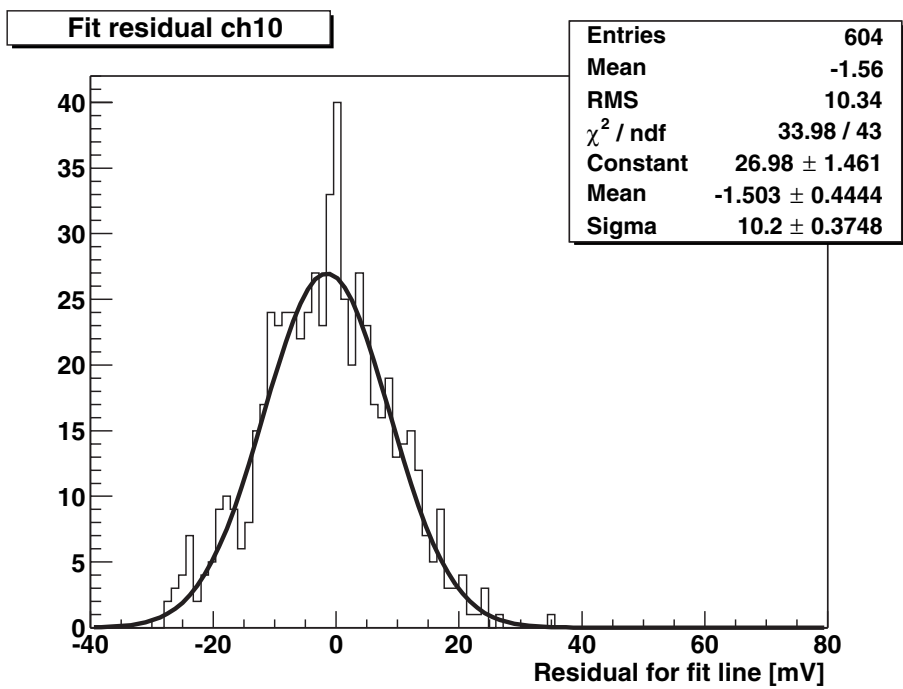


図 5.2: 図 5.1 で Fit した直線に対する Residual 分布

図 5.3 の上側は、横軸に信号を入力している ch22 の波高値、縦軸に ch21 の Preamp. 出力をみている。下側は、横軸に信号を入力している ch23 の波高値、縦軸に ch22 の Preamp. の出力をみている。どちらも入力側の信号が Threshold (99.5 %) を超えたときのみプロットしている。

図 5.4 は図 5.3 で Fit した直線に対する Residual 分布を見たものである。

ここで得られた結果も ch11 で得られた結果と同様の結果を得ることができた。

つぎに両隣に信号が入力されたときにどのような出力をするのかを調べた。図 5.5 の上側は、ch11 の両隣 ch10, ch12 が Threshold 以上の信号を出したときの ch11 の出力をみたものである。横軸は ch10 と ch12 の出力の和を与えている。下側は、ch22 の両隣 ch21, ch23 が Threshold 以上の信号を出したときの ch22 出力をみており、横軸には ch21 と ch22 の出力の和を与えている。

図 5.6 は図 5.5 で Fit した直線に対する Residual 分布である。イベントの数が少ないのではっきりしたことはいえないが、これらから Crosstalk は両隣の信号でそれぞれ期待される cross talk が、その和の形で現れるということがいえる。

よって図 5.7 ではすべてのデータをあわせて、ch11 vs. ch10 + ch12 と ch22 vs. ch21 + ch23 のグラフを重ね合わせ、それを直線で Fit したあと、Residual 分布をとった。

ここから VA32C の Crosstalk を以下のように決定した。

$$\text{Crosstalk} = 0.04705 \times \text{output} - 0.9484 \text{ [mV]} \quad \sigma = 10.48 \text{ mV}$$

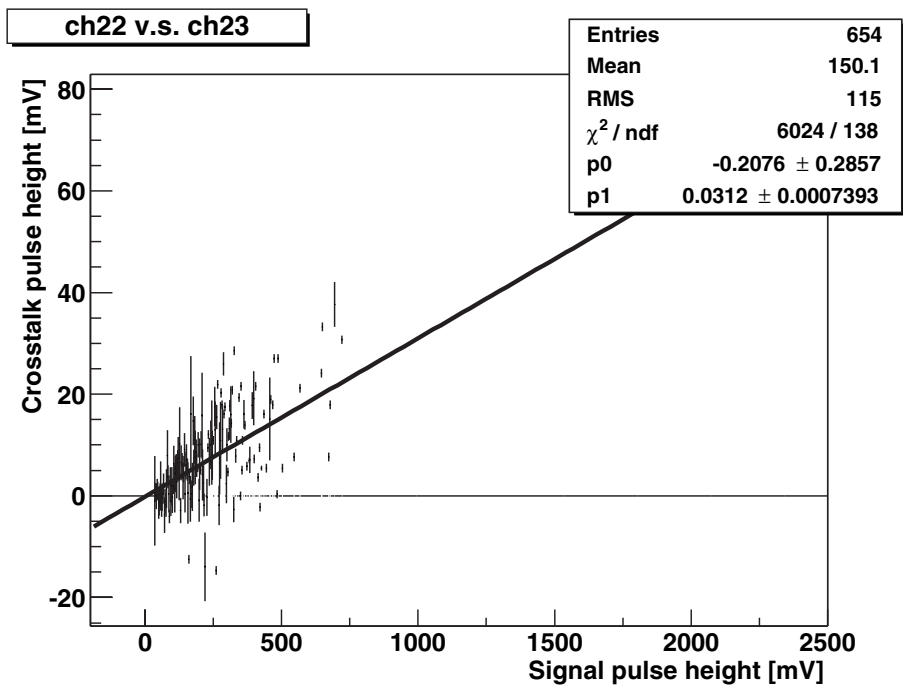
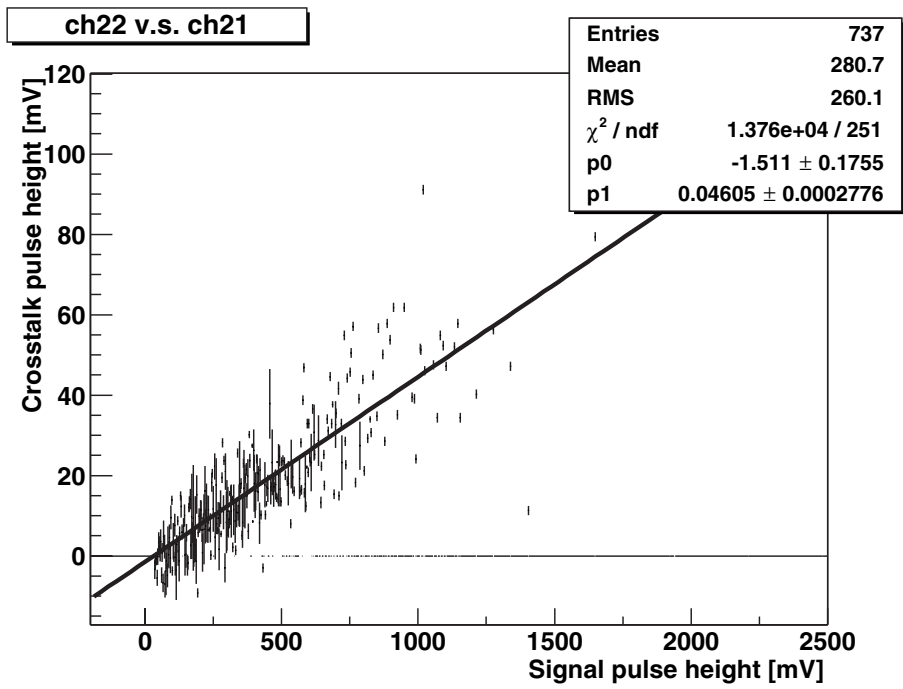


図 5.3: 上側 : Crosstalk vs. ch21 output、下側 : Crosstalk vs. ch23 output

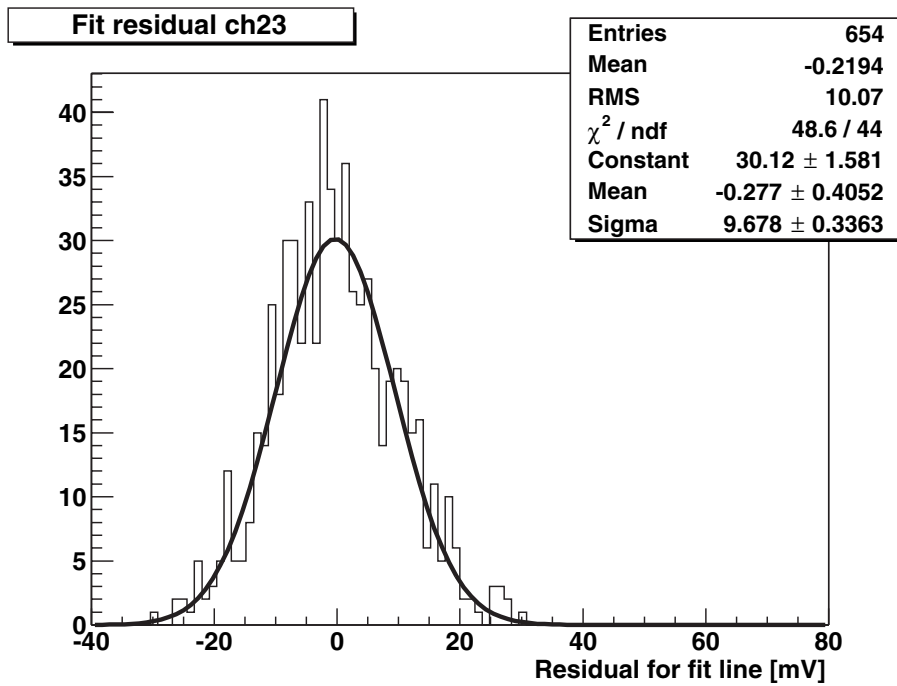
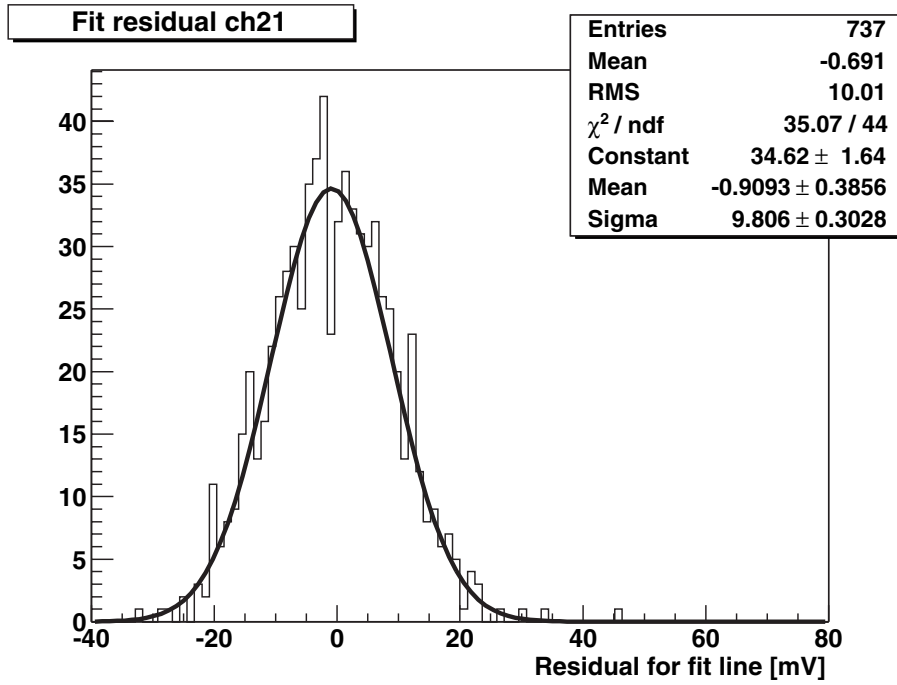


図 5.4: 図 5.3 で Fit した直線に対する Residual 分布

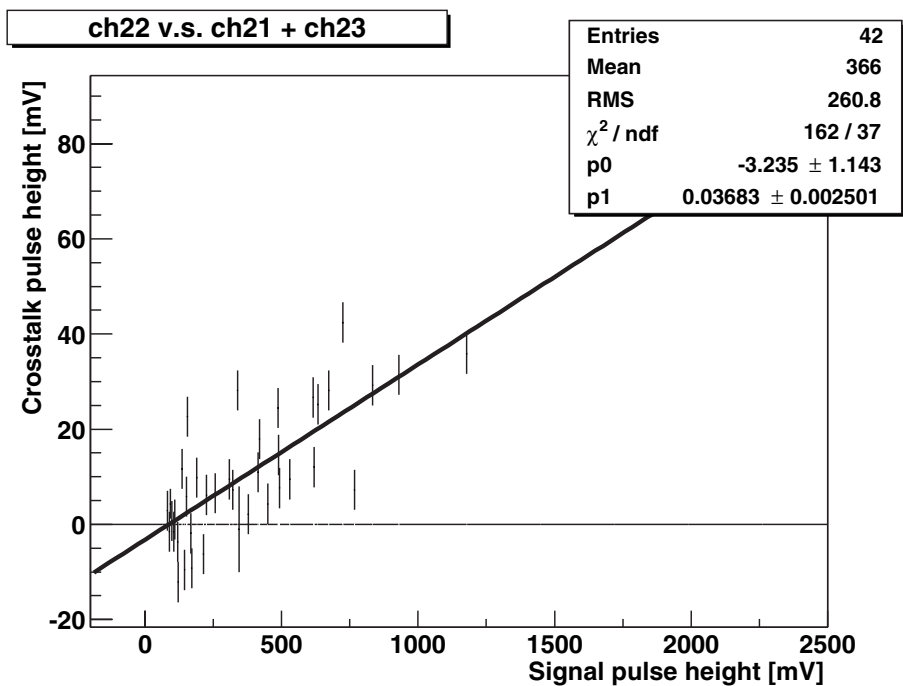
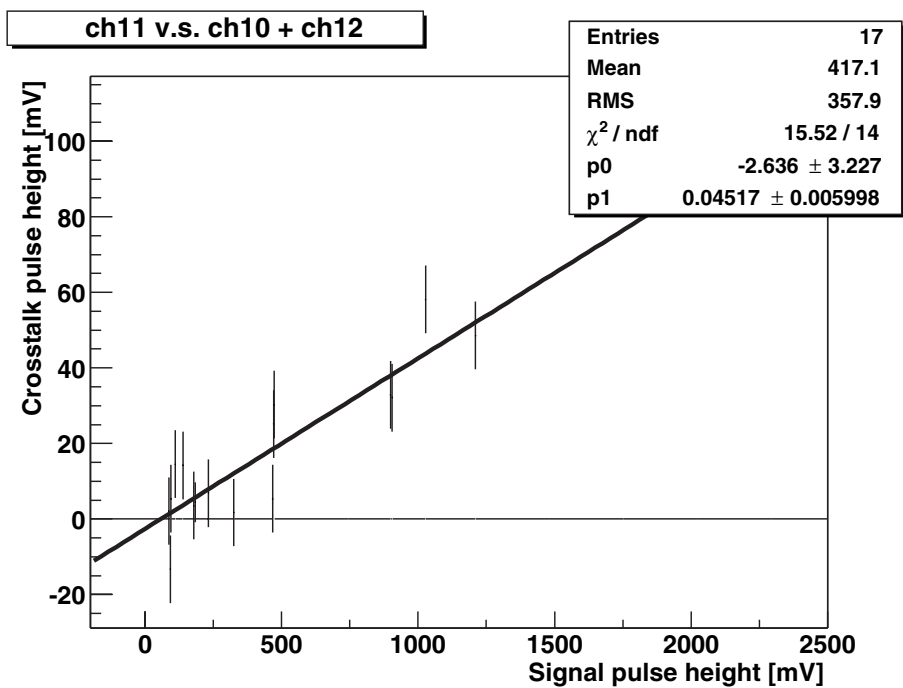


図 5.5: 上側 : Crosstalk vs. ch10 + ch12 output、下側 : Crosstalk vs. ch21 + ch23



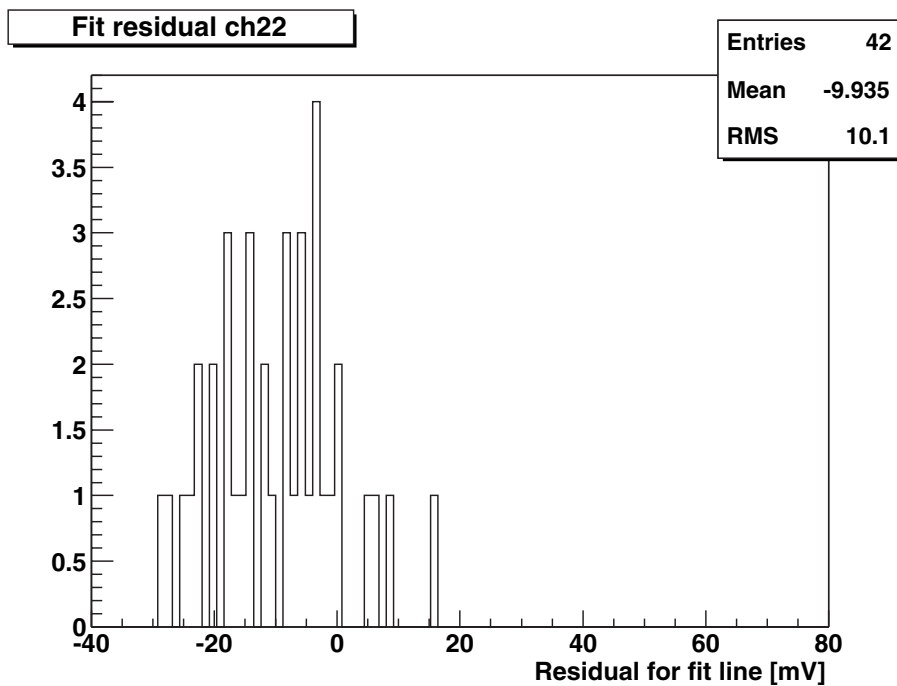
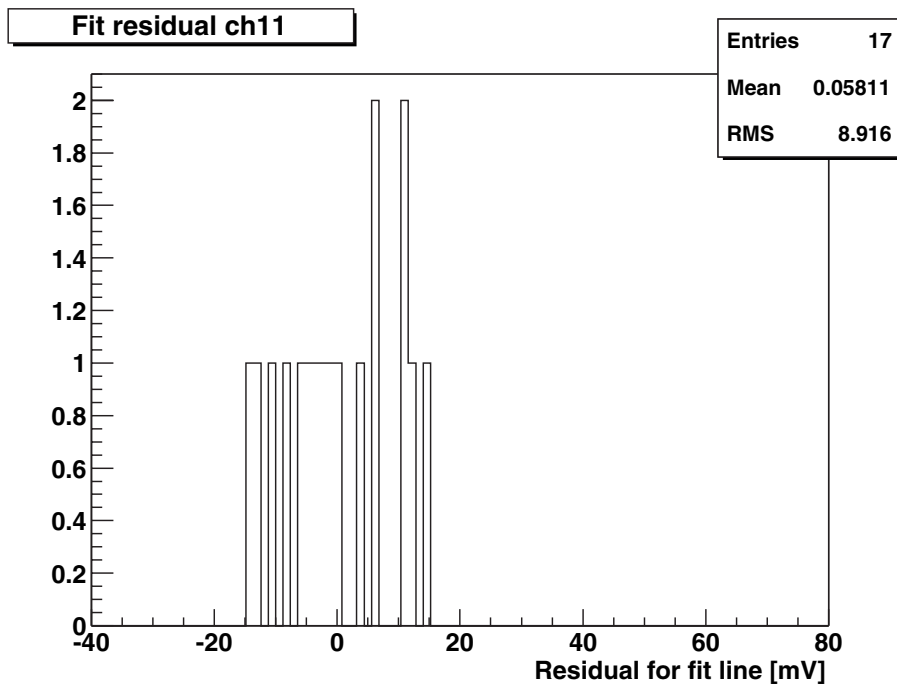


図 5.6: 図 5.5 で Fit した直線に対する Residual 分布

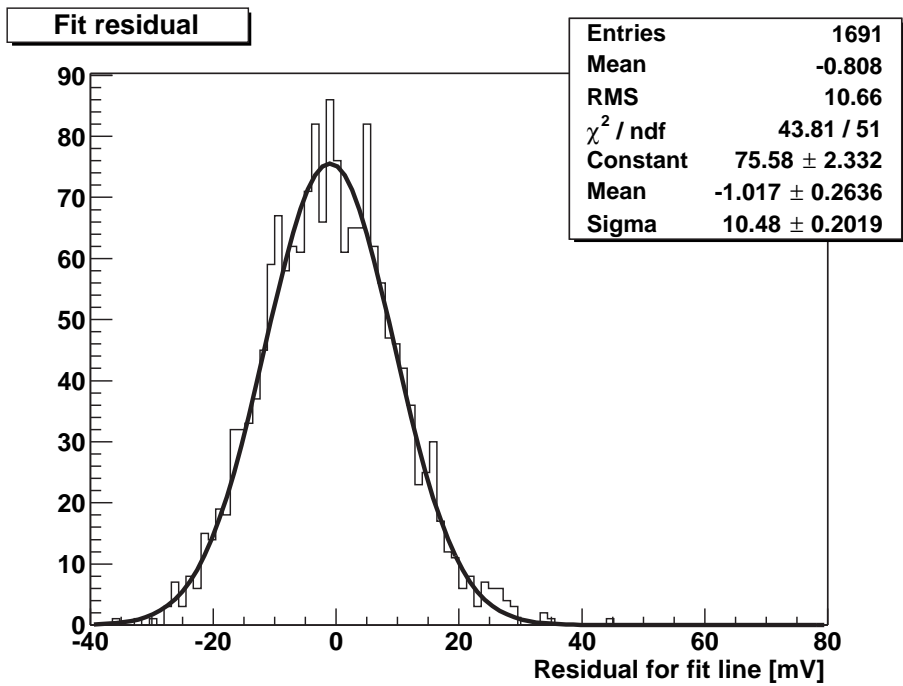
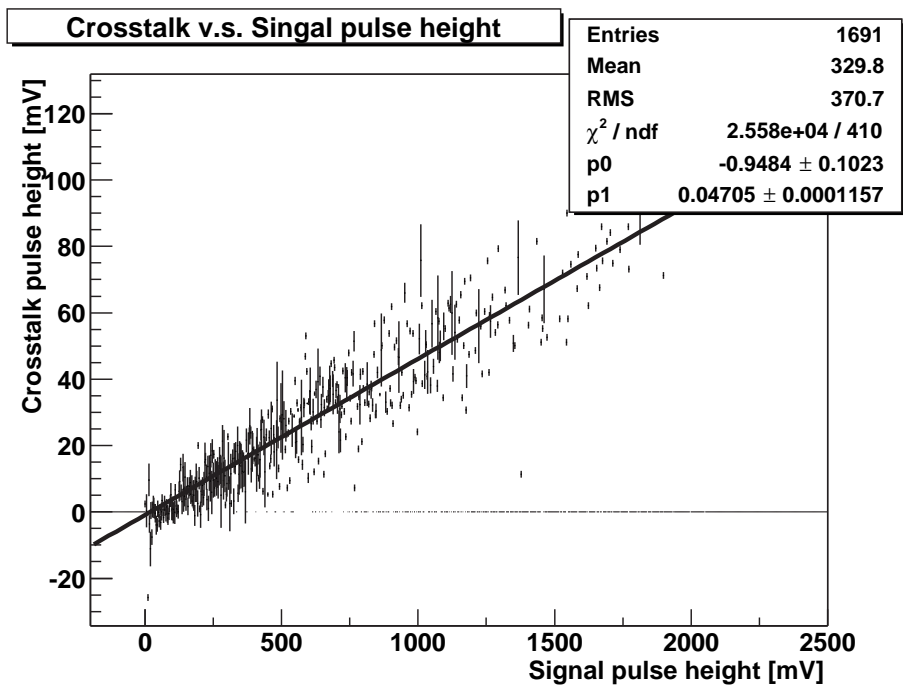


図 5.7: 上側 : Crosstalk vs. output、下側 : 上で Fit した直線に対する Residual 分布

## 5.2 Threshold に対する再議論

ここでの実験では Threshold を 99.5 % に設定してきた。この Threshold で検出効率がほぼ 100 % というのは決して他の中央飛跡検出器に劣るものではない。ただ SciFi Tracker 自身の性能をより上げるために Threshold 自身に対して再議論をすることは有意義である。

Threshold の効果は Noise occupancy に表れる。SciFi の数が 100 万本だったとすると、Threshold を 99.5 % したときには、平均 5000 本が粒子が通過してないにもかかわらず、信号を出す。これが Threshold を 0.1 % 上げて 99.6 % にしただけで平均 4000 本に減らすことができる。ただ 1000 本減らすことができたからといって、その効果は単純ではない。Noise による信号が Fake のイベントとなりうる可能性として、たまたま Fake の Hit が曲線を描き、その Track が興味のある lepton のコーンに存在し、vertex detector の Track との matching している場合がある。

こういった可能性を少なくするために、検出効率を高く維持したまま、Threshold をどこまであげられるのかをいうことを検討する。

まず、前章での 151.5V に固定したデータを用いて、特性の違いによって分けられた 3 つの部分に関しては 100 % noise を exclude する値にしても十分な検出効率を得られた。これはもともとの Noise 測定のデータの量が 10000 イベントしかないのであまり精度の高いものではない。

そこで 151.5V のときは、ブレークダウンからまだ十分離れているので、ノイズの形もガウス分布に近い形になっている。よってこのシグマを用いて検出効率の低下と Threshold の関係について調べようと思う。

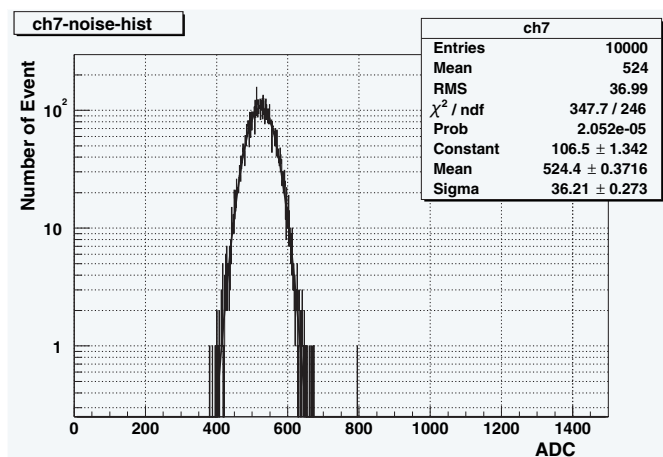


図 5.8: APD205 ch7 のノイズヒストグラム

Threshold を以下のようにして、検出効率の変化を調べた。

$$\text{Threshold} = \text{Pedestal} + \sigma_{\text{noise}} \times \text{Factor}$$

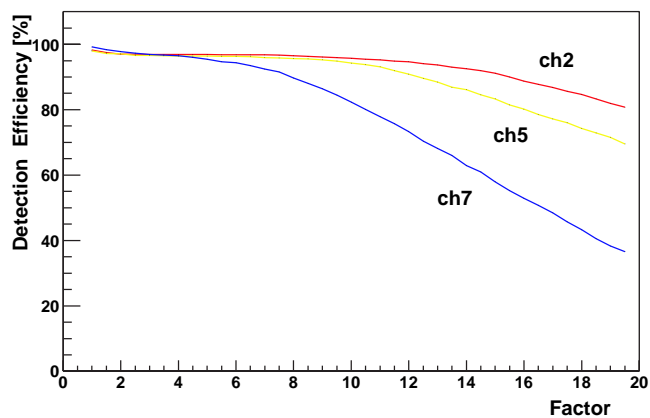


図 5.9: APD205 の Detection Efficiency vs. Threshold

実際 Threshold を決めるのは、単に検出効率からだけではなく、APD の特性のばらつきに対してプラトーをどの程度長くしなければならぬか、など様々な要因があるので、すぐに最適な Threshold を決める事は容易ではないが、少なくとも検出効率の点からすればまだ余裕があることが分かった。

## 第6章 Tracking Test

この章での目的は、Tracking Efficiency を考えることである。ここで Tracking Efficiency は、他の2つの Layer に hit が存在したときに、その Hit 情報によって、残りの Layer 上に内挿または外挿された点のある許容範囲内に hit が存在する確率と  
いうように定義する。

実験のセットアップは、SciFi Layer の読み出しのときと基本的には同じである。ただ Tracking をしているので、SciFi Layer の数や、トリガー部分が変わっている  
ので、そのあたりの説明をしておく。

表 6.1: Detector Major Parameter

SciFi の全長	253 cm
Trigger した領域の長さ	19 cm
Trigger した領域	APD 受光面から 229cm - 248cm
SciFi Layer の間隔	12.5 mm

表 6.2: SciFi, Sensor description

Trigger	
SciFi	SCSF38-M ( $\phi$ 0.75mm ) [KURRAY]
Sensor	PMT $\times$ 2 (Operating bias 1000V both way) [HAMAMATSU]
Number of SciFi	34 (8 + 9 + 8 + 9) $\times$ 2
Signal	
SciFi	SCSF-3HF(1500)M ( $\phi$ 0.75 mm ) [KURRAY]
Sensor	APD $\times$ 3 (APD 205, APD 206, APD207) Operating bias 151.0V [HAMAMATSU] Operating temperature - 49.5
Number of SciFi	(10+7) $\times$ 3 ( Readout only 10 fiber, Othres are not)

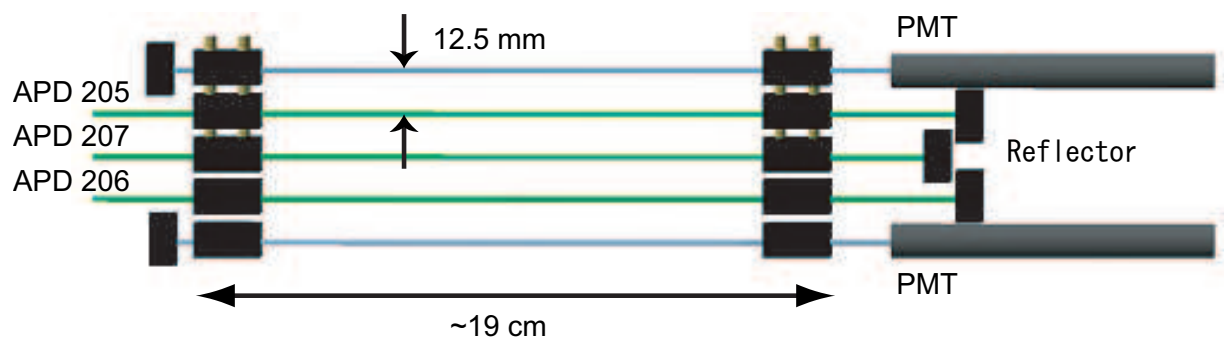


図 6.1: Trigger 部分を横から見た図

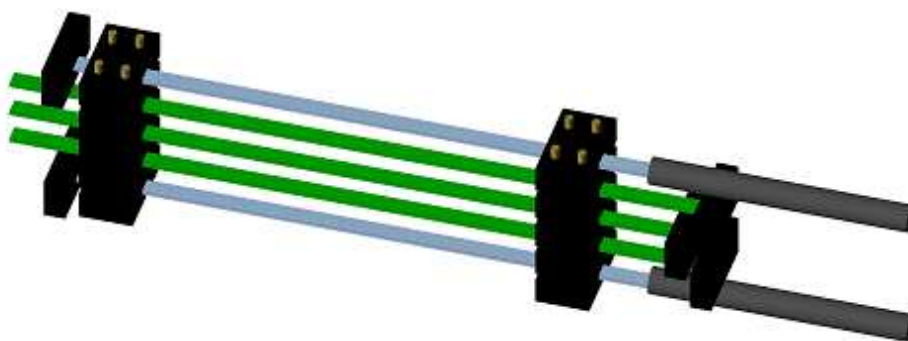


図 6.2: Trigger 部分を立体的に見た図

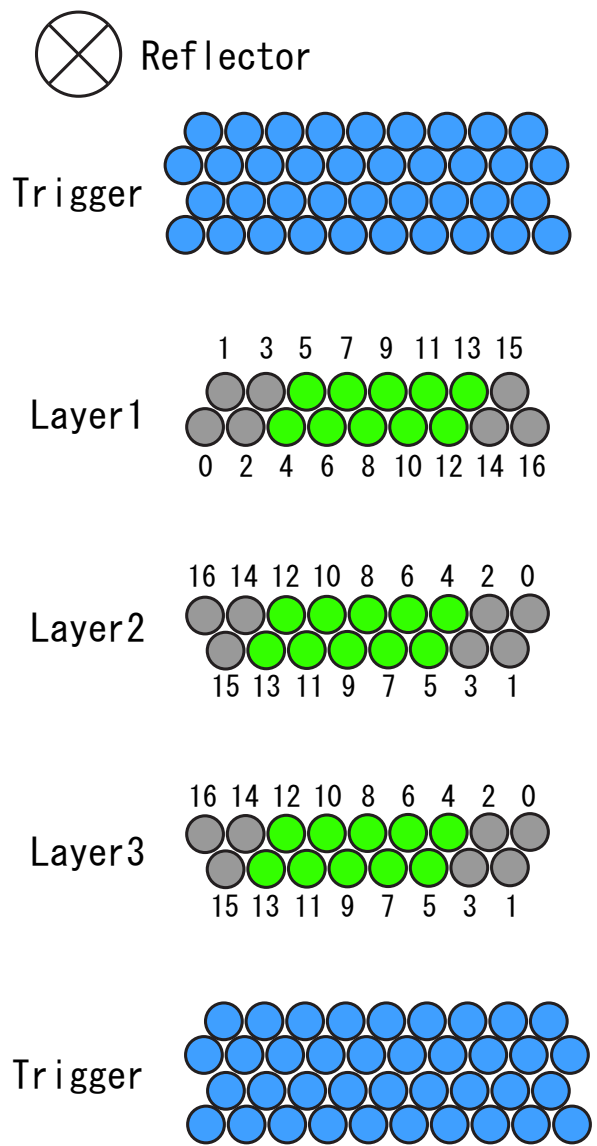


図 6.3: Trigger している部分の断面図 ( 緑色の部分が読み出し可能な SciFi、灰色は APD とは接続しているがプリアンプとは接続されていない SciFi、青色は PMT で読み出される SciFi ( ただし Fiber-0 は APD とも接続しておらず、真空容器の直前で切断されている dummy fiber である。Fiber-0 は安定した Layer をつくるのに役立っているのみならず、他の Fiber を位置を知る目印にもなっている。これは APD との接続のときに役立つ。)

表 6.3: Preamp, Fiber, APD のチャンネルの対応表。Preamp は入力部分を手前にして左から 1ch, 2ch, 3ch ... と数える。Fiber 番号は図 6.3 で割り振った番号。APD は浜松が割り振った番号に対応。

Preamp ch	Layer	Fiber No	APD No	Preamp ch	Layer	Fiber	APD No
1	3	4	15	17	2	9	5
2		5	3	18		10	12
3		6	14	19		11	6
4		7	4	20		12	11
5		8	13	21		13	7
6		9	5	22	No connected		
7		10	12	23	1	4	7
8		11	6	24		5	11
9		12	11	25		6	6
10		13	7	26		7	12
11	No connected			27		8	5
12	2	4	15	28		9	13
13		5	3	29		10	4
14		6	14	30		11	14
15		7	4	31		12	3
16		8	13	32		13	15

またプリアンプ - 真空容器間、真空容器 - APD 間を電気的につなぐ約 10cm 程度のケーブルは高電圧に対する耐久性が強く、ジュール熱をなるべく発生させないため、断面積の小さいものが好まれる。このような観点から新たにケーブルを選択しなおした。表 6.6 はその詳細である。参考として、表 6.5 に SciFi 16 本の読み出しのときに使用していたケーブルについても載せておいた。



図 6.4: APD と SciFi の接続部の配置

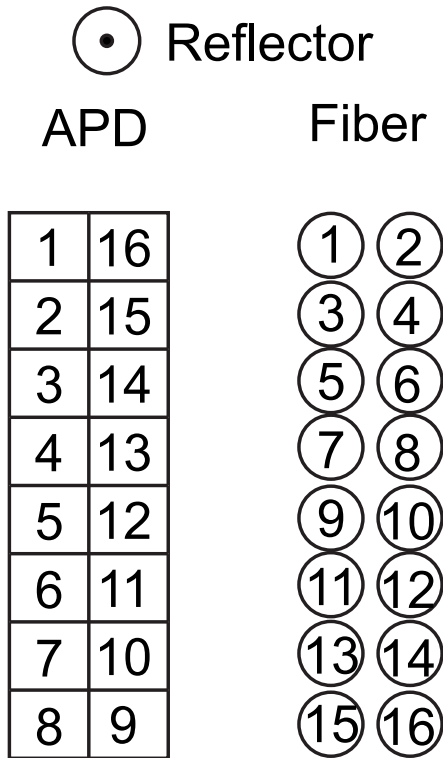


表 6.4: APD チャンネルと SciFi 番号の対応

APD ch	Fiber number
1	1
2	3
3	5
4	7
5	9
6	11
7	13
8	15
9	16
10	14
11	12
12	10
13	8
14	6
15	4
16	2

表 6.5: SciFi16 本の読み出しテストのとき

Production	XC-1 (マックエイト)	Size	26AWG
より線	7 × 0.16 mm	最大電流	1 A
使用温度範囲	- 40 ~ + 85	電圧定格	125 V

表 6.6: 今回の実験で使用するケーブル

Production	UL1213 (Alphawire 社)	Size	30AWG
より線	7 × 0.1 mm	最大電流	4 A
全体直径	0.81 mm	電圧定格	600 V
絶縁	カラーコード TFE	使用温度範囲	- 60 ~ + 200

## 6.1 APD Arrayの選択とその特性

今回の実験では3つの SciFi Layer を使用するため、3つの APD Array を必要とする。2つに関しては、すでに study されている APD205,APD206 を使用する。残りのひとつとして、APD204,APD207 から選択することとする。

選択は APD の特性が比較的そろっており、また立ち上がり位置が、APD205,APD206 に近いという観点から行う。まず、そのために図 6.5 で Threshold の立ち上がりを見ることで APD204,APD207 の特性を見た。どちらの立ち上がり位置は違いが、特性のばらつきという観点から APD207 を選択することにした。

図 6.6 は、実際測定をセットアップを行った後で、APD205,APD206,APD207 の接続されているチャンネルのみ、Threshold を測定したものである。図 6.7、図 6.8 は3つの APD の DarkCurrent を測定したものである。ここからちょうど APD207 は立ち上がり、APD205,APD206 の中間ぐらいになっており、これまでの議論から、APD207 も同一バイアスで動作可能であることが期待できる。

ここで以下-49.5 で実験を行うが、これはペルチエが-50 まで冷却すると長時間もたなくなってしまう理由からきている。この実験を行ったのは2002年の夏であるが、冬の実験では-50 に十分長い時間することができた。この辺の議論は後でまとめて議論することにする。短時間であるが、-50 にして Threshold を APD205,APD206,APD207 について測定したときには Threshold207 が一番立ち上がりが高かったので、APD207 を Layer2 の読み出しに用い、APD205,APD206 をそれぞれ Layer1,Layer3 の読み出しに用いることにした。しかし今から思えば、これは APD207 の比較的立ち上がりのはやいチャンネルにつられてほかのチャンネルが立ち上がったせいだと思う。図 6.7、図 6.8 は同時期に測定した DarkCurrent であるから、こちらの結果のほうが信頼できるだろう。

以上の理由から APD205,APD206,APD207 を用いて Tracking Test を行うことにした。

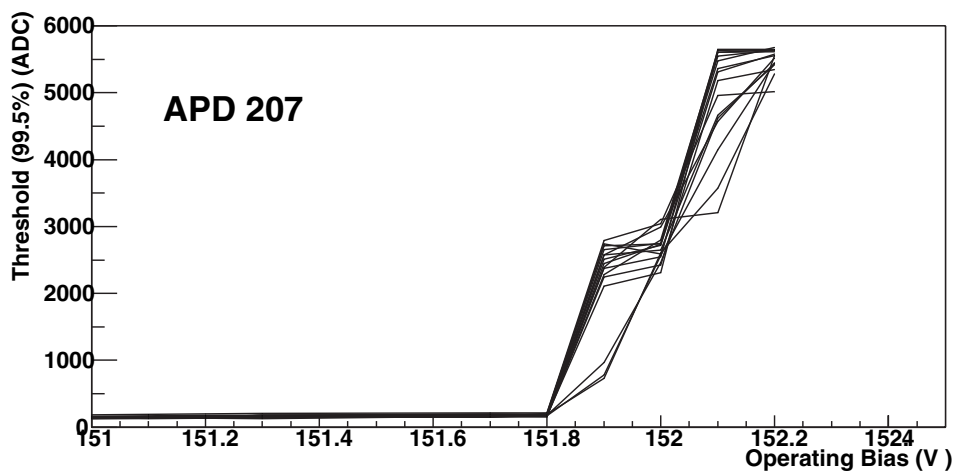
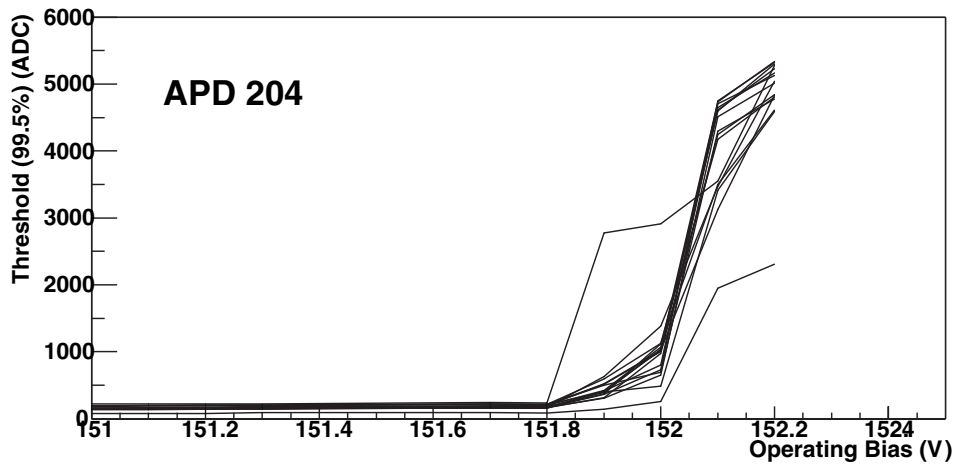


図 6.5: APD204,APD207 内のすべてのチャンネルについての Threshold [ADC] vs. Voltage [V] (APD bias + 負荷抵抗に対する電圧)

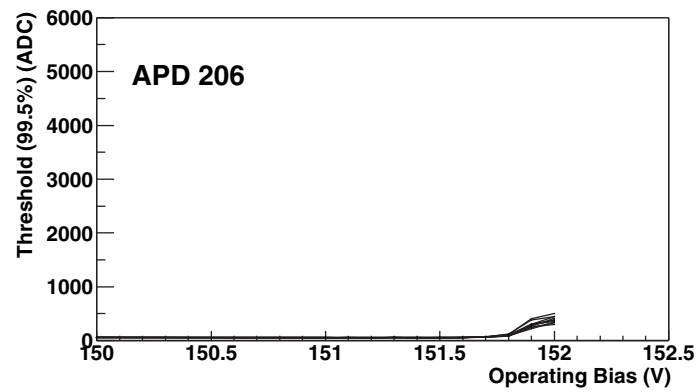
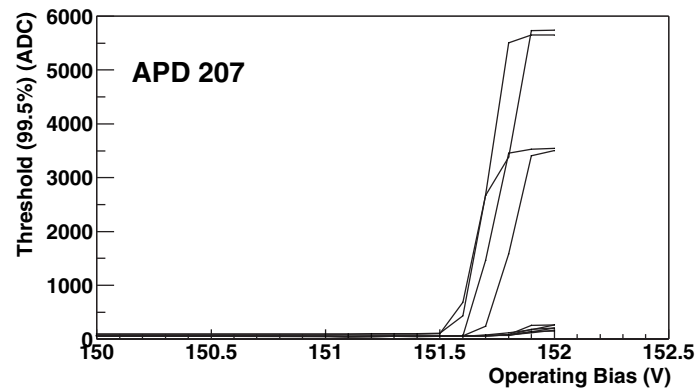
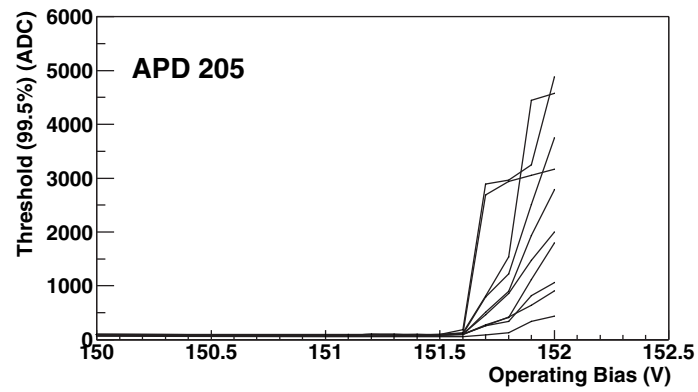


図 6.6: -49.5 での接続されている APD205,APD207,APD206 チャンネルのみの Threshold (exclude 99.5 % noise) [ADC] vs. Voltage (APD bias + 負荷抵抗に対する電圧) [V]

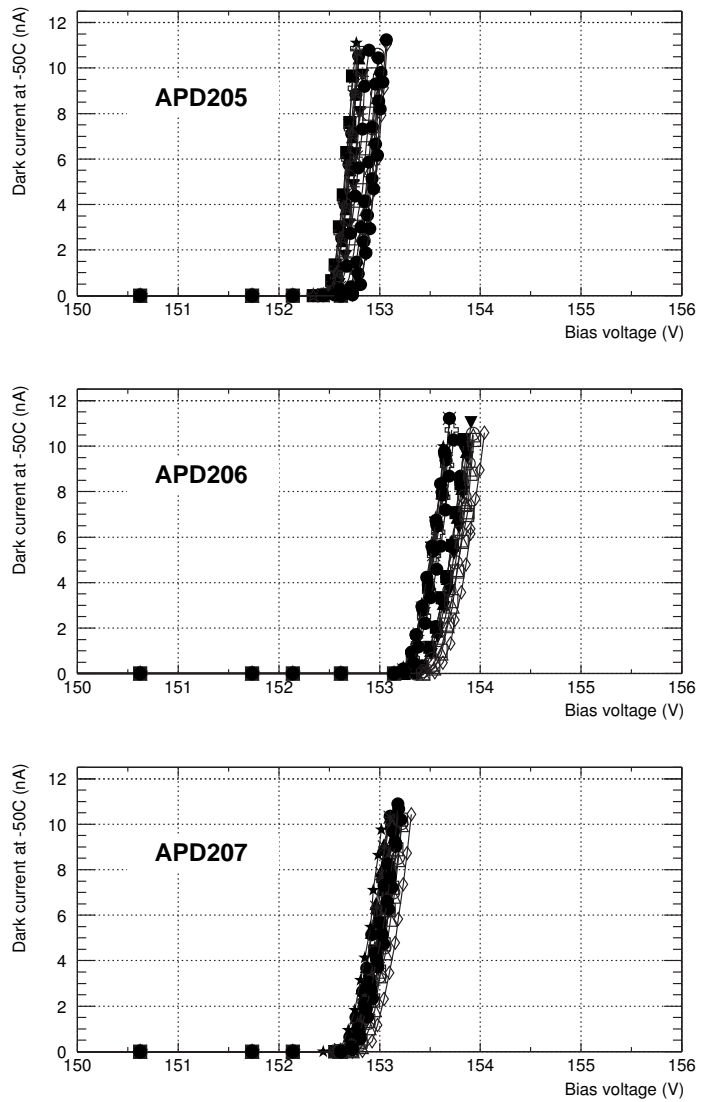


図 6.7: 2002 年冬に測定した-50 °C での APD205,APD206,APD207 の Darkcurrent vs. APD bias

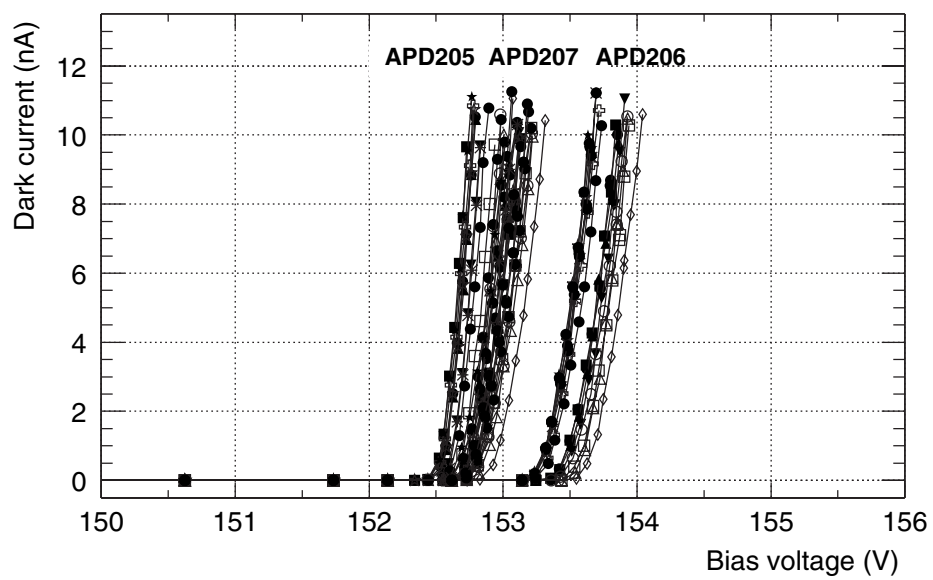


図 6.8: 図 6.7 のグラフを一つにまとめたもの

## 6.2 Analysis strategy

まずデータの全体像、クオリティーをみるために、cluster の分布や cluster 内の Multiplicity について考察する。そしてその後尤もらしい信号を得るためのカットを加え、Tracking Efficiency を求める。

ここで Tracking Efficiency を求めるための、再構成点の計算の仕方であるが、

1. クラスターの位置平均による解析
2. クラスターの位置に Gain の重みをつけた荷重平均
3. Preamp のクロストークを考慮して、Gain で荷重平均をとったもの

が考えられる。この中で解析方法として3の方法が尤もらしいと思われるが、各解析の効果を比較するという意味も含めて、3つの解析を行うことにした。

## 6.3 Study of cluster

### 6.3.1 Cluster distribution

この section での解析は、Layer の再構成点の制限など何の制限も行っていない。各 Layer でクラスターの数があるどのように分布しているのかを調べた。クラスターの分布は、Threshold 99.5 %、99.9 % でもあまりかわらない。

### 6.3.2 Multiplicity Distribution

次に各 cluster 内の multiplicity について調べた。複数 cluster が存在した場合にも、それぞれの cluster 中での multiplicity をカウントした。それを Threshold 99.5 % でしらべたものと、Threshold 99.9 % についてしらべたものが、それぞれ図 6.9、図 6.11 である。

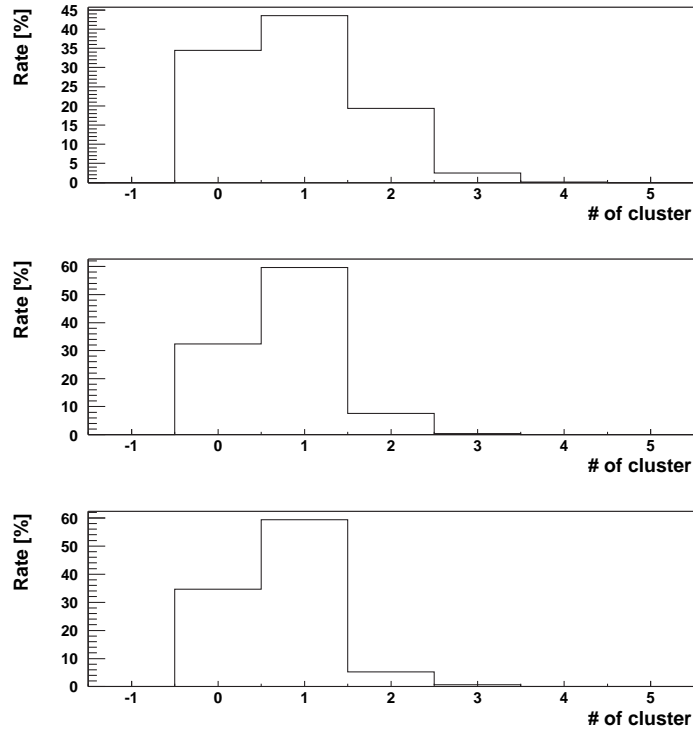


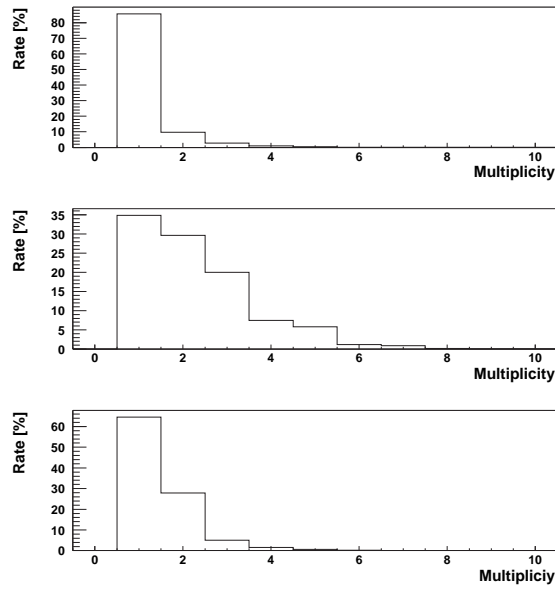
図 6.9: 各 Layer での cluster の分布

Layer1	0	2415
	1	3050
	2	1353
	3	177
	4	9

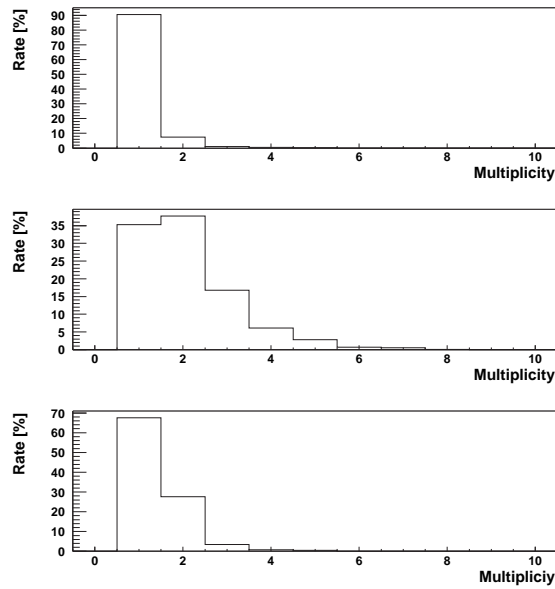
Layer2	0	2267
	1	4176
	2	531
	3	28
	4	2

Layer3	0	2428
	1	4159
	2	368
	3	44
	4	4
	5	1





6.10: Multiplicity Distribution at Theshold 99.5 %



6.11: Multiplicity Distribution at Theshold 99.9 %

### 6.3.3 Hit Patarn

各 Layer の 8 種類のヒットパターンについて、Threshold 99.5 %、99.9 % で調べてみた。それが以下の表である。

表 6.7: すべてのイベントパターンの分類とそのイベント rate。 は Hit が存在していることを示し、×は Hit が存在していなかったことを示す。

	# Layer			# Event		# Rate	
	1	2	3	99.5 %	99.9 %	99.5 %	99.9 %
type A				2984	2767	42.6 %	39.5 %
type B			×	749	787	10.69 %	11.23 %
type C		×		412	403	5.88 %	5.75 %
type D	×			812	887	11.59 %	12.66 %
type E		×	×	444	440	6.34 %	6.28 %
type F	×	×		368	374	5.25 %	5.34 %
type G	×		×	192	212	2.74 %	3.03 %
type H	×	×	×	1043	1134	14.89 %	16.19 %

## 6.4 Analysis by position average

### 6.4.1 Calibration of Layer Position

Tracking Efficiency を考える前に、3つの Layer の相対的位置関係の校正を行う。Fiber の budle は十分固まっているため、Trigger される領域では十分たるむことなくアクリルにサポートされており、鉛直方向の誤差はそれほどないと思われえる。またあったとしても Layer 間の長さに比べて、十分小さいので解析にあまり効いてこない。

問題は水平方向の相対的位置関係である。これを決める自由度は 2 であり、これを Layer3 に対する Layer1 の相対位置 (shift1)、Layer3 に対する Layer2 の相対位置 (shift2) というようにとる。

まず shift1、shift2 がどこからどこまでの値を幾何的に取ることが許されるのかということを考える。Layer は Fiber だけで  $0.8\text{mm} \times 8 + 0.75\text{mm} \sim 7.2\text{mm}$  程度の横幅がある。Layer をサポートするアクリル板は Fiber を glue しているアクリルペンキの厚さのことも考慮して、横幅 9.6 mm の穴があげられているので、およそ 2.5mm 程度の誤差が存在しうる。またそのずれ方によって +2.5mm、-2.5mm になるので、shift1, shift2 は  $\pm 5$  mm の誤差が存在しうる。

パラメータの決め方としては、各 Layer に cluster が 1 つだけ存在したイベントだけを取り出し、各 Layer で再構成された点を最小二乗で Fit し、各 Layer について Residual 分布を作成し、各 Residual 分布の平均値の RMS である  $P_{mean}$ 、各 Residual 分布の RMS の RMS である  $P_{rms}$  の最小になる点をもって決定する。 $P_{mean}$  と  $P_{rms}$  は Layer  $i$  の Residual 分布の平均  $m_i$ 、RMS  $\sigma_i$  を用いて以下のように定義される。

$$P_{mean} \equiv \sqrt{\frac{\sum \left\{ \frac{\sum m_i}{3} - m_i \right\}}{3-1}}$$

$$P_{rms} \equiv \sqrt{\frac{\sum \left\{ \frac{\sum \sigma_i}{3} - \sigma_i \right\}}{3-1}}$$

$P_{mean}$  についてみていく。粒子のトラックが直線であり、各 Layer に Hit が存在した場合を考える。Hit 座標を Layer  $i$  内の local coordinate  $x_i$  で定義する。shift1, shift2 を用いて、Layer3 をに対する相対座標すなわち、global coordinate が与えられ、Layer 間隔が等しいことから

$$2 \times (x_2 + shift2) = (x_1 + shift1) + (x_3)$$

$$shift1 = 2shift2 + (2x_2 - x_1 - x_3)$$

ここから適切な  $P_{mean}$  を選択したときには、shift1 と shift2 は一次関数の関係式になっていることが予想される。

図 6.4.2 は  $P_{mean}$  によるパラメータ決定の過程を示している。一番上の図は、shift1, shift2 を  $\pm 2.5$  mm の範囲内で 0.1mm step でふり、それによってつくられる

Residual 分布の各平均値の RMS が 0.5mm 以下になるときだけ、プロットをおこなった shift 1 vs. shift 2 である。

真ん中の図はさらに  $P_{mean}$  を小さくし、0.03mm 以下のときのみプロットしたものである。ここから帯状に存在していたものが、線状に細くなっているのが分かる。このプロットを直線で Fit をしたところ以下のような結果となった。

$$y = (2.044 \pm 0.01101)x - 0.2162 \pm 0.00817$$

一番下の図は Fit した直線近傍に存在しているもののみをプロットしたもので、縦軸は  $P_{mean}$  で、横軸は shift2 である。この図からわかるように直線近傍に限らず、 $P_{mean}$  を最小にするような shift2 はいろいろ存在し、単純に  $P_{mean}$  を最小にするようなパラメータの決め方では、shift1, shift2 は幾何的限界に近い数値になる。

実際の set up の組み立てでは目に見える範囲には誤差がないようにしているので、明らかに目に見える以上の値は不適切である。したがって、criteria を通常とは変えて、Fit した直線近傍のみを Hit し、それが  $shift2 = 0.1 \text{ mm}$  付近で sensitive に変化していることからパラメータを決定した。 $shift1$  に関しては Fit した直線から決めた。

$$\begin{aligned} shift2 &= 0.1mm \\ shift1 &= -0.0118mm \end{aligned}$$

つぎに  $P_{rms}$  を用いてパラメータを決定してみた。その過程を示しているのが、図 6.13 である。 $P_{mean}$  の場合と同様にして  $shift1, shift2$  を幾何的に許される  $-2.5\text{mm}$  から  $+2.5\text{mm}$  までパラメータを振った。

一番上の図は、 $P_{rms}$  が 0.2 以下のときだけ、プロットをした  $shift 1$  vs.  $shift 2$  である。

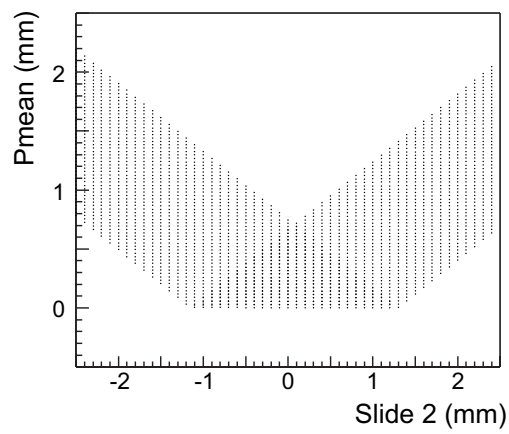
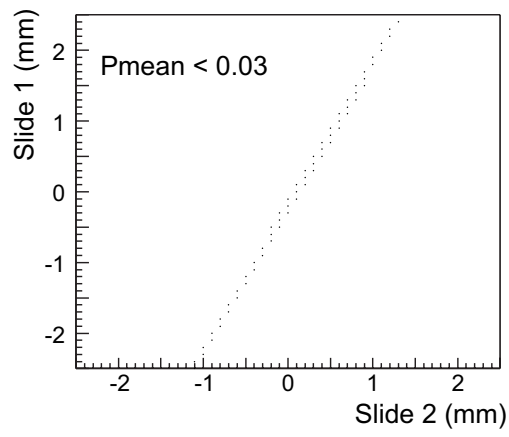
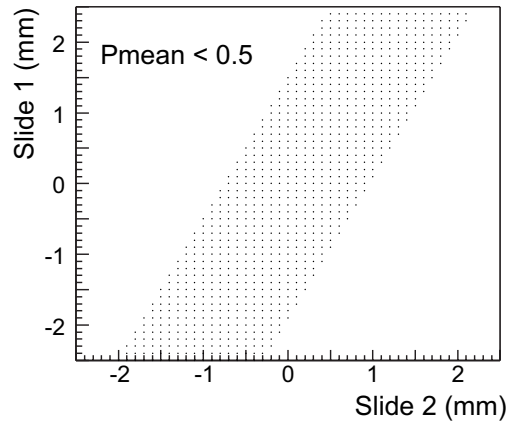
真ん中の図は  $P_{rms}$  を小さくし、 $0.133\text{mm}$  以下のときのみプロットをしたものである。上の図にくらべてより存在する領域が絞られているのが分かる。このプロットを直線で Fit した結果は以下のようになった。

$$y = (1.976 \pm 0.0193)x - 0.2143 \pm 0.001117$$

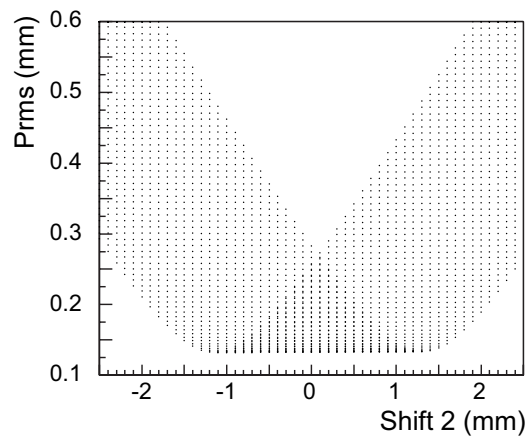
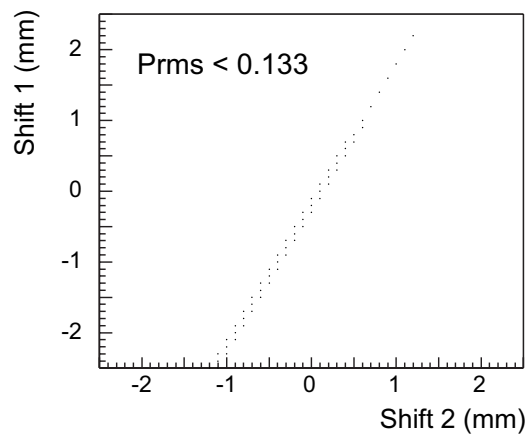
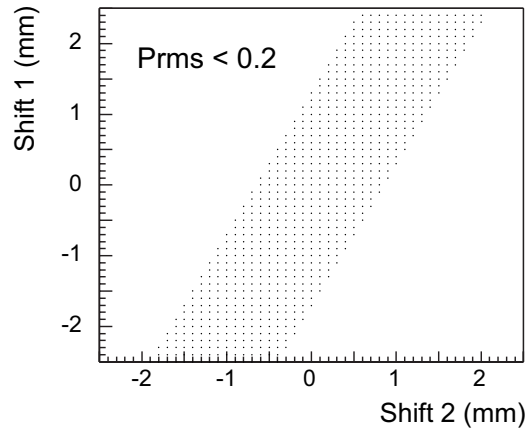
一番下の図は、Fit した直線近傍に存在するもののみをプロットし  $P_{rms}$  vs.  $shift2$  であらわしたものである。このグラフからでも  $shift2$  が最小のときに、 $P_{rms}$  が最小になっていることがわかる。したがって、 $P_{rms}$  をもちいて決められた結果は以下のようなになる。

$$\begin{aligned} shift2 &= 0.1mm \\ shift1 &= -0.0167mm \end{aligned}$$

$P_{mean}, P_{rms}$  による解析結果は誤差の範囲内でほぼ一致した。今回は Fit した直線の傾きが 2 に近い  $P_{rms}$  によって求められた  $shift1, shift2$  を用いる。



6.12:



☒ 6.13:

## 6.4.2 Residual Distribution

前節で求められた shift1,shift2 を持ちいて Layer の相対位置の校正をおこなったあと、校正後の各 Layer の Residual 分布をみってみる。イベントに関しては、同様に各 Layer に cluster の数が一つずつ存在し、Multiplicity が 4 以下のもののみを取り出している。これは予想される最大 Multiplicity2 に対して、プリアンプのクロスークを考慮した結果によるものである。

Residual の定義は、各 Layer の再構成点を最小二乗法を用いて直線で Fit し、直線と実際の再構成点の差を Residual と定義する。

$$\text{Residual} \equiv \text{Reconstructed point} - \text{Fitted point}$$

図 6.4.2 は 99.5 % の Threshold をつけた各 Layer の Residual 分布、図 6.15 は 99.9 % の Threshold をつけた各 Layer の Residual 分布である。

まずこの Residual 分布をみて気づく事は、ガウス分布していないということである。この Residual 分布についての study は後述する。99.9 % のほうがイベントが多いのは、Noise による Hit 情報による cluster の増加が少なくなったせいである。

現段階ではこの Residual 分布に従って、解析を進める。各 Layer の R.M.S. を  $\sigma_i$  ( $i=1,2,3$ ) と定義する。図 6.4.2、図 6.15 より

Threshold 99.5 %

$$\sigma_1 = 0.2299mm \quad \sigma_2 = 0.459mm \quad \sigma_3 = 0.2292mm$$

Threshold 99.9 %

$$\sigma_1 = 0.2277mm \quad \sigma_2 = 0.454mm \quad \sigma_3 = 0.264mm$$

Threshold をあげることによって、Residual がよくなったことから、Residual を悪くしている原因として、波高値の小さいシグナルが関与していることがわかる。おそらくこれは本来存在しない部分に Noise による Hit がまったく粒子の Track とは関係ないところに発生するせいだと思われる。

## 6.4.3 Tracking Efficiency

Tracking Efficiency を考える際の cut をまず、上記のようにに設定した。

- Layer1 と Layer3 に multiplicity が 4 以下の cluster が一つだけ存在する
- Layer1 と Layer3 で再構成点によって内挿される Layer2 上の点の  $\pm 3\sigma_2$  が Layer2 の active な領域内に収まっている

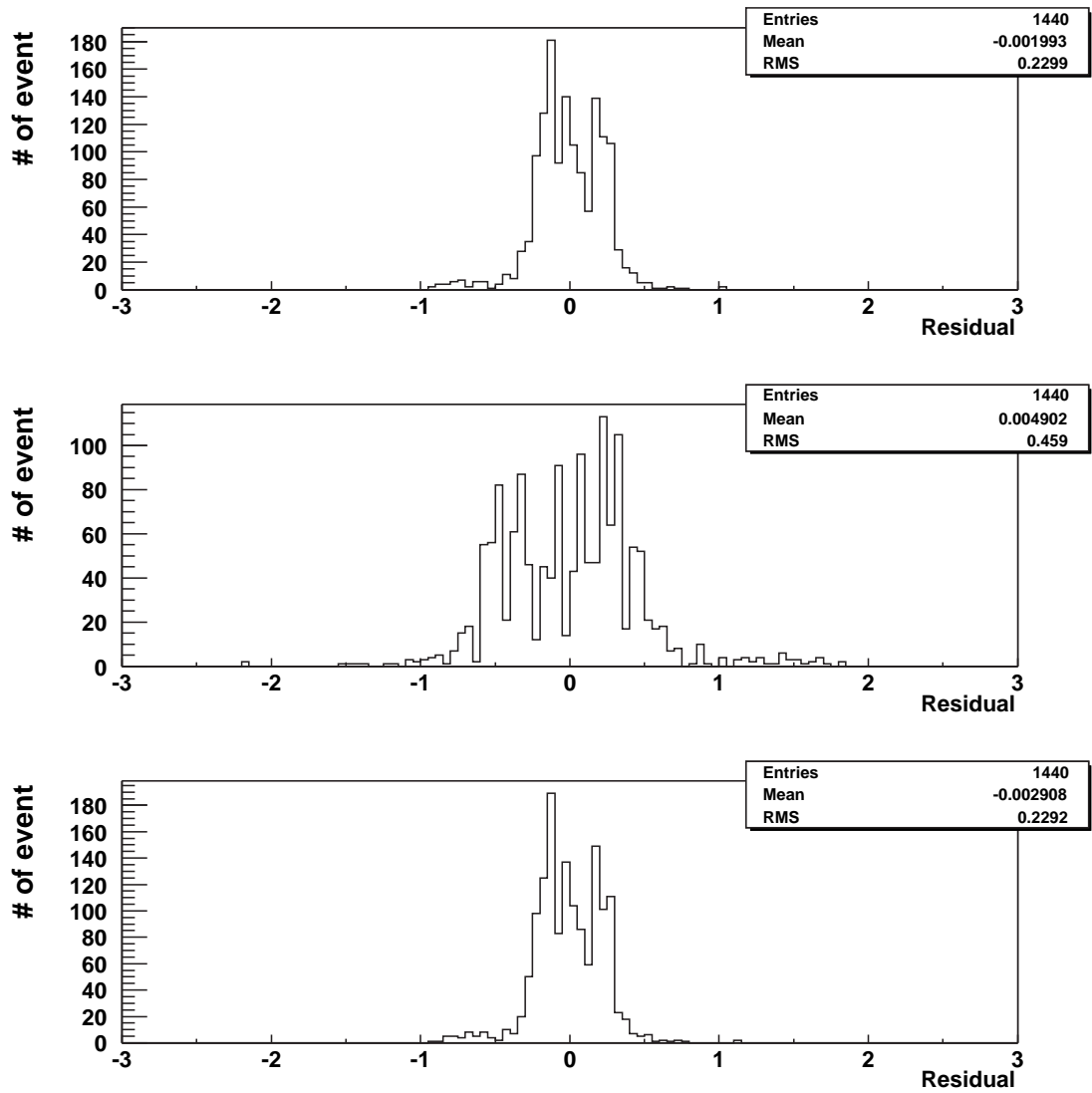


図 6.14: Threshold を 99.5 %にしたときの各 Layer の Residual 分布( 上から Layer1, Layer2, Layer3 )



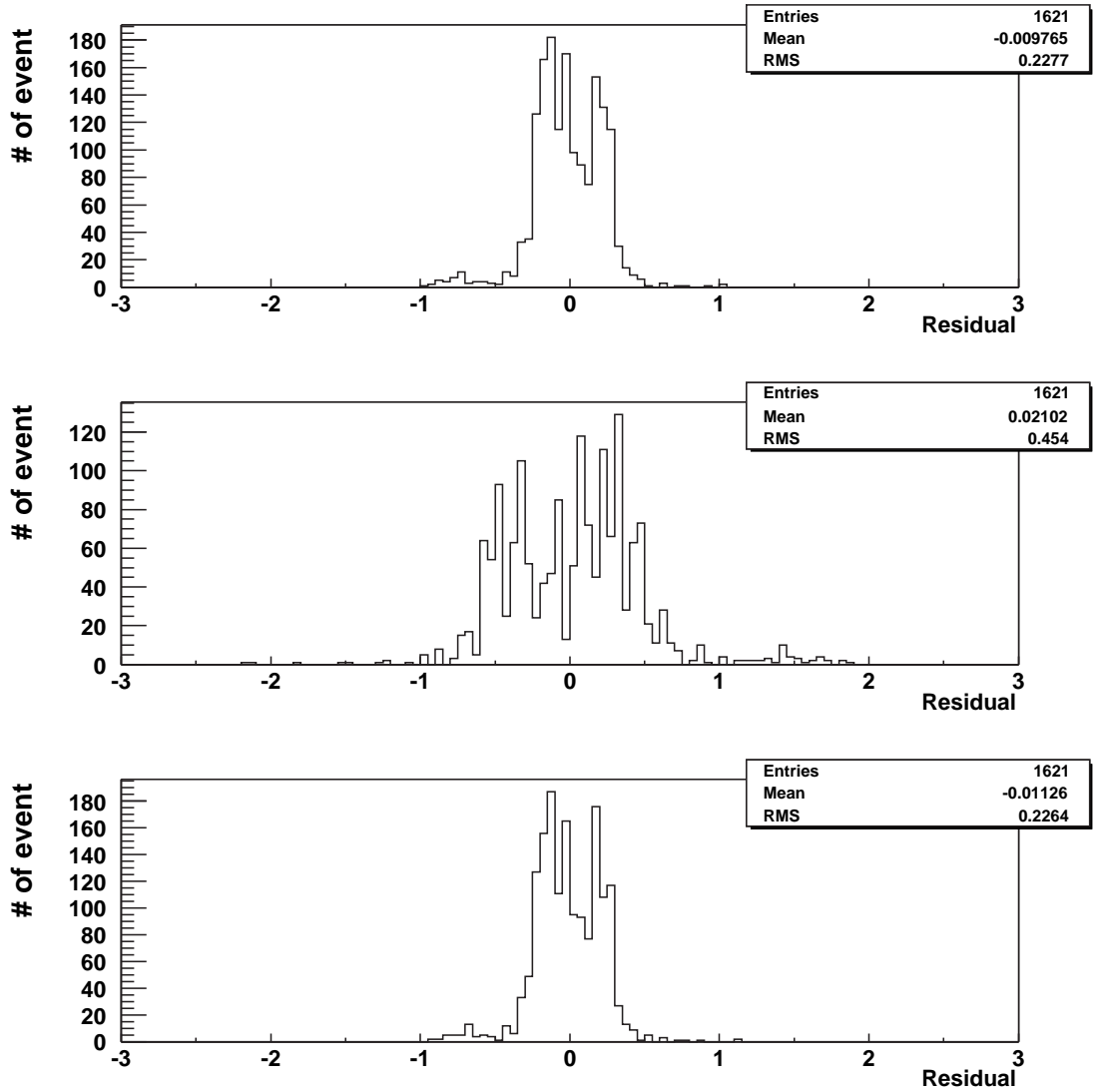


図 6.15: Threshold を 99.9 %にしたときの各 Layer の Residual 分布( 上から Layer1, Layer2, Layer3 )

我々が期待するものは Tracking Efficiency が検出効率と同程度になるという結果であるが、この criteria では Tracking Efficiency は検出効率と同程度にはならなかった。

そこでさらにイベントは下げても正しい信号のみを取り出すために、さらに二つの条件を加えた。

- Layer1 と Layer3 の active な領域における両端の SciFi の Hit は考えない。  
( Layer の端をかすめるようなイベントは捨てる )
- Layer2 に内挿される点が Layer2 の active な領域の中心付近に来たとき

この条件下で Tracking Efficiency を測ったところ図 6.16 のような結果となった。横軸は Layer1, Layer3 の再構成点によって Layer2 上に内挿された点を許容する中心からの範囲、縦軸はそのときの検出効率となっている。最も Tracking Efficiency の高いところで  $98.3\% \pm 1.68$  を達成している。表をみると、range があがるほど、bad が増えているのは、Layer2 の端のほうに内挿される場合がでてきて、 $\pm 3\sigma$  が active な領域に包含されていないためである。none が増えるのは、適切でないイベントを取り出しているのが理由だと思われる。その原因はおそらく Layer の水平方向に傾きをもっていることが原因であろう。

Layer2, Layer3 の再構成点をつかって Layer1 上に外挿された点をつかった Tracking Efficiency は、内層した場合に比べて、80 ~ 90 % 程度とよくなかった。Efficiency を下げている主な理由は、外挿される点の  $\pm 3\sigma$  に Hit が存在していないという理由よりも、外挿先の Layer に Hit が一つも存在しないという理由が大きかった。この理由は set up の図をみてもらうとわかるが、Trigger をしている SciFi Layer が、Layer1, 2, 3 の active な領域にくらべて大きいことと、再構成点に制限をくわえても Layer が水平方向に角度をもっているため、外挿先に Hit が存在せず、Efficiency を落とす。したがって、Trigger をする Layer を狭くする必要があり、その結果は後にのせる。よって、この実験では Layer1, Layer3 を用いて Layer2 に内挿した場合の Tracking Efficiency のみを計算することにする。

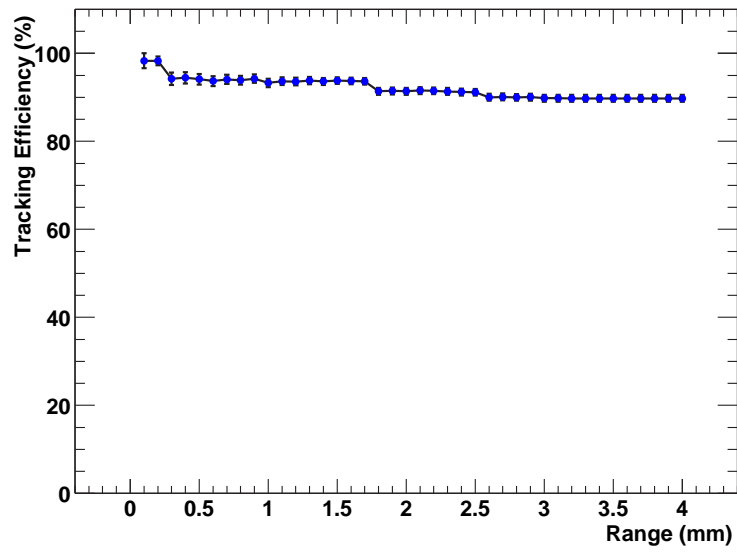


図 6.16: 位置平均解析による Tracking Efficiency vs. Layer2 の中央位置からの内挿点の許容範囲 (Threshold99.5 % )

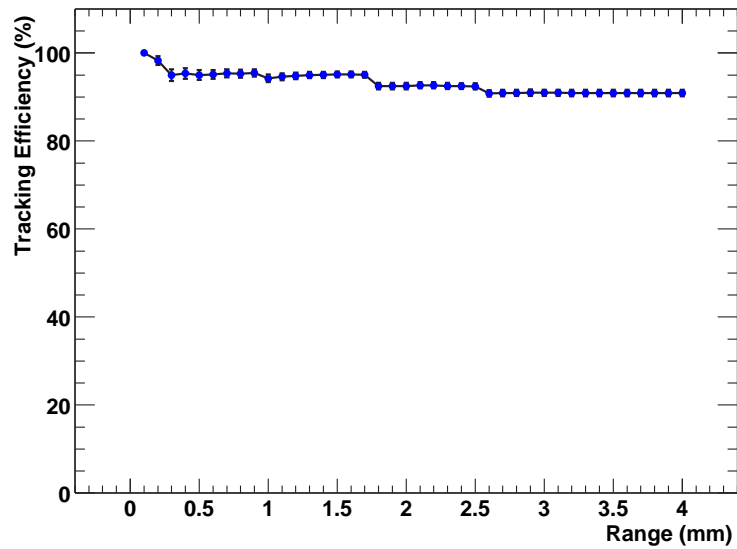


図 6.17: 位置平均解析による Tracking Efficiency vs. Layer2 の中央位置からの内挿点の許容範囲 (Threshold99.9 % )

表 6.8: 図 6.16 の詳細

range (mm)	event	good	bad	none	eff (%)	error (%)
0.1	59	58	1	0	98.3051	1.680482749
0.2	173	170	1	2	98.2659	0.992465538
0.3	275	259	3	13	94.1818	1.411599414
0.4	324	306	4	14	94.4444	1.272568256
0.5	373	351	7	15	94.1019	1.219834314
0.6	460	431	7	22	93.6957	1.133181172
0.7	523	492	7	24	94.0727	1.032546014
0.8	558	524	8	26	93.9068	1.012637808
0.9	608	573	8	27	94.2434	0.944619072
1	684	638	10	36	93.2749	0.957643176
1.1	773	724	11	38	93.6611	0.876388823
1.2	811	759	11	41	93.5882	0.860181512
1.3	867	813	11	43	93.7716	0.82075656
1.4	952	891	12	49	93.5924	0.793687452
1.5	1021	958	12	51	93.8296	0.753032501
1.6	1048	982	13	53	93.7023	0.750387288
1.7	1103	1033	13	57	93.6537	0.734065837
1.8	1168	1067	13	88	91.3527	0.822393247
1.9	1229	1124	15	90	91.4565	0.797350478
2	1241	1134	15	92	91.3779	0.796785136
2.1	1275	1167	15	93	91.5294	0.779798333
2.2	1326	1213	15	98	91.4781	0.766752186
2.3	1350	1233	16	101	91.3333	0.765728078
2.4	1373	1252	17	104	91.1872	0.765047902
2.5	1405	1281	18	106	91.1744	0.75678134
2.6	1462	1316	19	127	90.0137	0.784120711
2.7	1474	1328	19	127	90.095	0.778088225
2.8	1488	1339	20	129	89.9866	0.778176727
2.9	1495	1346	20	129	90.0334	0.774737796
3	1509	1355	20	134	89.7946	0.779283545
3.1	1509	1355	20	134	89.7946	0.779283545
3.2	1512	1357	20	135	89.7487	0.780059372
3.3	1512	1357	20	135	89.7487	0.780059372
3.4	1512	1357	20	135	89.7487	0.780059372
3.5	1512	1357	20	135	89.7487	0.780059372

表 6.9: 図 6.17 の詳細

range (mm)	event	good	bad	none	eff (%)	error (%)
0.01	58	58	0	0	100	0
0.2	173	170	1	2	98.2659	0.992465538
0.3	279	265	5	9	94.9821	1.307012626
0.4	322	307	6	9	95.3416	1.174442261
0.5	380	361	8	11	95	1.118033989
0.6	473	450	9	14	95.1374	0.988961402
0.7	540	515	9	16	95.3704	0.904235716
0.8	575	548	10	17	95.3043	0.882211058
0.9	621	593	10	18	95.4911	0.832666226
1	696	656	12	28	94.2529	0.882200131
1.1	795	752	13	30	94.5912	0.802217746
1.2	845	801	13	31	94.7929	0.764288825
1.3	900	855	14	31	95	0.726483157
1.4	985	936	14	35	95.0254	0.692756837
1.5	1060	1008	14	38	95.0943	0.663398986
1.6	1085	1032	15	38	95.1152	0.654385228
1.7	1128	1072	15	41	95.0355	0.646734665
1.8	1195	1105	15	75	92.4686	0.763398049
1.9	1260	1165	16	79	92.4603	0.743822668
2	1271	1175	16	80	92.4469	0.741201037
2.1	1309	1213	16	80	92.6662	0.720535503
2.2	1365	1265	16	84	92.674	0.705254857
2.3	1387	1283	16	88	92.5018	0.707156229
2.4	1408	1302	16	90	92.4716	0.703160072
2.5	1439	1330	17	92	92.4253	0.697505692
2.6	1502	1364	20	118	90.8123	0.745316566
2.7	1513	1375	20	118	90.879	0.740173502
2.8	1521	1383	20	118	90.927	0.736473763
2.9	1527	1389	20	118	90.9627	0.733721935
3	1536	1397	20	119	90.9505	0.732013735
3.1	1536	1397	20	119	90.9505	0.732013735
3.2	1537	1397	20	120	90.8913	0.733926253
3.3	1537	1397	20	120	90.8913	0.733926253
3.4	1537	1397	20	120	90.8913	0.733926253
3.5	1537	1397	20	120	90.8913	0.733926253

## 6.5 Analysis by weighted average

次に Preamp Gain による荷重平均によって、再構成点をきめる。解析の条件に関しては前節と同じにする。

図 6.18 は、99.5 % の Threshold を使った各 Layer の Residual 分布、図 6.19 は、99.9 % の Threshold を使った各 Layer の Residual 分布である。

各 Layer の R.M.S.  $\sigma_i$  は以下のような結果となった。

Threshold 99.5 %

$$\sigma_1 = 0.2318mm \quad \sigma_2 = 0.4627mm \quad \sigma_3 = 0.2311mm$$

Threshold 99.9 %

$$\sigma_1 = 0.2289mm \quad \sigma_2 = 0.4566mm \quad \sigma_3 = 0.2278mm$$

$\sigma_i$  だけを見ると、位置平均のときとくらべて大きくなっているが、分布自体の形は明確になっている。おそらく Gain による解析のほうがより解像度がよくなっているというように解釈できる。

図 6.20、図 6.21 は Threshold99.5 % のときと、Threshold99.9 % のときの Tracking Efficiency であるが、これに関してはそれほど向上は見られない。

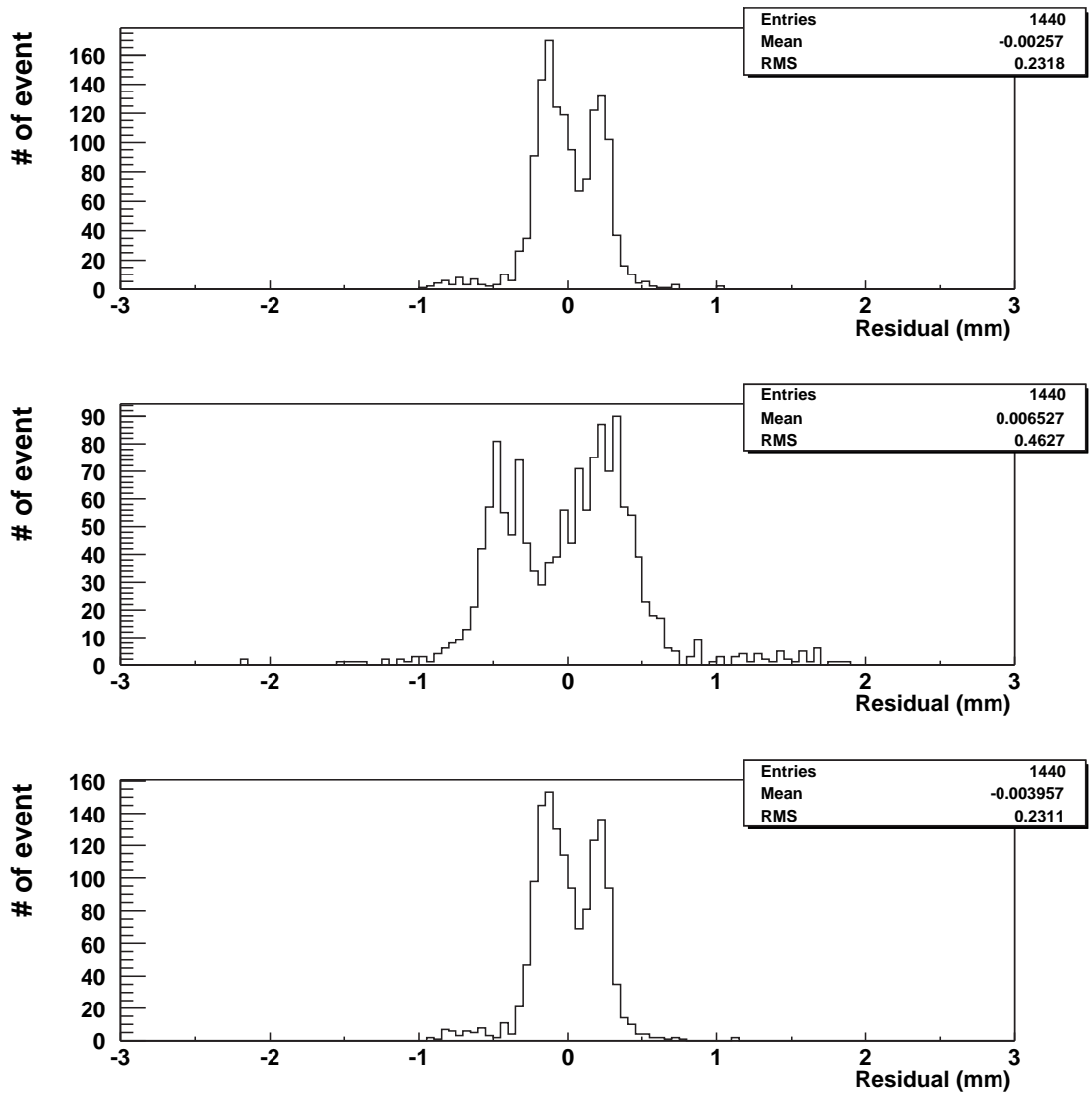


図 6.18: Threshold を 99.5 %にしたときの荷重平均による各 Layer の Residual 分布 (上から Layer1, Layer2, Layer3)

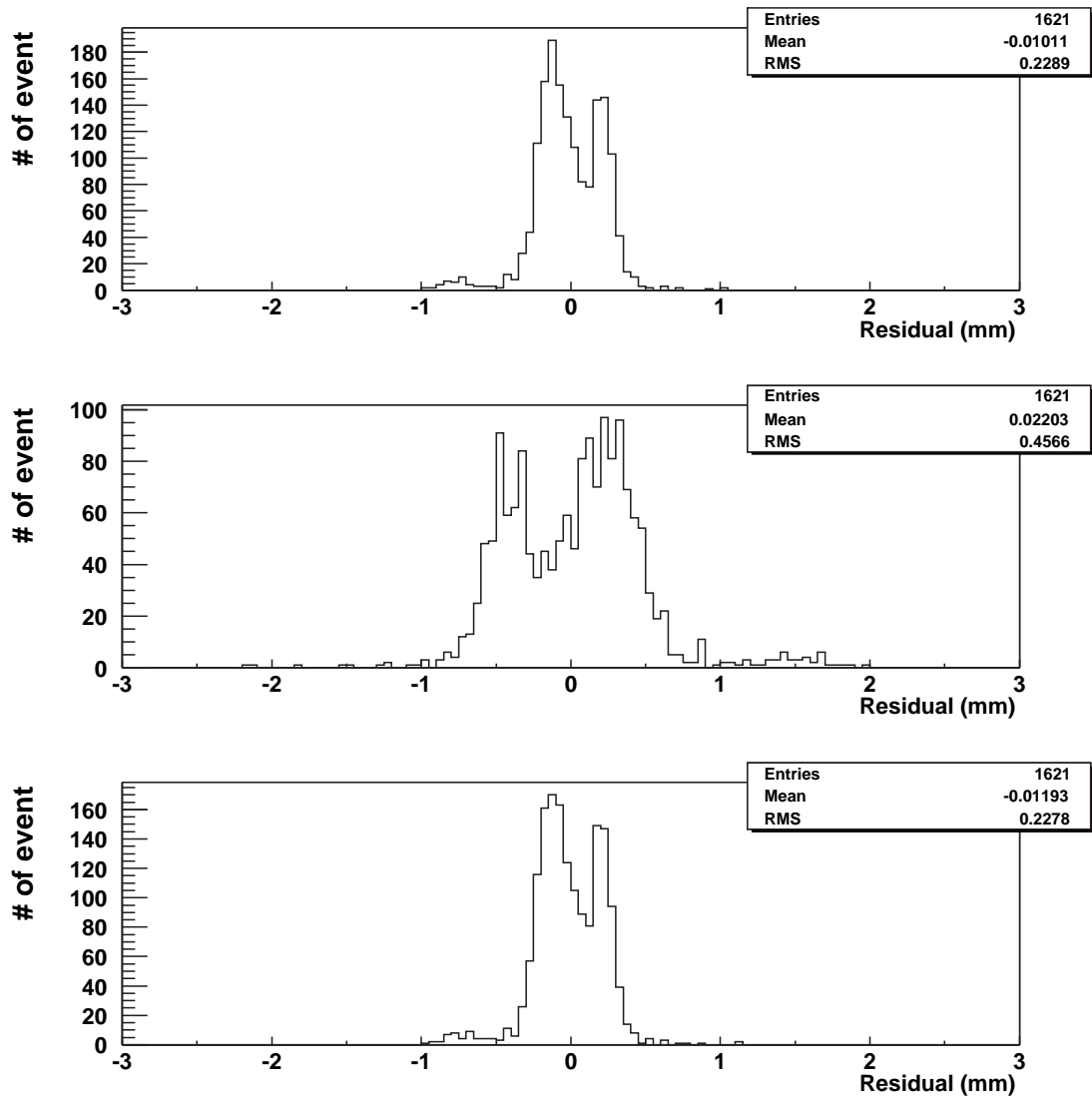


図 6.19: Threshold を 99.9 %にしたときの荷重平均による各 Layer の Residual 分布 (上から Layer1, Layer2, Layer3)



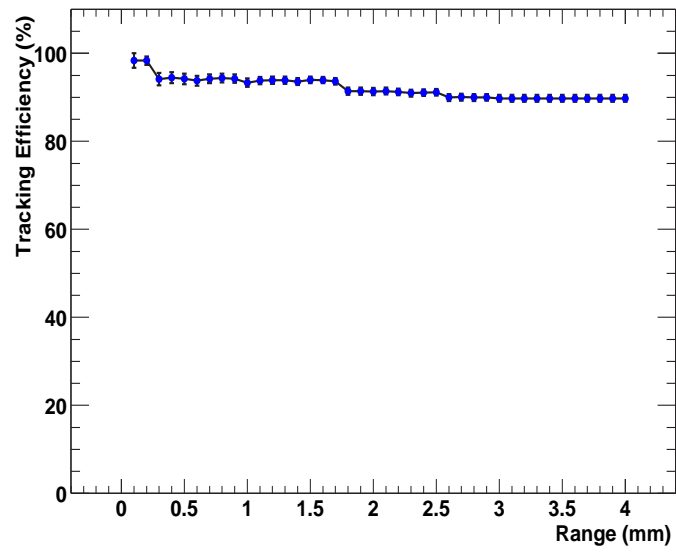


図 6.20: 荷重平均解析による Tracking Efficiency vs. Layer2 の中央位置からの内挿点の許容範囲 (Threshold 99.5 %)

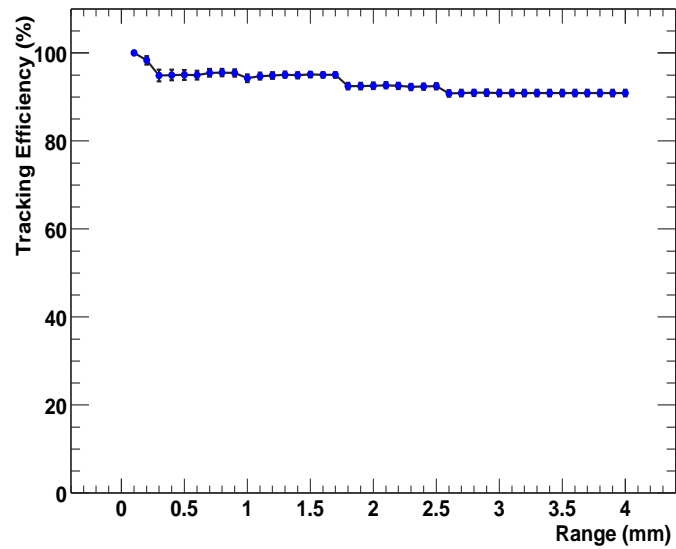


図 6.21: 荷重平均解析による Tracking Efficiency vs. Layer2 の中央位置からの内挿点の許容範囲 (Threshold 99.9 %)

表 6.10: 図 6.20 の詳細

range (mm)	event	good	bad	none	eff (%)	error (%)
0.1	61	60	1	0	98.3607	1.625829904
0.2	180	177	1	2	98.3333	0.954207382
0.3	274	258	3	13	94.1606	1.416587613
0.4	341	322	6	13	94.4282	1.242142512
0.5	378	356	7	15	94.1799	1.204199482
0.6	465	436	7	22	93.7634	1.121409271
0.7	536	505	7	24	94.2164	1.008277283
0.8	569	537	8	24	94.3761	0.965814397
0.9	609	574	8	27	94.2529	0.943111611
1	688	642	10	36	93.314	0.952274972
1.1	774	726	11	37	93.7984	0.866920176
1.2	832	781	11	40	93.8702	0.831620834
1.3	884	830	11	43	93.8914	0.8054853
1.4	962	900	12	50	93.5551	0.791688414
1.5	1045	982	12	51	93.9713	0.73629408
1.6	1069	1004	13	52	93.9196	0.730895587
1.7	1099	1029	13	57	93.6306	0.736646821
1.8	1171	1070	13	88	91.3749	0.820383807
1.9	1232	1126	15	91	91.3961	0.798925265
2	1255	1146	15	94	91.3147	0.794951984
2.1	1279	1169	15	95	91.3995	0.783968274
2.2	1334	1217	16	101	91.2294	0.774469193
2.3	1380	1255	18	107	90.942	0.772607404
2.4	1396	1271	18	107	91.0458	0.764188758
2.5	1410	1285	18	107	91.1348	0.756966805
2.6	1464	1317	19	128	89.959	0.785489266
2.7	1484	1336	20	128	90.027	0.777825807
2.8	1495	1345	20	130	89.9666	0.777041333
2.9	1499	1349	20	130	89.9933	0.775085678
3	1512	1357	20	135	89.7487	0.780059372
3.1	1512	1357	20	135	89.7487	0.780059372
3.2	1512	1357	20	135	89.7487	0.780059372
3.3	1512	1357	20	135	89.7487	0.780059372
3.4	1512	1357	20	135	89.7487	0.780059372
3.5	1512	1357	20	135	89.7487	0.780059372

表 6.11: 図 6.21 の詳細

range (mm)	event	good	bad	none	eff (%)	error (%)
0.01	56	56	0	0	100	0
0.2	179	176	1	2	98.324	0.959489576
0.3	274	260	5	9	94.8905	1.330225558
0.4	339	322	7	10	94.9853	1.185361531
0.5	382	363	8	11	95.0262	1.112331302
0.6	477	453	9	15	94.9686	1.000864421
0.7	553	528	9	16	95.4792	0.883485584
0.8	582	556	10	16	95.5326	0.856331119
0.9	621	593	10	18	95.4911	0.832666226
1	700	660	12	28	94.2857	0.877314714
1.1	798	756	13	29	94.7368	0.790465367
1.2	865	821	13	31	94.9133	0.74709107
1.3	913	868	14	31	95.0712	0.716406796
1.4	987	937	14	36	94.9341	0.698040866
1.5	1079	1026	14	39	95.088	0.65793246
1.6	1102	1047	15	40	95.0091	0.655965863
1.7	1124	1068	15	41	95.0178	0.648977901
1.8	1198	1108	15	75	92.4875	0.761562154
1.9	1263	1168	16	79	92.4782	0.74212814
2	1287	1191	16	80	92.5408	0.73235808
2.1	1311	1215	16	80	92.6773	0.719483704
2.2	1369	1267	16	86	92.5493	0.709714018
2.3	1413	1304	17	92	92.2859	0.709805283
2.4	1426	1317	17	92	92.3562	0.703603389
2.5	1440	1331	17	92	92.4306	0.697039465
2.6	1501	1363	20	118	90.8061	0.745790855
2.7	1519	1381	20	118	90.9151	0.73739332
2.8	1524	1386	20	118	90.9449	0.735094743
2.9	1528	1390	20	118	90.9686	0.733266117
3	1537	1397	20	120	90.8913	0.733926253
3.1	1537	1397	20	120	90.8913	0.733926253
3.2	1537	1397	20	120	90.8913	0.733926253
3.3	1537	1397	20	120	90.8913	0.733926253
3.4	1537	1397	20	120	90.8913	0.733926253
3.5	1537	1397	20	120	90.8913	0.733926253

## 6.6 Analysis by weighted average with crosstalk cut

ここでは先ほどの解析に Preamp 上のクロストークをカットして Preamp Gain による荷重平均によって、再構成点をきめる。

解析条件に関しては、これまでは cluster の multiplicity は 4 以下と制限をかけていたが、ここではクロストークをカットしているため、multiplicity は 2 以下というカットを入れる。

プリアンプ上のクロストークであるが、これはすでに議論されており、

$$y = 0.04705x - 0.9484$$
$$\sigma = 10.48mV$$

であることが分かっているので、信号の隣チャンネルの隣の波高値がクロストークの予想値 +  $\sigma$  以下であれば信号とみなさないことにする。

図 6.23 は、99.5 % の Threshold を使った各 Layer の Residual 分布、図 6.24 は、99.9 % の Threshold を使った各 Layer の Residual 分布である。

各 Layer の R.M.S.  $\sigma_i$  は以下のような結果となった。

Threshold 99.5 %

$$\sigma_1 = 0.2362mm \quad \sigma_2 = 0.4717mm \quad \sigma_3 = 0.2357mm$$

Threshold 99.9 %

$$\sigma_1 = 0.2313mm \quad \sigma_2 = 0.4616mm \quad \sigma_3 = 0.2305mm$$

$\sigma_i$  はカットをいれることによって悪くなった。むしろ  $+3\sigma$  というカットが効いて必要以上に隣の波高値を削りすぎたために、信号が最も高い波高値をだした部分に集中しすぎてカットをいれない場合にくらべて、Residual 分布がやや離散的になっている。カットを入れない場合のほうが、両端にでるクロストークが解析で cancel して、より正しい結果にちかくなると解釈するべきであると思われる。

図 6.25、図 6.26 は Threshold 99.5 % のときと、Threshold 99.9 % のときの Tracking Efficiency であるが、基本的にそれほど変わらない。

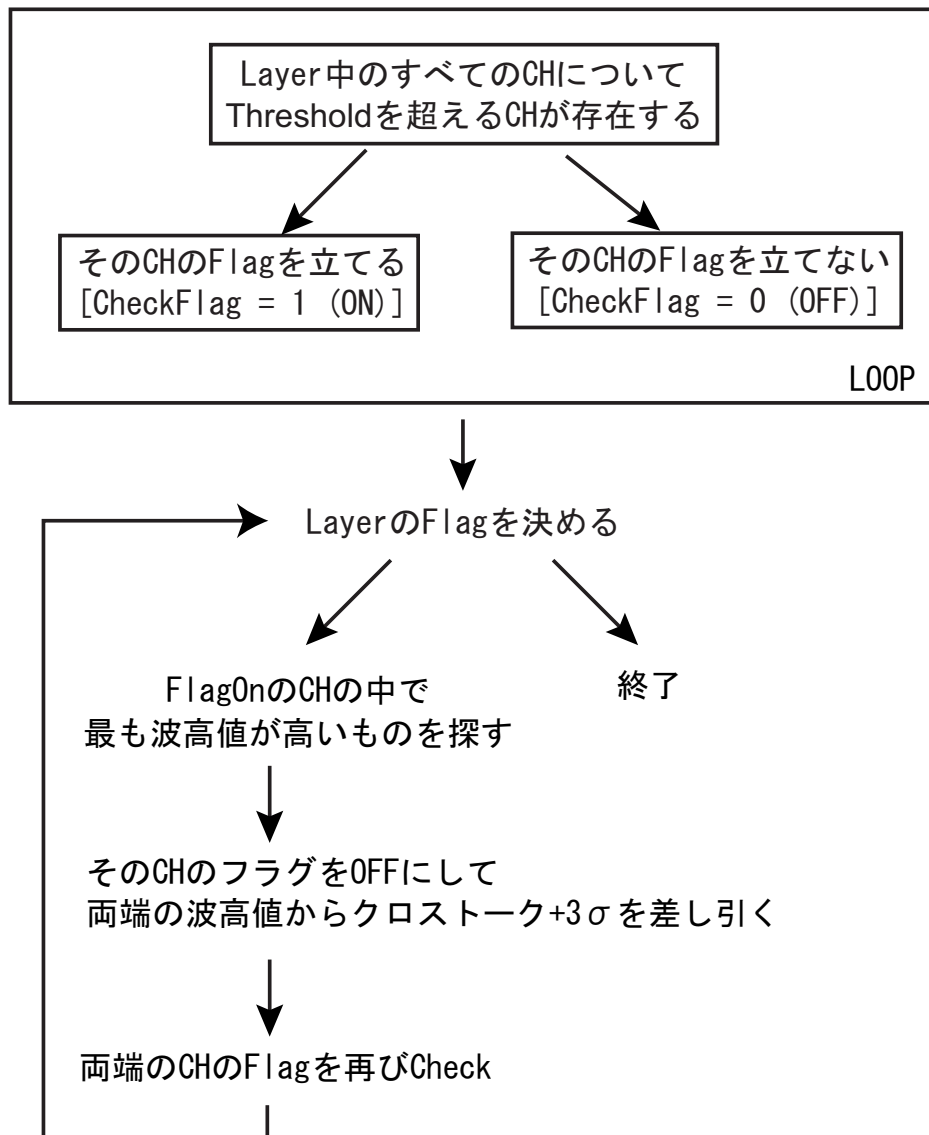


図 6.22: クロストークカットのプログラムロジック

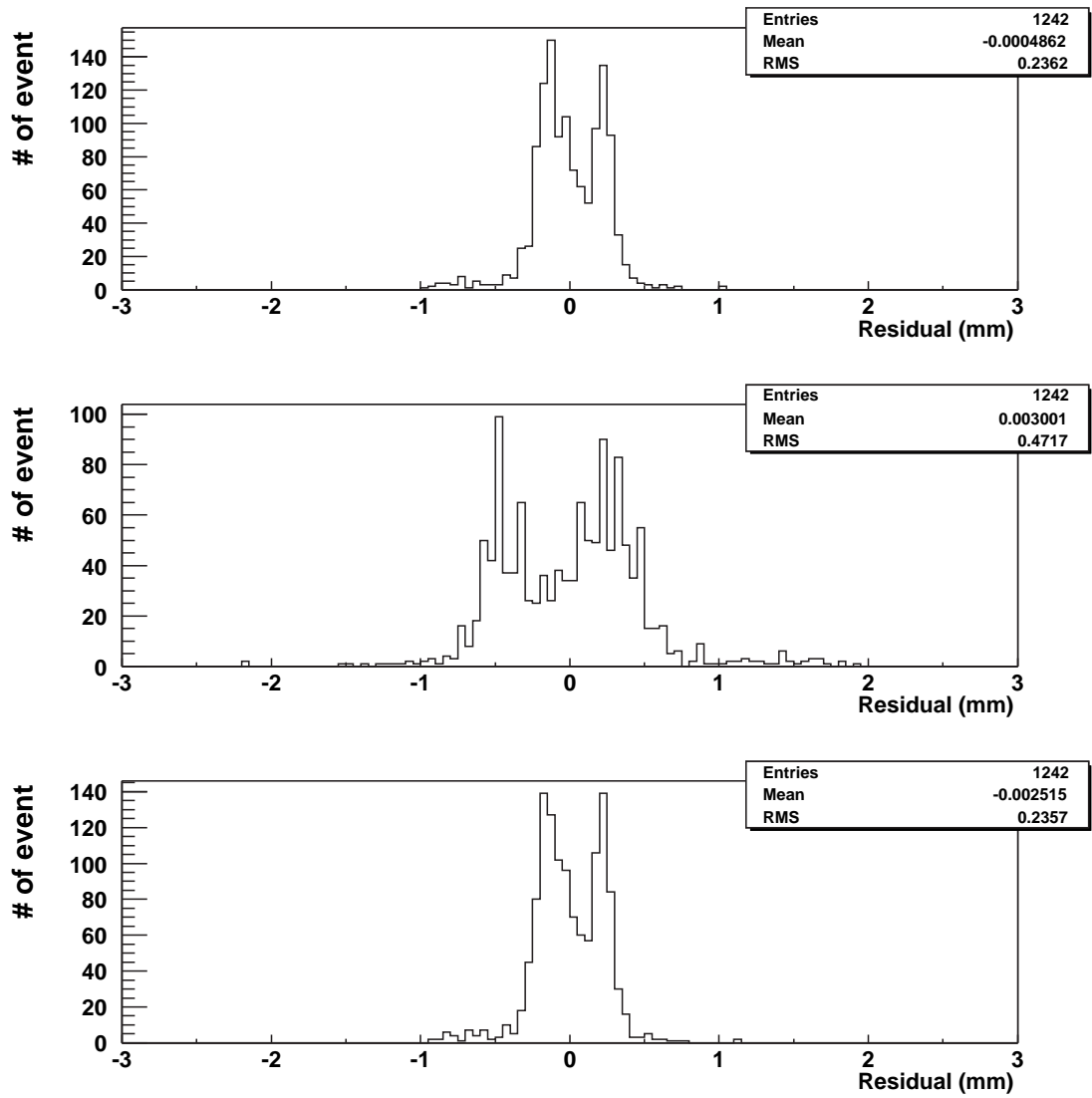


図 6.23: Threshold を 99.5 %にしたときの荷重平均 + クロストークカット解析による各 Layer の Residual 分布 ( 上から Layer1,Layer2,Layer3 )

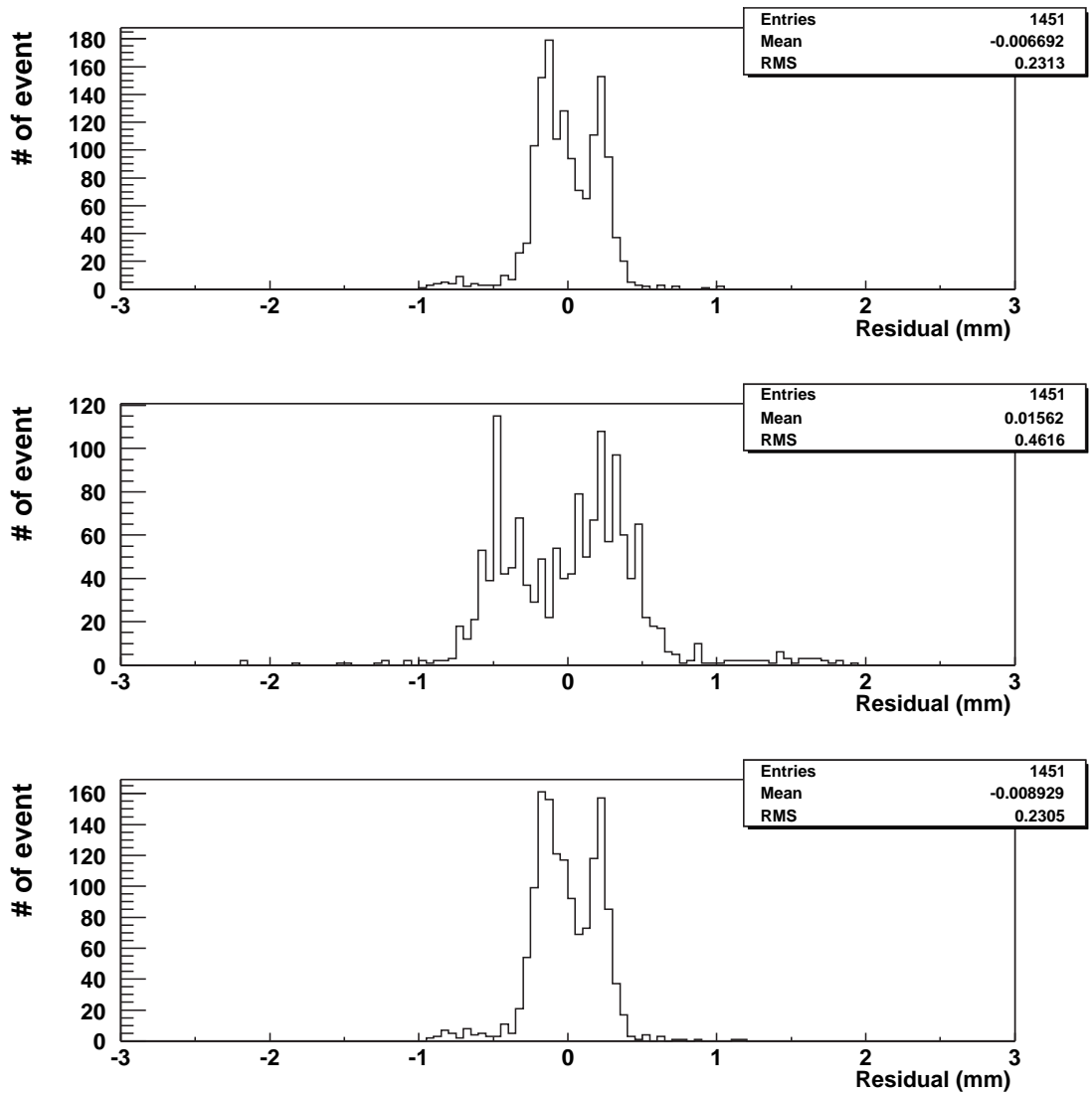


図 6.24: Threshold を 99.9 %にしたときの荷重平均 + クロストークカットによる各 Layer の Residual 分布 ( 上から Layer1,Layer2,Layer3 )

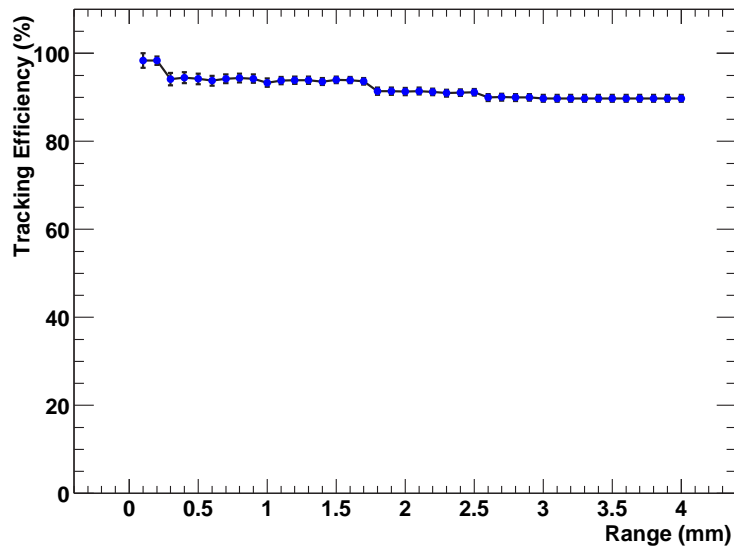


図 6.25: 荷重平均 + クロストークカット解析による Tracking Efficiency vs. Layer2 の中央位置からの内挿点の許容範囲 (Threshold 99.5 %)

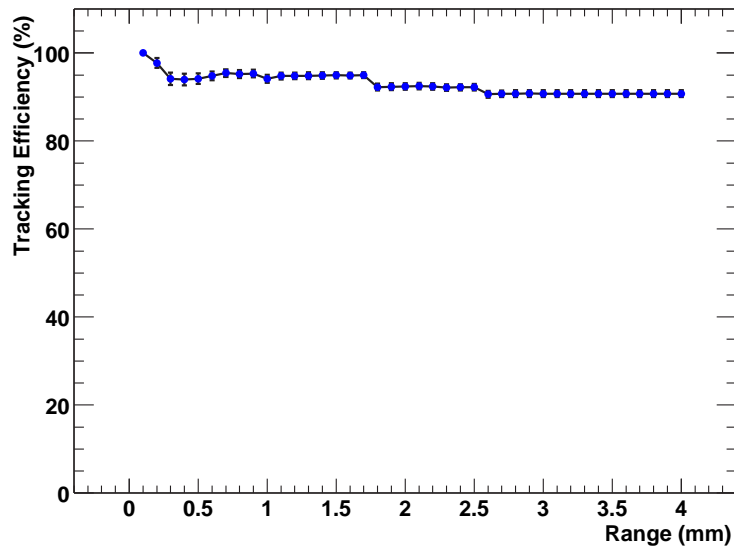


図 6.26: 荷重平均 + クロストークカット解析による Tracking Efficiency vs. Layer2 の中央位置からの内挿点の許容範囲 (Threshold 99.9 %)



表 6.12: 図 6.25 の詳細

range (mm)	event	good	bad	none	eff (%)	error (%)
0.1	28	28	0	0	100	0
0.2	167	164	2	1	98.2036	1.027796163
0.3	267	249	6	12	93.2584	1.534510413
0.4	306	286	8	12	93.4641	1.412909679
0.5	347	324	9	14	93.3718	1.335490892
0.6	434	406	10	18	93.5484	1.17925312
0.7	508	479	10	19	94.2913	1.02937251
0.8	530	499	11	20	94.1509	1.019339436
0.9	544	513	11	20	94.3015	0.993894133
1	627	583	13	31	92.9825	1.020135943
1.1	734	689	13	32	93.8692	0.885466434
1.2	776	729	13	34	93.9433	0.856288431
1.3	809	760	14	35	93.9431	0.838655085
1.4	887	832	14	41	93.7993	0.809763783
1.5	992	933	14	45	94.0524	0.75093091
1.6	1002	942	15	45	94.012	0.749546673
1.7	1010	950	15	45	94.0594	0.743798967
1.8	1094	994	17	83	90.8592	0.871300366
1.9	1168	1063	18	87	91.0103	0.836944098
2	1180	1074	19	87	91.0169	0.832402035
2.1	1193	1087	19	87	91.1148	0.823773554
2.2	1258	1147	19	92	91.1765	0.799689848
2.3	1302	1184	21	97	90.937	0.795611055
2.4	1310	1192	21	97	90.9924	0.790990847
2.5	1315	1197	21	97	91.0266	0.788133518
2.6	1376	1237	23	116	89.8983	0.812388479
2.7	1395	1255	23	117	89.9642	0.804495754
2.8	1399	1259	23	117	89.9929	0.802323266
2.9	1401	1261	23	117	90.0071	0.801244548
3	1415	1269	23	123	89.682	0.808671587
3.1	1415	1269	23	123	89.682	0.808671587
3.2	1415	1269	23	123	89.682	0.808671587
3.3	1415	1269	23	123	89.682	0.808671587
3.4	1415	1269	23	123	89.682	0.808671587
3.5	1415	1269	23	123	89.682	0.808671587

表 6.13: 図 6.26 の詳細

range (mm)	event	good	bad	none	eff (%)	error (%)
0.1	33	33	0	0	100	0
0.2	175	171	2	2	97.7143	1.12971697
0.3	273	257	6	10	94.1392	1.421616249
0.4	316	297	8	11	93.9873	1.337290666
0.5	360	339	9	12	94.1667	1.2352492
0.6	461	437	10	14	94.7939	1.034656013
0.7	546	521	10	15	95.4212	0.894544506
0.8	566	539	11	16	95.2297	0.895882057
0.9	578	551	11	16	95.3287	0.87774183
1	664	625	13	26	94.1265	0.912473797
1.1	784	743	14	27	94.7704	0.795083172
1.2	827	784	14	29	94.8005	0.772028531
1.3	852	808	15	29	94.8357	0.758179192
1.4	937	889	15	33	94.8773	0.720212782
1.5	1046	993	15	38	94.9331	0.678131871
1.6	1058	1004	16	38	94.896	0.676606947
1.7	1065	1011	16	38	94.9296	0.672275265
1.8	1150	1061	17	72	92.2609	0.78796178
1.9	1228	1134	18	76	92.3453	0.758703875
2	1236	1142	18	76	92.3948	0.753997402
2.1	1249	1155	18	76	92.474	0.746467166
2.2	1316	1216	18	82	92.4012	0.730438016
2.3	1362	1255	19	88	92.1439	0.729034772
2.4	1370	1263	19	88	92.1898	0.724956971
2.5	1374	1267	19	88	92.2125	0.722937182
2.6	1440	1305	21	114	90.625	0.768118813
2.7	1458	1323	21	114	90.7407	0.759121651
2.8	1462	1327	21	114	90.7661	0.757147922
2.9	1464	1329	21	114	90.7787	0.756166646
3	1473	1337	21	115	90.7671	0.754278837
3.1	1473	1337	21	115	90.7671	0.754278837
3.2	1473	1337	21	115	90.7671	0.754278837
3.3	1473	1337	21	115	90.7671	0.754278837
3.4	1473	1337	21	115	90.7671	0.754278837
3.5	1473	1337	21	115	90.7671	0.754278837

## 6.7 Residual 分布の形の解釈

本来ならば直線で Fit した Residual 分布はガウス分布するはずであるが、実際はガウス分布が二つ重なったような分布ができた。そこでこれを理解するためにつぎのような解釈を行った。



図 6.27: Residual 分布がガウス分布しなかったことに対する解釈

このことを証明するために、図 6.18 の Layer1,3 の Residual 分布を反転させて 2 倍して、Layer2 の Residual 分布と比較を行った。図 6.28 はそれをあらわしている。これをみると三者が非常によく一致していることが分かる。よって Tracking Test を行うには、もっと多くの Layer が必要となることが分かる。しかしこのデータも再構成点と Fit した直線との距離と Residual として Layer1 から Layer3 までの Residual を平均してやれば、SciFi Tracker の Residual を出すことが可能である。そこで Layer  $i$  での再構成点と Fit した直線との法線方向の距離（これまでの Residual は直線と再構成点との距離を Layer に平行な方向でとっていたが、今回は通常の点と直線との距離で求めた）を  $\sigma_i$  として、平均の Residual を  $\bar{\sigma}$  とすると、

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sigma_i \sigma^i}{3}}$$

となり、その  $\bar{\sigma}$  の分布は図 6.29 のようになった。

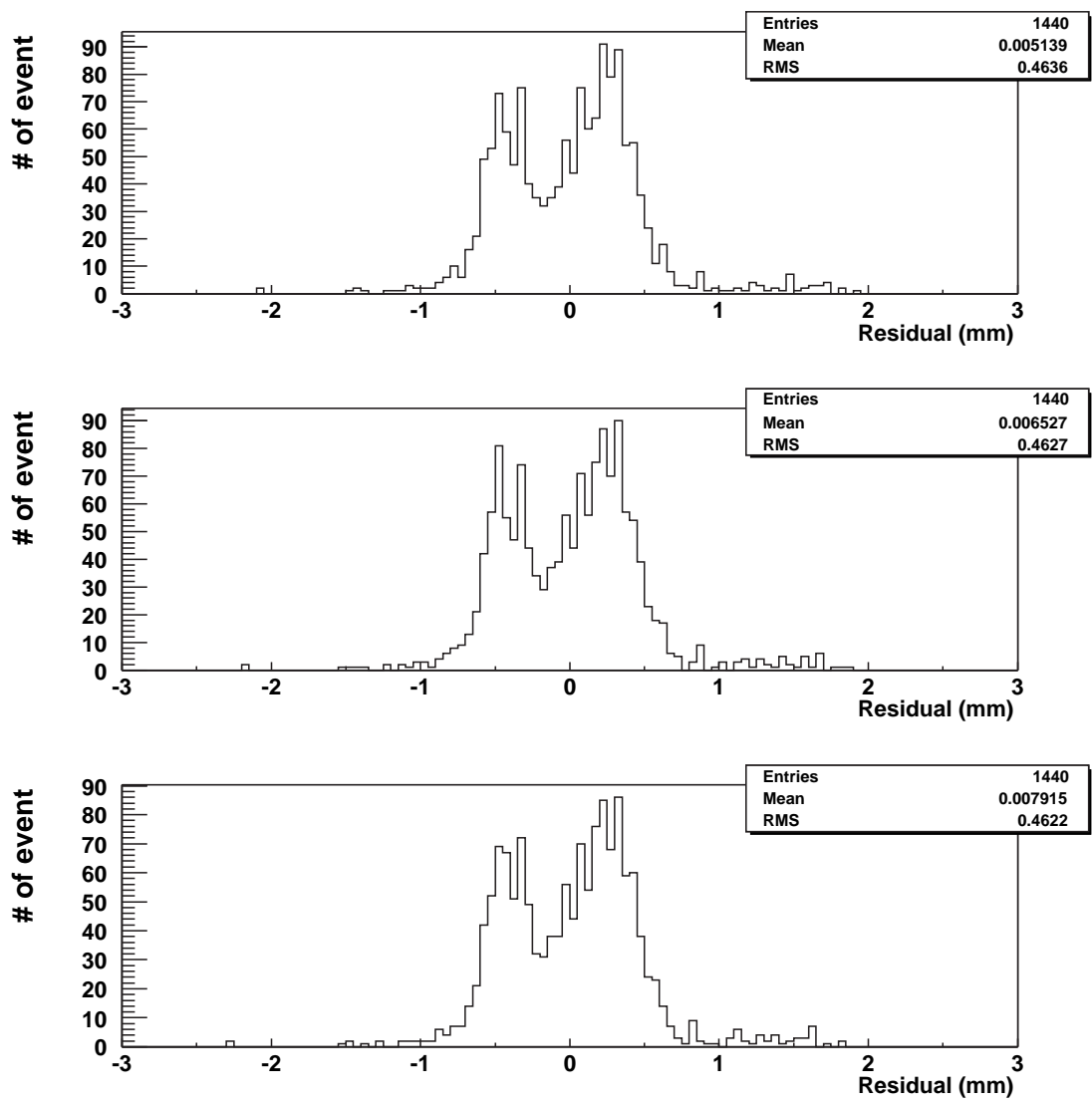


図 6.28: Layer1,Layer3 を反転させて 2 倍に広げたものと Layer2 との比較

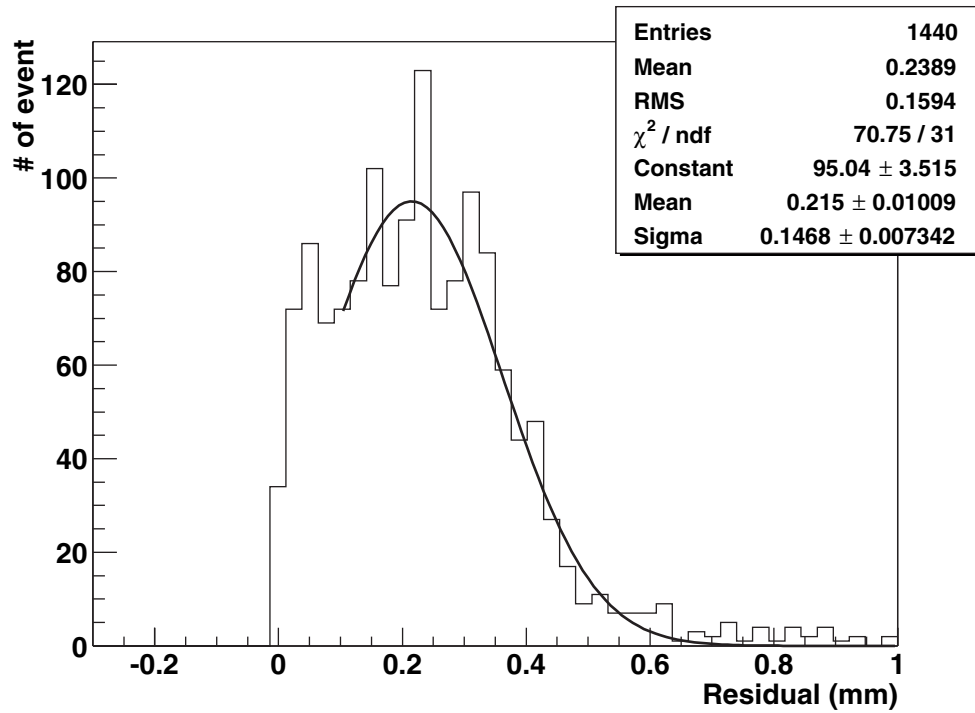


図 6.29:  $\bar{\sigma}$  の分布

ここからこの実験での SciFi Tracker の平均位置分解能は 0.215mm ということになる。SciFi は 0.4mm pitch でなっていることと Gain での荷重平均をとっていることから実際の解像度は  $0.40/\sqrt{12}$  よりはよくなるであろうと考えられるから、ここから alignment に関する誤差  $\sigma_{align}$  は

$$\begin{aligned} \sigma_{align} &\geq \sqrt{0.215^2 - 0.40/\sqrt{12}^2} \\ &= 0.181 \end{aligned}$$

となり、0.181mm 以上の誤差があると考えられる。

# 第7章 Simulation

LHC で実際にファイバーをセットしたときにどのくらいの occupancy になるのかをモンテカルロによって見積もってみようと思う。

## 7.0.1 longitudinal rapidity

longitudinal rapidity  $y$  は以下のように定義される。

$$y \equiv \frac{1}{2} \ln \left( \frac{E + P_z}{E - P_z} \right) = \ln \left( \frac{E + P_z}{\sqrt{P_T^2 + m^2}} \right)$$

この  $y$  は名前通り、longitudinal な方向の rapidity に相当するものであり、

$$\frac{dP_z}{E} = dy$$

がなりたつ。z 方向の Lorentz 変換 ( $E \rightarrow \gamma(E - \beta P_z)$ ,  $P_z \rightarrow \gamma(-\beta E + P_z)$ ) を行くと、

$$y \rightarrow y' = y + \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \equiv y + \Delta$$

ここで  $\beta = \tanh \Delta$  を用いた。粒子がとりうる最大の rapidity は重心系で  $\sqrt{s}/2$  ( $E = P_z = \sqrt{s}/2$ ) のときであるから、定義の式をつかって

$$y_{max}^{CM} = \ln \frac{\sqrt{s}}{m}$$

これから分かるように  $y$  は質量に依存、つまり粒子に依存する。よって粒子の種類が分からないときには pseudorapidity  $\eta$  を用いる。 $y$  の定義式に  $m=0$  を代入して、

$$\eta = -\ln \tan \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

## 7.1 Minimum bias by calculation

$\Delta\eta = 1$  あたりに飛来する荷電粒子数は一定であり、一回の衝突反応で飛来する荷電粒子の平均個数を  $N_{ch}$  をすると、その関係式は  $s$  [GeV] の関数で表される

[19]。

$$\left(\frac{dN_{ch}}{d\eta}\right)_{\eta=0} = 0.023\ln(s)^2 - 0.25\ln(s) + 2.5$$

LHC ( $\sqrt{s} = 14000\text{GeV}$ ) の場合、

$$\left(\frac{dN_{ch}}{d\eta}\right) = 0.023\ln(14000)^2 - 0.25\ln(14000) + 2.5 = 6.11$$

CMS MSGC は  $\Delta\eta = 5$  を cover しているので、ひとつの Layer 内に飛んでくる荷電粒子数は、

$$\left(\frac{dN_{ch}}{d\eta}\right) \cdot \Delta\eta = 6.11 \cdot 5.0 = 30.55$$

一方 Luminosity に関しては、

$$10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ @ Low Luminosity Phase}$$

$$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ @ High Luminosity Phase}$$

inelastic, non-diffractive crosssection  $\sigma \approx 70\text{mb}$ [21] を用いて、単位時間あたりの event 数は

$$7.0 \times 10^7 \text{ @ Low Luminosity Phase}$$

$$7.0 \times 10^8 \text{ @ High Luminosity Phase}$$

Bunch の衝突は 25ns ごとであるから、一衝突あたりの Minimum bias event は

$$1.75 \text{ event @ Low Luminosity Phase}$$

$$17.5 \text{ event @ High Luminosity Phase}$$

したがって、Minimum bias event あたりに Layer に飛来する荷電粒子数  $N_B$  は、

$$53.4625 \text{ @ Low Luminosity Phase}$$

$$534.625 \text{ @ High Luminosity Phase}$$

ここで磁場が存在しない場合の Tracking region の最も内側の Layer の Hit occupancy  $O_c$  を考えると、beam 軸からの距離  $r_{min}$ 、cell の pitch  $d$  を用いてつぎのように書ける。

$$O_c \sim \frac{N_B}{2\pi r_{min}/d}$$

CMS の Tracking region の最も内側では、 $r_{min} \sim 700\text{mm}$ 、 $d = 0.66\text{mm}$  であるから、

$$0.80 \% \text{ @ Low Luminosity Phase}$$

$$8.0 \% \text{ @ High Luminosity Phase}$$

磁場が存在しない場合は、occupancy は 10% 以下となっているが、実際 LHC 程度のバンチ衝突時間間隔が短いと、その重ね合わせをみることになり、その上、磁場がかかっていることから、比較的運動量の小さいな粒子がエネルギーを失うまで Loop し続けて、Hit occupancy を増大させる。したがって、磁場なしでも見積もりは目安程度にしかならない。したがって、以下では磁場中での SciFi Tracker の Hit occupancy の見積もりや Radiation damage など見積もっていく。

## 7.2 PYTHIA による Event Generation

今回の simulation における EventGenerator として PYTHIA6.205, JETSET7.4[22] を用いた。それぞれの役割は PYTHIA で event generation をして、JETSET は hadronization をおこす。

まず PYTHIA が正しい結果を出しているかどうか、いろいろチェックする。

### 7.2.1 Cross Section のチェック

$\sqrt{s}=14\text{TeV}$  の pp collision での cross section は PYTHIA が内部で持っている。10000event の衝突の結果、PYTHIA が出した cross section は表 7.1 ようになった。

表 7.1: PYTHIA による  $\sqrt{s}=14\text{TeV}$  でも pp cross section

Subprocess	Cross section (mb)
All included subprocesses	1.014E+02
Elastic scattering	2.221E+01
Single diffractive (XB)	7.151E+00
Single diffractive (AX)	7.151E+00
Double diffractive	9.677E+00

PDG によると実際の実験結果 [20] は次のようになっている。

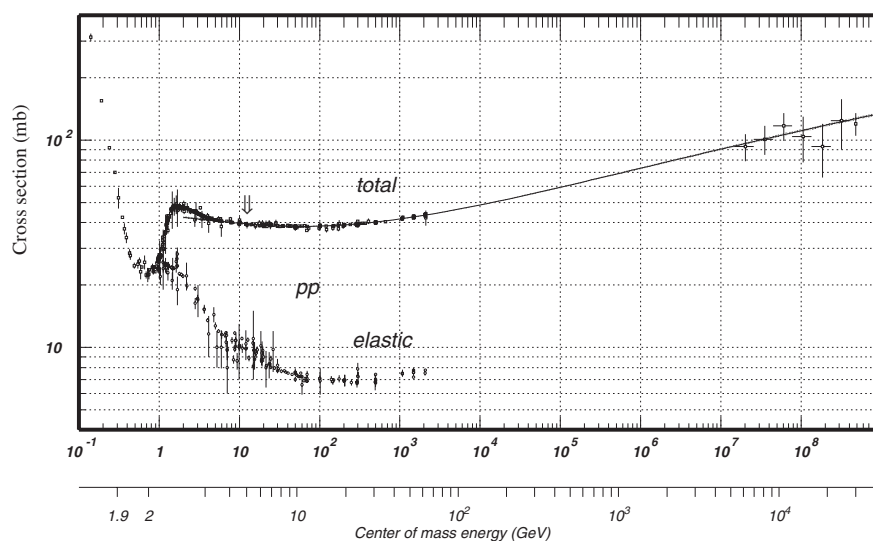


図 7.1: P-P 衝突における Cross section



これをみると、PYTHIA の与えた値は、total cross section については正しい値を与えていることが分かる。しかし、Elastic scattering に対する cross section が図 7.1 では確認できない。PYTHIA によると、inelastic cross section は 79.19mb という値を与えているが、資料 [21] によると、70mb 程度という値を出しているので、それほど悪くない値であろうと思われる。

## 7.2.2 Minimum bias event のチェック

LHCのようなエネルギーが高く、Luminosityが高い実験では一回の Bunch 衝突で発生する Minimum bias event は複数になる (PYTHIA ではこれを pile-up と呼ぶ)。通常、PYTHIA では一回の衝突で一回の Minimum bias が起きないが、実際の実験に即して pile-up による event generation をするには、以下のオプションが必要である。

- MSTP(131)=1

デフォルトでは off(MSTP(131)=0) になっている pile-up を on にする。

- MSTP(133)=1

pile-up される event の数を poisson 分布に従って発生させる。

しかし poisson 分布に従うと、0event という確率が本来発生するが、0event は simulate されないように設計されている。したがって、実際の Minimum bias を計算するにはこのことを考慮にいれなければならない。実際の Minimum bias event の平均を  $m$ 、PYTHIA がだした平均 Minimum bias event を  $m_p$  とすると、

$$m = \sum_k^N kP(k) \cdot \frac{1}{N}$$
$$m_p = \sum_k^N kP(k) \cdot \frac{1}{N - Ne^{-m}}$$

これより

$$m_p = \frac{m}{1 - e^{-m}}$$

このことから PYTHIA では実際の平均よりも多く見積もられていることがわかる。

- PARP(131)

ここでの一回の衝突あたりの luminosity、つまり pile-up rate を mb 単位で与える。

low luminosity の時で考えれば、

$$10^{33} [cm^{-2}s^{-1}] \times 25 \cdot 10^{-9} [s] \times 10^{-27} [cm^2/mb] = 0.025$$

したがって

PARP(131) = 0.025    low luminosity  
 PARP(131) = 0.25    high luminosity

以上の設定をして 1000 回の衝突での Minimum bias event をカウントした。pile-up event は、MSTI(41) に格納されているのでそれを足しあげた。その結果はつぎのようになった。

Number of Collision    1000  
 Pile-up Event            2013

したがって、PYTHIA が与えた平均 Minimum bias event は、2.013event であり、オーバーカウントされている分を差し引いて、実際の Minimum bias event を算出すると、1.61event に相当する。上の PYTHIA の出した cross section に基づくと、このうち inelastic event は 78 % に相当する、1.25event である。第 7.1 節で見積もった 1.75event にくらべて小さめの値となった。

### 7.2.3 G4HEPEvtInterface

PYTHIA の発生させた event を GEANT4 に受け渡す仕組みについて説明する。PYTHIA が粒子に割り振っている内部の ID 番号を HEP 標準の形式に変換するために、PYHEPC(1) というサブルーチンで変換する。変換前には unnecessary Line を消すために、

- CALL PYEDIT(11)    remove K(I,1) < 0
- CALL PYEDIT(12)    remove K(I,1) = 0
- CALL PYEDIT(15)    remove K(I,1) > 20

というサブルーチンを CALL しておく。その後 HEP 標準形式から GEANT4 の形式に変換するために HEP2G4 というサブルーチンを呼ぶ。ただし、HEP2G4 は PYTHIA 内部で用意されているサブルーチンではないため、ユーザーが coding する必要がある。G4HEPEvtInterface のクラスのプロトタイプは決まっているので、そのプロトタイプの引数になるものをこのサブルーチンを通してファイルに書き出し、GEANT に読み込ませればよい。

ここで GEANT が本当に PYTHIA からもらった情報を正しく結果に反映させているのかが問題となる。したがって、このことチェックするのに次の 2 点を確認した。

1.  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  の情報を PYTHIA で作り、それを GEANT に渡す
2.  $\pi^0$  が Decay しないように PYTHIA を操作し、その Decay しない  $\pi^0$  を GEANT に渡す

1. の結果、PYTHIA で与えた  $\pi^0$  からの  $\gamma$  の運動量、エネルギー共に GEANT で発生した  $\gamma$  と一致した。したがって、GEANT は PYTHIA からの情報をただしく受け取っている。また GEANT ではただしく粒子の親子関係を受け取っており、 $\gamma$  は  $\pi$  が decay した地点で発生している。

2. の結果、GEANT は PYTHIA の  $\pi^0$  の情報を正しく受け取っていたが、GEANT は勝手に  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  という Decay を行っていた。これを複数回行ったところ、どうも GEANT が確率で任意の方向に  $\gamma$  を発生させていることがわかった。

この二つのことを組み合わせてると、GEANT は PYTHIA から正しい情報を受け取り、そのとおりに Event を発生させるが、その先は GEANT が独自に判断していると考えられる。(正確に言えば GEANT がどのような physics を扱うかはデフォルトが用意されておらずユーザーが GEANT に考慮すべき physics を与えて、その physics が PYTHIA からの情報をすべて行った後、適応可能であれば発生させるということであろう。)

## 7.2.4 Charged particle density

PYTHIA ではユーザーが physics process を与えなければならない。この process の選択が適切であるかを調べるために、charged particle density が適切な値をとるかによって評価したいと思う。PYTHIA に考慮させた physics process を表 7.2 に挙げる。

表 7.2: PYTHIA に考慮させた physics process

process	PYTHIA code
Initial state radiation	MSTP(61)=1
Final state radiation	MSTP(71)=1
K factor in x-sec for qq	MSTP(33)=1
Second order running $\alpha_s$	MSTP(2) =1
Elastic scattering	MSEL =2 (ISUB = 91)
Single diffractive (XB)	(ISUB = 92)
Single diffractive (AX)	(ISUB = 93)
Double diffractive	(ISUB = 94)
Low-pT scattering	(ISUB = 95)
Semihard QCD $2 \rightarrow 2$	(ISUB = 96)

さらに PDF (Parton Distribution Function) として CTEQ5L(MSTP(51)=7, MSTP(52)=1) という比較的シンプルなモデルを採用し、PYTHIA にデフォルトで勝手に行われている  $P_{Tcut}$  を行わせないように許容する lower  $P_T$  limit を 0 にした

(CKIN(3)=0D0)。

上記のような設定で Charged particle density( $dN/d\eta$ ) を Simulation してみた。Simulation にあたっては、前述の pile-up による Minimum bias event が Data からの見積もりに対してやや小さめな値をとっていたことから、pile-up に関するオプションははずし、一回の衝突に一回しか発生しないようにした。10000 回の衝突、すなわち 10000 の minimum bias event のデータを用いた。その結果が図 7.2 である。ここで考慮している粒子は final state に存在する粒子だけである。

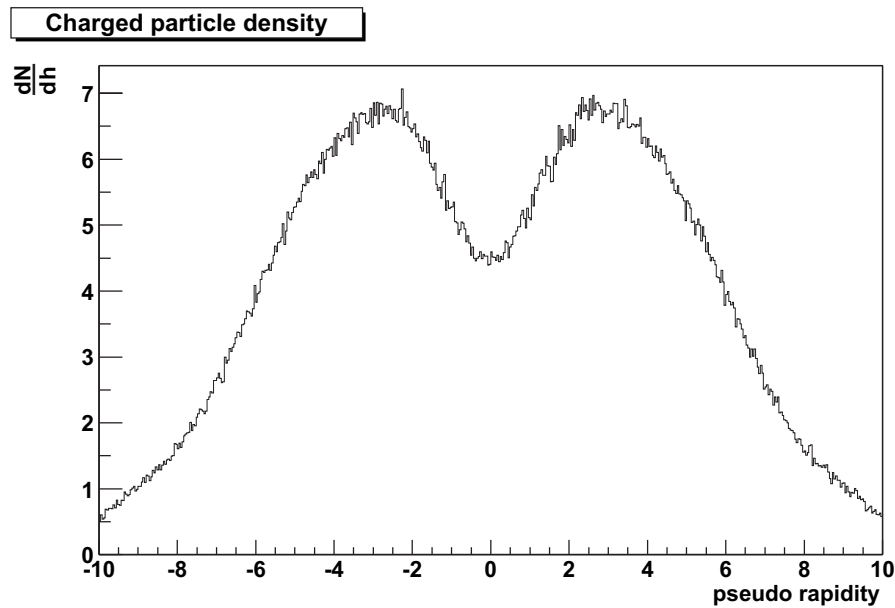
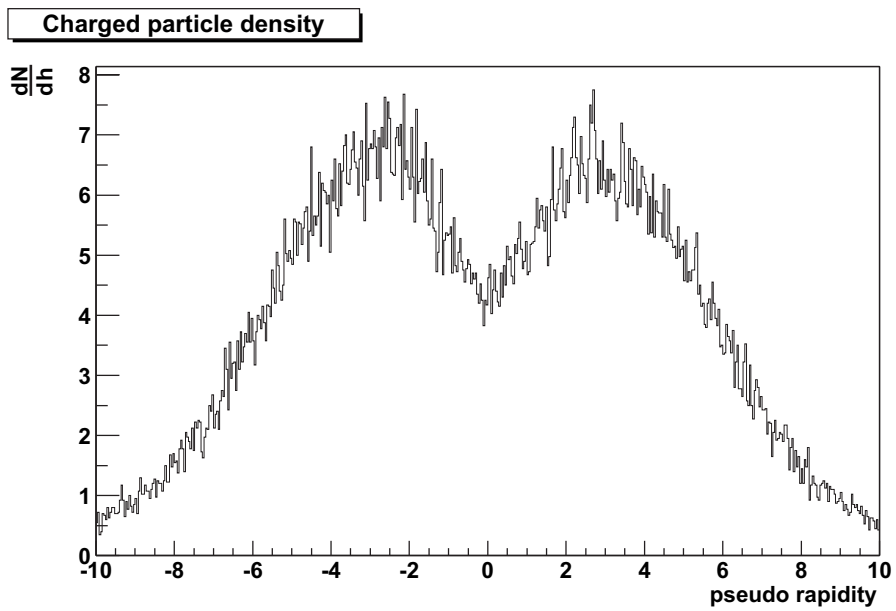


図 7.2: PYTHIA による Charged particle density (10000 minimum bias event)

7.1 節での計算によると  $(dN/d\eta) = 6.11$  だったので、PYTHIA による結果はほぼ計算どおりだということができる。

続いて PYTHIA で発生した 1000event(GEANT は処理に時間がかかるので 1000event しか渡さなかった) を GEANT に渡し、ビーム衝突点を中心として半径 500mm (Tracker region の Typical な距離) の真空で作られた非常に厚さの薄い仮想の球を置き、球に当たったときに粒子の情報を得て、荷電粒子だったときのみ計算対象にするプログラムをつくった。それによって得られた charged particle density は図 7.3 のようになった。



☒ 7.3: GEANT4 による Charged particle density (1000 minimum bias event)

### 7.3 Hit Occupancy

Hit Occupancy は TDR などによれば、10 % 以下にするべきだとか記述があるものの、Hit Occupancy 自身の study については詳細が書かれていない。たしかに Hit Occupancy だけが分かっている、実際の精度や多重粒子解像度について議論するには、Noise Occupancy, 検出効率など他のファクターの情報も必要であろう。

したがって、ここで SciFi Tracker の Occupancy を simulate したとしても 10 % 以下になったので使用可能であるという程度のことしか言えないので、実際に ATLAS の環境下で Straw chamber との Occupancy の比較することによって SciFi Tracker の相対的な Hit occupancy についての性能を調べようと思う。

まず、ATLAS 環境下での Straw chamber の Occupancy について再びみってみる。これは第一章ですでに詳細は説明した Occupancy の図である。

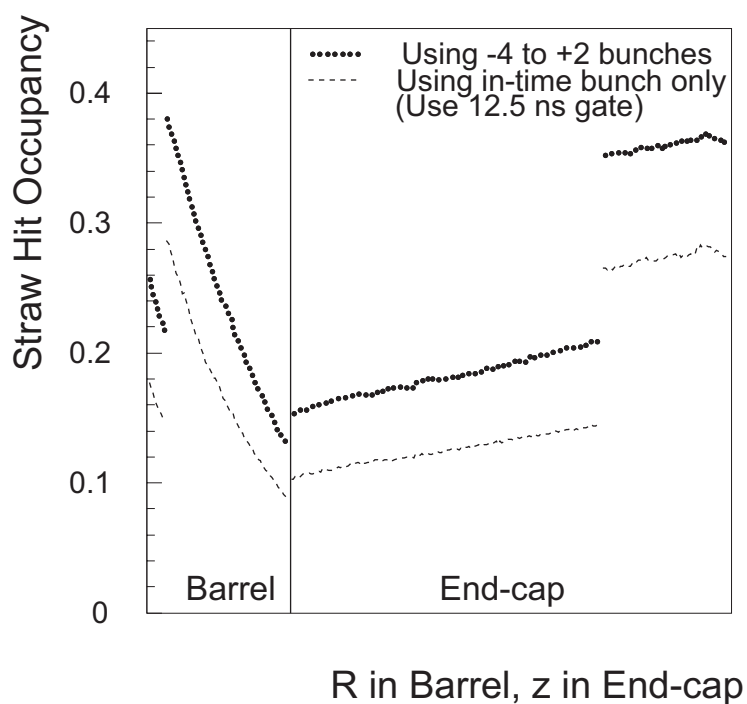


図 7.4: ATLAS 環境下での Straw chamber の occupancy

Inner Barrel は二つのタイプに分けられており、 $40\text{cm} \leq |z| \leq 74\text{cm}$  と  $0\text{cm} \leq |z| \leq 74\text{cm}$  がある。ここで分かるのが、Inner Barrel のうち外側の存在する  $0\text{cm} \leq |z| \leq 74\text{cm}$  をカバーする Barrel が Occupancy を一番大きくさせていることが分かる。

そこでこの部分を今回実験を行った core 0.66mm、clad 0.75mm の SciFi に置き換えたらどの程度 Occupancy が低下するのかを調べた。同条件にするために、2T

の磁場をかけ、SciFi のほうも gate 幅 12.5ns で Trigger をかけている。さらに SciFi は  $0\text{cm} \leq z \leq 74\text{cm}$  の部分と  $-74\text{cm} \leq z \leq 0\text{cm}$  の部分に分割している。Straw も  $z=0$  のところで電氣的に分割されている。また Simulation 上での SciFi Tracker の並べ方は、図 7.5 のように 0.75mm の SciFi が接するように  $\phi$  方向に配置をし、外側の SciFi Layer はその間に配置している。こうして、すべての SciFi の中心位置を決めた後、0.66mm の core の SciFi をおいた。clad 部分については Simulate していない。

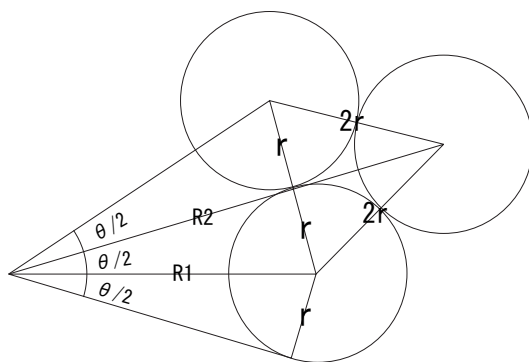


図 7.5: Simulation 上の SciFi Layer の配置

参考のために InnerBarrel 部分の Straw の配置の仕方を示す。

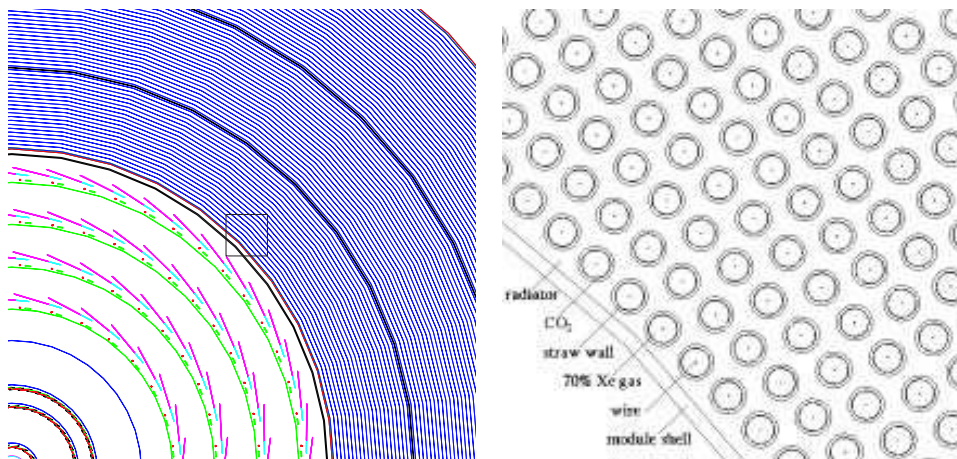


図 7.6: TRT の Straw chamber の配置 6.8mm step に並べられている。



Simulationの結果、以下のような結果となった。比較のために、図7.4の12.5nsのgate幅のin-time-bunchの結果を示す。

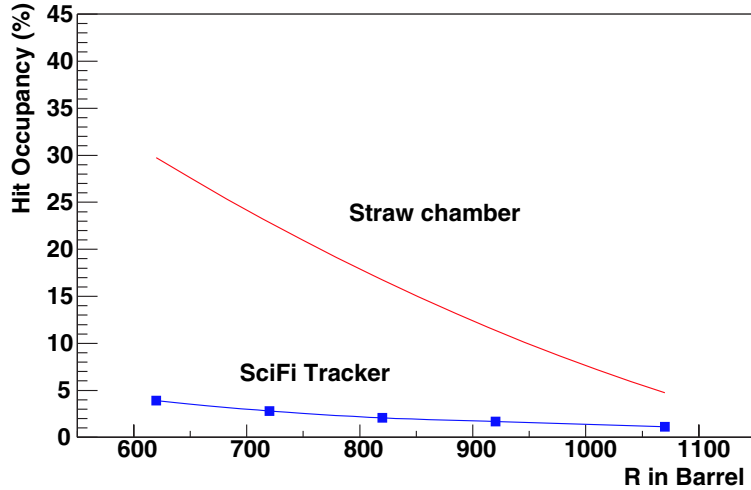


図 7.7: ATLAS 環境下での SciFi Tracker, Straw chamber の Occupancy の比較

この Simulation による結果が適切であるかについて簡単な定量的な議論をする。

Straw chamber の配置は 6.8mm 間隔になっており、そのうち cell の直径は 4mm であるため、飛来粒子の数を  $N$  と仮定したとき一つの Layer が拾うことができる粒子数は  $4/6.8N$  程度になり、cell の数を  $N_{cell}$  とおくと、Straw chamber の Occupancy  $O_{straw}$  は

$$O_{straw} = \frac{4.0}{6.8} \cdot \frac{N}{N_{cell}}$$

これに対し、SciFi Tracker は図 7.5 のように 0.75mm step に並んでおり、一つの Layer が拾うことができる粒子数は  $0.66/0.75N$  となり、cell の数は  $6.8/0.75$  倍になり、これより、SciFi Tracker の Occupancy  $O_{SciFi}$  は

$$O_{SciFi} = \frac{0.66}{0.75} \cdot \frac{0.75}{6.8} \cdot \frac{N}{N_{cell}}$$

これをまとめると

$$\frac{O_{SciFi}}{O_{straw}} \sim 0.165$$

となり、6 倍程度の Occupancy の低下が期待される。実際 Simulation の結果では  $r = 620$  のところで比較すると、

$$\frac{O_{SciFi}}{O_{straw}} \sim 0.136$$

というように、大まかには一致している。

## 7.4 Radiation Damage

### 7.4.1 荷電粒子による放射線量の見積もり

pseudorapidity と立体角の定義より、次の式が成り立つ。

$$\begin{aligned}d\Omega &= 2\pi \sin\theta d\theta \\d\eta &= -\frac{1}{\sin\theta}d\theta\end{aligned}$$

荷電粒子は pseudorapidity 分布でほぼ平らな分布をするので

$$\frac{dN}{d\Omega} = \frac{6}{2\pi \sin^2\theta}$$

バンチ間隔が 25ns であるから、一秒間に  $4.0 \times 10^7$  回 interaction が起こり、

$$\frac{dN^{charged}}{dS} = 6 \cdot \frac{1}{2\pi L^2 \sin^2\theta} \cdot 4.0 \times 10^7 [1/sec] = \frac{4.0 \times 10^7}{r_T^2} [1/sec]$$

ここで  $r_T$  はビームパイプからの距離である。Tracking Detector の最も内側の Barrel の typical な値として  $r_T = 60cm$  で考えると、

$$\frac{4.0 \times 10^7}{60^2} [cm^{-2}] = 11,000 \text{ particle } [cm^{-2}] @ 60cm$$

年間の運転時間が  $10^7$  sec とすると、積算粒子通過量は  $1.1 \times 10^{11} [1/cm^2]$  にもなる。この放射線量 (dose) に換算すると、

$$\begin{aligned}dose &= \frac{4 \times 10^7}{r_T^2} \cdot \frac{10^7}{3.7 \times 10^9} [\text{Gy/Year}] \\&\sim \frac{10^5}{r_T^2} [\text{Gy/Year}]\end{aligned}$$

ここで Gy は吸収放射線量の単位で  $1\text{Gy}(\text{gray}) = 100\text{rad} = [\text{J}]/[\text{kg}] = 6.25 \times 10^9 \text{ MeV/g}$  となる。MIP の物質中でのエネルギー損失は約  $1.7\text{MeV/g/cm}^2$  なので、1Gy は  $1\text{cm}^2$  あたり、 $3.7 \times 10^9$  個の粒子が通過した量に相当する。

### 7.4.2 Radiation Damage Simulation

LHC 実験での Low luminosity phase の goal は一年間の RUN で  $10\text{fb}^{-1}$  のペースで Luminosity をあげていき、三年間の RUN で Integral Luminosity を  $30\text{fb}^{-1}$  を達成することである [21]。

RUN の最中バンチが等間隔に存在しており、25ns ごとにずっと衝突しつづけない。実際 Low luminosity phase での luminosity の値を使って三年間の Integral

Luminosity を計算すると  $90\text{fb}^{-1}$  になる(もしかしたらオーダーだけの話をしているのか)。したがって、以下では一回の衝突あたりの Integral Luminosity を計算し、そこから  $30\text{fb}^{-1}$  を貯めるには、何回衝突させればいいのかを計算する。

一回の衝突あたりの Integral Luminosity は

$$\int Ldt = 10^{33} \times (25 \times 10^{-9}) \times 10^{-24} = 25 \text{ barn}$$

したがって  $30\text{fb}^{-1}$  を貯めるには  $1.2 \times 10^{15}$  回衝突が必要である。

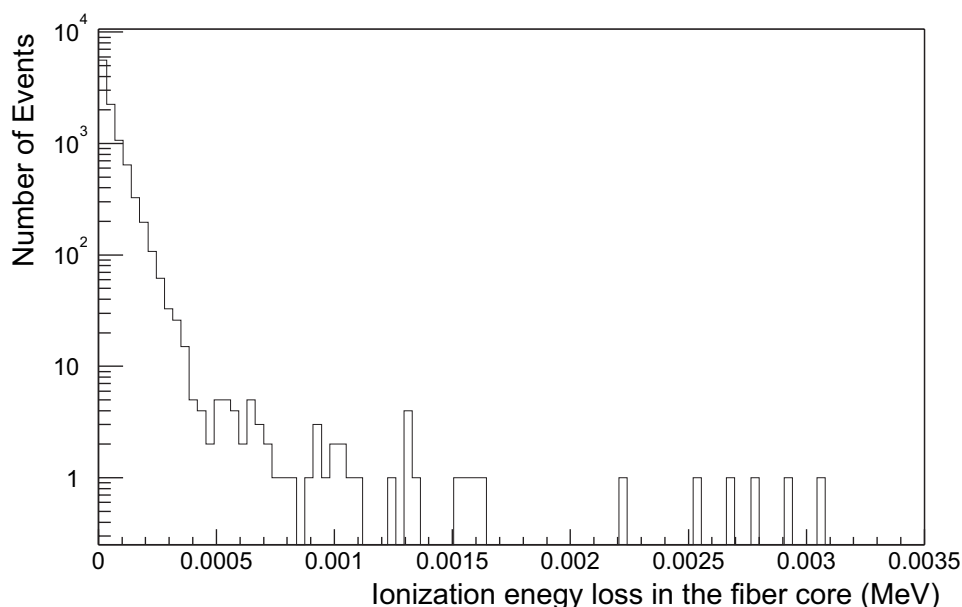


図 7.8: 一回の Minimum bias event 当たりの各 Fiber でのイオン化損失の分布

図 7.8 は、一回の Minimum bias event 当たりの各 Fiber のイオン化損失の分布を示している。これは GEANT で 1000 回 pile-up なしのデータを用いて Simulate し、その平均をとったものである。図 7.8 の平均値は

$$4.992 \times 10^{-5} \pm \frac{1.0 \times 10^{-4}}{\sqrt{1000}} \text{ [MeV]}$$

実際には一回の衝突で 2.3pile-up (ATLAS TDR によると High Luminosity の pile-up は 23event であるとしていることから、low luminosity では 2.3 と計算した) し、三年間での衝突回数は  $1.2 \times 10^{15}$  であるから Fiber 当たりの平均イオン化損失は

$$4.992 \times 10^{-5} \times 2.3 \times (1.2 \times 10^{15}) = 1.38 \times 10^{11} \text{ [MeV]}$$

ここで一つの Fiber の重さを計算すると

$$\pi \times \left( \frac{0.066 \text{ [cm]}}{2} \right)^2 \times 74 \text{ [cm]} \times 1.05 \text{ [g/cm}^{-3}] = 0.266 \text{ [g]}$$

したがって、Fiber 1 本全体の吸収放射線量は

$$\frac{1.38 \times 10^{11} [\text{MeV}]}{0.266 [\text{g}]} \cdot \frac{[\text{Gy}]}{6.25 \times 10^9 [\text{MeV/g}]} = 8.30 \times 10^1 [\text{Gy}]$$

Simulation のここまでの議論が適切かを確認するためにいろいろな角度から、定量的に Dose を見積もる。

$\eta$  当たりの charged particle の数は、6 だとすると、今は  $\Delta\eta = 2$  をカバーしているので一回の Minimum bias event 当たりに発生する charged particle の数は 12 になる。それが 2.3 の pile-up と衝突回数を考慮して 3 年間の RUN で Fiber を通過する charged particle の数は

$$12 \times 2.3 \times 1.2 \times 10^{15} = 3.31 \times 10^{16} \text{ particle}$$

今回使用している core 径が 0.66mm の Fiber を MIP が通過したときの平均 Energy deposit は 110KeV[13] であり、 $r = 620\text{mm}$  での SciFi の本数は doublet layer 全体で 2 万本程度存在するから、一本の Fiber 当たりの

$$3.3 \times 10^{16} \times 0.11 [\text{MeV}] \times \frac{1}{20000} = 1.8 \times 10^{11} [\text{MeV}]$$

すると、Fiber 1 本全体の吸収放射線量は

$$\frac{1.8 \times 10^{11} [\text{MeV}]}{0.266 [\text{g}]} \cdot \frac{[\text{Gy}]}{6.25 \times 10^9 [\text{MeV/g}]} = 108 [\text{Gy}]$$

となり、この結果も大まかには正しい結果となっている。

また前節の計算を用いると

$$dose \sim \frac{10^5}{60^2} \times 3 [\text{Gy}/3\text{year}] = 83.3 [\text{Gy}]$$

となり、非常によく Simulation の結果と一致している。

また CDF RUNI の SVX での Radiation Damage についての研究結果 [24] を用いて、Radiation Damage を計算すると、SVX のビームから 3cm のところでは  $300\text{rad}/\text{pb}^{-1}$  になり、それが  $r^{-1.7}$  に比例するから、 $r=62\text{cm}$  のところでは

$$dose = 300 \times \left(\frac{62}{3}\right)^{-1.7} = 1.74 [\text{rad}/\text{pb}^{-1}]$$

$30\text{fb}^{-1}$  貯めたとき、

$$1.74 [\text{rad}/\text{pb}^{-1}] \times 30 \times 10^3 = 52 [\text{Gy}]$$

Tevatron は一回の Minimum bias 当たりに発生する  $\eta$  当たりの charged particle density は約 4 であり、LHC では約 6 であるから、

$$52 [\text{Gy}] \times \frac{6}{4} = 78 [\text{Gy}]$$

### 7.4.3 Radiation Damage による SciFi Tracker への影響

前節で計算した結果を用いて、これまで考えてきた Barrel の最も厳しいところの SciFi Tracker が LHC low luminosity phase の 3 年間の RUN に耐えられるのかを検証する。

3HF の Radiation Damage に対する Attenuation Length の低下は [24] で study されており、100krad 程度の Damage を受けると、Attenuation Length が 50 % 程度に低下することが分かっている ( 図 7.9 )

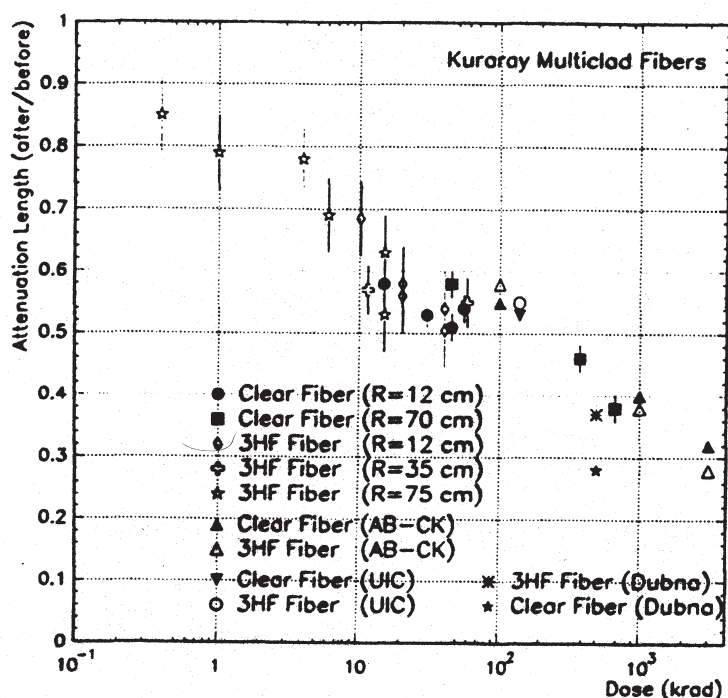


図 7.9: Ratio of attenuation lengths before and after irradiation.[24]

一般に Light Transmission  $T$  は以下のように書かれる。

$$T = \left[ \exp\left(-\frac{z}{\lambda_{sc}}\right) + R \exp\left(-\frac{2L_{sc} - z}{\lambda_{sc}}\right) \right] \epsilon_{conn} \exp\left(-\frac{L_{cl}}{\lambda_{cl}}\right) \epsilon_{conn} \epsilon_{cass} QE$$

ここで、 $\lambda_{sc}$  は SciFi の Attenuation Length、 $z$  は照射位置、 $R$  はミラーの反射率、 $L_{sc}$  は SciFi の全長、 $L_{cl}$  は clear fiber の全長、 $\lambda_{cl}$  は clear fiber の Attenuation Length、 $\epsilon_{conn}$  は connection efficiency、 $\epsilon_{cass}$  は fiber と APD の cassette transmission efficiency、 $QE$  は APD の量子効率である。

まず、clear fiber を接続せず、SciFi を APD に直接接続した場合を考える。Light

Transmission に関する Parameter はすでに研究されており [25]、これによると Photoelectron の数を  $Y_M$  とし、最初に発生した photon の数を  $N$  として、

$$\begin{aligned} Y_M(x) &= N \epsilon_{conn} \epsilon_{cass} Q E \left[ \exp\left(-\frac{z}{\lambda_{sc}}\right) + R \exp\left(-\frac{2L_{sc} - z}{\lambda_{sc}}\right) \right] \\ &\equiv Y_0 \left[ \exp\left(-\frac{z}{\lambda_{sc}}\right) + R \exp\left(-\frac{2L_{sc} - z}{\lambda_{sc}}\right) \right] \end{aligned}$$

のような関数を使って Fit を行い、以下のような結果が得られた。

$Y_0$	$17.0 \pm 0.8$
$\lambda$	$6.8 \pm 1.2 \text{ m}$
$R$	$0.71 \pm 0.08$

この値をつかって  $30\text{fb}^{-1}$  の Radiation Damage を受けたときの Photoelectron の数を計算する。照射位置に関しては最も遠い位置にある  $z=74\text{cm}$  の時に照射されたときを考える。Photoelectron の数は

$$\begin{aligned} Y_M &= 17 \left[ \exp\left(-\frac{0.74}{3.4}\right) + 0.71 \exp\left(-\frac{0.74}{3.4}\right) \right] \\ &\sim 23 \end{aligned}$$

このことから十分読み出し可能であることが分かった。

さらにどこまで SciFi を伸ばすことができるかを計算することにする。[25] のミラーなしの実験から photoelectron 10 個程度なら高い検出効率を得られることを確認しているので、 $Y_M=10$  として、方程式を解くと、 $z=3.6 \text{ m}$  となる。 $\eta = \pm 2.5$  をカバーするには  $z=0$  から  $\pm 3\text{m}$  あればよいので、十分であるといえる。よって実際は  $z$  方向への SciFi の長さは検出効率の低下からではなく、Occupancy によって制限されることが分かった。

つぎに clear fiber を用いて、APD をどの程度はなれた場所におくことが可能であるかを検討する。clear fiber の Attenuation length は  $10 \text{ m}$  とし、Radiation damage によって、 $5\text{m}$  になるとする。そして SciFi と clear fiber の connection efficiency については、約  $95\%$  程度であることが分かっているので [31]、Photoelectron 10 個までを許容すると、

$$10 = 17 \left[ \exp\left(-\frac{0.74}{3.4}\right) + 0.71 \exp\left(-\frac{0.74}{3.4}\right) \right] \cdot 0.95 \cdot \exp\left(-\frac{L_{cl}}{5.0}\right)$$

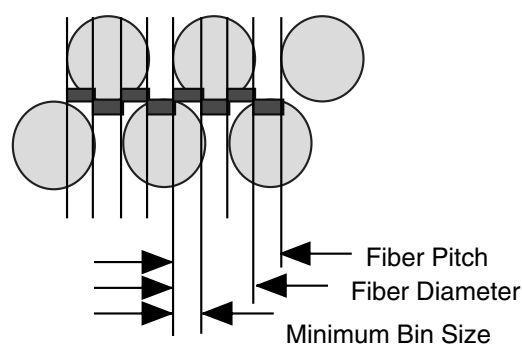
これを解くと、 $L_{cl}=4.0\text{m}$  となる。ここから detector の外へはもっていけないので、detector 内に cryostat を設置することになるが、end cap の事も考えると、中

中央飛跡検出器の外側に置くのが妥当と考えられる。そのときに 4m という距離は十分な距離であり、この計算は最も RadiationDamage の厳しいところでのものなので、実際はもっと clear fiber を長くすることが可能であると思われる。

## 7.5 Momenmum resolution

### 7.5.1 SciFi Tracker Momentum resolution

ここでは SciFi Tracker の Momentum resolution を求める。これまでの実験結果より、core 径が 0.66mm 以下でも使用可能であることが分かっているが、ここでの計算では SciFi の core は 0.66mm で計算していくことにする。ただし Alignment に関しては 0.4mm pitch に並べた doublet layer ではなく、次のような Alignment で計算する。



- Fiber Pitch ~ 1 mm
- Fine Binning = Sum of 4 Minimum bins

図 7.10: DØ Fiber Alignment

Bin size が core の 1/3 なので、

$$\text{resolution} \leq \frac{1}{3} \cdot 0.66 \cdot \frac{1}{\sqrt{12}} = 63.5 \mu\text{m}$$

不等号をいれたのは、APD の Gain による荷重平均ではさらに resolution がよくなるのが期待されるからである。

ここで 3 章の話を出すと、High  $P_T$  の Momentum resolution は、Multiple scattering の効果を見捨ててよいから

$$\frac{\sigma(P)}{P} \sim \frac{\epsilon \cdot P}{0.3 \cdot B \cdot L^2} \sqrt{\frac{720}{N+5}}$$

ここで Typical な中央飛跡検出器の  $\epsilon$  は次のようになっている。



表 7.3: Position Accuracy of Typical Detector

Drift chamber	$\sim 200 \mu\text{m}$ [29]
Straw chamber	170 - 200 $\mu\text{m}$ [4]
Micro Strip Gas Chamber	30 - 40 $\mu\text{m}$ [6]

ここから CMS の MSGC の Momentum resolution を出すと、

$$\begin{aligned}\frac{\sigma(P)}{P} &= \frac{35 \times 10^{-6} P}{0.3 \cdot 4 \cdot 0.4^2} \sqrt{\frac{720}{(6-1)+5}} \\ &= 0.001546P\end{aligned}$$

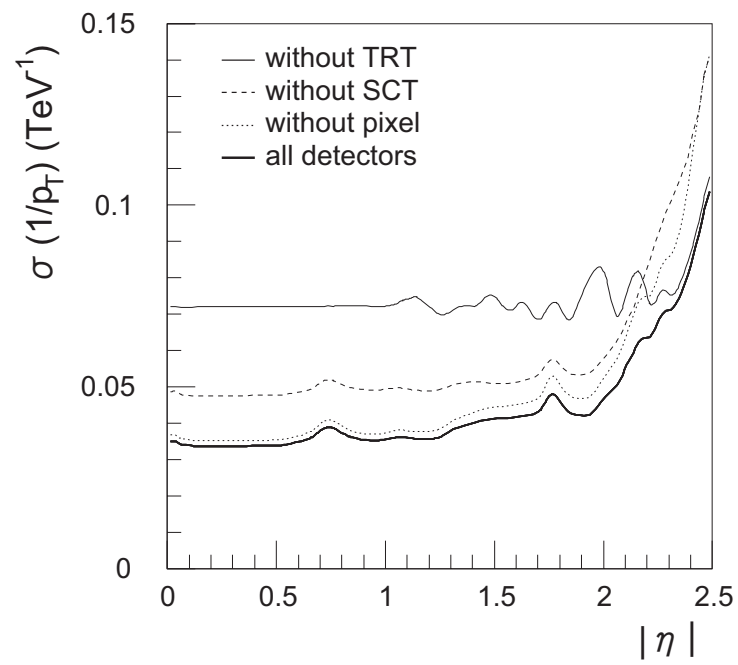
ATLAS の Straw chamber の Momentum resolution を出すと、

$$\begin{aligned}\frac{\sigma(P)}{P} &= \frac{185 \times 10^{-6} P}{0.3 \cdot 2 \cdot 0.51^2} \sqrt{\frac{720}{(73-1)+5}} \\ &= 0.003624P\end{aligned}$$

このことから LHC の中央飛跡検出器としての Momentum resolution に対する要請は上の程度であることがわかる。ここで逆算をして、SciFi Tracker が同程度の performance をするにはどの程度の Layer が必要なのかを計算すると、領域の長さは同じだと近似すると、CMS の場合には 28Layer、ATLAS の場合には 5Layer 必要である。

図 7.11 は、ATLAS での Inner detector による momentum resolution を  $\eta$  の関数で書いたものである。図 7.11 の縦軸は、 $\sigma(1/P)$  で与えられているが、 $\sigma(P)$  が  $P^2$  に比例することから、 $\sigma(1/P)$  は constant な値をとる。これより  $\eta \leq 1$  あたりでは、以下の程度の Momentum resolution が得られる。

$$\frac{\sigma(P)}{P} = 3.5 \times 10^{-5} \cdot P$$



⊠ 7.11: ATLAS Momentum resolution

## 7.5.2 Inner DetectorがSciFi Trackerのみのときの Momentum resolution

ここでは、Inner DetectorをすべてSciFi Trackerに置き換えたときに、all Silicon + TRTで実現されるMomentum resolutionを達成できるかを検討する。

このときに必要なLayerの数を計算は、CMSもATLASも中央飛跡検出器はR=1.2m程度まであり、B=4Tで、SciFiのLayerをoptimumな配置をした場合、

$$\begin{aligned} 3.5 \times 10^{-5} \cdot P &= \frac{63.5 \times 10^{-6} \cdot P}{0.3 \cdot 4 \cdot 1.2^2} \sqrt{\frac{256}{N+1}} \\ N &= 256 \left( \frac{63.5 \times 10^{-1}}{1.2^3 \times 3.5} \right)^2 - 1 \\ N &= 281.2 \dots \end{aligned}$$

つぎにRadiation Lengthの制限を考える。RUNIIのIFTのProposalを参考にすると、IFTの1unitは表7.4のようにになっている。

281のLayerが必要なとき、70unit必要なことになり、TotalのRadiation Lengthを考えると、現在使用しているFiberの直径が0.75mmであることから、Doublet Layerの平均path lengthは0.4mm pitchで並べたとすると、

$$\pi \cdot \left( \frac{0.75}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{0.4} = 1.1 \text{ mm}$$

Polystyrene scintillatorのRadiation Lengthは42.4cmであるから[30]、Radiation Lengthは0.26 [%]  $X_0$  となり、singlet間をつなげる0.1mmのEpoxyを考えると、Doublet LayerのTotalのRadiation Lengthは0.289 [%]  $X_0$  となる。

したがって、TotalのRadiation Lengthは

$$(0.2596 + 0.289 \times 4) \times 70 + 0.0139 = 99.1 \text{ [%]} X_0$$

図7.12は、ATLASでのRadiation Lengthを $\eta$ の関数で表したものである。これをみると、さきほど計算した0.99 $X_0$ はやや大きめだが、許容範囲内であるといえるだろう。参考のために、Radiation LengthとMomentum resolutionの関係を示しておく。

しかし、実際に設置するとなると、1unitの厚さが21mm程度となるので、70unit存在すると1470mmとなり、中央飛跡検出器領域の1200mmを超えてしまうので、実際にするならばspacerのROHACELLを減らさなくてはならないだろう。計算ではROHACELLは15mmとunitの大部分を占めているので4mm削って、12mmにすればトータルの厚さは1190mmとなり、飛跡検出機内に収まる。

表 7.4: IFT における 1unit Fiber(core 0.44mm,clad 0.5mm)

Material	Thickness [mm]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	X <sub>0</sub> (comment)	Rad L [%]
Layer				
Carbon Fiber Cloth	0.044	2.265	18.8 cm (Solid graphite)	0.0234
Epoxy	0.1	1.16 ~ 1.2	34.4 cm (plexiglass)	0.0291
Fiber Doublet (Z)	1	1.032	42.4 cm (Polystyrene)	0.1779
Epoxy	0.1			0.0291
Fiber Doublet (V)	1			0.1779
Epoxy	0.1			0.0291
Fiber Doublet (U)	1			0.1779
Sub Total			0.1107+0.5377(FiberDoublet)	
Spacer				
Epoxy	0.1			0.0291
ROHACELL #31	15	$1/3 \times 31 \times 10^{-3}$		0.0382
Epoxy	0.1			0.0291
Carbon Fiber Cloth	0.044			0.0234
Sub Total			0.1198	
Layer				
Epoxy	0.1			0.0291
Fiber Doublet (Z)	1			0.1779
Sub Total			0.0291+0.1779(FiberDoublet)	
Total			0.2596+0.7156(FiberDoublet)	

もともと中央飛跡検出器領域は大きく、ATLAS,CMSでも Inner Detector の半分程度を占めているため、 $L$ が2倍になることで、resolutionが4倍よくなり、Layerの数が約2倍程度になるから、 $\sqrt{2}$ 倍よくなる。したがって、Totalで5倍強よくなるにすぎないので、それほど Resolution に変化はない。大雑把な計算として、Momentum resolutionが0.001P [GeV]であるCDFのCOTと比べて、SciFiがDrift chamberよりも3倍程度 two track resolution がよいことを考えるとトータルで10倍強よいことになり、計算結果と大まかに一致する。

図7.12にはないが、TRTのみのMomentum resolutionはずっと悪く、Momentum resolutionはPixcelやSCTによってほぼ決まっており、Momentum resolutionについては中央飛跡検出器は補助的な役割を担っているといっただろう。むしろ、中央飛跡検出器の役割は、PixcelやSCTに比べて多層であるため、連続的な粒子の飛跡再構成を行うことが可能であり、その飛跡を内側につなぎ、それをPixcelとSCTのTrackにmatchさせることだろう。

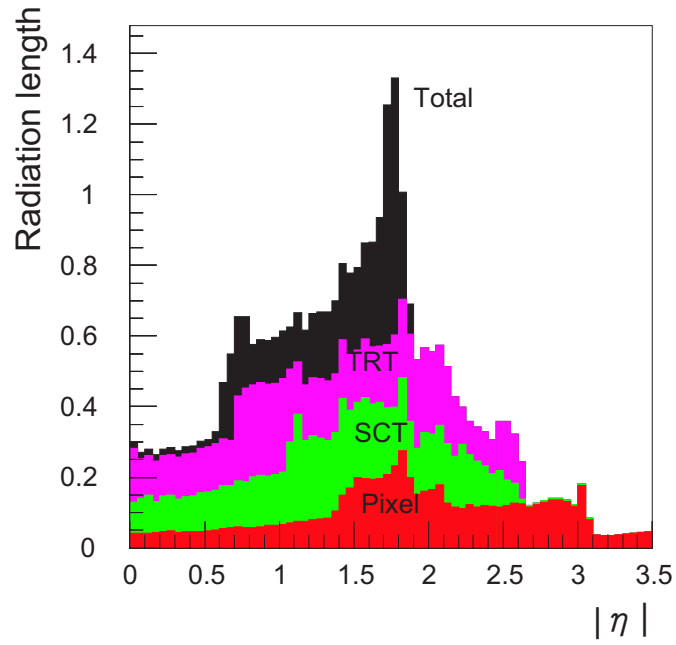


図 7.12: 各 detector の Radiation Length の累積

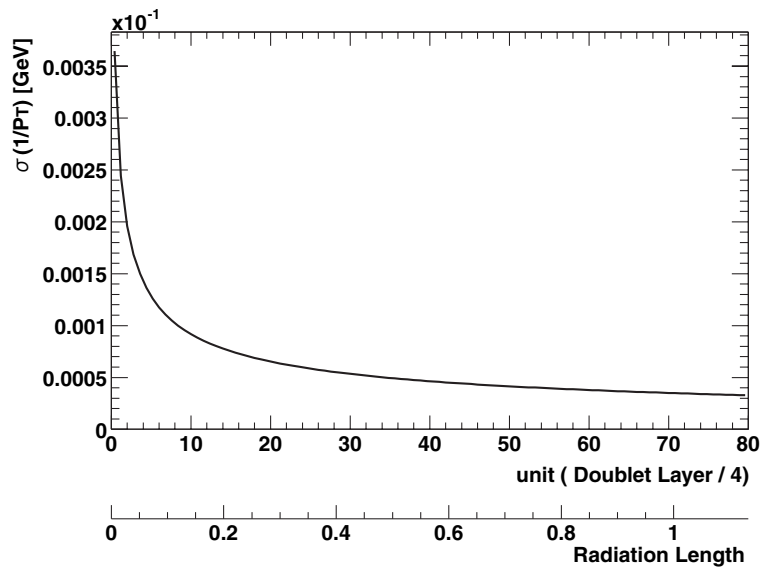


図 7.13: Momentum resolution vs. unit, radiation length

### 7.5.3 SciFi Tracker の Alignment proposal

Alignment は設置する環境によって異なるが、磁場が大きく、中央飛跡検出器領域も比較的大きい CMS の環境での SciFi Tracker の Alignment を提案しようと思う。

まずそのために Layer の数を決めることにする。SciFi Tracker は構造上偶数の数の Layer しかできない。おそらく SciFi Tracker の全長は 0.45m~0.5m になるから、そこから Momentum resolution を計算すると、

表 7.5: 各 Layer 数での Momentum resolution  $\sigma(1/P)$

	L = 0.45 m	L = 0.50 m
12 Layer	0.00175	0.001475
14 Layer	0.00165	0.0013386

よって、12Layer、14Layer あれば十分な Momentum resolution が得られることがわかった。あとは、設置の際の parameter ができるだけ、単純になるように選ぶことを考えて、12Layer にすることにした。SciFi Tracker の大まかな structure を以下にあげる。

表 7.6: SciFi Tracker の簡単な structure

interval		Layer 7	Z
Layer 1	UVZ	Spacer	
Spacer		Layer 8	UVZ
Layer 2	Z	interval	
interval		Layer 9	Z
Layer 3	Z	Spacer	
Spacer		Layer 10	UVZ
Layer 4	UVZ	interval	
interval		Layer 11	Z
Layer 5	Z	Spacer	
Spacer		Layer 12	UVZ
Layer 6	UVZ	interval	
interval			

Doublet Layer には今回使用した Fiber (core 0.66mm, clad 0.75mm ) を使用したとすると、一つの Doublet Layer の Thickness は 1.5mm となる。12 の super layer

の中には Doublet Layer が 24 個存在するので、Total の Thickness は 36mm となる。Layer の内側と外側の interval を 0 にして、Layer 間の interval の上限を与えると、中央飛跡検出器領域は R=700mm ~ 1200mm の 500mm なので、 $(500 - 36)/11 = 42.1$  mm になることがわかる。ここから、Layer 間の interval を 40mm にし、のこりの 24mm は Tracker の内側、外側のマージンに当てることにする。

これらからつぎのような配置を提案する。Fiber の Radiation Length については、Alignment を Minimum bin が core の 1/3 になるようにした場合、Path Length が

$$\frac{\pi r^2}{\frac{2}{3}r} = \frac{3}{2}\pi r = 1.56 \text{ mm} = 0.368 [\%]X_0$$

として計算している。

表 7.7: SciFi Tracker Layout

Radii [mm]	Thickness [mm]	Material	Rad L [%]
Fist Layer			
710	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
710	0.1	Epoxy	0.0291
710 ~ 711.5	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
711.5 ~ 713.0	1.5	Fiber Doublet (V)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
713.0 ~ 714.5	1.5	Fiber Doublet (U)	0.368
Sub Total	4.5		1.2147
Spacer			
714.5	0.1	Epoxy	0.0291
714.5 ~ 754.5	40	ROHACEL#31	0.1018
754.5	0.1	Epoxy	0.0291
	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
Sub Total	40		0.1834
2nd Layer			
754.5	0.1	Epoxy	0.0291
754.5 ~ 756.0	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
Sub Total	1.5		0.3971



Radii [mm]	Thickness [mm]	Material	Rad L [%]
3rd Layer			
796.0	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
796.0	0.1	Epoxy	0.0291
796.0 ~ 797.5	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
Sub Total	1.5		0.4205
Spacer			
797.5	0.1	Epoxy	0.0291
797.5 ~ 837.5	40	ROHACEL#31	0.1018
837.5	0.1	Epoxy	0.0291
	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
Sub Total	40		0.1834
4nd Layer			
837.5	0.1	Epoxy	0.0291
837.5 ~ 839.0	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
839.0 ~ 840.5	1.5	Fiber Doublet (V)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
840.5 ~ 842.0	1.5	Fiber Doublet (U)	0.368
Sub Total	4.5		1.1913

Radii [mm]	Thickness [mm]	Material	Rad L [%]
5nd Layer			
882.0	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
882.0	0.1	Epoxy	0.0291
882.0 ~ 883.5	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
Sub Total	1.5		0.4205
Spacer			
883.5	0.1	Epoxy	0.0291
883.5 ~ 923.5	40	ROHACEL#31	0.1018
923.5	0.1	Epoxy	0.0291
	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
Sub Total	40		0.1834
6nd Layer			
923.5	0.1	Epoxy	0.0291
923.5 ~ 925.0	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
925.0 ~ 926.5	1.5	Fiber Doublet (V)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
926.5 ~ 928.0	1.5	Fiber Doublet (U)	0.368
Sub Total	4.5		1.1913

Radii [mm]	Thickness [mm]	Material	Rad L [%]
7nd Layer			
968.0	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
968.0	0.1	Epoxy	0.0291
968.0 ~ 969.5	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
Sub Total	1.5		0.4205
Spacer			
969.5	0.1	Epoxy	0.0291
969.5 ~ 1009.5	40	ROHACEL#31	0.1018
1009.5	0.1	Epoxy	0.0291
	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
Sub Total	40		0.1834
8nd Layer			
1009.5	0.1	Epoxy	0.0291
1009.5 ~ 1011.0	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
1011.0 ~ 1012.5	1.5	Fiber Doublet (V)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
1012.5 ~ 1014.0	1.5	Fiber Doublet (U)	0.368
Sub Total	4.5		1.1913

Radii [mm]	Thickness [mm]	Material	Rad L [%]
9nd Layer			
1054.0	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
1054.0	0.1	Epoxy	0.0291
1054.0 ~ 1055.5	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
Sub Total	1.5		0.4205
Spacer			
1055.5	0.1	Epoxy	0.0291
1055.5 ~ 1095.5	40	ROHACEL#31	0.1018
1095.5	0.1	Epoxy	0.0291
	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
Sub Total	40		0.1834
10nd Layer			
1095.5	0.1	Epoxy	0.0291
1095.5 ~ 1097.0	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
1097.0 ~ 1098.5	1.5	Fiber Doublet (V)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
1098.5 ~ 1100	1.5	Fiber Doublet (U)	0.368
Sub Total	4.5		1.1913

Radii [mm]	Thickness [mm]	Material	Rad L [%]
11nd Layer			
1140	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
1140	0.1	Epoxy	0.0291
1140 ~ 1141.5	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
Sub Total	1.5		0.4205
Spacer			
1141.5	0.1	Epoxy	0.0291
1141.5 ~ 1181.5	40	ROHACEL#31	0.1018
1181.5	0.1	Epoxy	0.0291
	0.044	Carbon Fiber Cloth	0.0234
Sub Total	40		0.1834
12nd Layer			
1181.5	0.1	Epoxy	0.0291
1181.5 ~ 1183	1.5	Fiber Doublet (Z)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
1183 ~ 1184.5	1.5	Fiber Doublet (V)	0.368
	0.1	Epoxy	0.0291
1184.5 ~ 1186	1.5	Fiber Doublet (U)	0.368
Sub Total	4.5		1.1913
Total			
	276	All Material	10.77

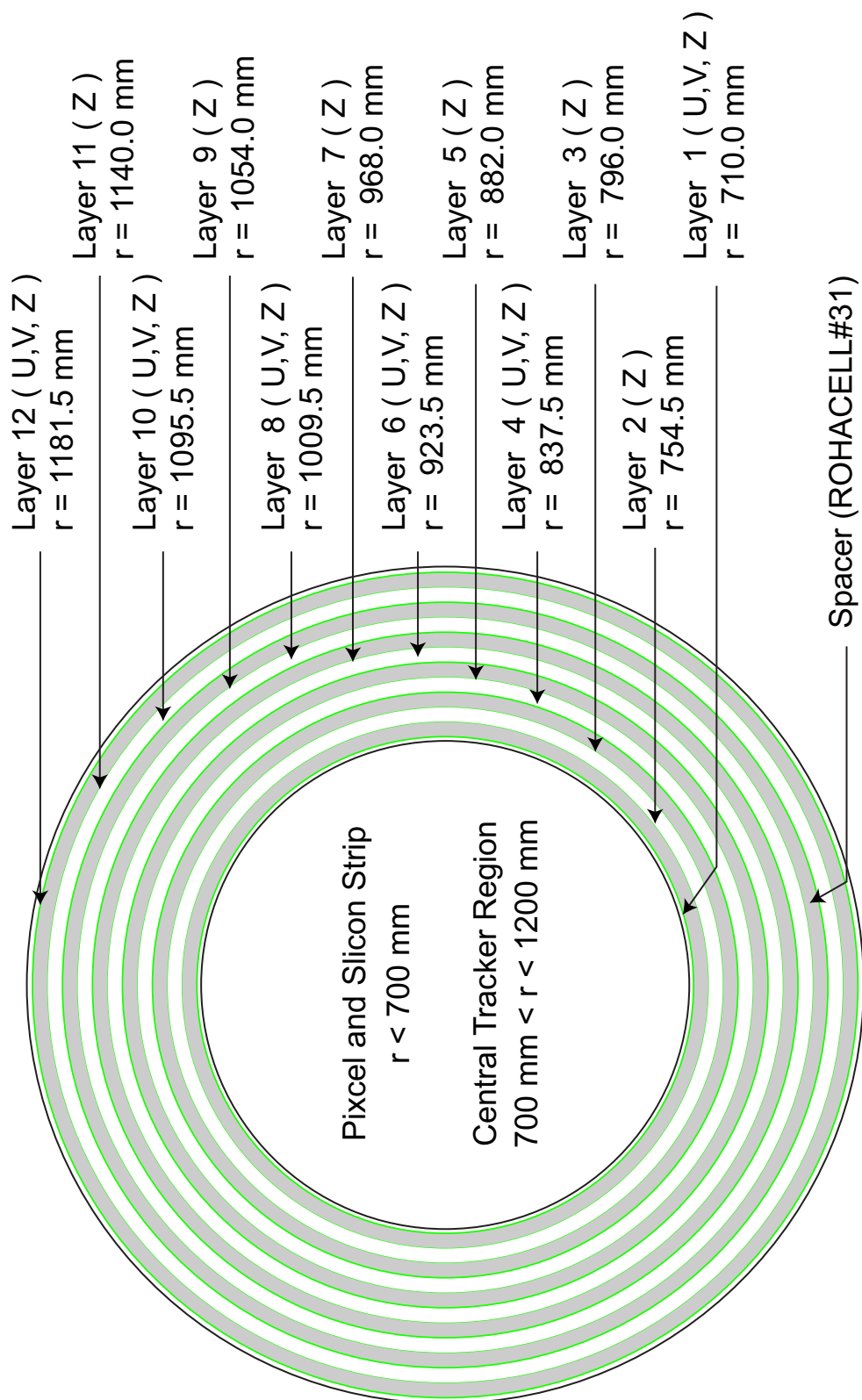


図 7.14: CMS に set up した SciFi Tracker の  $r$ - $\phi$  view

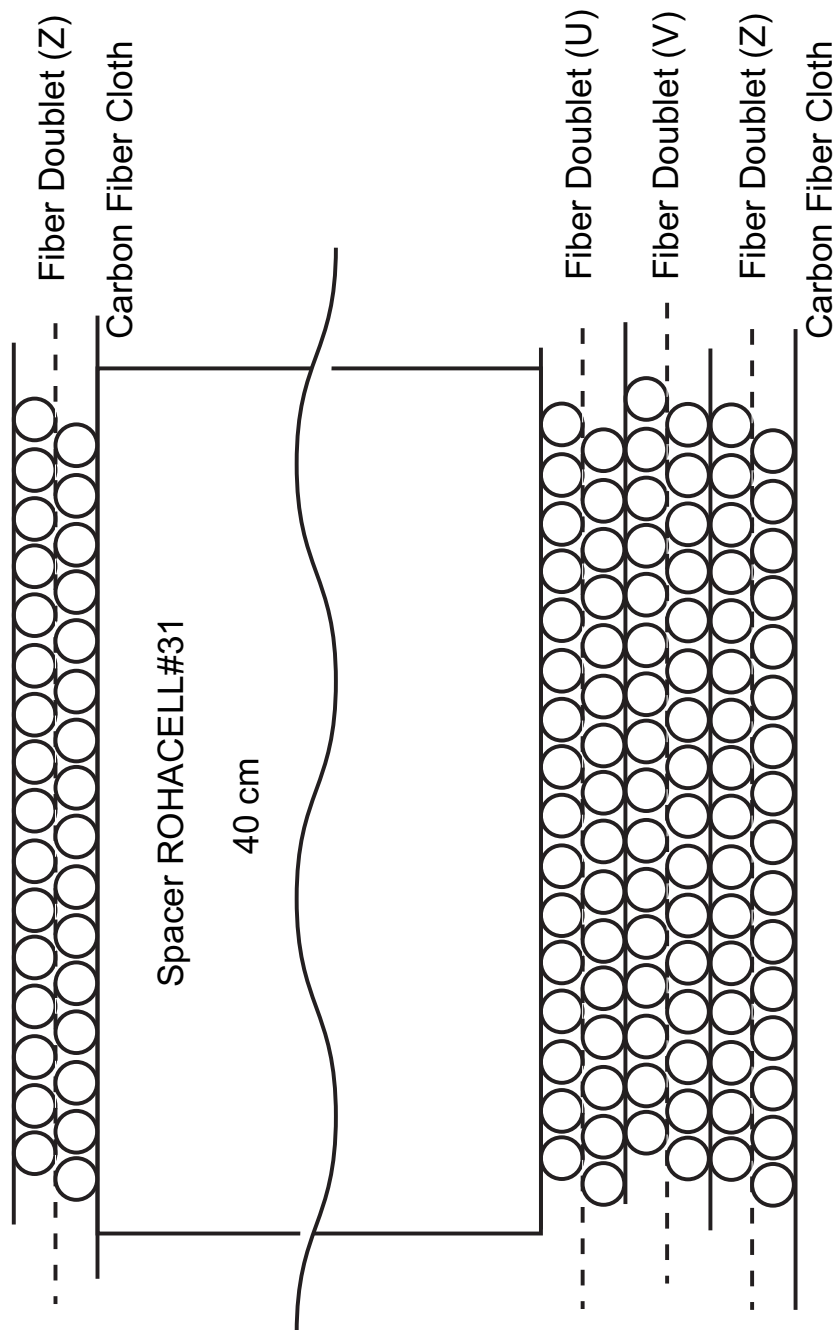


図 7.15: 図 7.14 の Layer 部の拡大図

表 7.8: 各 Layer での Fiber の本数

		# of fiber
Layer 1	Fiber Doublet (Z)	10138
	Fiber Doublet (V)	10160
	Fiber Doublet (U)	10182
Layer 2	Fiber Doublet (Z)	10774
Layer 3	Fiber Doublet (Z)	11366
Layer 4	Fiber Doublet (Z)	11959
	Fiber Doublet (V)	11980
	Fiber Doublet (U)	12002
Layer 5	Fiber Doublet (Z)	12594
Layer 6	Fiber Doublet (Z)	13186
	Fiber Doublet (V)	13208
	Fiber Doublet (U)	13229
Layer 7	Fiber Doublet (Z)	13821
Layer 8	Fiber Doublet (Z)	14414
	Fiber Doublet (V)	14435
	Fiber Doublet (U)	14456
Layer 9	Fiber Doublet (Z)	15049
Layer 10	Fiber Doublet (Z)	15641
	Fiber Doublet (V)	15663
	Fiber Doublet (U)	15684
Layer 11	Fiber Doublet (Z)	16276
Layer 12	Fiber Doublet (Z)	16869
	Fiber Doublet (V)	16889
	Fiber Doublet (U)	16911
Sum		326886



このときに SciFi Tracker だけで達成される Momentum resolution は

$$\begin{aligned}\frac{\sigma(P)}{P} &= \frac{63.5 \times 10^{-6} \cdot P}{0.3 \cdot 4 \cdot 0.476^2} \sqrt{\frac{720}{(12-1)+5}} \\ &= 0.00156P \text{ [GeV]}\end{aligned}$$

これは MSGC の Momentum resolution にほぼ等しく、straw chamber より Factor2 ほどよい。

表 7.8 は Fiber の各 Layer の Fiber の本数を表したものであるが、occupancy からの要請から  $z=0$  で Barrel を分割する必要があるため、実際はこの 2 倍の Fiber の数、すなわち  $326886 \times 2 = 653772$  本必要となる。

## 7.6 Higgs search

### 7.6.1 SM Higgs decay mode

図 7.16 は Higgs の Branching ratio を Higgs の mass の関数で表したものである。LEP で示唆されているあたりの Higgs の Branching ratio はめまぐるしく変わっている。したがって、Higgs の mass がはっきりと確定していない以上、様々なモードで Higgs の解析を行わなくてはならない。また各モードにおける Background が異なるため、単に Branching ratio が大きいだけで有力なモードとはいえず、そのため有力なモードを探すには Significance という量で各モードをみるべきであり、それが図 7.17 である。

これをみると、real な W pair が生成する部分を除いて、 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  というモードが有力なモードであることが分かる。またこのモード解析では inner detector の果たす役割も大きいことから、4 つの lepton の運動量をどれくらい精度よく測定できるかをしらべる。

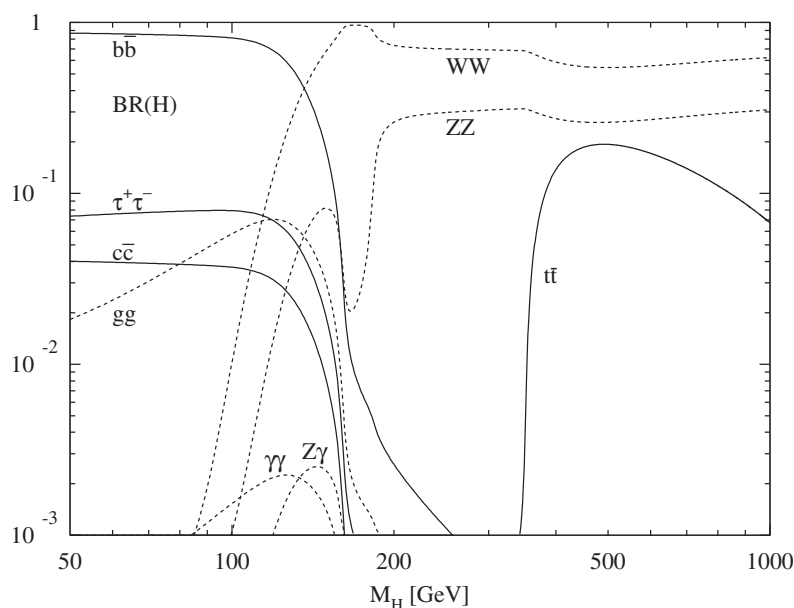


図 7.16: SM Higgs Branching ratio

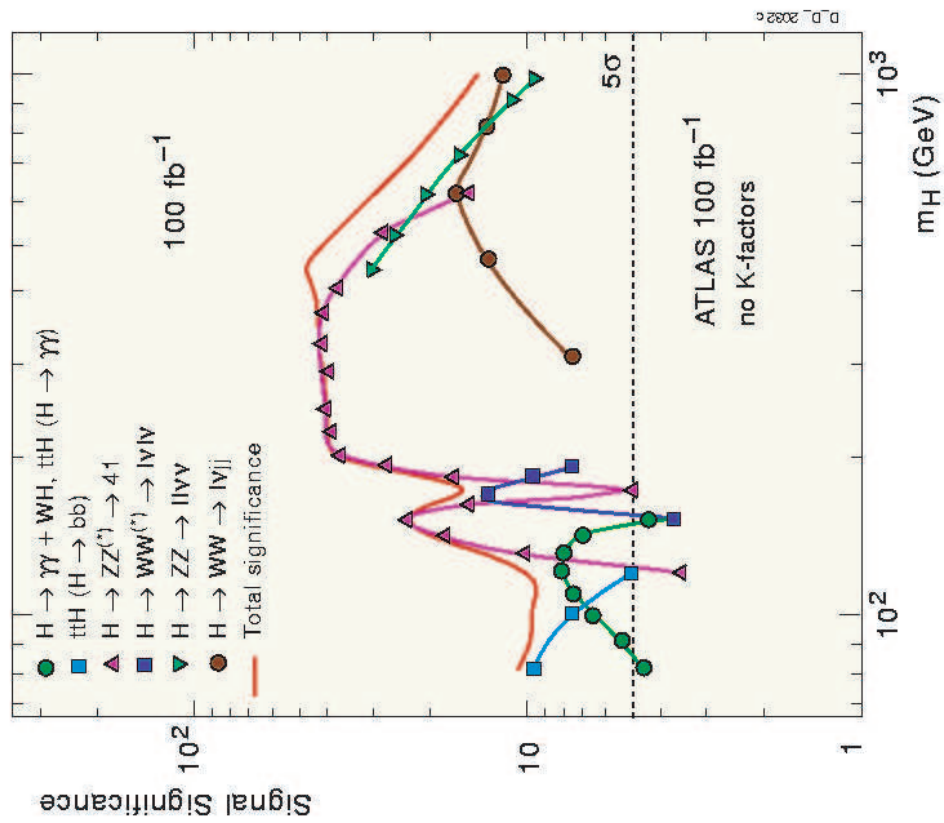
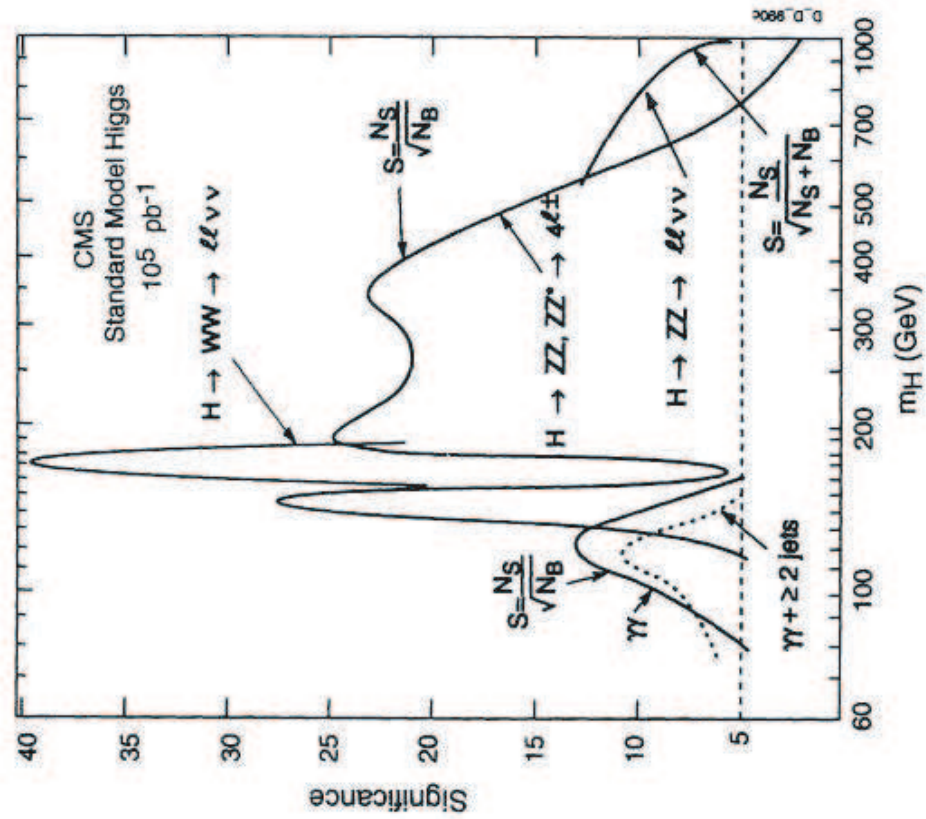


図 7.17: ATLAS, CMS での各 Decay mode の Significance

## 7.6.2 $P_T$ distribution in the mode $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

PYTHIA6.205 を用いて、110GeV,150GeV,200GeV の Higgs を 10000 個発生させ、そこから出てきた 40000 個の lepton の  $P_T$  distribution をみた。中央飛跡検出器は通常  $\eta = \pm 2.5$  をカバーしているのので、それを  $\eta$  の関数で表してみた。それが図 7.18、図 7.19、図 7.20 である。

これらの領域の運動量がどの程度精度で測定できるかを見たものが、図 7.21 である。ここでの運動量の誤差には multiple scattering や z 方向の誤差は十分小さいとみなし、考慮していない。SciFi Tracker は straw chamber や MSGC と運動量測定に関して同程度の性能が得られるように配置したときのものである。具体的な計算は、MSGC のデータを用いて

$$\frac{35 \times 10^{-6} \cdot P_T}{0.3 \cdot 4 \cdot 0.5^2} \sqrt{\frac{720}{5+1}} = 9.4 \times 10^{-4} P_T \text{ [GeV]}$$

silicon や all detector のデータは図 7.11 を参考にした。

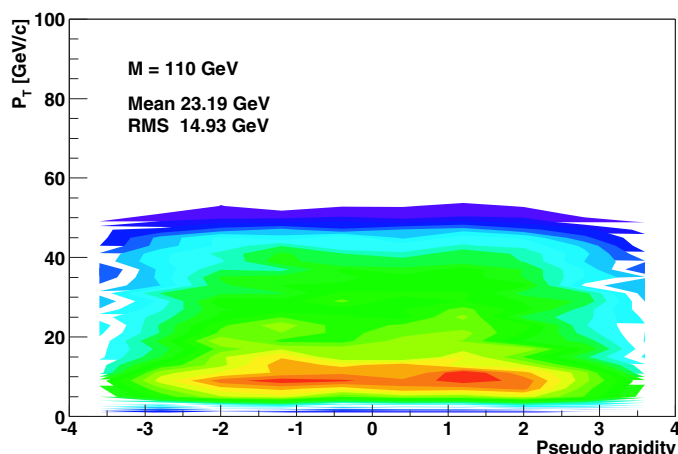
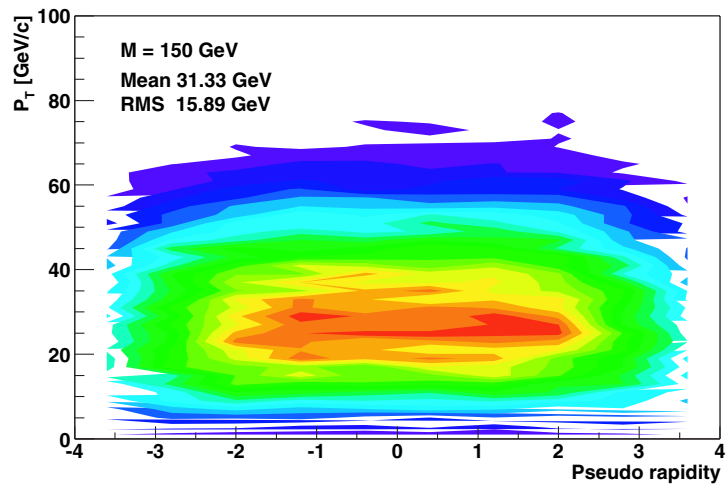
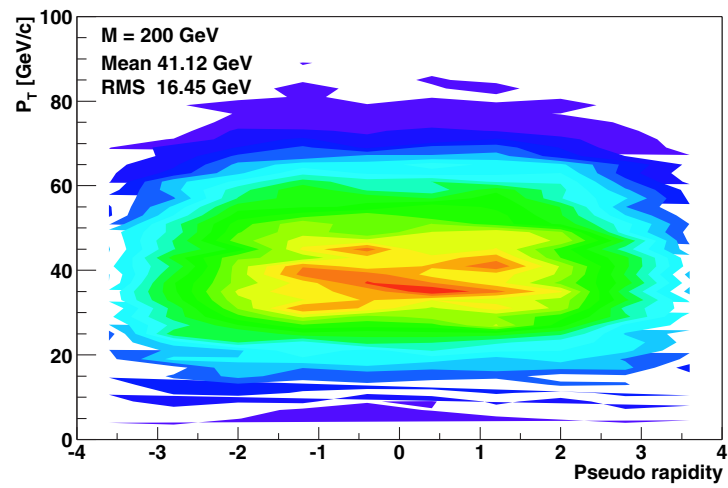


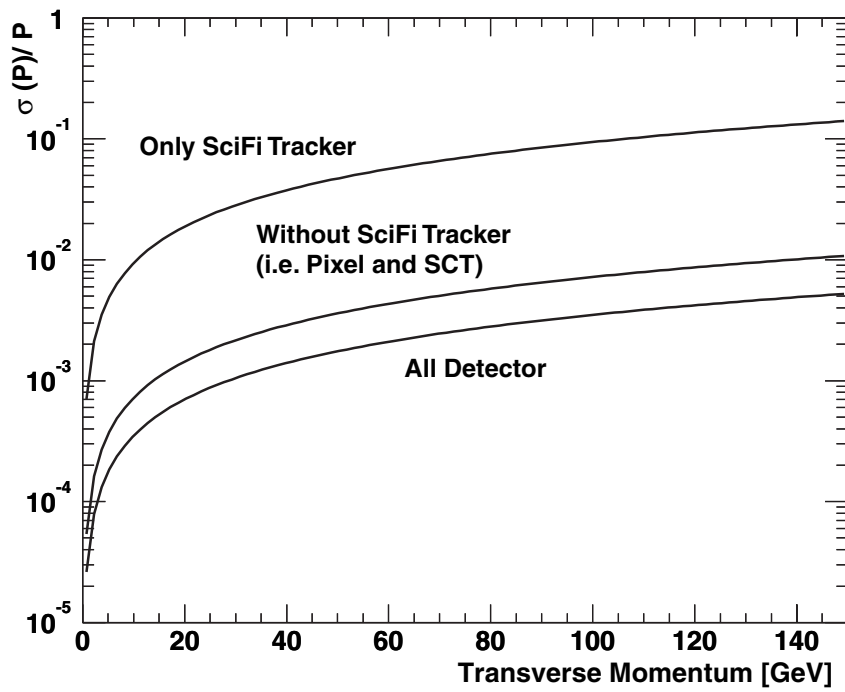
図 7.18: lepton  $P_T$  vs.  $\eta$  at  $M_H=110\text{GeV}$



☒ 7.19: lepton  $P_T$  vs.  $\eta$  at  $M_H=150$ GeV



☒ 7.20: lepton  $P_T$  vs.  $\eta$  at  $M_H=200$ GeV



7.21: Momentum accuracy vs. transverse momentum

## 第8章 Summary

### 8.1 本研究の結論

本研究は既に成功しているノーマルモードでの SciFi の読み出しを継承し、それを実用化することに重点をおいた実験である。

まず実用化のためのシステムのコンパクト化のために、APD に関してはモノリシック法で生産する方法を確立し、Preamp. に関しては VA32C という 1chip に 32ch を搭載した高度に集積された Preamp. を用いた。

つぎにこれらのデバイスを組み込んだ SciFi Tracker の試作品を作成し、APD Array による SciFi ( 2.5mm 長、core  $\phi$  0.66mm、clad  $\phi$  0.75mm ) の読み出しテストを行った。本来ならば Array 中の APD は同様の振る舞いをするはずであるが、制作上製品には特性にばらつきが出てしまう。この実験は言い換えれば、現在の APD 生産技術が SciFi Tracker としての要請を満たすように特性のばらつきを抑えることができるかどうかである。この APD Array を -50 に冷却して、SciFi Tracker に組み込み、 $\beta$  線の検出効率を測定したところ、Array 中のすべての APD に関して高い検出効率を得ることができた。しかも異なる Array 間合計 32ch の APD についても同一バイアスの動作によって高い検出効率を得ることが可能であることを示した。

そして Array 内の異なる APDch の特性の違いによる検出効率への影響も理解を深めることができた。特性の違いは我々の予想通り、DarkCurrent の立ち上がりと Threshold の立ち上がりは関係しており、また DarkCurrent の立ち上がりは Gain の増加を意味しており、DarkCurrent の立ち上がりをみることでその直前 4V が高い検出効率であることが分かった。すなわち我々は本研究を通して、DarkCurrent をみるだけで APD の適切な動作バイアスを選ぶことができる。

また ATLAS 実験で SciFi Tracker と Straw chamber を occupancy の点で比較することにより、SciFi Tracker が一桁程度 occupancy の点で優れていることを示した。もっとも Radiation Damage の厳しいところでの SciFi Tracker の Damage の Simulation を行い、現在の実験結果を用いて十分高い検出効率を得るためには Detector 内に APD が存在すれば読み出しが可能であることを示した。

## 8.2 Proposal

まず、本文中でも述べているが Threshold、Darkcurrent の立ち上がりが変化する問題がある。

まず改めてその変化を見てみる。

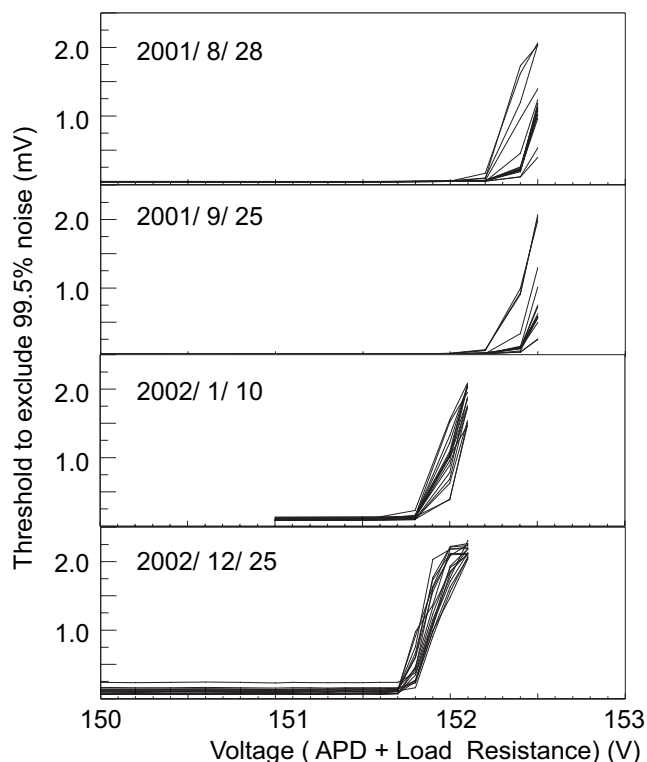


図 8.1: APD205 の Threshold の変化

図 8.1 は、APD205 の Threshold の立ち上がりの変化を表しているものである。立ち上がりがだんだん早くなっているが、これらのデータはすべて Labview によって -50 に制御されている。データを定期的にとっていたわけではないので、正確な事はいえないが、この 4 つのデータに限っていえば、立ち上がりのはやい下二つは、上二つに比べてノイズが大きかった。もし本当にノイズが大きくなったのであれば、その理由はおそらく Darkcurrent の増加に伴う Shot noise の増加であろう。もし Darkcurrent の増加するならば、APD の劣化で Si の格子が変化したことによってバンドギャップが小さくなることや、伝導帯と価電子帯の間になにか中間準位が生成したなどが考えられる。実際フォトダイオードが  $\gamma$  線による損傷により、新たな電子、正孔捕獲準位が導入されることが報告されている。

しかし図 8.2 をみると、APD205 と APD206 が立ち上がりの早さが APD の Bias について同じだけ平行移動していることがわかる。たしかに APD205 と APD206 は同じ程度使用したので同じくらい劣化は進んでいるはずなので、上のような原



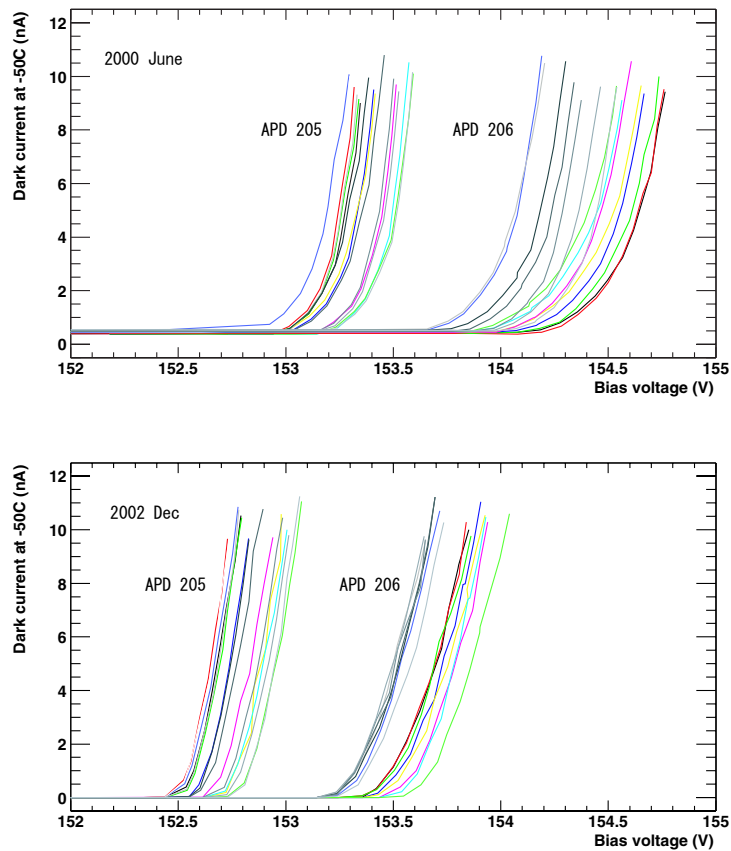


図 8.2: APD の DarkCurrent の立ち上がりの変化 上はモニターによる人の手による温度制御  $\pm 0.5$  の誤差を許容、下は Labview による温度制御

因によって立ち上がりが早くなったと解釈できないこともないが、これはむしろモニターされている温度の誤差が原因であると考えられるほうが自然であろう。もし温度による誤差が原因であるならば、 $-0.5V$  程度シフトしているの、 $5$  程度の温度差が生じていると思われる。

温度誤差を生み出している原因を挙げると

1. 熱電対の温度誤差
2. 熱電対のゼロ点の誤差
3. 熱電対の製作精度、劣化、プローブの不安定

あと温度をプローブした位置と APD の温度に差があったという可能性もあるが、こういった理由は考えにくいし、 $5$  も温度差は生まれないと思われる。また温度や湿度変化による H.V. の精度に変化が起きている可能性もないわけではないが、H.V. の calibration data を比較してもせいぜい  $0.05V$  程度である。

今回使った熱電対は+側にクロメル(Ni,Cr) -側にアルメル(Ni-2Al-2Mn-1Si)を使ったものである。この使用した熱電対は米国オメガ ER社から輸入したものであり ASTM 規格に基づいて作られる。ASTM 規格の資料がなかったため、JIS 規格で話をすると、このタイプの熱電対は-200 ~ 1260 の温度を測定することが可能であるが、温度精度は今回使った細さの熱電対の場合、クラス2というグループに属し、測定温度は-40 ~ 1200 で、測定誤差は $\pm 2.5$ または測定温度の $\pm 0.75\%$ のどちらか大きいほうで決まる。ここでいう測定誤差とは熱起電力を基準熱電力表によって換算した温度から、測定接点の温度を差し引いた値の許される最大限度をいっている。したがって、正確に-50 ではないが、同一熱電対を使っていればモニター上で同じ数値を出していれば同じ環境になっているはずである。基準接点補償回路のガイドによるとゼロ点の精度は $1/4$  と書いてあるので、ゼロ点の変化も考えにくい。APDの経年変化も含めて、温度環境がどの程度正確に保たれているのかより高精度のセンサーをつかって調べる必要があるかもしれない。

今回の実験では冷却による効果によって APD の Gain を高め、十分な検出効率を得るという成功を収めたが、さらに冷却させることによって Gain を増大によって、より Threshold をあげ、プラトーより長くできる期待が持たれる。そのため、-50 はほぼ電子冷却の限界に近いので、現在液体窒素を用いたシステムの計画が進行中である。また冷却されることにより、より APD の立ち上がりが急になり特性のばらつきがより小さくなる期待も持てる。また APD が液体窒素の温度でどのような挙動を示し、温度変化に対して立ち上がりなどが、どの程度敏感に変わるなどを調べる必要もあるだろう。そして、より多くの APD をテストして特性のばらつきについてさらに統計を上げる必要がある。実際に検出効率を測らなくても、簡単なテストをして、我々は DarkCurrent の測定のみで大まかな目安をつけることが可能であろう。

つぎに APD が次世代素粒子実験で求められる高速な読み出しにおいてどのような性能を示すかを調べる必要がある。それにむけて我々はより高速で、Gain の高く、低ノイズである Preamp. を選択していかなければならない。現在我々は Preamp. に VA-chip を使っている。VA-chip はもっとも応答の速いもので 75ns の Peaking Time を持ったものが存在する。今までのところ External Trigger によって我々が Trigger の Timing を振って調節していたが、External Trigger を通した場合、VA-TA Evaluation system 内部に存在する Delay のために、それを potentiometer で最小にしても数 100ns 以上の Peaking Time の Preamp. しか読み出すことができないことがわかっている [26]。よって TA を用いて Trigger をかけなければいけない。そのために、TA 側の shaper 後 pulse や TA trigger などをプローブし可能性を検討していく必要がある。またより多チャンネルにしていくために、現在 study 中の MCR 用 Adapter board をつかったり、K2K のグループによって行われている

64ch の VA-TA を使った FEB を使うのもよいかもしれない。予定では 2002 年 10 月に量産開始で、2004 年にフルインストールするらしい。参考のために K2K で開発している VA-chip の DAQ システムを以下に載せておく。

フロントエンドボード

MAPMT(x1) & VA/TA chip(x2)

DAQモジュール

VA/TAコントロール

VA信号のデジタル化

イベントタグ

タイミングコントロール

タイミングディストリビュータ

spill timing information

トリガーモジュール (宇宙線トリガー)

TMC (for multi event)

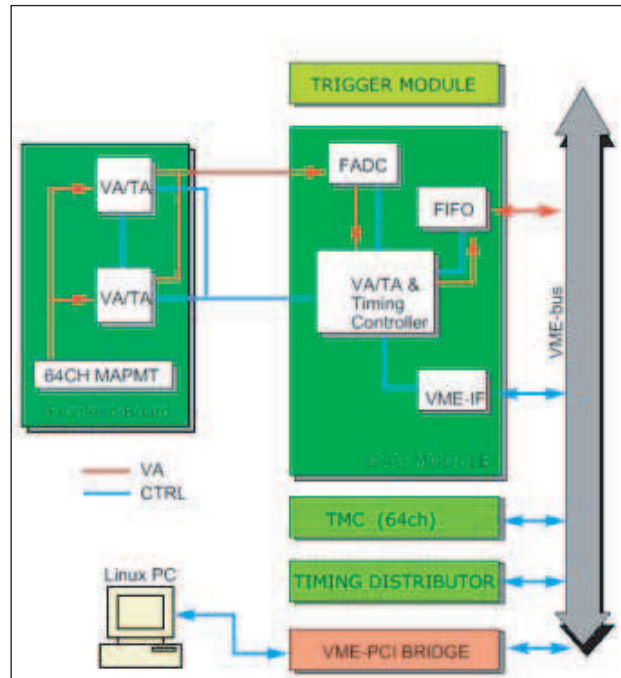
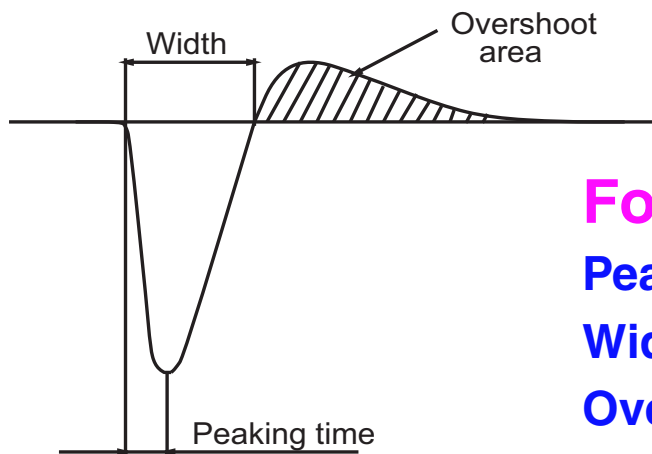


図 8.3: K2K での VA-TA を使ったフロントエンドおよびエレクトロニクス

しかし 75ns の読み出しに成功したとしても、LHC は 25ns であるから LHC で使用できるかどうか問題は残る。よって、もう一つの方法として LHC で使われているアンプをつかうという方法もある。Straw の話の時にできは MECO 実験では ATLAS 実験での技術をフィードバックしている。本文中でも出てきたが、ASDBLR のさらに詳しい情報を載せておく。



**For analog part:**

**Peaking time**

**8 ns**

**Width**

**20 ns**

**Overshoot area**

**5-20%**

図 8.4: ASDBLR の pulse

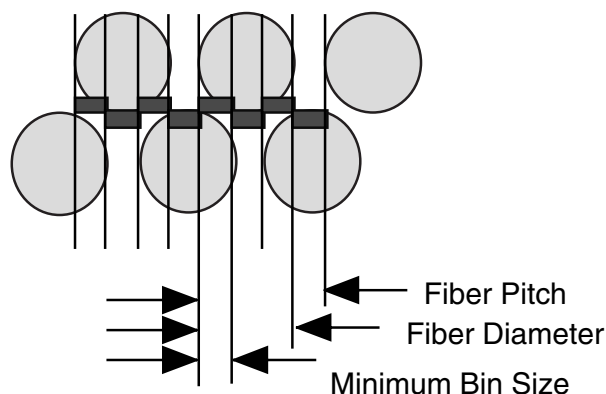
表 8.1: CXA3183Q TGC ASD chip characteristics

---

SONY Analog Master Slice (bipolar semi-custom)
Preamplifier gain of 0.8 V/pC
16nsec integration time
Input impedance around 80 $\Omega$
Open-emitter analog outputs
Main-amplifier with a gain of 7
Baseline restoration circuits
Comparator with LVDS outputs
ENC $\approx$ 7500 electrons at $C_D = 150$ pF
4 channels in a QFP 48 plastic package
Threshold voltage : common for all 4 channels
Required voltage : $\pm 3V$ , GND
59 mW/ch when driving a 100 $\Omega$ load
+3V:16.4mA, -3V:3.25mA, 46mW in ASD chip
13mW at LVDS receiver end

---

Fiber の並べ方に関しては、今までの研究が検出効率に重きを置いていたため、不感領域を塞ぐという意味で 0.4mm pitch に並べていたが、resolution のことを考えて D $\emptyset$  で行われているような並べ方 [28] で試してみるものいいと思われる。



- Fiber Pitch ~ 1 mm
- Fine Binning = Sum of 4 Minimum bins

図 8.5: D $\emptyset$  での Fiber の並べ方

Tracking Test に関しては、今回の教訓を生かし、さらに Layer を増やしてすべきであろう。そのためには、上に書いたような多チャンネルのプリアンプが必要となるだろう。また alignment の精度は別に考えるとして、geometry が非常にはっきりした状況で Tracking test を行い、SciFi Tracker の intrinsic resolution を決めるべきだと思う。Gain による再構成点の決定方法は恐らく図 8.5 の Minimum bin の  $1/\sqrt{12}$  よりもよくなるであろう。

SciFi が Radiation Damage を受けても APD が十分な検出効率を得るためには Detector 内に存在しなければならない。磁場中の photo device については、[27] などで研究されているが、我々が使用している APD の磁場中の振る舞いや CMS のような強い磁場の中での振舞いなども確認しておく必要があるだろう。そして APD 自身の Radiation Damage に対する study もしなければならない。これに関しては実際に実験するのがよいと思うが CMS のカロリメーターは APD であるため、当然 Radiation Damage の study はされているので、そこから外挿するのが一番簡単に見積もる方法であろう。

そしてこういった APD、SciFi Tracker についての研究を GEANT に反映させ、量子効率や、検出効率、経年変化、SciFi Attenuation などの実際のデータを組み込ませながら、Digitization による解析をおこない、飛跡再構成の criteria について study をすすめていくべきだろう。それにより Noise occupancy がどの程度解析の邪魔をするのかを研究し、そこで本当に最適な Threshold を決めていくべきで

あろう。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々の御指導、御協力をいただきました。この場をかりてお礼を申し上げたいと思います。

指導教官として3年間ご指導いただいた吉田 拓生先生には、研究について全く無知だった自分を一からご指導していただき、研究に必要なものを十分与えてくださった上に、GEANT4 講習会や ICEPP シンポジウムなど外部にも勉強しに行かせて下さり、研究、勉強をするための十分な環境を与えてくださいました。また FNAL にいらっしゃるときでも研究のことを気にして下さり、研究に関する議論を重ねてくださいました。非常に感謝しております。

奥沢 徹先生には、研究のアドバイスや研究をすすめていくための必要だった物理を教えていただきました。購読で学んだ物理のおかげで自主勉強がしやすくなった上に、外部で他人の話聞いても理解できるようになり、夏の学校では座長としての役割も十分果たすこともできました。

山本 和弘先生には物理やコンピュータの質問に対していつも非常に丁寧に教えてくださいました。本研究をするにあたり自分だけでは越えられない多くの困難がありましたが、山本 先生のご指導で何度も困難を乗り越えることができました。

そして共同研究者として研究を共にすすめてくれた田辺 守氏、平本 潤一氏に感謝いたします。とくに早朝や深夜遅くまで実験のシフトを行ってくれたおかげでデータを出すことができました。

また ROOT の開発者の方々には何度も質問に答えていただき、今から思えば ROOT で C++ ベースのソフトウェアの使い方を知ることができ、これは GEANT4 への理解につながりました。また ROOT では東工大の森さんにはマクロを提供していただいたり、ROOT による解析環境を作るのに非常に役に立ちました。

GEANT4 に関しては、Hyper News で GEANT4 講習会以来お世話になった SLAC の浅井さんには特に質問に答えていただき、非常に助かりました。また PYTHIA に関しては設計外の LHC シミュレーションを行うための方法を教えてくださいました。PYTHIA 開発者 ルンド大学の Torbjorn Sjostrand 教授、coding に関するトラブルに対して example の source を送ってくれたり、一緒に問題を考えてくれた DESY の Frank Gaede にも感謝いたします。

また夏の学校では ICEPP の山下先生をはじめ、学生の皆さんとの有意義な議論や楽しい時間を過ごすことができました。本論文での LEP や LHC の資料、また

Straw や VLPC は皆さんがプレゼンテーション資料を提供してくださったおかげです。

そして最後に SciFi の作成や物理に関する議論などを含め、共に学生生活を過ごし惜しみない協力をしてくださった、豊田 博俊氏、宮崎 由之氏、田中 俊広氏、若林 健治氏、原 智氏、須藤 孝志氏に感謝いたします。



# Reference

- [1] LHC-The Large Hadron Collider HomePage  
Web page: <http://lhc-new-homepage.web.cern.ch/lhc-new-homepage>
- [2] 近藤敬比古 特別講義ノート July 1999 東北大学
- [3] Kiyotomo Kawagoe, The ATLAS Detector, Collider Workshop @ ICEPP, Tokyo, July 19th 2001
- [4] Inner Detector Technical Design Report, ATLAS TDR 4, CERN/LHCC 97-16,30 April 1977
- [5] ATLAS Internal Note-Muon NO- 1 October,1999
- [6] Technical Design Report CMS collaborator
- [7] PDG The review of particle physics section 26
- [8] 『UNCERTAINTIES IN TRACK MOMENTUM AND DIRECTION, DUE TO MULTIPLE SCATTERING AND MEASUREMENT ERRORS』 R.L Gluckstern,NIM24(1963)381
- [9] 光エレクトロニクス 日本材料科学会編 裳華房 2000年7月
- [10] Scintillation Materials, 株式会社クラレ機能材料事業部、〒103-8254 東京都中央区日本橋 3-1-6 クラレ日本橋ビル
- [11] 山崎充生 修士論文,「陽子・反陽子衝突型加速器における素粒子実験のための Scintillating Fiber 飛跡検出器の開発」,2000年2月,大阪市立大学大学院理学研究科.
- [12] GEANT-Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library Long Writeup W5013.
- [13] High-Efficiency Readout of Scintillating Fiber by APDs  
T.Yoshida, T.Okusawa, T.Sora, and M.Yamasaki,International Journal of Modern Physics A 16 (Supplement 1C),pp.1113-1115(2001)

- [14] (株)小松エレクトロニクス,<http://www.komatsu-electronics.co.jp/>.
- [15] (株)デジテックス研究所, 〒 181 東京都三鷹市井口 3-3-24
- [16] (株)浜松ホトニクス,<http://www.hamamatsu.com/>.
- [17] Integated Detector & Electronics AS (IDE AS), <http://www.idea.no/>.
- [18] P.Aspell et al., Nucl. Instr. and Meth. A315,425 (1992).
- [19] F.Abe,et al.,Phys.Rev.D 41 2330 (1990)
- [20] THE European Physical Journal Vol.15 Number 1-4 2000 P223
- [21] 山下 了「エネルギーフロンティア実験の夢と現実」  
2002 夏の学校 高エネルギーパート
- [22] PYTHIA - The Lund Monte Carlo  
Web page: <http://www.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>
- [23] GEANT4 - a Simulation Toolkit  
Web page: <http://cern.ch/geant4>
- [24] Juan A. Valls, SCIFI97: Conf. on Scintillating Fiber Detectors, AIP Conf. Proc. **450**, 229(1998)
- [25] Readout of a 3 m long scintillating fiber by an avalanche photodiode,  
T.Okusawa, Y.Sasayama, M.Yamasaki, T.Yoshida, Nucl. Instr. and Meth. A  
459 (2001) 76
- [26] 空 剛史 卒業論文,「Avalanche Photodiodeを用いた Scintillating Fiber Detectorの開発」,2001年3月,大阪市立大学理学部
- [27] Y.Fujii et al., Nucl. Instr. and Meth. A 366, 71 (1995)
- [28] TeV33 DØCFT Trigger, The DØ Central Fiber Tracker, 11-May-1996
- [29] F.BEDESCHI et al., Nucl. Instr. and Meth. A 268, 50-74 (1988)
- [30] PARTICLE PROPERTIES DATA BOOKLET JUNE 1992 P205
- [31] K.Hara et al., Nucl. Instr. and Meth. A 348, 139-146 (1994)