

イメージインテンシファイアの ゲート方法に関する性能評価

神戸大学大学院 自然科学研究科
博士前期課程 物理学専攻
999S111N 田中康之

平成13年2月9日

概要

つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験(K2K実験)では、前置検出器の一部であるシンチレーティングファイバー飛跡検出器の読みだしにIIT(Image Intensifier Tube)が使われている。それは、静電型IIT(初段IIT)、MCP(Micro Channel Plate)型IIT、レンズ、CCDカメラの順に連結したものである。IITでは、光が光電面に当り放出した電子を電場で加速し、それを蛍光面に当て再び光に戻すことにより光量を増幅している。MCPにゲート機能が付いており、現在のゲート幅は、初段IITの蛍光面の残光時間を考慮し、長めに $100\mu\text{s}$ であるが、これはビーム照射の幅 $1\mu\text{s}$ に比べて長い。本研究では、ゲート幅と検出効率及びノイズの関係を系統的・定量的に調べた。

LED(Light Emitting Diode)テストでは、 8p.e. に相当する光量をIITに照射した場合、MCPのゲート幅を $60\mu\text{s}$ まで短くしても、検出効率が落ちず(99%)、ノイズを47%にできることが分かった。また、実機での宇宙線テストを行なったところ、MCPゲートを $60\mu\text{s}$ にすると、検出効率は96.6%から95.0%へ下がるが、ノイズは62%になることが分かった。

MCPゲート幅の最適化を行なったが、それでもビーム照射幅に比べて数十倍のゲート幅である。そこで蛍光面の残光時間に依存しないよう初段IITにおいてゲートをかける方法が開発された。これまで初段IITには、電子を蛍光面に向け加速する静電場が常にかかっていたが、これに逆電場をかけることにより光電面で放出した電子を蛍光面に到達しないようになっている。本研究では、この初めて開発されたゲート機能について性能評価を行なった。

その結果、 $3\mu\text{s}$ のゲート幅でも検出効率は落ちず(6p.e. 相当の光を入射した場合95.0%から96.0%へ)、ノイズについてもIITの内部で発生するランダムノイズは15%に減り、IITに入射する信号以外の光の数を1.4%にすることができる。初段ゲートは、耐久テストなどの課題も残っているが、今後の実験において、非常に有効なゲート方法である。

目次

1	序論	7
2	つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (K2K)	12
2.1	実験の概要	12
2.2	ビームライン	13
2.3	前置検出器	15
2.4	スーパーカミオカンデ (SK)	17
2.5	実験の現状	17
3	シンチレーティングファイバー飛跡検出器	21
3.1	シンチレーティングファイバー (SciFi)	21
3.2	シンチレーティングファイバーシート	21
3.3	ファイバーバンドル	22
3.4	シンチレーティングファイバー飛跡検出器	25
4	イメージンテンシファイアーチューブ	26
4.1	イメージンテンシファイアーの原理	26
4.2	IIT-CCD チェーン	28
4.3	MCP の高電圧の最適化	28
4.4	MCP ゲート及び初段ゲートの原理	29
5	MCP ゲートの性能評価	31
5.1	目的	31
5.2	準備	31
5.3	LED テスト	35
5.4	解析方法	35
5.5	実験結果	39
5.6	実機の IIT でのテスト	46
5.7	宇宙線テスト	55
6	初段ゲートの性能評価	60
6.1	目的	60
6.2	LED テスト	60
6.3	ゲートの開閉に要する時間の測定結果	61
6.4	ゲート幅とノイズの関係	62

6.5	ビームテスト	68
6.5.1	準備	68
6.5.2	解析方法	68
6.5.3	実験結果	70
7	結論	77
A	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の振動確率の計算	78
B	初段 IIT 後部にあるの蛍光面の発光時間	81

目次

1	スーパーカミオカンデにより観測されるニュートリノフラックスの天頂角分布	11
2	つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験	12
3	ニュートリノビームライン	14
4	前置検出器	16
5	スーパーカミオカンデ	17
6	Fine-Grained Detector event	19
7	Fine-Grained Detector event	19
8	SK event	20
9	シンチレーティングファイバー【SCSF-78M 改良 11】の模式図	22
10	シンチレーティングファイバーシート模式図	23
11	シンチレーティングファイバー依積みの図	23
12	SciFi シートとハニカム板	23
13	SciFi シートの SciFi バンドル化	24
14	ファイバーバンドルの写真	24
15	SciFi 飛跡検出器全体図	25
16	近接焦点型 IIT と倒立型 IIT の模式図	27
17	マイクロチャンネルプレートの模式図	27
18	K2K 実験で使用されている IIT-CCD チェーン図	28
19	HV カーブ (印加電圧変更前)	29
20	HV カーブ (印加電圧変更後)	29
21	LED-fiber 装置の概念図	32
22	LED 光量測定のためのセットアップ図	33
23	1p.e. 相当の ADC 分布	33
24	8p.e. 相当の ADC 分布	33
25	LED にかける電圧とその時の ADC 分布の関係	34
26	IIT テストのためのセットアップ	36
27	8p.e. 相当の光を IIT に照射したときの CCD 画像	37
28	LED を 5000 回光らせた時の積分画像	38
29	MCP ゲートの幅と検出効率の関係	41
30	MCP ゲートの幅と、シグナルクラスターのクラスターサイズ及びその ADC 和との関係	42
31	MCP ゲートの幅とノイズの関係	42
32	MCP ゲート幅に対する、シグナルのクラスターサイズの分布	43

33	MCP ゲート幅に対する、シグナルの ADC 和の分布	44
34	IIT1 の MCP ゲート幅と検出効率の関係	48
35	IIT3 の MCP ゲート幅と検出効率の関係	48
36	IIT5 の MCP ゲート幅と検出効率の関係	48
37	IIT6 の MCP ゲート幅と検出効率の関係	48
38	IIT24 本の検出効率 (6p.e.)	49
39	IIT24 本の検出効率 (8p.e.)	49
40	IIT24 本のシグナルのクラスターサイズの平均値 (6p.e.)	50
41	IIT24 本のシグナルのクラスターサイズの平均値 (8p.e.)	50
42	IIT24 本のシグナルの ADC 和の平均値 (6p.e.)	51
43	IIT24 本のシグナルの ADC 和の平均値 (8p.e.)	51
44	IIT24 本の 1 画面に含まれるノイズの数 (6p.e.)	52
45	IIT24 本の 1 画面に含まれるノイズの数 (8p.e.)	52
46	実機を使用し宇宙線テストより求めた IIT ごとのヒット検出効率	57
47	実機を使用し宇宙線テストより求めた IIT ごとのノイズ混入率	58
48	宇宙線の μ 粒子貫通イベントの例	59
49	初段ゲートに対しての LED を光らせるタイミングの図	61
50	初段ゲートの開閉に要する時間の測定 (初段 IIT への電源ケーブルの長さ 5m)	63
51	初段ゲートの開閉に要する時間の測定 (初段 IIT への電源ケーブルの長さ 15m)	63
52	初段ゲートに対しての LED の発光のタイミングとシグナルクラスターサイズ及び ADC 和の関係	64
53	初段ゲートに対しての LED の発光タイミングとノイズ数の変化	64
54	初段ゲートの幅と検出効率の関係	65
55	初段ゲートの幅とシグナルクラスターのクラスターサイズ及び ADC 和の関係	65
56	初段ゲートの幅とノイズの関係	66
57	ファイバーバンドルの模式図	69
58	トラック画像を足し合わせたもの	70
59	ファイバーバンドルと前後のシンチレータの位置関係	71
60	ファイバーバンドル内をまっすぐに通過している粒子のトラック	73
61	ファイバーバンドル内で散乱した粒子のトラック	73
62	初段ゲート幅とトラックの検出効率の関係	74
63	初段ゲート幅とノイズトラックの本数との関係	74

64	初段ゲートを使用した場合と使用しなかった場合の MCP ゲート幅とノイズトラックの関係	75
65	初段ゲートと MCP ゲートを同じゲート幅にしたときのゲート幅と検出効率	76
66	初段ゲートと MCP ゲートを同じゲート幅にしたときのゲート幅とノイズトラック数	76
67	MCP ゲートに対して LED を光らせるタイミングをずらした場合の検出効率	81

表目次

1	大気ニュートリノの観測結果	8
2	SCSF-78M 改良 11 の材質及び、屈折率	21
3	MCP ゲート幅と検出効率の関係 (光量 6p.e.) 左から、MCP ゲート幅、検出効率、クラ スターの平均ピクセルサイズ、クラスターの平均 ADC 値、ノイズ数である。	45
4	MCP ゲート幅と検出効率の関係 (光量 8p.e.)	45
5	IIT24 本分の検出効率、ピクセルサイズ、ADC 和、及びノイズ。光量 6p.e.、MCP ゲー ト幅 $60\mu s$	53
6	IIT24 本分の検出効率、ピクセルサイズ、ADC 和、及びノイズ。光量 6p.e.、MCP ゲー ト幅 $100\mu s$	53
7	IIT24 本分の検出効率、ピクセルサイズ、ADC 和、及びノイズ。光量 8p.e.、MCP ゲー ト幅 $60\mu s$	54
8	IIT24 本分の検出効率、ピクセルサイズ、ADC 和、及びノイズ。光量 8p.e.、MCP ゲー ト幅 $100\mu s$	54
9	初段ゲート幅と検出効率、シグナルのクラスターサイズ、ADC 和、ノイズの関係。6p.e. 相当の光量を入射した場合。	67
10	初段ゲート幅と検出効率、シグナルのクラスターサイズ、ADC 和、ノイズの関係。光量 を入射しない場合。	67
11	初段ゲートを使用しない場合。MCP ゲート幅は $100\mu s$ であり、6p.e. 相当の光を入射して いた場合。	67
12	初段ゲートを使用しない場合。MCP ゲート幅は $100\mu s$ であり、光を入射しない場合。	67

1 序論

現在、素粒子物理学では、標準理論において、物質は全てクォークとレプトンから構成されていると考えられている。レプトンは3種類の荷電レプトンと、それに対応した3種類の中性レプトンに分類される。その中性レプトンをニュートリノと呼ぶ。ニュートリノは、電氣的に中性で弱い相互作用しかせず、また、質量があるとしても他の粒子と比べて極端に小さいという特徴がある。

標準理論では、ニュートリノの質量は零と仮定されているが、その理論的根拠はなく、種々の実験より質量の上限が与えられているに過ぎない。それぞれのニュートリノの質量の上限値は、現在、以下のように与えられている [1]。

$$m_{\nu_e} < 3\text{eV} \quad (1)$$

$$m_{\nu_\mu} < 0.19\text{MeV} \quad (2)$$

$$m_{\nu_\tau} < 18.2\text{MeV} \quad (3)$$

もし、仮にニュートリノが有限な質量を持つとすれば、それは標準理論を越えた新しい物理を示唆することになる。

また、ニュートリノは宇宙空間に $330 \text{ 個}/\text{cm}^3$ の密度で存在していることから、ホットダークマターの有力な候補として考えられる。このようにニュートリノが質量を持つか否かは、素粒子物理学のみならず、宇宙物理学に重大な影響を及ぼす。

一次宇宙線の主成分 (約 90%) である陽子は大気中の原子核と反応して、

$$p + N \rightarrow \pi, K, \dots, + N' \quad (4)$$

のように、 π 中間子や、 K 中間子を生成する。 π 中間子や K 中間子は、以下に示すように弱い相互作用で崩壊し、主に μ^+ と ν_μ または、 μ^- と $\bar{\nu}_\mu$ になる。

$$\left. \begin{array}{l} \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{分岐比 } 99.99\% \\ \text{分岐比 } 63.51\% \end{array} \quad (5)$$
$$\left. \begin{array}{l} K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \\ K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0 \end{array} \right\} \text{分岐比 } 21.16\%$$

さらに崩壊の結果生成される μ も弱い相互作用により e, ν_e, ν_μ に崩壊する。

$$\left. \begin{array}{l} \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \\ \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \end{array} \right\} \text{分岐比} \sim 100\% \quad (6)$$

これらの過程によって生成されたニュートリノを大気ニュートリノと呼ぶ。ニュートリノは弱い相互作用しかしないので、そのほとんどが地表に降り注ぐ。ここで、約 1GeV 以下の低エネルギーでは ν_μ と ν_e のフラックスの比は約 2 である。エネルギーが上がると、相対論の効果でミュー粒子の寿命が延び、崩壊前に地上に到達する確率が大きくなるため、その比は 2 より大きくなる。

次に、大気ニュートリノの観測結果を表 1 にあげる。ここで用いられている R はミューニュートリノと電子ニュートリノのフラックスの比を、測定結果とモンテカルロシミュレーションの期待値で比をとったものである。

表 1: 大気ニュートリノの観測結果

実験	観測時間 ($kton \cdot year$)	R
Kamiokande(Sub-GeV)	7.7	$0.60^{+0.06}_{-0.05} \pm 0.05$
Kamiokande(Multi-GeV)	6.0~8.2	$0.57^{+0.08}_{-0.07} \pm 0.07$
IMB	7.7	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.07$
Fréjus	2.0	$1.00 \pm 0.15 \pm 0.08$
NUSEX	0.74	$0.99^{+0.35}_{-0.25}$
Soudan2	3.9	$0.64 \pm 0.12 \pm 0.06$

$$R = \frac{\{N(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/N(\nu_e + \bar{\nu}_e)\}_{EXP}}{\{N(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/N(\nu_e + \bar{\nu}_e)\}_{MC}} \quad (7)$$

上の表より、Fréjus と NUSEX の実験では、観測値と理論値はほぼ 1 になっている。しかし、その他の実験では、 R の値は約 0.6 となっており、観測値が標準理論の期待値の約 60% しかない。

1998 年、スーパーカミオカンデは、大気ニュートリノのフラックスの天頂角分布を発表した [2]。これは、神岡上空の大気で生成したニュートリノと、地球の裏側の大地で生成し地球の内部を通過してきたニュートリノと比較した結果、そのフラックスは上下非対称性になっているということである。図 1 は 2000 年に発表されたスーパーカミオカンデに

よる大気ニュートリノのフラックス分布の結果である。ここで、Sub-GeVとは1.33[GeV]以下のエネルギーをもった生成ミュー粒子、Multi-GeVとは1.33[GeV]以上のエネルギーを持った生成ミュー粒子のことである。また、 θ は神岡において鉛直下向き方向からの角度である。図より、電子ニュートリノと思われるイベントのフラックスは、モンテカルロシミュレーションにより予想される値とほぼ変わらず、天頂角分布による依存は見られない。しかし、ミューニュートリノと思われるイベントでは予想される値と比べ、明らかに分布の形が異なっている。

これらの異常を『大気ニュートリノ異常』と言う。

上記の大気ニュートリノ異常を説明する理論として、『ニュートリノ振動』がある。これは、3種類のニュートリノが異なる質量を持ち、なおかつ、レプトンの世代間にクォークと類似した混合があるとすれば、3種類のニュートリノがお互いに変換し合う現象が起こることである。ニュートリノ振動が起こっているという実験事実を得ることができれば、ニュートリノに質量があるという証明になる。

ミューニュートリノが真空中でタウニュートリノに振動する確率は、以下のように表せる(付録 A 参照)。

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] \cdot L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right) \quad (8)$$

ここで、 θ は2つのレプトン間(ここでは ν_{μ} と ν_{τ})の混合の度合を表すパラメータ(混合角)である。 Δm^2 は2つのニュートリノの質量の2乗の差である。この式は、最初ミューニュートリノとして発生したエネルギー E [GeV]のニュートリノが、真空中を L [km]走行した後、タウニュートリノとして観測される確率を表している。他の世代間の振動についても、同様である。

もし、ニュートリノ振動が実験的に観測できれば、振動確率 P 、距離 L 、エネルギー E を式に代入することにより、振動のパラメータ $\sin^2 2\theta$ と Δm^2 の値がとり得る領域を求めることができる。それによって、ニュートリノの質量の大きさを限定することができる。

これまで、ニュートリノ振動の有無を確かめるさまざまな実験が行なわれてきた。これらの実験は、 L/E の値が小さい短基線(short-baseline)ニュートリノ振動実験と、 L/E の値が大きい長基線(long-baseline)ニュートリノ振動実験に大きく分けることができる。このうち、短基線ニュートリノ振動実験は、ニュートリノの飛行距離が短いためフラックス(粒子束)が大きく、多くの反応を得ることができる。そのため、 $\sin^2 2\theta$ の小さな振動パラメータ領域を探索しやすい特徴を持つ。一方、長基線ニュートリノ振動実験では、 Δm^2 の小さい振動パラメータ領域を探索しやすい特徴をもつ。

長基線ニュートリノ振動実験の一つとして、人工的に作られたニュートリノビームを使ったK2K実験がある。

ニュートリノ振動の有無を確かめるには、ニュートリノ生成直後と250km先のスーパーカミオカンデでのエネルギー分布を比較すれば良い。ニュートリノ生成直後のエネルギー分布を求めるために、KEKの敷地内に前置検出器が作られた。ここでは ν_μ のエネルギー分布、フラックス、ビームの方向などを求めている。シンチレーティングファイバートラッカーではシグナルを読み出すためにイメージインテンシファイアチューブ(以下IIT)を使用している。IITは上流側から、静電型IIT、MCP(Micro Channel Plate)型IIT、光学レンズ、CCDカメラの順に連結されたものである。

ニュートリノビームは2秒に1回、 $1\mu\text{s}$ の幅で照射される。このため、シンチレーティングファイバースシートに映る、宇宙線によるトラックやIITの内部でランダムに発生するノイズ等を減らすために、ビーム照射に合わせてIITのゲートを開いている。現在は $1\mu\text{s}$ 幅のビームに対して、 $100\mu\text{s}$ 幅のゲートをかけている。このゲートはMCP型IITにゲート機能を付けたものである。MCP型IITの前段には蛍光面があるため、その発光時間に依存したゲート時間になっている。これまで、このMCP型IITについているゲート機能について、定量的な性能テストはされていない。そこで本研究では、MCPゲートの幅と検出効率及び、ノイズの関係を調べた。もし、検出効率を落さない範囲内で、MCPゲートをさらに短くすることができるのなら、IITからのノイズを減らすことができる。

また、今回新たに、浜松ホトニクスによって、初段の静電型IITにゲート機能をつける電源が開発された。これは静電型IITの電場を変化させることにより、ゲート機能を作り出している。初段の静電型IITのゲートの幅を短くしても、検出効率には何の影響も与えないと予想されるので、大幅にノイズを減らすことができると期待される。本研究ではこの性能も詳しく評価した。

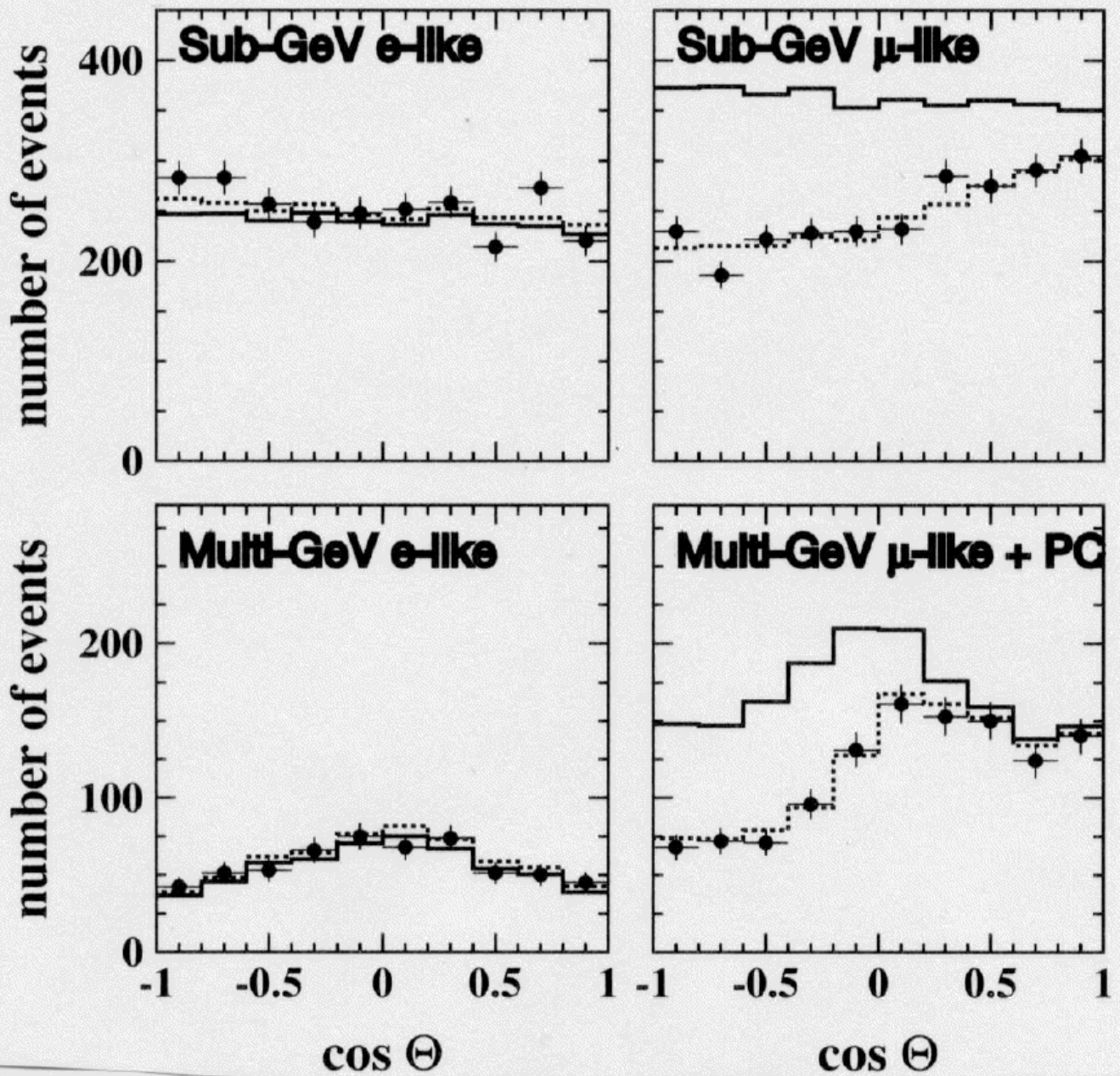


図 1: スーパーカミオカンデにより観測されるニュートリノフラックスの天頂角分布。Sub-GeVは1.33GeV以下のエネルギー、Multi-GeVは1.33GeV以上のエネルギーを持った生成ミュー粒子である。 θ はスーパーカミオカンデにおいて、鉛直下向き方向からの角度である。

2 つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (K2K)

2.1 実験の概要

つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (K2K) の目的は、人工的に作られたニュートリノビームを使い、ニュートリノ振動の有無を確かめることにある。茨城県つくば市にある KEK の 12Gev 陽子シンクロトロンにより生成された、平均エネルギー 1.4GeV のニュートリノビームを、250km 先の岐阜県吉城郡神岡町にあるスーパーカミオカンデ検出器 (SK) に向けて発射する (図 2 参照)。そして、KEK にあるビームモニタと前置検出器でニュートリノの角分布とエネルギー分布を測定する。前置検出器の測定結果より、ニュートリノ振動がなかった場合の SK でのエネルギー分布を予想し、それと SK で測定されたニュートリノのエネルギー分布を比較することにより、ニュートリノ振動の有無が確認できる。



図 2: つくば-神岡間長基線ニュートリノ振動実験。茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構から約 250km 離れた岐阜県吉城郡神岡町のスーパーカミオカンデに向けてニュートリノビームを発射する。

K2K 実験では、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の 2 つの振動モードの探索を行なう。ニュートリノは、原子核の中の中性子と荷電カレント準弾性散乱により、荷電レプトンを生成する。

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p \quad (9)$$

SK では主にこの荷電レプトンが水中で出すチェレンコフ光を検出することにより、ニュートリノの種類、エネルギーを特定する。K2K 実験では、ニュートリノのエネルギーは τ の生成に必要なエネルギー 3.45 GeV にほとんど達しないため、 $\nu_\mu \rightleftharpoons \nu_\tau$ 振動モードにおいて、 ν_τ は確認できず、 ν_μ の減少を確認することになる (disappearance 実験)。 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動モードは、荷電カレント準弾性散乱によって電子が生成されるので、 ν_e が予想より増加することによって確認できる (appearance 実験)。

しかし、後者の振動モードは、図 1 の大気ニュートリノの観測結果から考えて、可能性は少ない。

次に測定器の各構成要素を説明する。

2.2 ビームライン

ビームラインの役割は、ニュートリノビームを生成し、SK へ向けてビームを収束させることにある (図 3)。まず、加速された 12 GeV の陽子が神岡に向けてビームラインを通り、アルミニウムターゲットに照射される。そこで生成された π は、2 つのホーンマグネットにより、 π^- は弾き飛ばされ、 π^+ は SK へ向けて収束される。その後 π^+ は 200 m のディケイパイプを通り、式 10 で示す崩壊モードでニュートリノと μ 粒子に崩壊する。ディケイパイプの終端には、ビームダンプが置かれ、崩壊しなかった粒子と μ 粒子を前置検出器まで到達しないようにしている。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (10)$$

ホーンマグネットの後ろには π 中間子のエネルギーと角度分布を測定する π モニタがある。これを用いて、前置検出器及び、SK におけるニュートリノビームのエネルギー分布や広がり予測する。また、ディケイパイプの終端前にある、 μ モニタでは、 μ^+ の方向を測定し、 ν_μ ビームが SK 方向に向いているかどうかをモニタをしている。

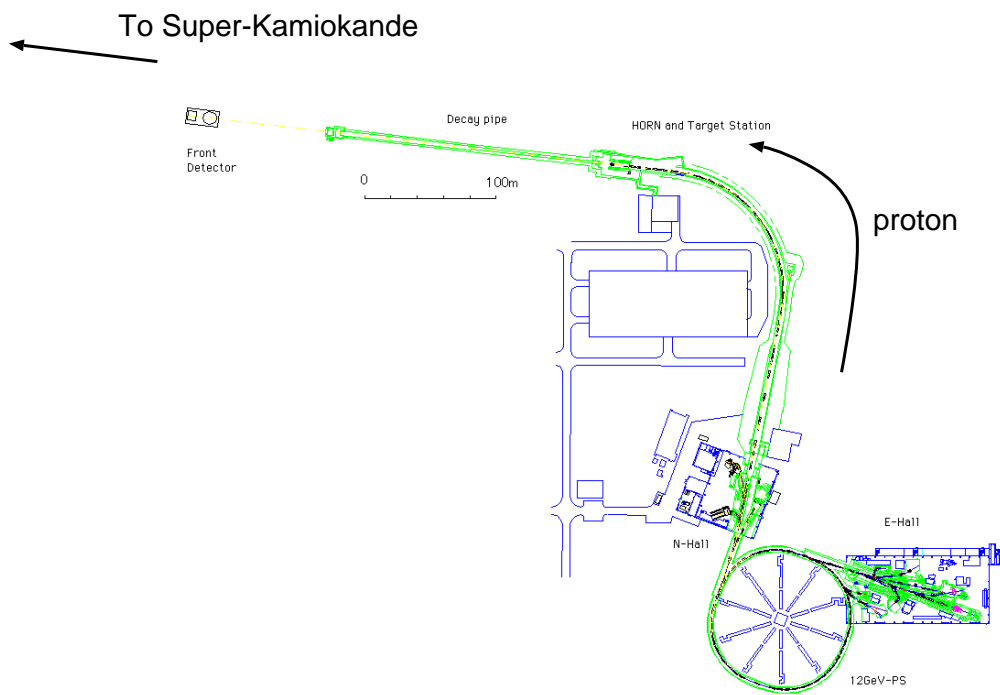


図 3: 12GeV 陽子シンクロトロンで加速された陽子は、SK へ向けるためのビームラインを通り、ターゲットと衝突する。そこで発生した、 π^+ はディケイパイプを飛行する間に、 ν_μ と μ^+ に崩壊する。

2.3 前置検出器

前置検出器の目的は、生成直後のニュートリノの特性を調べることである。 ν_μ のエネルギー分布及びフラックスを求め、SK のそれと比較する。また、 ν_e の混入率も調べる。

前置検出器は 1kt 水チェレンコフ検出器と Fine-Grained Detector とで構成される (図 4)。

次にそれぞれについての簡単な説明をする。

1kt 水チェレンコフ検出器

1,000 トンの純水を蓄えた水チェレンコフ検出器。半径 540.0cm、高さ 1225.0cm の円筒形である。SK と同じ光電子増倍管が 680 本使われている。スーパーカミオカンデと同じ水標的、検出装置、解析法を使うことにより、系統誤差を減らしている。ここでは、 ν_μ 、 ν_e のフラックス、及び、エネルギーを測定する。

Fine-Grained Detector

Fine-Grained Detector の目的は ν_μ 、 ν_e のエネルギー分布を求めることである。 ν_μ は水標的内の核子と荷電カレント準弾性散乱反応を起こす。

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p \quad (11)$$

その結果生成される μ^- 粒子の、ビーム軸に対する生成角 (θ_μ) とエネルギー (E_μ)、運動量 (P_μ) を測定することにより、ニュートリノのエネルギーが再構成される。

ニュートリノのエネルギーは以下の式で求めることができる。

$$E_{\nu_\mu} = \frac{m_N E_\mu - m_\mu^2/2}{m_N - E_\mu + P_\mu \cos\theta_\mu} \quad (12)$$

ここで、 m_N 、 m_μ はそれぞれ核子、 μ 粒子の質量である。

Fine-Grained Detector は以下の 4 つの検出器からなる。

水標的+シンチレーティングファイバー (SciFi) 飛跡検出器 シート状のシンチレーティングファイバーと、アルミ容器に入った水標的がサンドイッチ状に 20 層並んだもの。標的と反応したニュートリノの反応点と、その反応で生成された荷電粒子の飛跡を検出する。(3 章参照)

VETOトリガーカウンター プラスチックシンチレータを Scifi 飛跡検出器の上流側、下流側に置き、トリガーカウンターとして使用する。上流はシンチレーティングファイバーの上流からの荷電粒子のイベント除去に、下流は、ミュオンチェンバーのTDCのスタート信号の発信に使用する。

鉛ガラスカロリメータ ニュートリノビームの中に混じっている ν_e の、荷電カレント準弾性散乱による電子の同定と、そのエネルギーの測定を目的とする。

ミュオンチェンバー ドリフトチェンバーと鉄がサンドイッチ状に12層並んだもの。 μ 粒子の飛程から、そのエネルギーを求める。

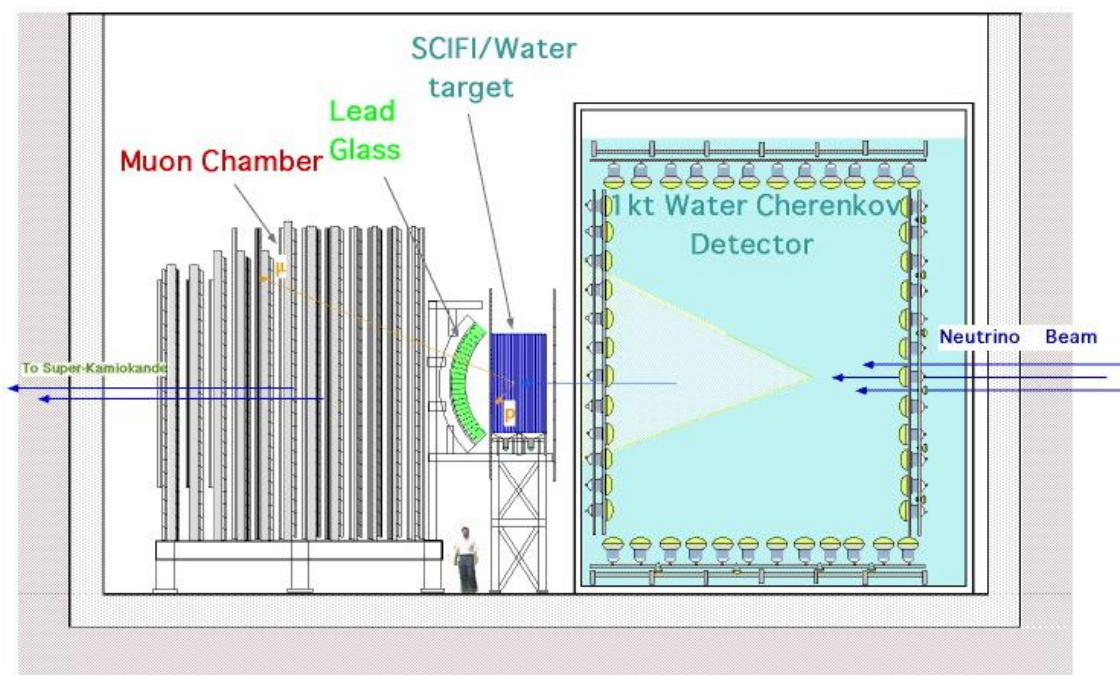


図 4: 前置検出器

ニュートリノビーム上流側から順に、1kt 水チェレンコフ検出器、シンチレーティングファイバー飛跡検出器、VETO トリガーカウンター、鉛ガラスカロリメータ、ミュオンチェンバーである。

2.4 スーパーカミオカンデ (SK)

スーパーカミオカンデは、神岡鉱山の地下 1,000m の所にある、50,000 トンの純水を蓄えた水チェレンコフ検出器である (図 5)。高さ 41.4m、直径 39.3m の円筒形であり、内向きに付けられた 20 インチの光電子増倍管で、荷電粒子の出すチェレンコフ光を検出する。チェレンコフ光の光量、形、方向、時間などからニュートリノのエネルギー、種類、方向などを求める。

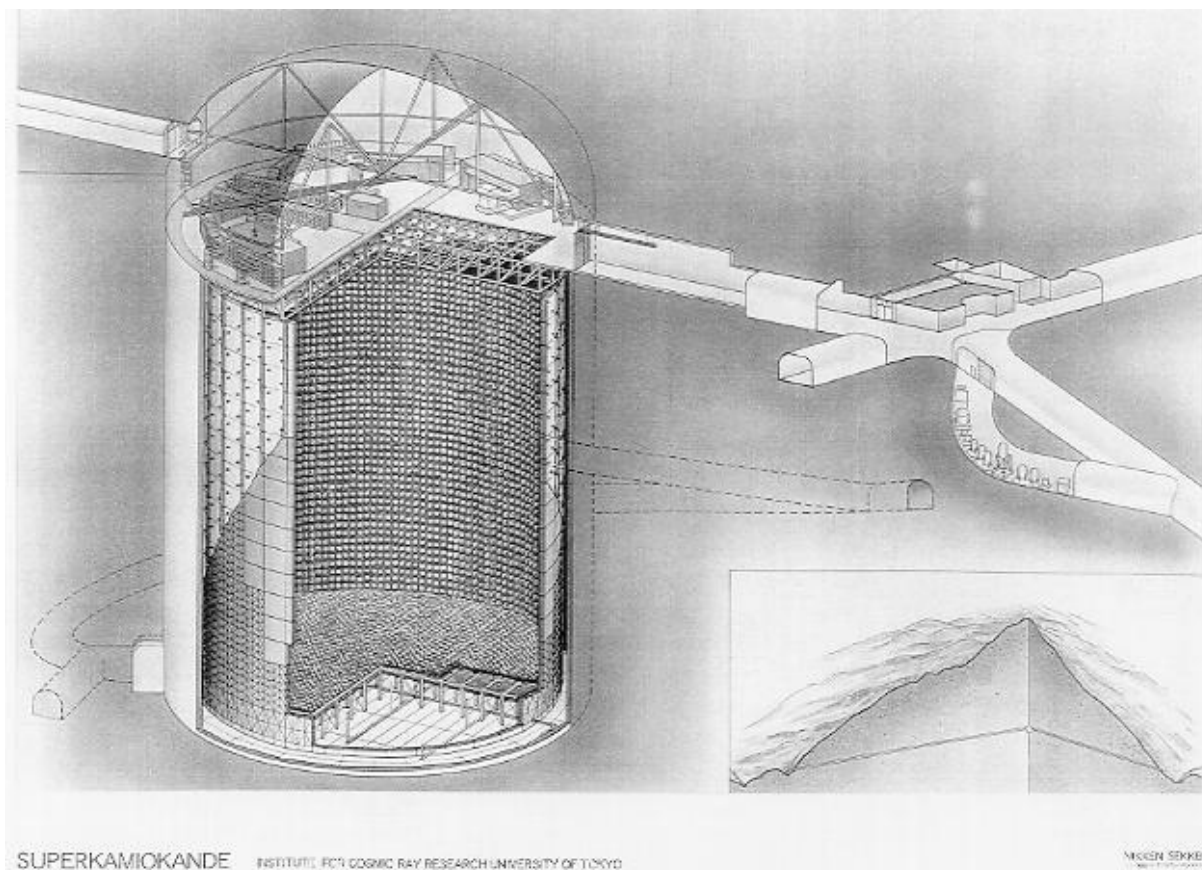


図 5: スーパーカミオカンデ純水 50,000 トン、光電子増倍管を 11,146 本使った水チェレンコフ検出器

2.5 実験の現状

Fine-Grained Detector および、SK で得られた典型的なニュートリノイベント (準弾性散乱 $\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$) を図 6、図 7、図 8 に示す。

Fine-Grained Detector の場合、SciFi 飛跡検出器上流部で、ニュートリノと反応してできた μ 粒子が、鉛ガラスを突き抜けてミュオンチェンバーまで到達しているのが分かる。陽子は SciFi 飛跡検出器の 5 層目まで通過して止まっている。

SK の場合、 μ 粒子の出したチェレンコフ光のリングが見える。観測時刻から、KEK から発射されたニュートリノだと判断できる。これが、大気ニュートリノなどによるバックグラウンドである確率は 1 万分の 1 である。人工的に発生させたニュートリノビームを 250km 先の検出器で観測した、世界で初めての例である。

平成 12 年 6 月までに、SK で検出されたニュートリノイベントは 27 で、KEK 内の前置検出器において検出されたニュートリノイベントから推定される検出数は、ニュートリノ振動がないと仮定した場合、 $40.3+4.7-4.6$ である。これは、ニュートリノ振動が起きている確率が約 95%であることを意味する。今後も数年間実験を継続することにより目標達成を目指す。

K2K Fine-Grained Detector (Side View)

Run 1171 Spill 64031 TRGID 1
99 6 10 12 55 17 0
Nvtx 0

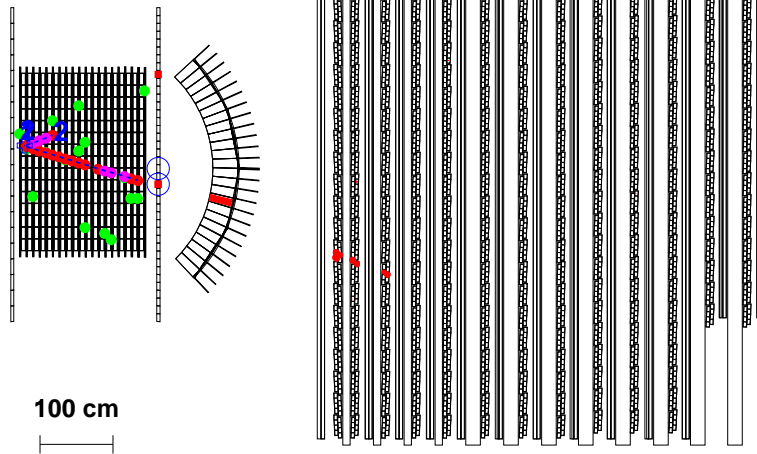


図 6: Fine-Grained Detector におけるニュートリノ反応 (側面図)

K2K Fine-Grained Detector (Top View)

Run 1171 Spill 64031 TRGID 1
99 6 10 12 55 17 0
Nvtx 0

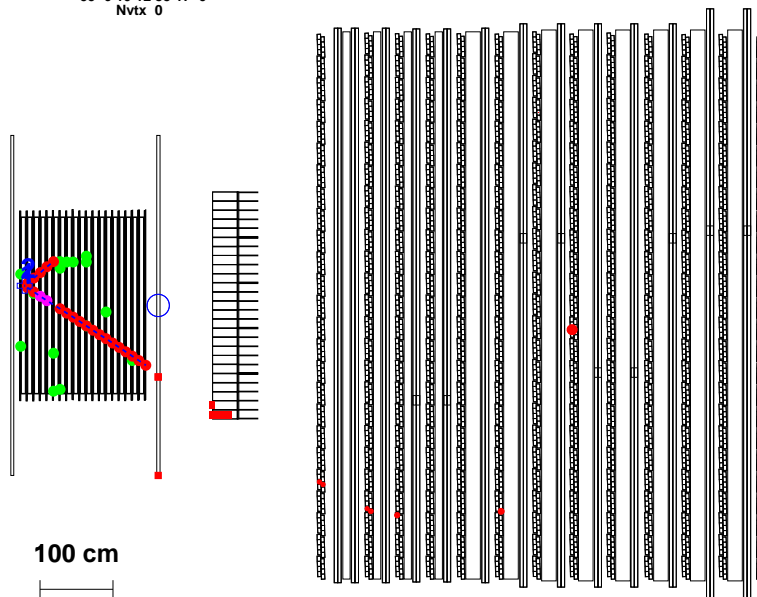


図 7: Fine-Grained Detector におけるニュートリノ反応 (上面図)

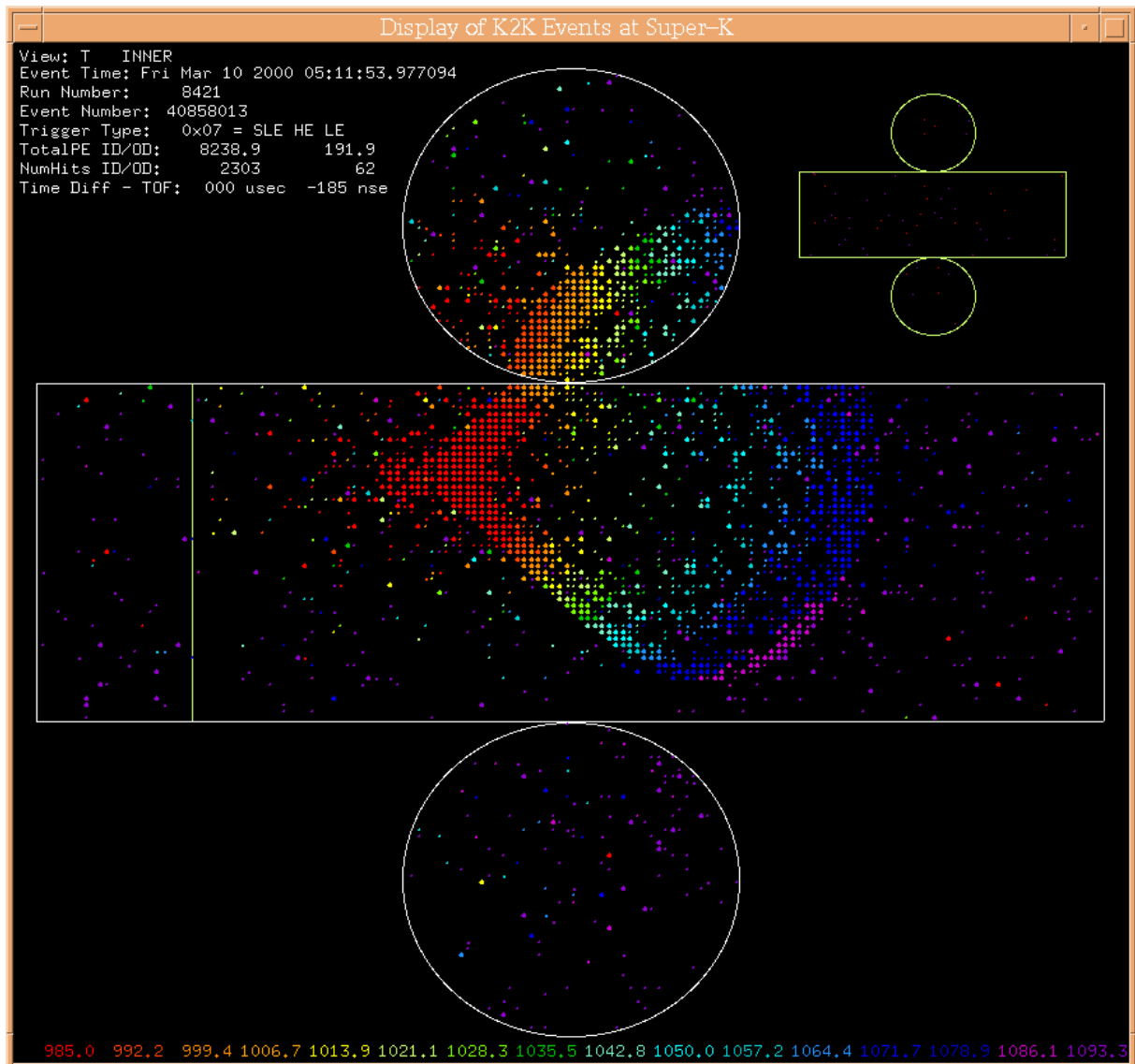


図 8: スーパーカミオカンデで観測された、ニュートリノビームによるイベント。右上の小さな図は外向きに付けられた検出器からの信号を表している。この図より、外側向きの検出器には荷電粒子による信号はないが、内側に向きの検出器には、はっきりとしたリングが見える。これにより、このリングは、検出器内でニュートリノが反応し、それにより生成された荷電粒子が作ったものいえる。

3 シンチレーティングファイバー飛跡検出器

シンチレーティングファイバー飛跡検出器は、水標的と反応したニュートリノの反応点と、その反応で生成された荷電粒子の飛跡を検出するのが目的である。

ここでは、シンチレーティングファイバー飛跡検出器について詳しく説明する。

3.1 シンチレーティングファイバー (SciFi)

シンチレーティングファイバー (SciFi) は、荷電粒子が通過すると発光するシンチレーターで、光ファイバーの一種である。

今回の実験装置で使用している SciFi(Kuraray 社、SCSF-78M 改良 11) は、図 9 のように、直径が約 0.7mm で中心部にシンチレータとしてのコア、その周囲に 2 層のクラッドがある。それぞれの材質と屈折率は表 2 の通りである。本実験では、1 層のクラッドよりも 2 層クラッドのほうが、より多くの光を伝播させることができるため 2 層クラッドを採用した。

荷電粒子が通過した場合、コアのポリスチレンは 340nm 付近にピークをもつ波長のシンチレーション光を出す。この光は、コアに混入されている波長変換蛍光体に吸収、放出されることにより、より減衰長の長い約 430nm の波長に変換される。

表 2: SCSF-78M 改良 11 の材質及び、屈折率

	材質	屈折率
コア	ポリスチレン	1.59
クラッド(1層目)	ポリメチルメタクリレート	1.49
クラッド(2層目)	フッ化ポリマー	1.42

3.2 シンチレーティングファイバーシート

荷電粒子の飛跡を測定するために、シンチレーティングファイバーをシート状にしたものをシンチレーティングファイバーシート (SciFi シート) と言う。

一つの SciFi シートは幅 40cm、長さ 370cm であり、1142 本 (571 本×2 層) の SciFi からなっている (図 10 参照)。粒子の検出効率をあげるため、SciFi は図 11 のように 2 層俵積みに並べてある。SciFi 同士の接着には白ペンキが使われており、ファイバーの端面は研磨され、アルミ蒸着されている。読み出しの部分から最も遠い点 (370cm) の所を β 線

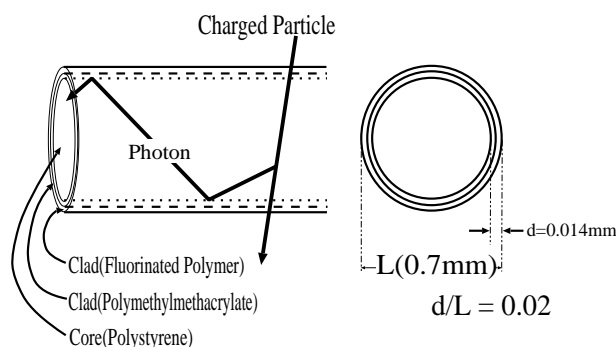


図 9: シンチレーティングファイバー【SCSF-78M 改良 11】の模式図より多くの光を伝播させるため、コアの回りに 2 層のクラッドがある。

が通過した場合、光電子増倍管 (以下 PMT) で読み出した場合約 8p.e. 相当の光量が得られる。[3]

実験で必要となる 240 枚の SciFi シートは、全て神戸大学で製作した [4]。

SciFi シートは粒子の飛跡を知るために、固定のためのハニカム板の表と裏に、図 12 のように縦向きと横向きに 6 枚並べて張り付けてある。それが全部で 20 層あり、粒子の飛跡を 3 次元的に知ることができる。

3.3 ファイバーバンドル

SciFi シートからの光の信号はイメージインテンシファイアチューブ (IIT) を使って読み出す。この有効光電面は直径約 10cm の円形なため、その面を有効活用するために、図 13 のように SciFi シートの読み出し部分を 5 つに分割し、光電面の形状に合わせてブロック状に束ねる。その回りをアクリルの型で固定し、形が崩れないように補強してある。これをファイバーバンドルと言ひ、一つのファイバーバンドルには 11420 本のファイバーがある。ファイバーバンドルの端面は専用の研磨機を使い研磨した。写真 14 は研磨後のファイバーバンドルの端面を見たものである。

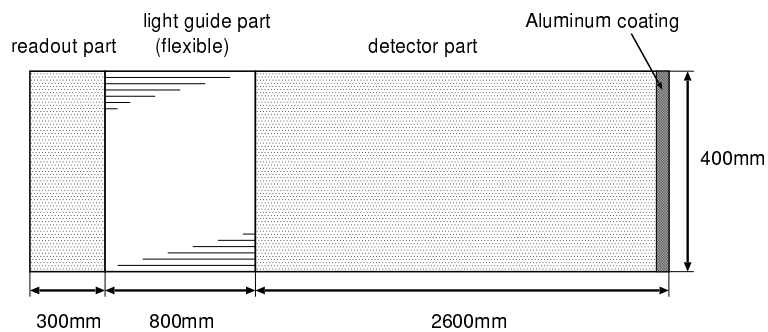


図 10: シンチレーティングファイバー模式図

読み出し部分と検出部分は白ペイントで固められている。その間のライトガイド部分は SciFi 同士は接着されず、柔軟性をもったライトガイドとなっている。神戸大学ではこのシートを 240 枚製作した。

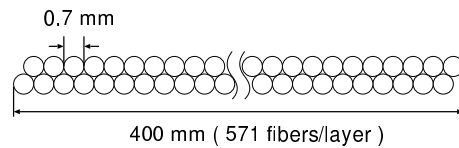


図 11: シンチレーティングファイバー俵積み図 (SciFi シートの断面)

SciFi を俵積みにより、検出効率をあげている。

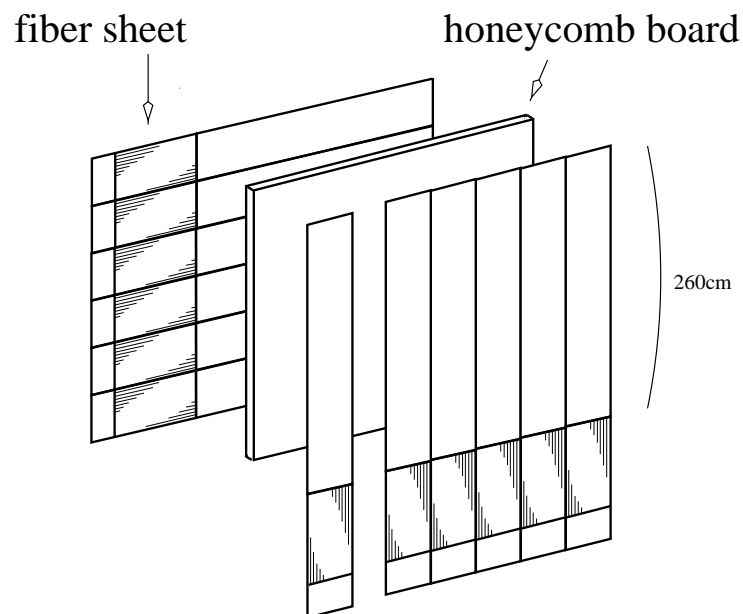


図 12: SciFi シートを 6 枚並べ、ハニカム板に張り付ける。縦方向と横方向の SciFi シートをハニカム板に両側から張ったものを 1 層とし、これが全部で 20 層ある。

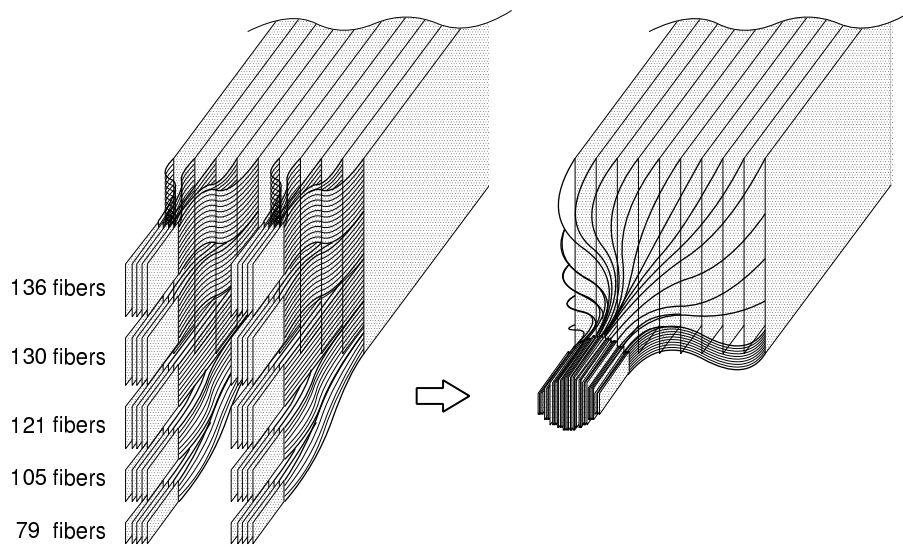


図 13: SciFi シートのバンドル化

1つの SciFi シートを 5つの部分に分割し、それぞれを 5シート分束ねる。それを重ねて SciFi バンドルを作る。

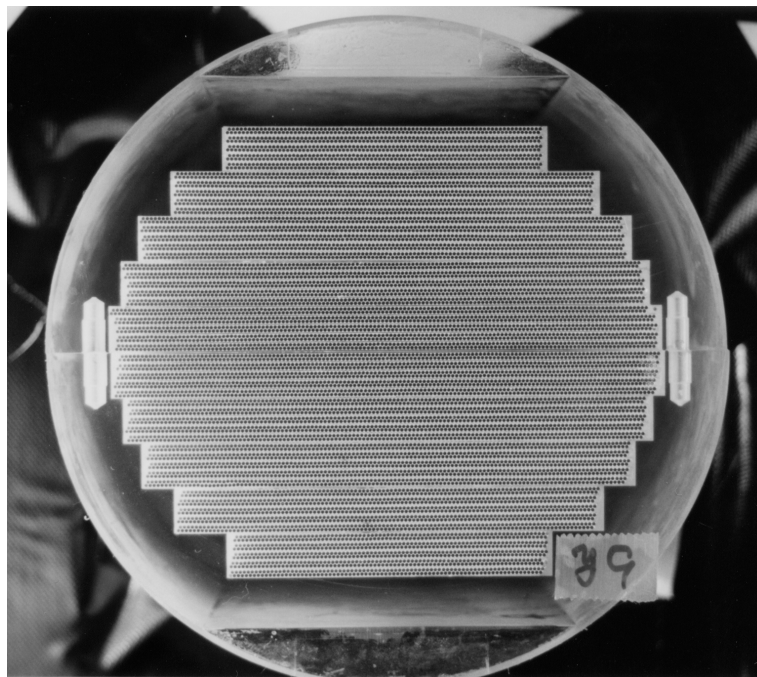


図 14: SciFi バンドルの端面の写真この面が IIT の光電面に接続される。

。

3.4 シンチレーティングファイバー飛跡検出器

シンチレーティングファイバー飛跡検出器 (SciFi 飛跡検出器) の構成は、SciFi シートを 6 枚並べ、それをハニカムボードに縦向きと横向きに両側から張り、それを 1 組とした上で、純水の入ったアルミチューブとサンドイッチ状に 20 層ならべたものである (図 15)。SciFi からの光の情報の読み出しには、イメージインテンシファイアチューブを使用する。ビーム方向に対する、検出面は $6.76\text{m}^2 (2.6\text{m} \times 2.6\text{m})$ であり、位置分解能は約 0.8mm である。トラックの検出効率は $98 \pm 2\%$ であり (5 層以上ヒットした場合)、宇宙線の μ 粒子を使って求めたヒットの検出効率は $92 \pm 2\%$ と見積もられている [5]。

この SciFi は時間と共に劣化し、光量が落ちてくることが分かっているが、実験期間中は十分な光量を保証されている (実機の環境温度、 15 度で光量が 90% に減少するには約 4000 日かかる。[6])。

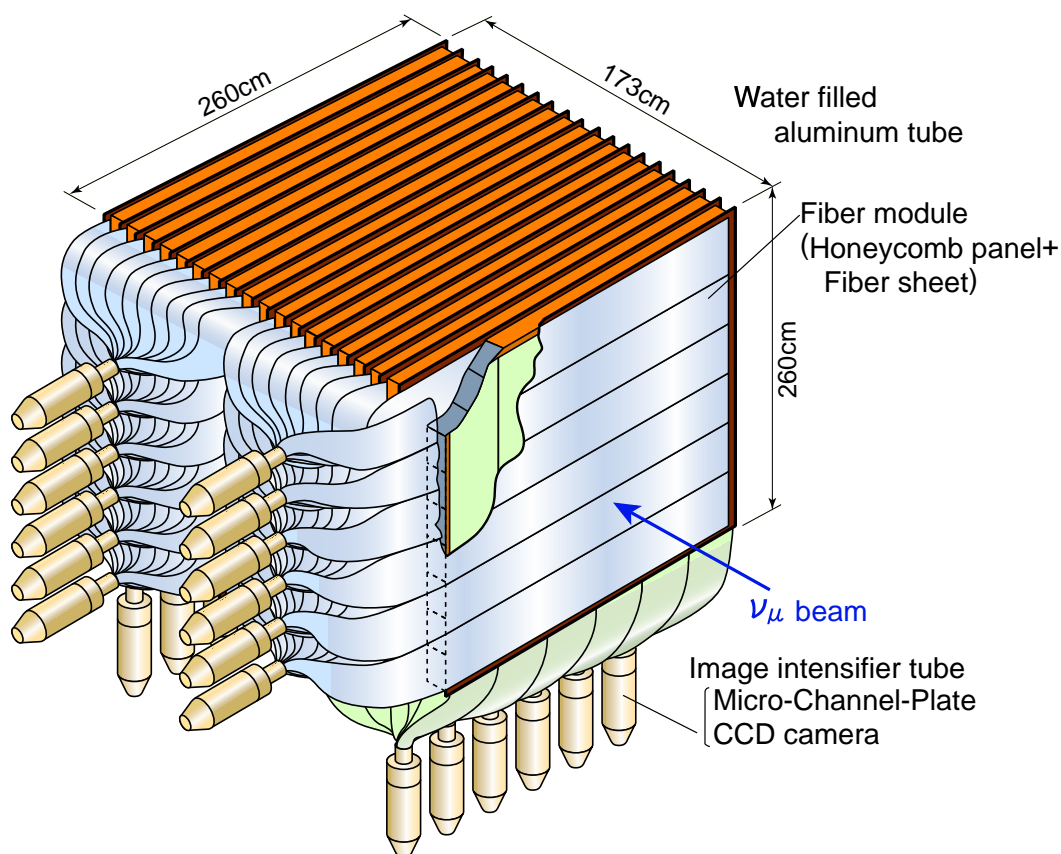


図 15: SciFi 飛跡検出器全体図

4 イメージインテンシファイアーチューブ

この章では、SciFi からの情報を読み出すために使用する、イメージインテンシファイアーチューブ (Image Intensifier Tubes: IIT) について説明する。IIT を使うことにより、光ったファイバーの位置情報と輝度情報を知ることができる。

4.1 イメージインテンシファイアーの原理

イメージインテンシファイアーとは、微弱な光の映像を光電面で電子に変換し、その電子を電場で加速し蛍光面に当てることにより、より明るい光の像にする装置である。まず、光はファイバークラウド (一本のファイバーの直径が $11\mu\text{m}$) でできた入射窓から入り、光電面を叩く。そこで飛び出した電子は高真空チューブ内で印加された直流電圧により加速され、光電面とは反対側の蛍光面で再び光に変換される。この様になると、光の像を保ったまま光量を増幅させることができる。IIT の種類は、電子の加速機構の違いによる 2 世代、またそれぞれの世代において、焦点の合わせ方から 2 つの型がある。

第 1 世代イメージインテンシファイアー (静電型) 真空チューブ内において電子の加速のみを行なう IIT。利得は 10 倍程度であるが、高解像度、広いダイナミックレンジ (明暗の比率の再現能力)、低雑音を特徴とする (図 16 参照)。

第 2 世代イメージインテンシファイアー (MCP 型) 真空チューブ内にマイクロチャンネルプレート (Micro Channel Plate :MCP) と呼ばれる、多数の小さな穴 (典型的な穴の大きさは $10\mu\text{m}$) のある、厚さ 1mm 程度のガラス板を挿入してある IIT。穴の壁には高電圧が印加しており、図 17 の様にそこに衝突した電子は 2 次電子を放出させ、それを繰り返すことにより、電子を増殖する。画像の解像度とダイナミックレンジに関しては第一世代に劣るが、 10^4 程度の利得を得ることができる。

近接焦点型二極管 光電面と蛍光面を近接させて配置し、平行電場により電子を加速する (図 16 参照)。

倒立型 (インバータ型) 二極管 光電面から発射された電子を電子レンズを使用し、蛍光面上に結像させる。電子レンズの使い方により、像を拡大、縮小できる (図 16 参照)。

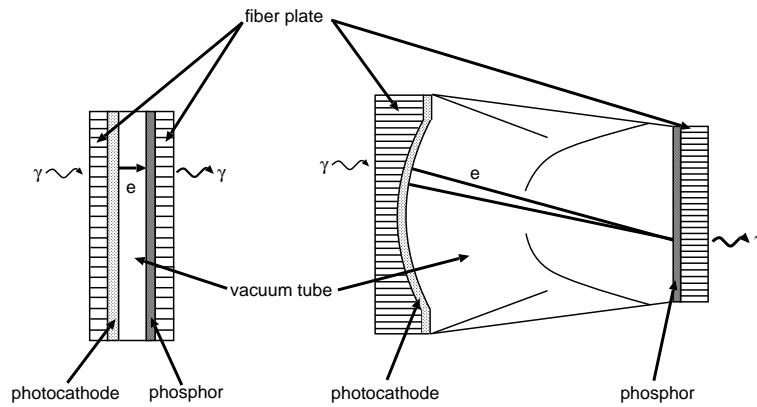


図 16: 近接焦点型 IIT と倒立型 IIT の模式図

第 1 世代 (静電型) IIT についての、2 つの焦点の合わせ方についての図である。左は光電面と蛍光面との距離が短い近接焦点型 IIT、右は電子レンズにより、蛍光面に結像させる倒立型 IIT である。図中のファイバープレートは入射光や放出光の向きを決定するために使われる。これらの真空チューブ内にマイクロチャンネルプレートを挿入すると、第 2 世代の MCP 型 IIT になる。

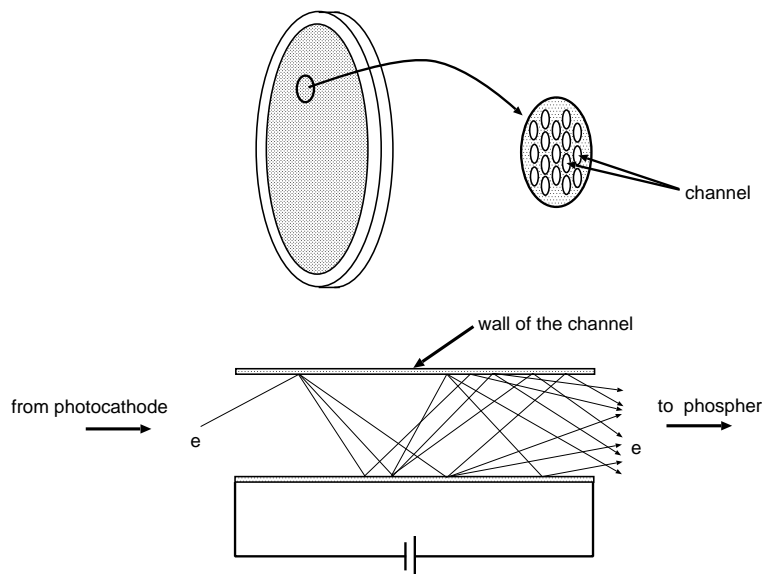


図 17: マイクロチャンネルプレートの模式図

厚さ 1mm 程度のガラス製の板に多数の小さな穴 (直径約 $10\mu\text{m}$) が空いている。その穴の壁には高電圧がかかっており、電子がぶつかった時に多重生成を起こし、 10^4 程度の利得を得ることができる。

4.2 IIT-CCD チェーン

SciFi 飛跡検出器の読み出しでは、IIT、光学レンズ、CCD カメラが使われている。これらを IIT-CCD チェーンと呼び、初段 IIT、後段 IIT、光学レンズ、CCD カメラの順に取り付けられている。(図 18 参照) 初段 IIT には第 1 世代インバータ型 IIT が使われており、直径 100mm の像を 23mm に縮小し、輝度を 10 倍程度に増幅させる。後段 IIT には、第 2 世代インバータ型 IIT を用いるが、MCP は高利得を稼ぐのみならず、ゲート機能を有し、ビームが来た時のみゲートを開き、S/N 比のよい画像を観測することができる。今後これを MCP 型 IIT と呼ぶ。光学レンズは画像のサイズを 1/3 に縮小し、CCD カメラの撮像面積 (8.8mm × 6.6mm) に像を収め、ピントを合わせる。CCD カメラは、768 × 493pixel(画素) の解像度をもち、位置情報と輝度情報を取り込む。1pixel で前段 IIT 光電面上の 165 ~ 200 μm に相当する。

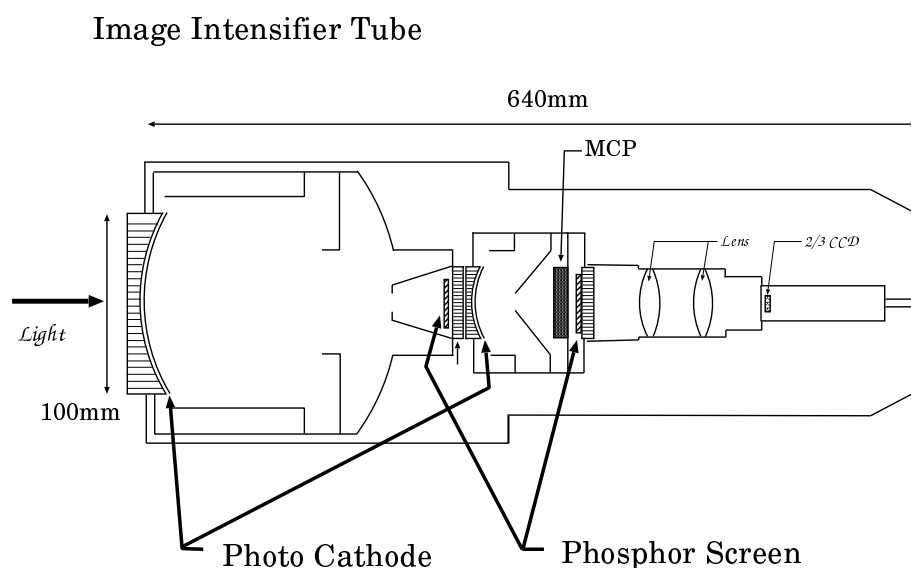


図 18: 本実験で使用されている、IIT-CCD チェーン図
左から、静電型 IIT、MCP 型 IIT、光学レンズ、CCD カメラである。

4.3 MCP の高電圧の最適化

本実験で使用している IIT の MCP には、もともと 440~891V までの高電圧 (High Voltage:HV) がかかるようになっている。しかし、宇宙線テストによる IIT-CCD チェーンのヒットの検出効率は $92 \pm 2\%$ とあまり良くなかったため、さらに MCP の HV を上げ検出

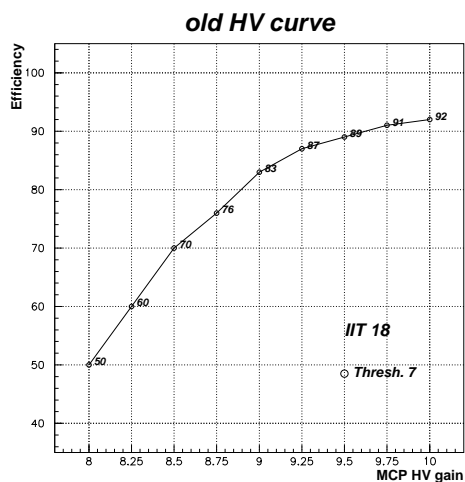


図 19: HV カーブ (印加電圧変更前)、光量は 6p.e.。HV を上げればさらに検出効率は上がる。横軸の 10.00 の目盛が、MCP の最大電圧に対応する。

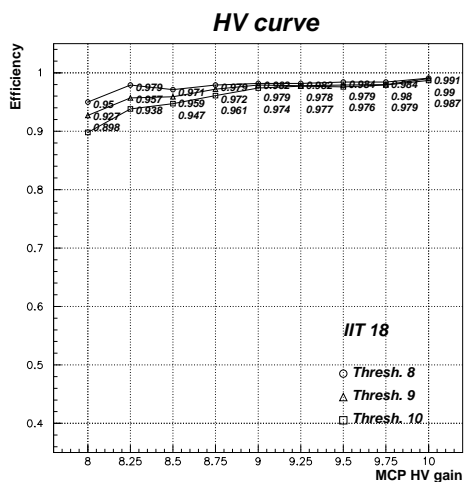


図 20: HV カーブ (印加電圧変更後)、光量は 6p.e.。HV を上げてこれ以上は検出効率は上がらず、一定になっていることが分かる。

効率を上げる試みを、1999 の夏のビームオフの時に行なった。

MCP の印加電圧を上げるには HV システムの抵抗を取り替えばよい。MCP には最大で 1000V まで電圧を加えることができるが、あまり上げ過ぎると、放電する危険性がでてくる。そのため、今回は 440V~950V の範囲内で使用することとし、調整した。

MCP の印加電圧を上げると、検出効率は上がるが、それにもなってノイズの量も増えてくるという問題が起こる。そこで、検出効率を損なわない範囲で、ノイズの量をできるだけ減らす HV の値を求めた。つまり、MCP の HV を変化させ、検出効率が悪くならない範囲で、MCP 印加電圧をできるだけ低く設定した (HV カーブ測定)。測定では IIT に 6p.e. 相当の光を入れ検出効率のカーブを求めることを、IIT24 本分全てに対して行なった。その結果の例が図 20 である。変更前の HV カーブ (図 19) と比べて検出効率が大きく上がっているのが分かる。

このようにして、IIT24 本分の MCP 印加電圧を最適化した結果、宇宙線テストによる検出効率は $96 \pm 2\%$ となり、検出効率を約 4% 上げることができた [7]。

4.4 MCP ゲート及び初段ゲートの原理

IIT には、カメラのシャッターの役割を果たすゲート機能がついている。これは、必要な時間 (ビームが来ている時間) のみデータを取り、それ以外の時はデータを取らないことにより、余分なノイズを落とし、必要な情報のみを取ることを可能にしている。

K2K 実験で使用している IIT に、ゲートをかける方法は 2 つある。1 つは、現在実機

で使用されている、MCP ゲートという MCP の電圧を切ることによってゲート機能を作り出す方法である。そして、2つめは今回新たに浜松ホトニクス社により開発されたのだが、初段ゲートという、静電型 IIT の電場を変更することによってゲートをかける方法である。

MCP ゲートは IIT の MCP 部分の電源をかけたりかけなかったりすることにより、必要な時間以外の情報を後ろの CCD カメラへ伝えないようにしている。これは IIT にゲート信号を必要な長さだけ送れば良いため、非常に手軽に必要な装置も少なく済む。ゲートの長さはマイクロ秒の単位まで短くすることができるが、初段 IIT 後部についている蛍光面での発光時間が有限なため、MCP 型 IIT への信号の伝達は遅れる。そのため、現在の実機では $100\mu\text{s}$ のゲート時間で使用している。(5 章参照)

初段ゲートとは初段 IIT にゲート機能をつけることにより、光の入射する時間に合わせゲートを開くことを可能にしたものである。このゲートは、専用電源により静電型 IIT の電場を変化させて、ゲート機能をつくり出している。光を読み込む場合は、光電面で発生した電子を蛍光面に向け加速する電場を作り出しているが、光を読み込まない場合は、光電面で発生した電子を、蛍光面に向け加速する向きとは逆の電場をかけることにより光電面に戻す。ゲートの立ち上がり、及び立ち下がりには IIT の電源のケーブルの長さにもよるが、ケーブル長が 5m の場合、 $1\mu\text{s}$ 以下である。電場を急激に変化させるため、回りに強い電磁波を出す問題もあるが、数 μs のゲートをかけることが可能である。(6 章参照)。

5 MCP ゲートの性能評価

5.1 目的

現在、宇宙線が SciFi 飛跡検出器を貫通したイベントの内、SciFi シートを 15 層以上通過したものを選びだし、トラッキングに使用されないヒットをノイズとすると、これはトラッキングに使用されるヒットシグナルの数に比べて 1.7 倍ある。現在のところ、トラッキングをする上でこのノイズは問題にはなっていないが、今後短いトラックを解析していく上では問題になる可能性がある。トラッキングの精度を上げるためにも、ノイズの削減は重要な課題である。もしノイズの数を半分に減らすことができれば、ノイズによって間違っ

てトラッキングされる飛跡の数は約 20% 減少すると見積もられている。ノイズの発生には、何種類かの原因が考えられる。まずは、光ファイバーを伝播し、IIT の光電面に入射するとき、角度を持って入射することにより、実際に光っているファイバー以外の位置にヒットを作り、ノイズとなる場合である。次に、宇宙線や、光漏れなど、ニュートリノビームによる反応とは関係のない光によるノイズが考えられる。また、静電型 IIT 内で何らかの原因で電子が放出された場合、それが増幅されることにより光信号として検出される。最後に、輝度情報を伝達するケーブルにノイズが乗る場合が考えられる。

本研究では、ランダムに発生すると考えられる、宇宙線や光漏れなどによるノイズ、また、IIT 内で発生するノイズを減らすために、IIT の MCP ゲートを短くすることを考える。現在、K2K 実験で使用している IIT の MCP ゲート幅は $100\mu\text{s}$ である。この値を使用している理由は、MCP ゲートの前段にある蛍光板の発光時間を考慮して、十分な検出効率をかせぐために長めにとった値であって、定量的な測定から最適化したわけではない。本研究では、LED テスト、宇宙線テストを通し、MCP のゲート幅と検出効率及びノイズの関係を調べ、ゲート幅の最適化をはかる。

5.2 準備

IIT-CCD チェーンの検出効率を測定するために LED(Light Emitting Diode:発光ダイオード)を使用しテストを行なった。LED は供給電圧を変化させることにより光量を操作でき、その光を SciFi を通し IIT で測定することにより、実際の実験と同じ条件で検出効率を調べる。

まず、LED(TOYODA : E1L51-3BB02) と SciFi(KURARAY : SCSF-78M) を組合せ、必要な光量を安定して IIT に伝える図 21 の装置を製作する。

基板に、LED と 50Ω の抵抗を直列に繋ぎ、その端に電力供給用の LEMO コネクタを取り付ける。この時、LED の光を一様に分布させるため、LED の表面をやすりで削り、そ

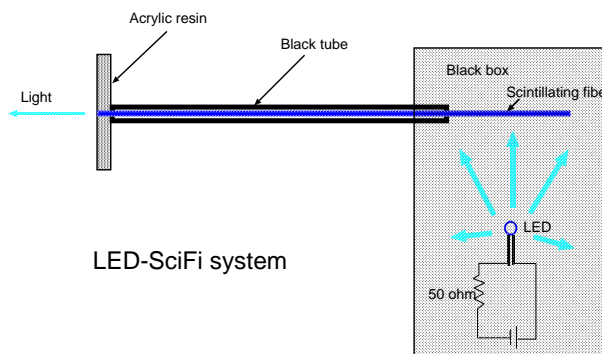


図 21: LED-fiber 装置の概念図

LED で発生した光は SciFi を伝播し、読みだし面に到達する。余分な光が外に洩れないようにするため、LED は暗箱に入っており、SciFi はブラックチューブに通してある。

の回りをトレーシングペーパーなどの半透明の紙で包んでおく。こうすると、LED 表面で光が散乱するため、SciFi に一様に光が当たる。SciFi の長さは約 1.5m、保護と遮光の目的で黒色のシンフレックスチューブの中に通す。IIT で読み出す部分は、垂直にファイバーが当たり密着するよう、アクリルでガードを作る。反対側の LED の光を入射する部分は、ブラックボックスに固定し、LED の基板を取り付ける。

次に、上で製作した LED ファイバー装置で、LED への印加電圧と出力される光量の関係を調べる。セットアップは図 22 の通りである。まず、1p.e. 相当の ADC 値を求める。LED の電圧を 0 から少しずつ上げていき、初めに見えた ADC 分布のピークが、1p.e. によるものである (図 23 参照)。ペDESTAL の値と 1p.e. によるピークの分布の平均値の差が 1p.e. の ADC 値である。

$$(1p.e. \text{ に対応する } ADC \text{ 値}) = (1p.e. \text{ の } ADC \text{ 分布の平均値}) - (\text{ペDESTAL の値}) \quad (13)$$

Xp.e. に対応する ADC 値は、上の結果を X 倍しペDESTAL を足し合わせればよい。

$$(Xp.e. \text{ の } ADC \text{ 値}) = (1p.e. \text{ に対応する } ADC \text{ 値}) \times X + (\text{ペDESTAL の値}) \quad (14)$$

図 25 は LED 印加電圧と ADC の関係を示す。これを最小二乗法を使い直線でフィットする。その結果より、必要な光量を得るための LED 印加電圧が分かる。

LED calibration

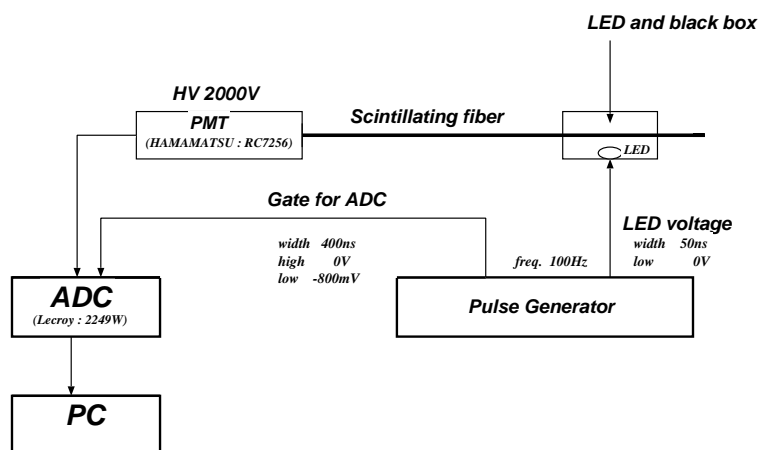


図 22: LED 光量測定のためのセットアップ図

パルスジェネレータで LED 用の電圧と ADC へのゲート信号を作る。LED の光は SciFi を伝播し、PMT へ達する。PMT からの信号は、ADC で読みとられる。それをコンピューターに記録する。

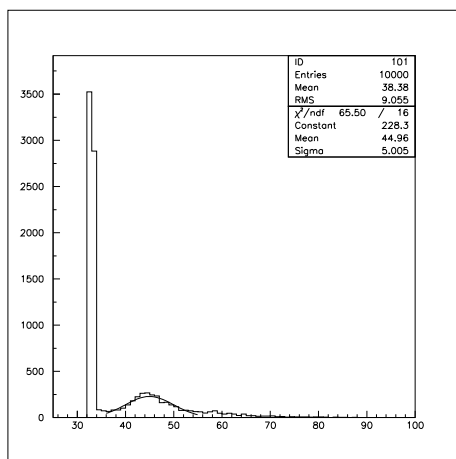


図 23: 1p.e. の ADC 分布

この時、LED にかかっている電圧は 1.62V である。

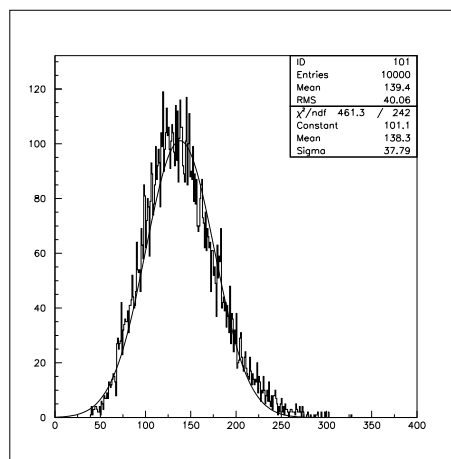


図 24: 8p.e. の ADC 分布

この時、LED にかかっている電圧は 1.91V である。

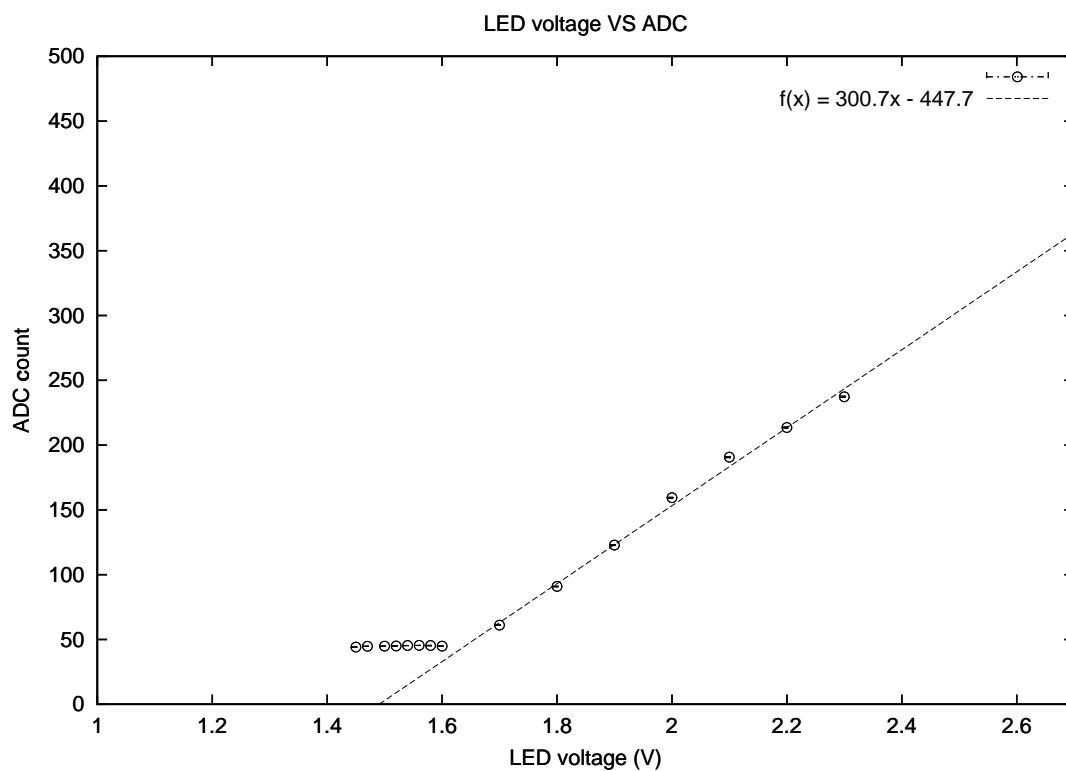


図 25: LED への印加電圧とその時の ADC 値の関係
 光量が小さい時は電圧を上げても ADC 値が変わらない。ここでは LED 電圧 1.7V 以上の点を最小二乗法を使い直線でフィットした。

5.3 LEDテスト

実機では24台のIITが使われているが、今回はまず予備IITを使いテストを行なった。

セットアップは図26の通りである。LEDに電圧(幅50ns)を印加するごとに、DAQのトリガーをかけている。データはDAQの処理能力の関係のため20Hzで取り、それぞれのトリガー数は5000である。

MCPゲートの幅は、必要なゲート幅の信号(TTLレベル:ON=5V OFF:0V)をIIT本体に送るだけで良いため、簡単に変更できる。現在は100 μ sであるが、これを10 μ sずつ短くしていき、検出効率とノイズの変化を調べる。LEDを光らせるタイミングはMCPゲートの開放と同時である。

SciFiシートの読み出し側から一番遠い所に荷電粒子が通過した場合、IITに到達する光による光電子(photo electron:p.e.)は7~9p.e.、平均8p.e.程度である[3]。今回のテストでは8p.e.と安全のため6p.e.相当の光量で行なった。

5.4 解析方法

図27は8p.e.相当の光をIITに照射したときのCCD画像である。光の像の位置や大きさは毎回異なっていることが分かる。そこでファイバーの中心の位置と光の広がり、LEDを多数回光らせ、輝度(ADC)を重ね合わせて求める。LEDを5000回光らせ輝度を積分した結果を図28に示す。輝度のピーク位置(この場合では(X,Y)=(426,303))をファイバーの中心とみなす。図より、ピークの座標、上下左右10ピクセルの領域をとれば1本のファイバーからの光はほぼ全て入る。よって、この領域をシグナル領域とし、それ以外の領域をノイズ領域とする。ファイバーの直径(約700 μ m)はCCD画面上で約4ピクセルである。光の広がりが4ピクセル以上の大きさを持つのは、ファイバーを伝播した光が、光電面に入射する時に角度をもって入射するためだと考えられる。

次に、クラスタリングについて述べる。ファイバーが発光した場合、それによるヒットは、ピクセルの集合(クラスター)として現れると考えられ、隣接して光っているピクセルを統合し、1つのクラスターにする。これをクラスタリングと呼ぶ。このクラスターを構成するピクセルの数をクラスターサイズと呼ぶ。孤立ピクセルはシグナルとは考えにくいので、2ピクセル以上つながった場合をクラスターとする。また、輝度情報はCCD上を横方向に順に走査して読み込まれるため、ケーブル等にノイズが乗ると、横長のクラスターとなる可能性がある。そのため横方向のみにつながったクラスターも電氣的なノイズであるとしてこれを除外する。

シグナル領域にあるクラスターをシグナルとし、ノイズ領域にあるクラスターをノイズとする。シグナル領域に2つ以上のクラスターがあった場合は、クラスターサイズが最大のものをシグナルとし、それ以外のクラスターはシグナルともノイズともみなさず、解

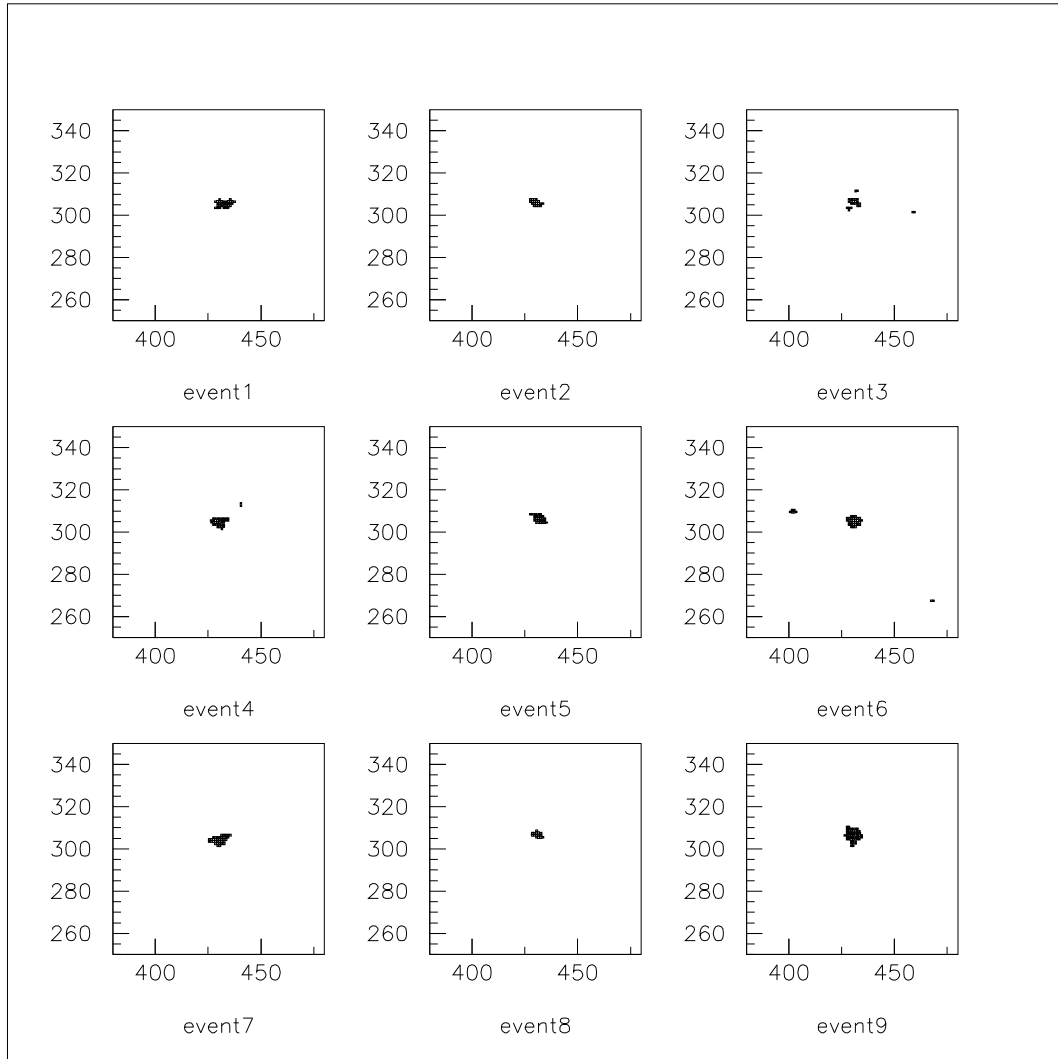


図 27: 8p.e. 相当の光を IIT に照射したときの CCD 画像。ここでは LED を 1 回光らせた場合の像を 9 個示す。横軸が X 座標、縦軸が Y 座標である。像のサイズ、輝度、位置は、毎回異なっていることが分かる。

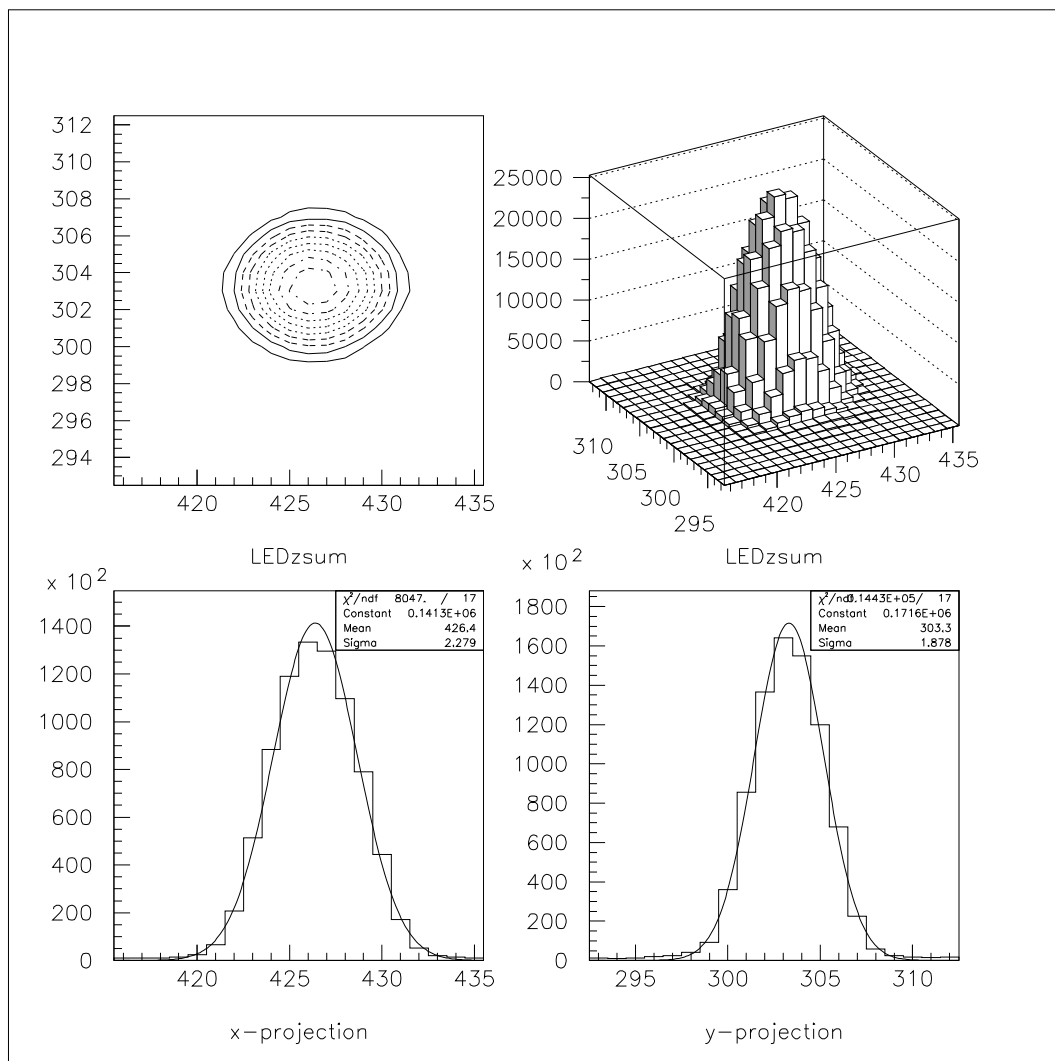


図 28: LED を 5000 回光らせた場合の積分画像

左上が等高線図、右上がヒストグラムである。横軸が X 座標、縦軸が Y 座標、LED を 5000 回光らせ、その時の輝度を積分したものである。左下は輝度の X 軸への射影、右下は輝度の Y 軸への射影である。横軸が座標、縦軸が輝度の和である。

析には使用しない。シグナル観測数の LED 発光回数に対する割合を検出効率とする。また、ノイズ数は 1 画面当りに含まれるノイズクラスター数で考える。

$$\text{検出効率} = \frac{\text{観測シグナルの数}}{\text{LEDを光らせた回数}} \quad (15)$$

$$\text{ノイズ数} = 1 \text{画面当りのノイズクラスター数} \quad (16)$$

5.5 実験結果

図 29 より、6p.e. 相当の光量で行なったテストでは、MCP ゲートの幅を $100\mu\text{s}$ から $80\mu\text{s}$ まで短くしても、検出効率に変化はなく、また 8p.e. 相当の光量で行なったテストでは、MCP ゲートの幅を $100\mu\text{s}$ から $60\mu\text{s}$ にしても検出効率に変化はない。

次に MCP ゲートの幅と、シグナルクラスターのクラスターサイズ及び ADC 和の値の関係を図 30 に示す。6p.e. 相当の光量で行なったテストの場合、MCP ゲート時間を $100\mu\text{s}$ から $80\mu\text{s}$ にするとクラスターサイズは 94%、ADC 和の値は 92%に小さくなる。また、8p.e. 相当の光量で行なったテストの場合、MCP ゲート時間を $60\mu\text{s}$ にするとクラスターサイズは 84%、ADC 和の値は 78%になる。クラスターサイズより ADC 和

MCP ゲートの幅を変化させた時の、それぞれの MCP ゲート幅に対するシグナルクラスターのクラスターサイズ及び、ADC 和のヒストグラムは、図 32、33 で示す。MCP ゲートの幅が小さくなるに従い、クラスターサイズ及び、ADC 和の値が小さくなっており、検出できないクラスターが増えていくことが分かる。クラスターサイズと ADC 和の MCP ゲート幅に対する影響を考えると、ADC 和の値の方が、MCP ゲート幅が短くなった時の影響をクラスターサイズよりも強く受けることが分かる。これは、MCP 型 IIT の前面にある蛍光面の発光に時間がかかるため、光の面積情報として表されるクラスターサイズはあまり変わらないが、光の輝度情報として表される ADC 和は蛍光面が光り続ける間は時間と共に増えるため MCP ゲート幅に強く依存すると考えられる。現在の解析方法では ADC の輝度情報は使われておらず、クラスターサイズのみ使用されるため、MCP ゲート幅を短くすることによる影響を受けやすい ADC 和の値はあまり問題とはならない。斜線のヒストグラムはノイズクラスターの分布である。

MCP ゲートの幅とノイズ数との関係を図 31 に示す。LED を光らせないことにより、MCP ゲート幅と IIT 内で発生するノイズ数の関係を調べた。図より、MCP ゲート幅とノイズ数は比例していることが分かる。6p.e. 相当の光を入射した場合、MCP ゲートの幅は $80\mu\text{s}$ まで短くしても検出効率は落ちず、その時 IIT 内で発生するノイズは、MCP ゲートの幅 $100\mu\text{s}$ の時と比べて 68%である。また、8p.e. 相当の光を入射した場合、MCP ゲート幅は $60\mu\text{s}$ まで短くしても検出効率は落ちず、その時の IIT 内のノイズは 41%になる。

以上の LED テストの結果より、検出効率を落さずに MCP ゲートを短くすることは可能であり、ノイズ数を削減できることが分かった。

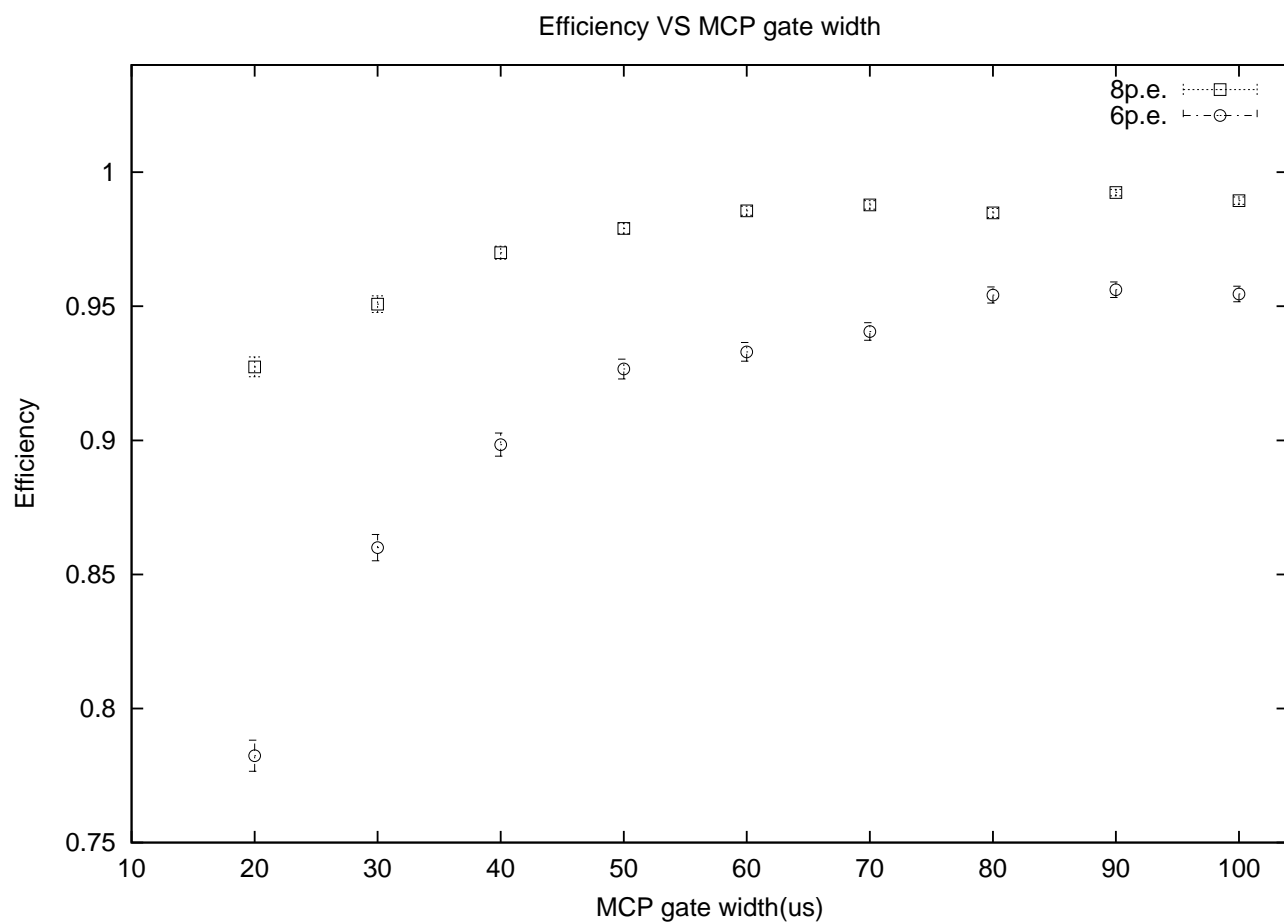


図 29: MCP ゲートの幅と検出効率の関係。6p.e. では MCP ゲート幅を $80\mu\text{s}$ 、8p.e. では $60\mu\text{s}$ まで短くしても検出効率は $100\mu\text{s}$ の場合とほとんど変わらない。

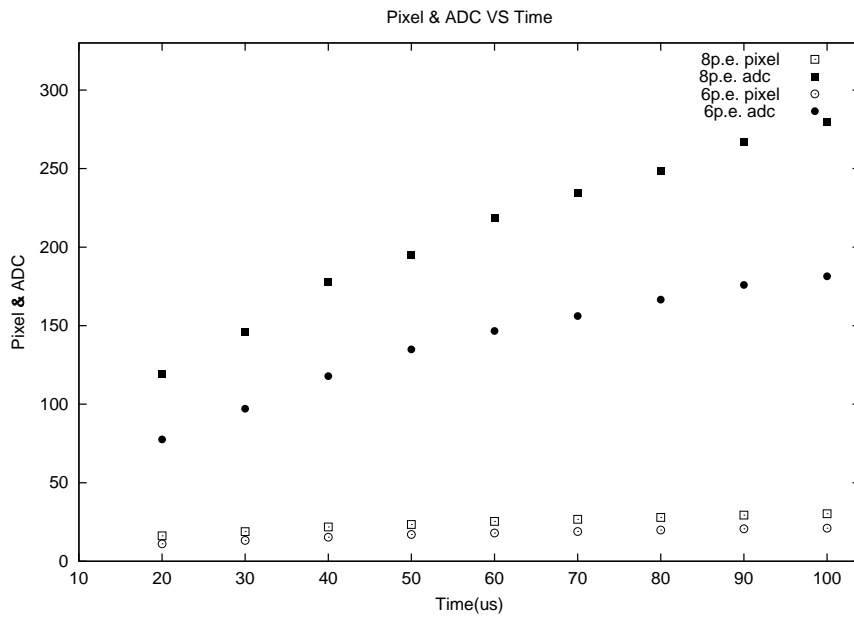


図 30: MCP ゲートの幅と、シグナルクラスターのクラスターサイズ及びその ADC 和との関係。横軸が MCP ゲート幅、縦軸がクラスターサイズおよび、ADC 和の値。シグナルのクラスターサイズは主に、光の明るさに依存するため、MCP ゲートの幅を変えても変化は少ない。しかし、その ADC 和は、蛍光面の発光時間が長いいため、時間と共に増え、MCP ゲート幅に影響される。

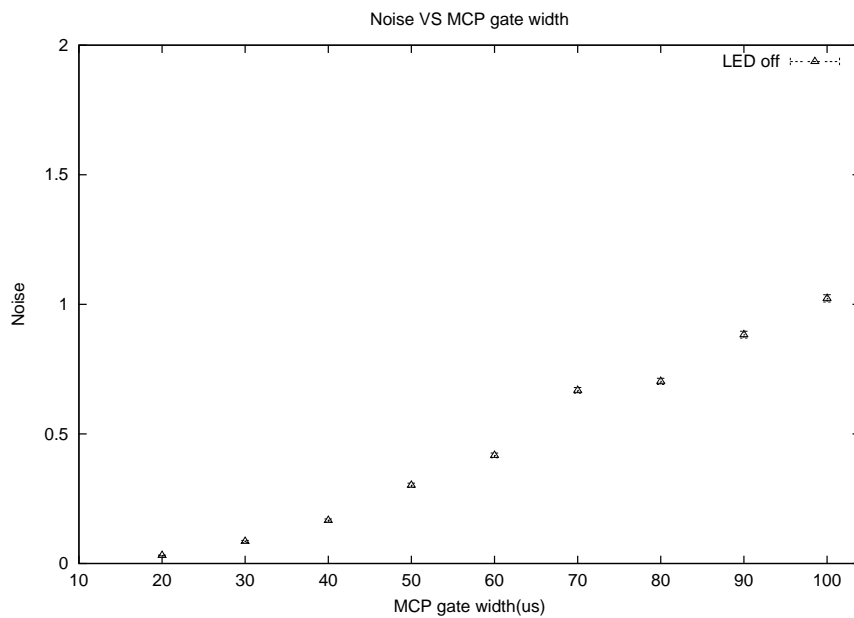


図 31: MCP ゲートの幅と 1 画面に含まれるノイズの数の関係。横軸は MCP ゲート幅、縦軸は 1 つの画面のノイズ領域に含まれるノイズの数である。このプロットは LED を光らせない場合であり、IIT 内部で発生したノイズ数を意味している。ノイズ数は、ほぼゲート幅と比例していることが分かる。

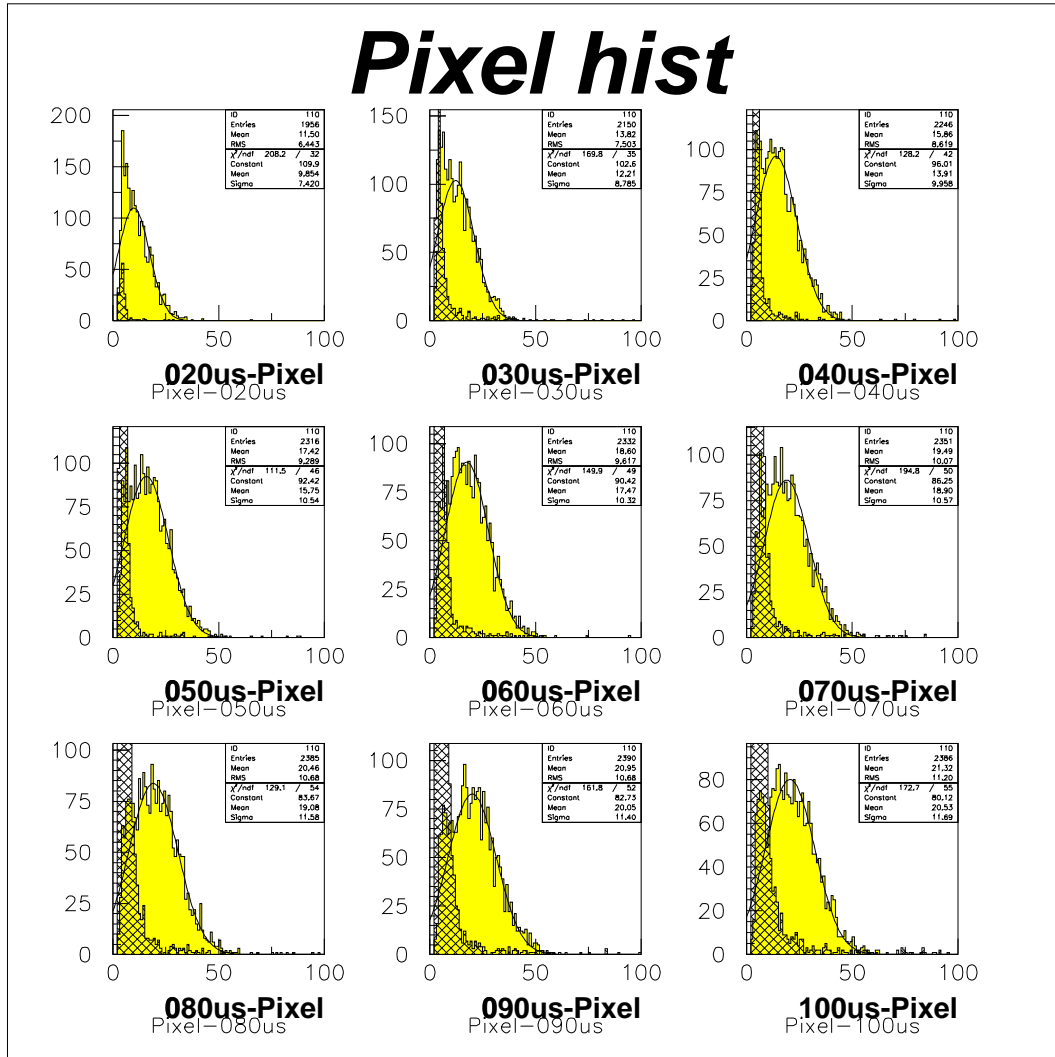


図 32: MCP ゲート幅に対する、シグナルクラスターのクラスターサイズの分布。左上から右方向へ順に、MCP ゲート時間を $20\mu\text{s}$ 、 $30\mu\text{s}$ とした場合のヒストグラムである。横軸がピクセル数、縦軸が数である。斜線のかかっているヒストグラムはノイズクラスターのクラスターサイズの分布である。シグナルのクラスターサイズはノイズのそれより大きく、分布に差があることが分かる。

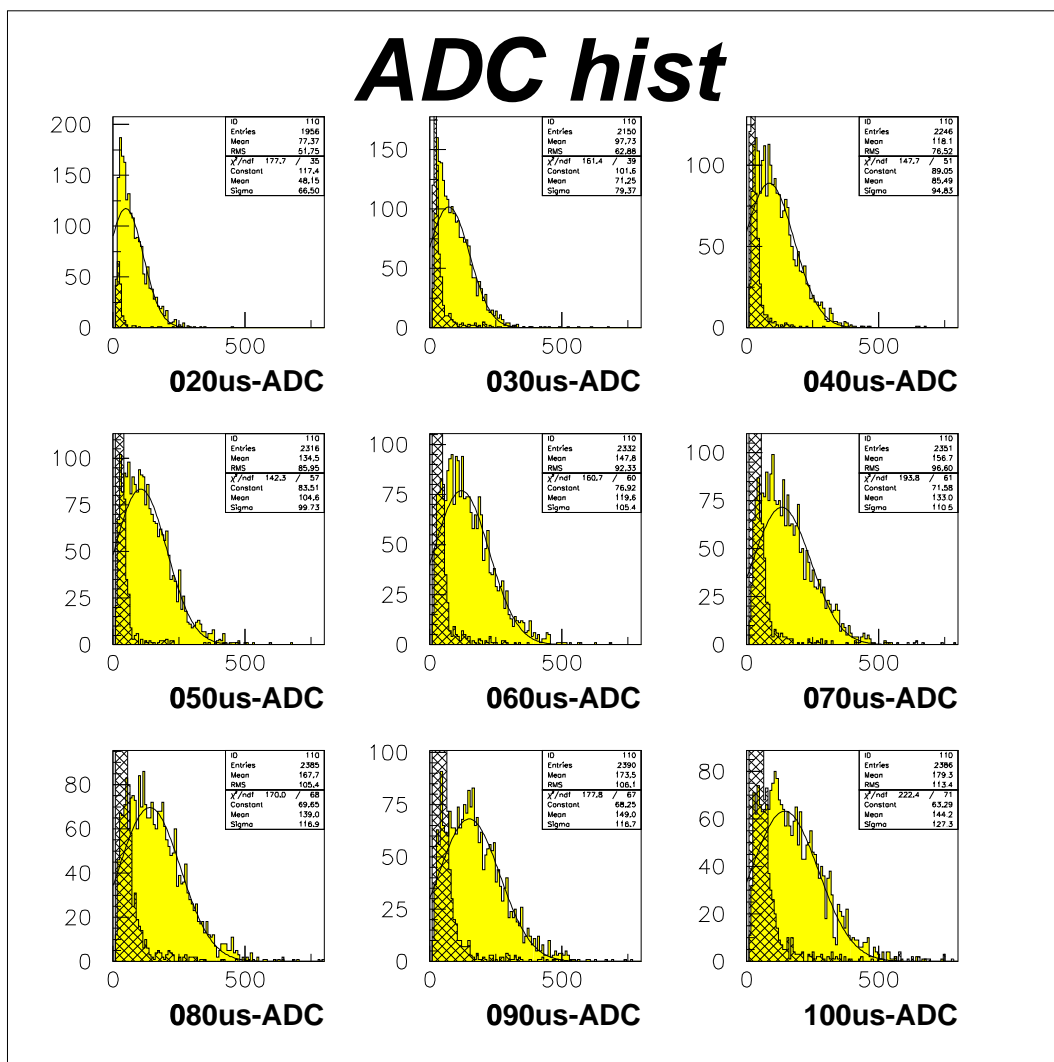


図 33: MCP ゲート幅に対する、シグナルクラスターの ADC 和の分布。左上から右方向へ順に、MCP ゲート時間を $20\mu\text{s}$ 、 $30\mu\text{s}$ とした場合のヒストグラムである。横軸が ADC 和、縦軸が数である。斜線のかかっているヒストグラムはノイズクラスターの ADC 和の分布である。

表 3: MCP ゲート幅と検出効率の関係 (光量 6p.e.) 左から、MCP ゲート幅、検出効率、クラスターの平均ピクセルサイズ、クラスターの平均 ADC 値、ノイズ数である。

MCP(μs)	Efficiency	Pixel	ADC	Noise
100	0.954 ± 0.013	21.0	181.3	1.220 ± 0.016
90	0.956 ± 0.013	20.6	175.9	1.014 ± 0.014
80	0.954 ± 0.013	19.8	166.6	0.933 ± 0.014
70	0.940 ± 0.013	18.9	156.1	0.741 ± 0.012
60	0.933 ± 0.013	18.0	146.5	0.593 ± 0.011
50	0.926 ± 0.013	17.0	134.9	0.416 ± 0.009
40	0.898 ± 0.013	15.3	117.8	0.292 ± 0.008
30	0.860 ± 0.013	13.2	97.0	0.264 ± 0.007
20	0.782 ± 0.012	11.1	77.5	0.071 ± 0.004

表 4: MCP ゲート幅と検出効率の関係 (光量 8p.e.)

MCP(μs)	Efficiency	Pixel	ADC	Noise
100	0.989 ± 0.014	30.2	279.7	1.277 ± 0.016
90	0.992 ± 0.014	29.3	266.8	1.123 ± 0.015
80	0.984 ± 0.014	27.8	248.3	0.951 ± 0.014
70	0.987 ± 0.014	26.7	234.6	0.827 ± 0.013
60	0.985 ± 0.014	25.4	218.3	0.600 ± 0.011
50	0.979 ± 0.014	23.3	195.2	0.484 ± 0.010
40	0.970 ± 0.013	21.8	177.8	0.330 ± 0.008
30	0.950 ± 0.013	18.8	145.6	0.173 ± 0.006
20	0.927 ± 0.013	16.1	119.2	0.095 ± 0.004

5.6 実機の IIT でのテスト

IIT には個体差があるため、実機の 24 台全てで、前章と同様の LED テストをしなければならない。しかし、これは時間的に非常に難しい。そのため、検出効率の悪い何本かの IIT で MCP ゲート幅と検出効率の関係を調べ、MCP ゲート幅をどこまで短くするのかを決める。次に、その MCP ゲート幅と今までの $100\mu\text{s}$ の幅で全ての IIT についてのデータを取る。解析方法は、予備 IIT で行なった方法と全く同じである。なお、テストは 6p.e., 8p.e. 相当の光で行う。

まず、6p.e. 相当の光を入射した場合の MCP ゲート幅と検出効率の関係は、宇宙線テストにより、以前より検出効率が悪くなったことが分かっていた IIT1、3、5、6 で調べる (24 台の IIT にはそれぞれ番号がついており、IIT1 から IIT24 までである)。図 34、35、36、37、はこの 4 本の IIT の MCP ゲート幅と検出効率の関係である。図 34、図 35 より、IIT1、IIT3 は MCP ゲートの幅を短くしても検出効率は MCP ゲート幅 $100\mu\text{s}$ の時と比べて大きな変化はない。しかし、図 36 を見ると、MCP ゲート幅が $60\mu\text{s}$ より短くなる辺りから検出効率が下がり始めている。また、図 37 を見ると、ゲート幅が $50\mu\text{s}$ になった時、検出効率が下がりだしている。

以上の 4 本の IIT の測定結果より、MCP ゲート幅が $60\mu\text{s}$ なら検出効率の減少が $100\mu\text{s}$ の時と比較して少ないであろうと判断し、その値に固定し、LED テストを行なった。

IIT24 台の LED テストの測定結果より、MCP ゲートの幅と検出効率、クラスターサイズ、ADC 和の値、ノイズ数の関係を次ページ以降に示す。

まず、検出効率を考える。図 38 は MCP ゲート幅と検出効率の関係である。MCP ゲート幅を $100\mu\text{s}$ から $60\mu\text{s}$ に短くした時の検出効率は、IIT ごとに差はあるが、平均値は 98.2% から 97.9% になった。特に IIT3、7、8、10、12 の検出効率が他の IIT と比べて低くなっており、MCP ゲートを短くすることによる影響も大きく受けている。

次に、8p.e. 相当の光を入射した場合の MCP ゲート幅と検出効率の関係を図 39 に示す。この場合、MCP ゲート幅を $60\mu\text{s}$ にしても $100\mu\text{s}$ のままだと、全ての IIT の検出効率は 100% に近く、個体差もほとんどない (共に検出効率の平均値は 99.5%)。8p.e. 相当の光は MCP ゲート幅を $60\mu\text{s}$ にしても問題なく検出できることが分かった。

次に MCP ゲートを短くすることによる、シグナルのクラスターサイズの平均値及び、ADC 和の値の平均値の変化を調べる。まず、図 40 は 6p.e. 相当の光を入射した場合の MCP ゲート幅とシグナルのクラスターサイズの平均値の関係である。クラスターサイズは全体的に下がっており、MCP ゲート幅を $100\mu\text{s}$ から $60\mu\text{s}$ にすることにより、クラスターサイズは平均で 84% になっている。また、8p.e. 相当の光を入射した場合の同様な関係を図 41 に示す。この場合は MCP ゲートを短くすることによりクラスターサイズは 83% になっている。

次に図 42 は 6p.e. 相当の光を入射した時の MCP ゲート幅とシグナルクラスターの ADC

和の値の平均値の関係である。MCPゲートを $100\mu\text{s}$ から $60\mu\text{s}$ にすることにより、ADC和は平均を考えると68%に減っている。8p.e.相当の光を入射した場合について同様の関係を図43に示す。この場合、MCPゲート幅を短くすることによりADC和は79%に減っている。この結果をまとめて考えると、MCPゲートの幅を短くすることにより、LEDテストの結果と同様に、クラスターサイズよりADC和の方が大きく減少することが分かった。

1画面に含まれるノイズの数について考える。6p.e.相当の光量を入射した場合の、MCPゲート幅とノイズの関係を図44に示す。MCPのゲート幅を $100\mu\text{s}$ から $60\mu\text{s}$ にすることによりノイズの量は2.87から1.69になる。約6割に減っている。また、8p.e.相当の光量を入射した場合のMCPゲート幅と検出効率の関係を図45で示す。MCPゲート幅を $100\mu\text{s}$ から $60\mu\text{s}$ へ短縮すると、IITのノイズの平均は3.09から1.79になる。こちらも同じく約6割に減っている。

実際に使用されているIIT、24台で行なったLEDテストの結果より、8p.e.相当の光を入射した場合は、MCPゲート幅を $100\mu\text{s}$ から $60\mu\text{s}$ へ短くしても検出効率は落ちず、ノイズも6割に減る。6p.e.相当の光を入射した場合は、平均の検出効率は0.3%しか下がらず全く問題のないが、IIT7、8、12が2%下がっている。ノイズの量は8p.e.相当の光量を入射した場合と同じ約6割に減る。

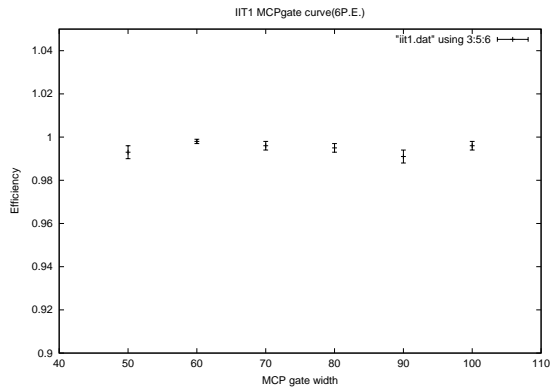


図 34: IIT1 の MCP ゲート幅と検出効率の関係

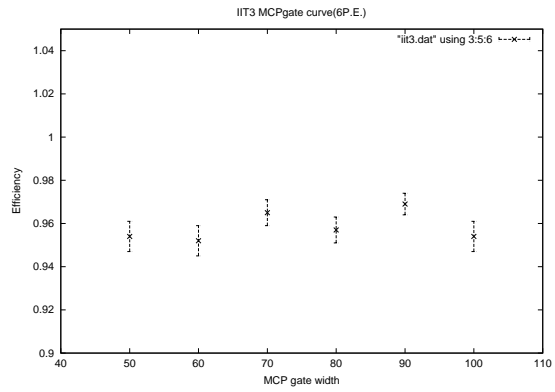


図 35: IIT3 の MCP ゲート幅と検出効率の関係

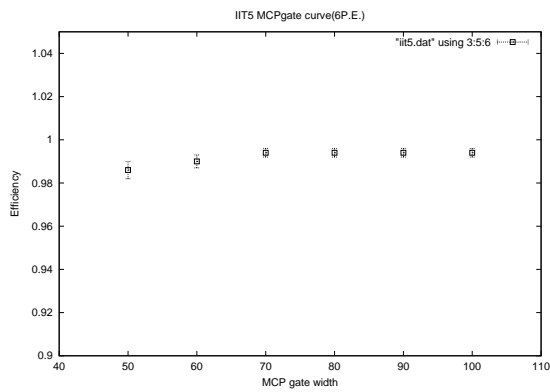


図 36: IIT5 の MCP ゲート幅と検出効率の関係

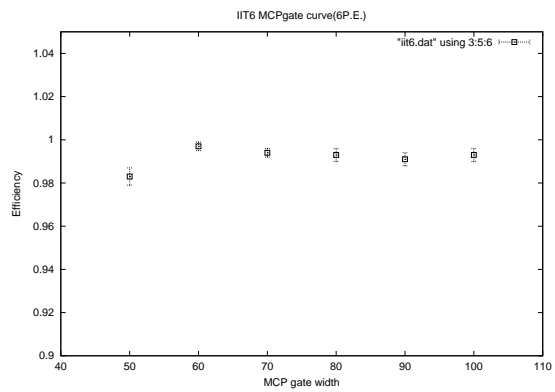


図 37: IIT6 の MCP ゲート幅と検出効率の関係

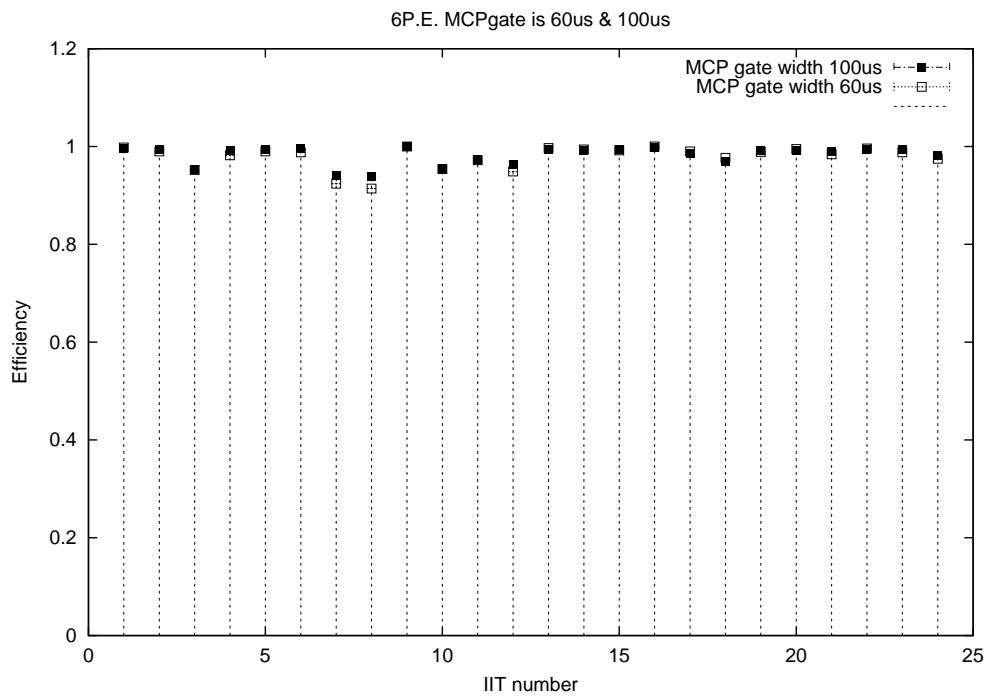


図 38: IIT24 本の検出効率 (6p.e.)

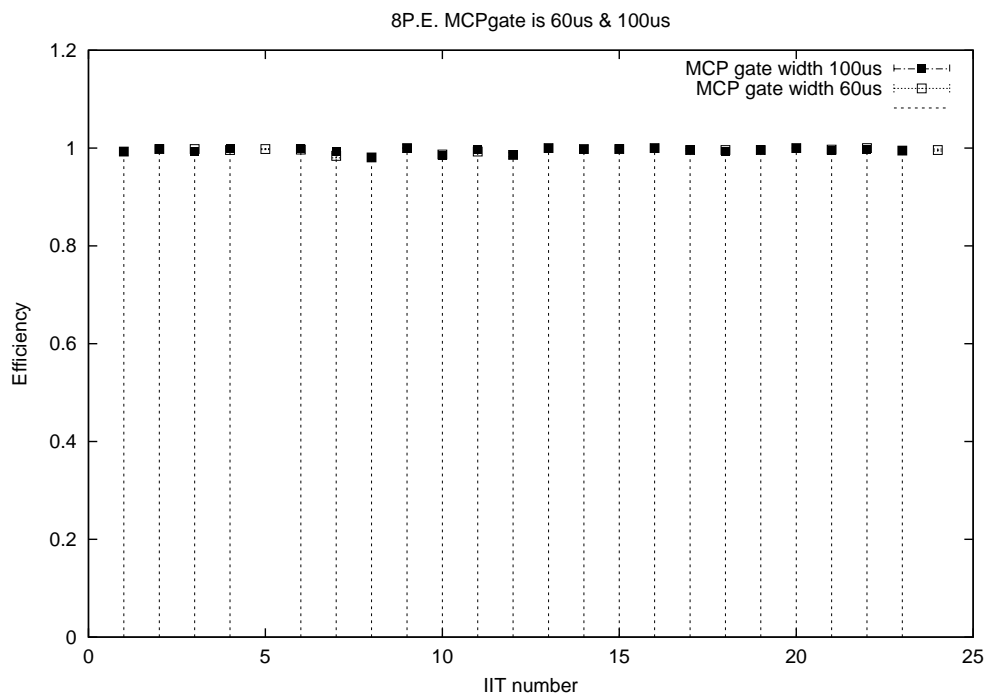


図 39: IIT24 本の検出効率 (8p.e.)。IIT5、24 の MCP ゲート幅 $100\mu\text{s}$ のデータは測定ミスにより使用できない。

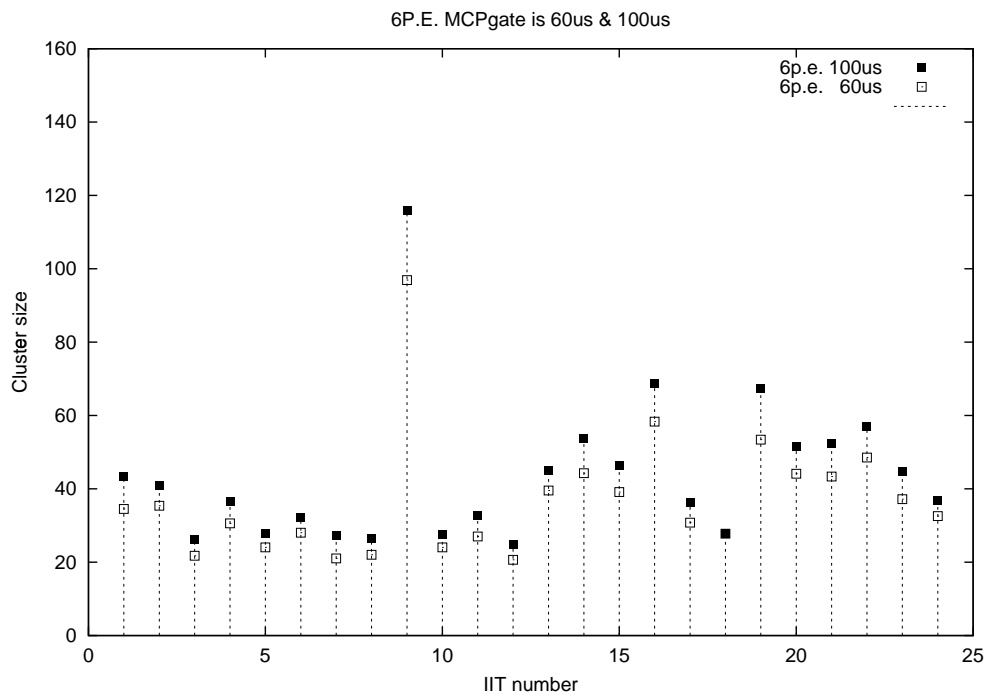


図 40: IIT24本のシグナルのクラスターサイズの平均値 (6p.e.)

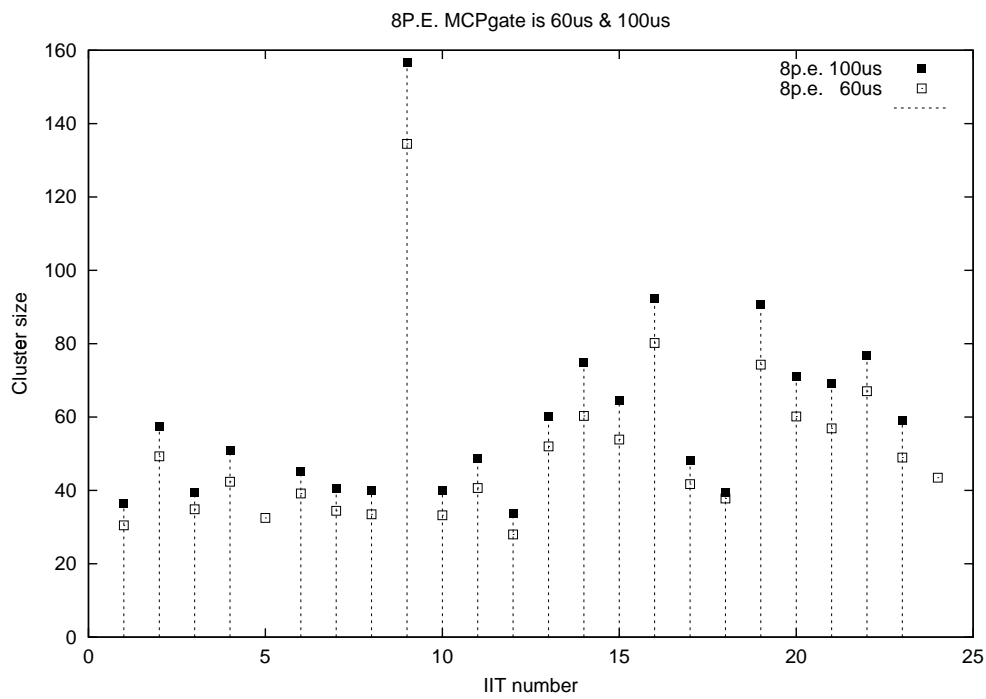


図 41: IIT24本のシグナルのクラスターサイズの平均値 (8p.e.)。IIT5、24のMCPゲート幅100 μ sのデータは測定ミスにより使用できない。

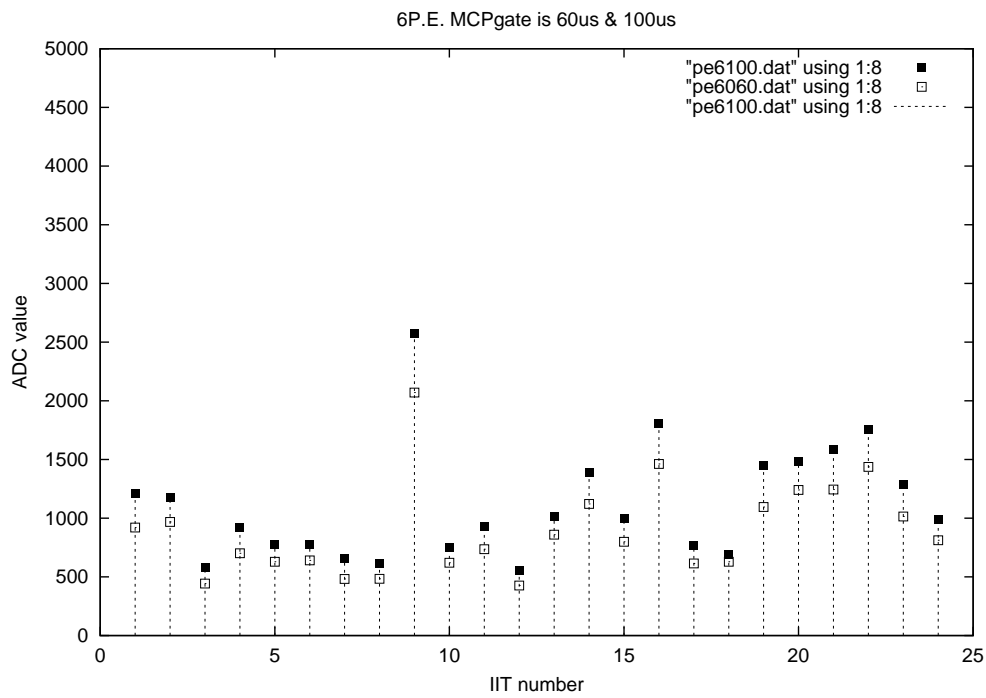


図 42: IIT24 本のシグナルの ADC 和の平均値 (6p.e.)

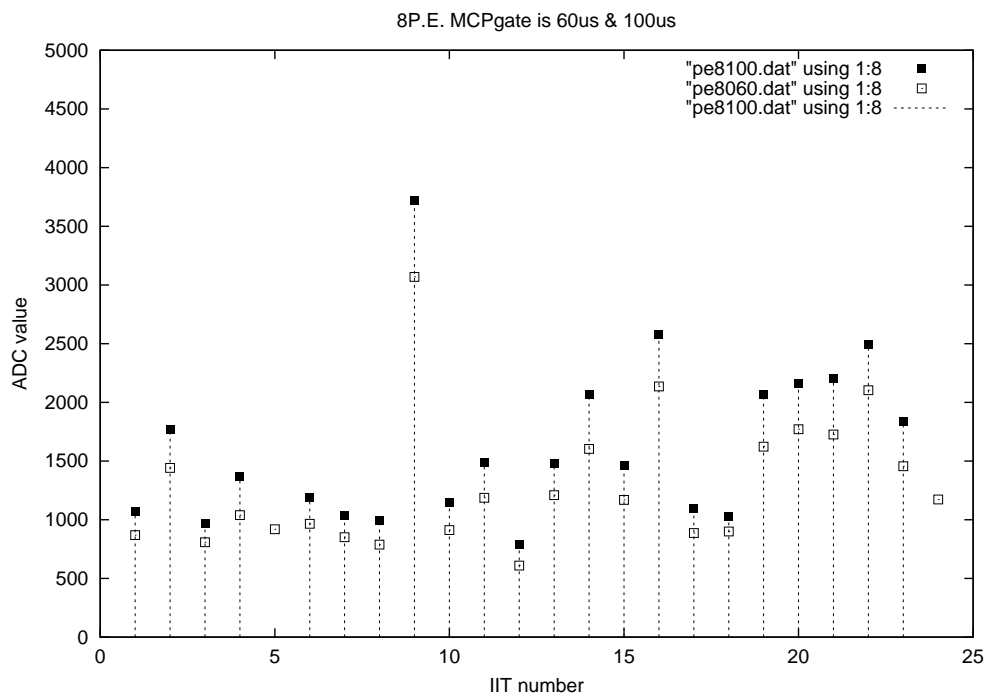


図 43: IIT24 本のシグナルの ADC 和の平均値 (8p.e.)。IIT5、24 の MCP ゲート幅 $100\mu\text{s}$ のデータは測定ミスにより使用できない。

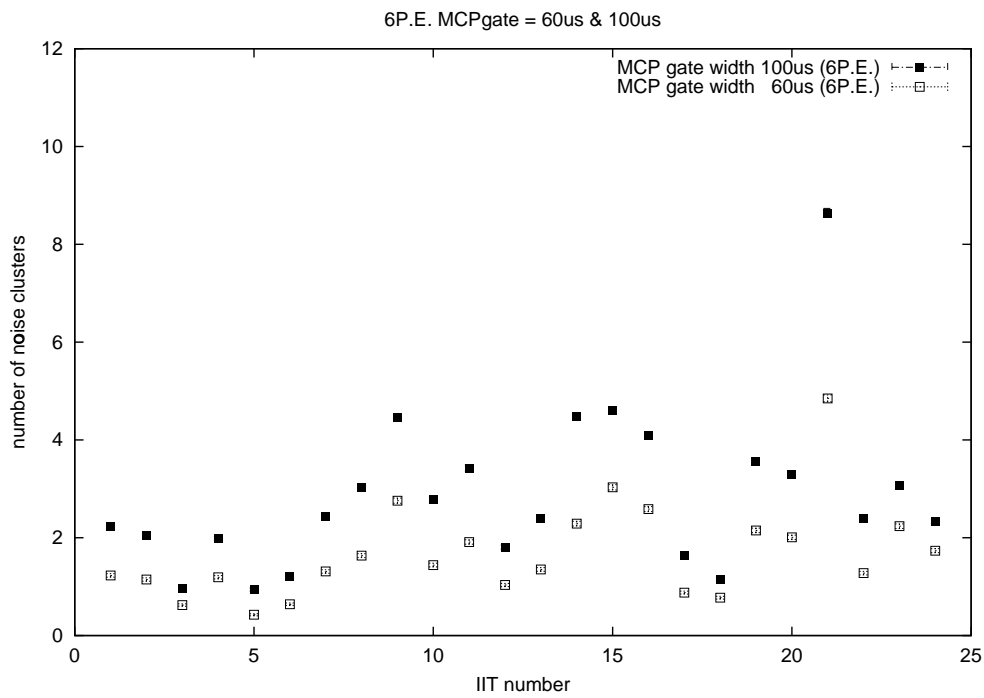


図 44: IIT24本の1画面に含まれるノイズの数(6p.e.)
 IIT21のノイズは他のIITよりも高くなっている。個性のためと考えられるが、検出効率も他のIITと比べて良くないため、閾値を下げるなどの調整はしていない。

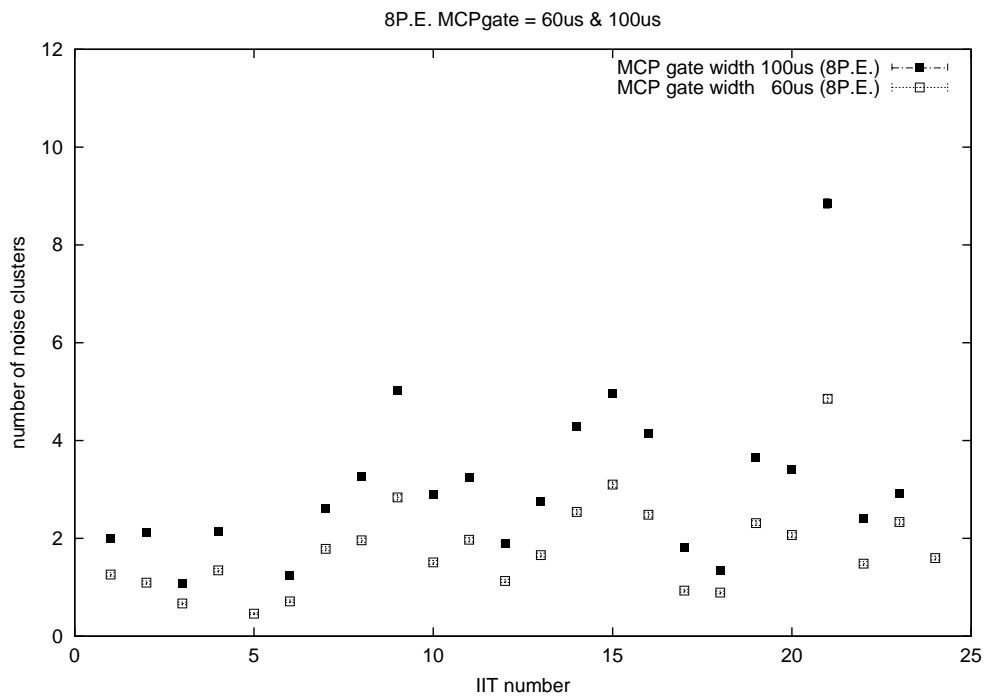


図 45: IIT24本の1画面に含まれるノイズの数(8p.e.)。IIT5、24のMCPゲート幅100 μ sのデータは測定ミスにより使用できない。

表 5: IIT24 本分の検出効率、ピクセルサイズ、ADC 和、及びノイズ。光量 6p.e.、MCP ゲート幅 60 μ s

IIT	efficiency	pixel	ADC	noise
1	0.998	34.5	920.1	1.230
2	0.990	35.4	968.2	1.145
3	0.952	21.7	443.0	0.624
4	0.982	30.5	701.3	1.192
5	0.990	24.0	628.3	0.425
6	0.988	28.0	640.3	0.641
7	0.924	21.0	482.4	1.310
8	0.914	22.0	483.8	1.635
9	1.000	96.9	2070.4	2.758
10	0.954	24.0	619.8	1.441
11	0.972	27.0	735.7	1.912
12	0.949	20.6	425.8	1.033
13	0.997	39.5	859.0	1.351
14	0.994	44.2	1121.3	2.288
15	0.992	39.1	799.3	3.031
16	1.000	58.3	1461.5	2.585
17	0.990	30.7	614.1	0.878
18	0.977	27.7	628.0	0.774
19	0.989	53.4	1094.7	2.150
20	0.995	44.1	1239.9	2.008
21	0.984	43.3	1244.1	4.850
22	0.996	48.5	1436.4	1.276
23	0.988	37.1	1013.8	2.237
24	0.975	32.5	812.4	1.735

表 6: IIT24 本分の検出効率、ピクセルサイズ、ADC 和、及びノイズ。光量 6p.e.、MCP ゲート幅 100 μ s

efficiency	pixel	ADC	noise
0.996	43.2	1213.3	2.228
0.995	40.8	1179.9	2.053
0.954	26.2	581.7	0.963
0.992	36.4	916.3	1.979
0.994	27.9	775.4	0.941
0.996	32.1	774.8	1.210
0.941	27.2	660.5	2.433
0.939	26.4	612.0	3.023
1.000	115.9	2570.8	4.450
0.956	27.5	749.4	2.779
0.974	32.6	932.2	3.423
0.964	24.8	555.4	1.807
0.994	45.1	1014.2	2.387
0.993	53.6	1389.5	4.480
0.994	46.2	997.0	4.612
0.999	68.8	1803.3	4.094
0.985	36.2	769.2	1.635
0.970	27.7	686.5	1.155
0.991	67.4	1451.9	3.551
0.992	51.5	1484.5	3.296
0.990	52.4	1583.9	8.641
0.995	57.0	1754.8	2.391
0.995	44.6	1285.8	3.075
0.982	36.7	987.0	2.335

表 7: IIT24 本分の検出効率、ピクセルサイズ、ADC 和、及びノイズ。光量 8p.e.、MCP ゲート幅 60 μ s

IIT	efficiency	pixel	ADC	noise
1	0.993	30.4	869.3	1.261
2	0.998	49.3	1441.6	1.095
3	0.998	34.8	808.3	0.669
4	0.996	42.3	1038.7	1.347
5	0.998	32.4	919.0	0.460
6	0.997	39.1	965.7	0.712
7	0.984	34.4	851.5	1.787
8	0.981	33.4	787.5	1.960
9	1.000	134.4	3069.2	2.837
10	0.987	33.2	912.1	1.509
11	0.993	40.6	1186.9	1.971
12	0.986	27.9	610.0	1.130
13	1.000	51.9	1209.1	1.657
14	0.998	60.3	1603.7	2.540
15	0.998	53.8	1169.5	3.099
16	1.000	80.1	2136.1	2.484
17	0.996	41.7	886.4	0.930
18	0.996	37.7	899.8	0.892
19	0.996	74.2	1622.1	2.311
20	1.000	60.1	1771.9	2.069
21	0.997	56.9	1725.9	4.855
22	1.000	67.0	2103.1	1.484
23	0.995	48.9	1456.2	2.334
24	0.996	43.4	1172.2	1.596

表 8: IIT24 本分の検出効率、ピクセルサイズ、ADC 和、及びノイズ。光量 8p.e.、MCP ゲート幅 100 μ s

efficiency	pixel	ADC	noise
0.994	36.4	1069.8	2.002
1.000	57.3	1765.6	2.126
0.994	39.3	969.3	1.079
0.999	50.8	1372.2	2.147
1.000	45.1	1186.8	1.239
0.992	40.4	1039.1	2.621
0.981	40.0	996.6	3.261
1.000	156.6	3718.2	5.021
0.985	39.9	1147.0	2.894
0.997	48.6	1490.6	3.235
0.987	33.6	790.7	1.889
0.999	60.1	1478.5	2.748
0.998	74.9	2062.9	4.291
1.000	64.4	1464.9	4.958
1.000	92.3	2575.9	4.137
0.997	48.1	1094.4	1.814
0.994	39.4	1030.8	1.351
0.998	90.6	2066.9	3.650
1.000	70.9	2164.4	3.417
0.995	69.2	2202.5	8.849
0.998	76.6	2489.3	2.404
0.996	58.9	1834.9	2.910

5.7 宇宙線テスト

実際の実験で MCP ゲート幅を短くした状態を使用するためには、実機による宇宙線テストを行ない検出効率への影響を調べなければならない。MCP ゲート幅を $100\mu\text{s}$ から $60\mu\text{s}$ へ短くし、宇宙線が SciFi トラッカーを 15 層以上通過した場合のイベントを選びだし、飛跡をトラッキングした上でヒットの検出効率、及び、ノイズ数を評価する。

解析方法は、まず、LED テストの場合と同様に CCD に取り込まれたヒットをクラスタリングする。クラスタサイズは 2 ピクセル以上要求する。次に、そのクラスタがどのファイバーから伝わってきた光によるものなのかを調べる [8, 9]。ファイバーの位置に 1 クラスタ以上あるものをヒットファイバーと呼ぶ。次に、ヒットファイバーとその隣の層にあるヒットファイバーを線分で結ぶ。その直線上から 2 度以内に他の線分があればつなぎ合わせる (この作業をトラッキングと呼ぶ)。これを繰り返し、トラックを作る。SciFi シートを 15 層以上通過したイベントを使用する。

飛跡上にあるヒットの数 (層の数) をその飛跡から期待されるヒットの数で割ったものをヒットの検出効率とする。また、飛跡上以外のヒットの数を、飛跡により期待されるヒットの数で割ったものをノイズ混入率とする。

$$\text{検出効率} = \frac{\text{飛跡上で観測されたヒットの数}}{\text{飛跡により期待されるヒットの数}} \quad (17)$$

$$\text{ノイズ混入率} = \frac{\text{飛跡上にないヒットの数}}{\text{飛跡により期待されるヒットの数}} \quad (18)$$

実機を使用した宇宙線テストの結果より、MCP ゲートを $100\mu\text{s}$ から $60\mu\text{s}$ へ短くした場合の、IIT ごとの検出効率を図 46 に示す。MCP ゲート幅が $100\mu\text{s}$ の場合の検出効率は $96.6 \pm 0.1\%$ であるが、 $60\mu\text{s}$ の場合では $95.6 \pm 0.1\%$ である。平均で考えると、検出効率は約 1% の減少であるが、IIT5,6, では 3% IIT18 では 4% も検出効率が減少している。

一方、ノイズ混入率は図 47 に示す通りである。MCP ゲートを短くすることにより、ノイズ混入率の平均は 1.92% から 1.41% に減り、73% になった。

IIT の輝度情報は、FADC (Flash ADC) を通して読み込まれているが、それには閾値を設定する機能がある (図 26 参照)。閾値を調節することにより、検出効率を調整することができる。そこで、検出効率の低い IIT の閾値を下げ、検出効率の高い IIT の閾値を上げる調整をした上で、同様に MCP ゲート幅 $60\mu\text{s}$ でテストした。その結果、ノイズ混入率は 1.19%、検出効率は $95.0 \pm 0.1\%$ になった。つまり、検出効率は 1.6% 落ちたが、ノイズ混入率は 62% に減少した。

宇宙線テストから実機を使用した場合でも、MCP ゲート幅を短くすることは有効な手段であるということが分かった。今後、MCP ゲート幅 $60\mu\text{s}$ ~ $100\mu\text{s}$ の間で更に詳しい宇宙線テストが必要である。

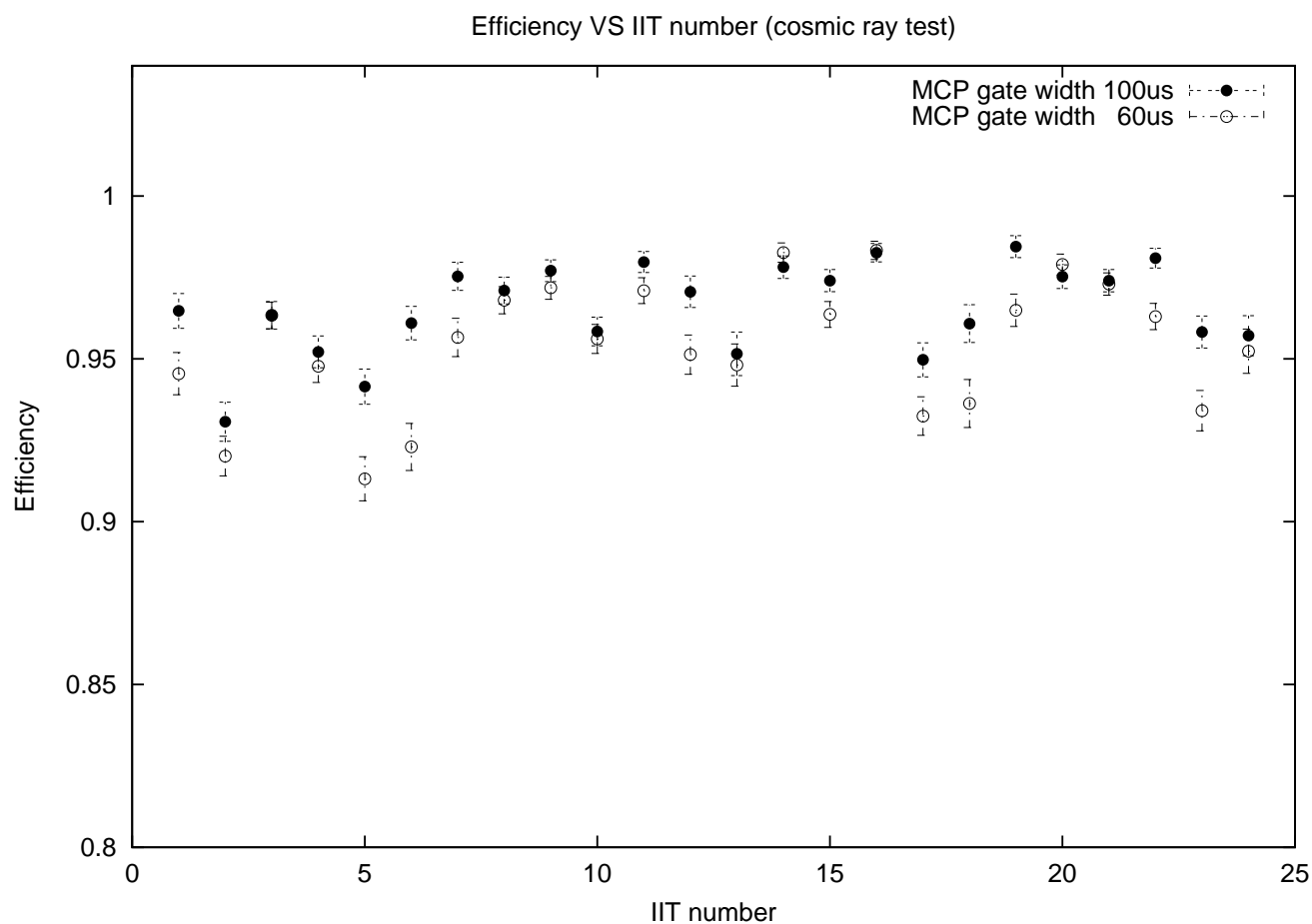


図 46: 実機を使用し宇宙線テストより求めた IIT ごとのヒット検出効率。横軸は IIT 番号、縦軸は検出効率である。黒印が MCP ゲート幅 $100\mu\text{s}$ 、白印が $60\mu\text{s}$ である。検出効率の平均値は MCP ゲートを短くすることにより、96.6%から 95.6%へ下がった。

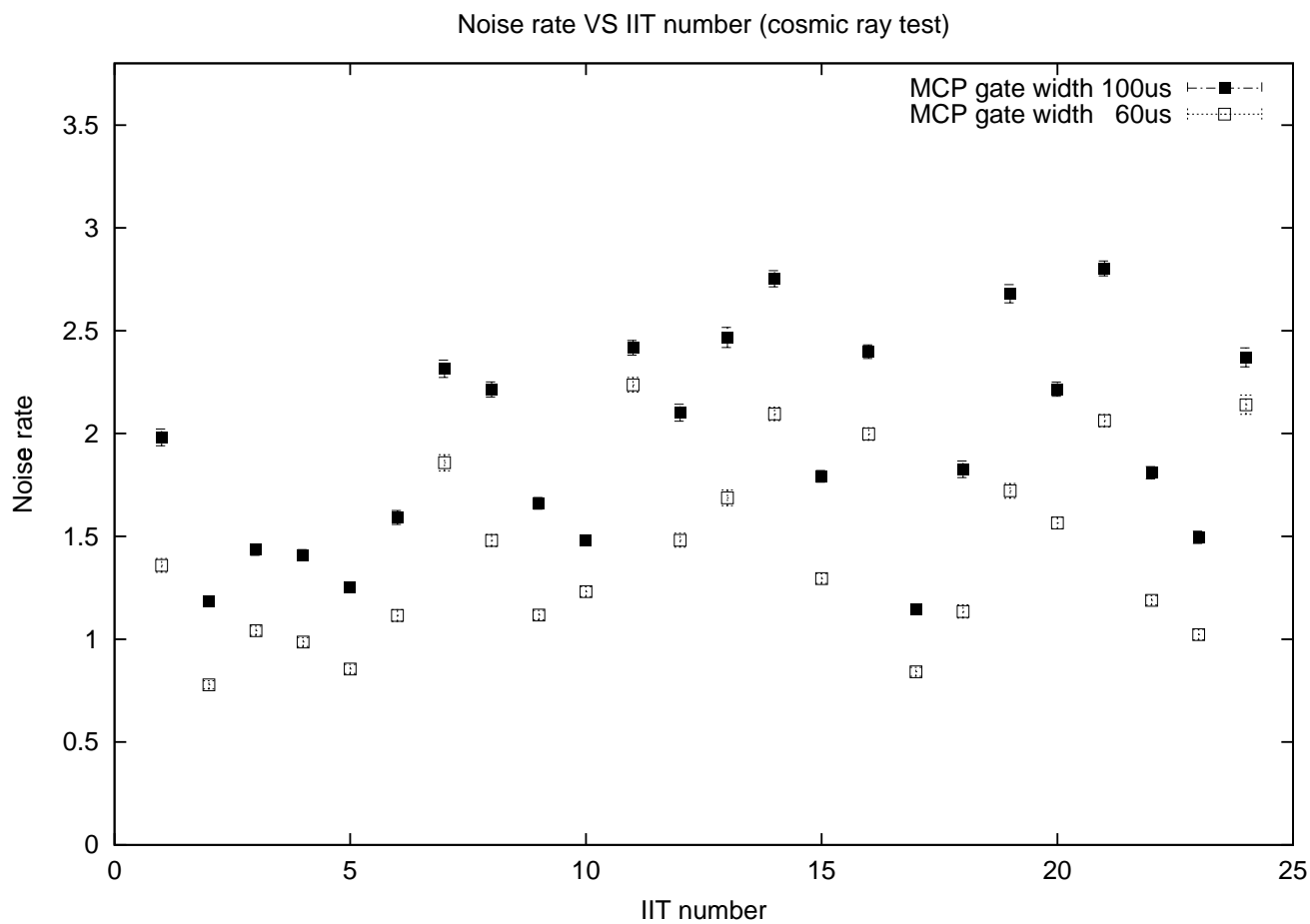


図 47: 実機を使用し宇宙線テストより求めた IIT ごとのノイズ混入率。横軸は IIT 番号、縦軸はノイズ混入率である。黒印が MCP ゲート幅 $100\mu\text{s}$ 、白印が $60\mu\text{s}$ である。ノイズ混入率の平均値は MCP ゲートを短くすることにより、1.92%から 1.41%へ下がっており、73%に減少している。

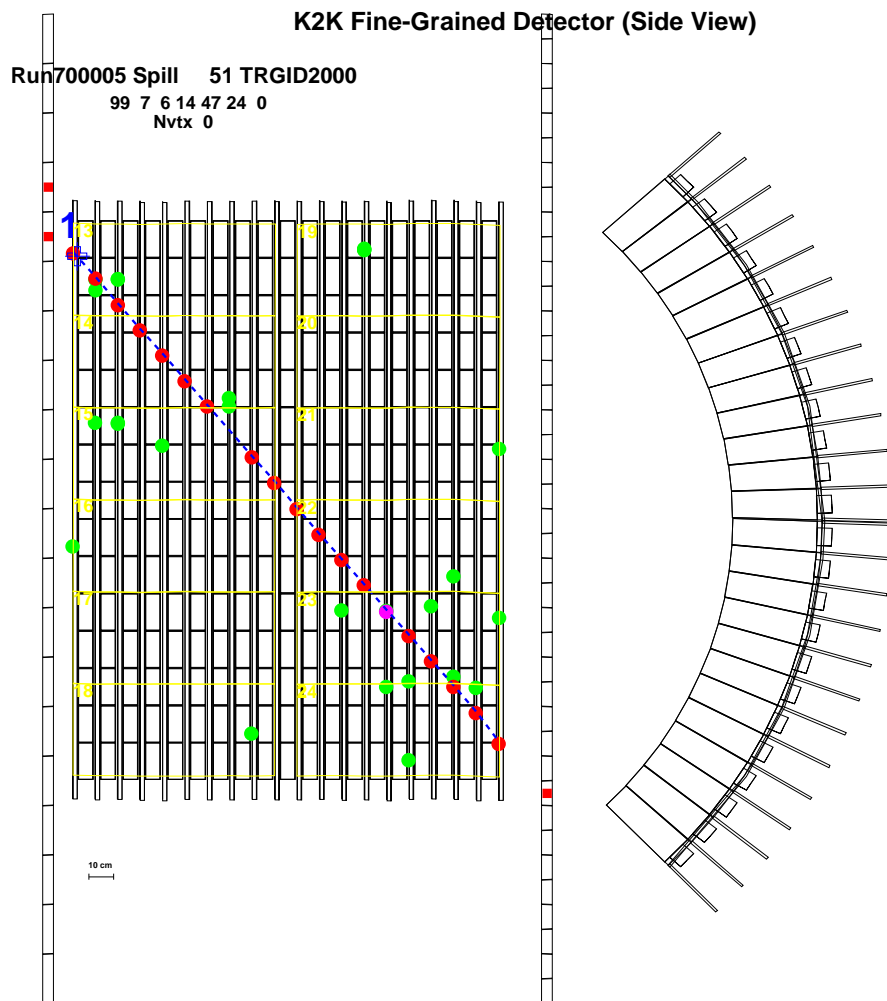


図 48: 宇宙線の μ 粒子貫通イベントの例。

6 初段ゲートの性能評価

6.1 目的

前章で述べた通り、現在の IIT には MCP にゲートに機能があるが、初段 IIT の蛍光面の発光には時間幅があるため、 $60\mu\text{s}$ 以下での使用は難しい。しかし、このゲート幅はビーム照射の幅 $1\mu\text{s}$ に比べてまだ長い。

このほど、浜松ホトニクスにより静電型 IIT にゲート機能を持たせるための電源が開発された (以後このゲートのことを初段ゲートと呼ぶ)。これを使用すれば IIT の再上流でゲートの開閉が可能となり、光が入射する時間の幅のみのゲートをかけることが可能である。ビーム照射の幅 $1\mu\text{s}$ に合わせ、ゲートを $1\mu\text{s}$ 開放することが可能ならば大幅にノイズを減らすことができる。

本研究では、K2K 実験で使用している IIT において初段ゲートを使用した場合の性能評価を LED テスト、ビームテストを通して行ない、本実験への導入の可能性を検討する。

6.2 LED テスト

LED テストにより以下の測定を行なう。

- 初段ゲートの開閉に要する時間の確認
- 初段ゲートに対しての LED の発光タイミングと検出効率・ノイズの関係
- 初段ゲート幅とノイズの関係。また初段ゲートを使用しない場合との比較

実験のセットアップ、及び、解析方法は 5.4 節の LED テストの場合と同じである。ただし、初段 IIT にはゲート機能用の専用の電源を新たに取り付け、そこにゲートをかけたタイミングにゲート幅と同じ幅のトリガー信号を送る (信号は TTL レベルを使用)。初段ゲートの開放タイミングは MCP ゲートの開放と同時であり、MCP ゲートの幅は現在の実機と同じ $100\mu\text{s}$ に固定する。6.3 節を除き初段ゲートの電源ケーブルの長さは 5m である。

浜松ホトニクスのテストにより、初段ゲートの立ち上がりには約 500ns かかることが分かっている (電源から初段 IIT 迄の電源ケーブルの長さが 5m の場合)。LED テストではまず初段ゲートの開閉に要する時間を、6p.e. 相当の光を入射し検出効率を調べることにより求める。一方、実機で使用している初段 IIT へのケーブルの長さは 15m である。その場合のゲート開閉に要する時間も調べる。

次に、初段ゲートに対して LED の発光タイミングを変化させた場合のクラスターサイズ、輝度 (ADC) 和及びノイズ数を測定し、それらがどう変化するかを調べる。

最後に初段ゲートの幅とノイズ数の関係を調べる。

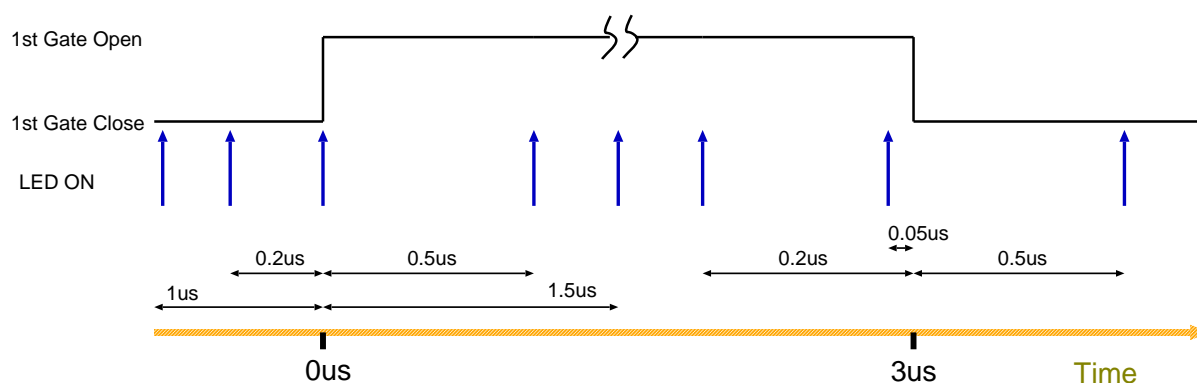


図 49: 初段ゲートに対してLEDを光らせるタイミングの図。LEDを光らせるタイミングは、左から、初段ゲートの開放0.2µs前 ($t=-0.2\mu\text{s}$)、開放時 ($t=0$)、開放0.5µs後 ($t=0.5\mu\text{s}$)、ゲート中心時 ($t=1.5\mu\text{s}$)、閉鎖0.2µs前 ($t=2.8\mu\text{s}$)、閉鎖0.05µs前 ($t=2.95\mu\text{s}$)、閉鎖0.5µs後 ($t=3.5\mu\text{s}$)である。

6.3 ゲートの開閉に要する時間の測定結果

ゲートの開閉に要する時間は、初段ゲートに対しLEDを光らせるタイミングをずらし、検出効率の変化をみることにより調べる。LEDを光らせるタイミングは図49の通りである。このときの初段ゲートの幅は3µsである。

初段用IITの電源ケーブルの長さが5mの場合の測定結果を図50に示す。初段ゲートの開放と同時にLEDを発光させた場合では、検出効率は80%にも満たないが、500ns以降では約95%と安定して得られている。この時の検出効率の値は、初段ゲートを使用していない場合の検出効率95.0%と同等である。また、初段ゲート閉鎖500ns後にLEDを光らせた場合では、シグナルは検出されていない。これらのことから、初段ゲートの完全な開閉には500nsあれば十分であるといえる。これは浜松ホトニクスによる測定結果と一致している。

シグナルのクラスターサイズ及び、ADC和の値の関係を図52に示す。ゲートを開放している時 ($t=0.5, 1.5, 2.8, 2.95[\mu\text{s}]$) にLEDを発光させた場合のシグナルのクラスターサイズ及び、ADC和の平均は、それぞれ20.8、188.3であり、初段ゲートを使用せず、MCPゲート100µsのみの場合の値、20.3、185.4と比較しても全く下がっていないことが分かる。つまり、初段ゲートを導入したとしても、クラスターサイズ、及びADC和は変化しないと言える。

初段ゲートに対し、LEDを光らせるタイミングをずらした場合の1画面当たりのノイズ数を図53に示す。ゲート開放時、及び閉鎖時のノイズ数は、ほぼ一定である。ところ

が、初段ゲートを開くと同時に LED を発光させた場合では、ノイズが極端に増えていることが分かる。これは、初段ゲートが開放する時に、静電型 IIT 内の電場構造が大きく変化するため、CCD 画像上に映る像も歪んでしまうためである。そのため、本来シグナル領域に入るべきヒット信号がノイズ領域で捉えられ、ノイズ数が増加すると考えられる。

このテストで使用している初段 IIT への電源ケーブルの長さは 5m だが、実機の場合は 15m である。そこで、同様のテストを電源ケーブルの長さが 15m の IIT で行なった。ゲート開閉時の検出効率をより詳しく調べるためにその前後を重点的に測定した。測定結果を図 51 に示す。図より、初段ゲートが完全に開放するまでの時間は約 $1.5\mu\text{s}$ であり、また完全に閉鎖するまでの時間は $1\mu\text{s}$ である。この値は 5m の電源ケーブルの場合と比べ、長くなっている。従って、実機で初段ゲートを使用する場合は、ゲートの開放時間 $1.5\mu\text{s}$ とビームの照射時間 $1\mu\text{s}$ を合わせ最低でも $2.5\mu\text{s}$ 必要である。

6.4 ゲート幅とノイズの関係

最後に初段ゲートの幅とノイズ数の関係を調べる。6.3 節の結果より、実機の IIT でこの初段ゲートを使用する場合は最短で $2.5\mu\text{s}$ 必要である。ここではそれより長めの、 $3\mu\text{s}$, $5\mu\text{s}$, $10\mu\text{s}$ のゲート幅でノイズとの関係を調べた。また、検出効率、クラスターサイズ、ADC 和についても調べておく。

図 54 は初段ゲートの幅と検出効率の関係である。LED の発光タイミングは初段ゲート立ち上がり $1.5\mu\text{s}$ 後である。初段ゲートの幅が $3\mu\text{s}$ 、 $5\mu\text{s}$ 、 $10\mu\text{s}$ といずれの場合でも検出効率は全て 96% と一定であり、これは初段ゲートを使用しない場合の検出効率 (95%) とほぼ等しい。また、図 55 は初段ゲートの幅と、シグナルクラスターのサイズ及び、ADC 和の関係である。これからも初段のゲート幅によらずシグナルのクラスターサイズ、ADC 和は (初段ゲート幅 $3, 5, 10\mu\text{s}$ に対し、ピクセルサイズ 20, 21, 21、ADC 和 185, 188, 189) 一定であることが分かる。従って、実機においても初段ゲートの幅を短くさせることによる検出効率の減少はないと言える。

初段ゲート幅とノイズ数の関係を図 56 に示す。初段ゲートの幅とノイズ数は比例していることが分かる。光を入射せず (0p.e.)、初段ゲートの幅 $3\mu\text{s}$ の場合のノイズ数は 0.15 であり、この値は初段ゲートを使用しなかった場合のノイズ数 1.02 の 15% になっている。しかし、初段ゲート幅 $10\mu\text{s}$ の場合のノイズ数は 2.21 と初段ゲートを使用しなかった場合の約 220% にあたる。つまり初段ゲートの幅と MCP ゲートの幅には比例関係はないといえる。この原因は、初段ゲートをかけることにより、初段 IIT 内で何らかのノイズが発生している可能性が考えられる。例えば、初段ゲートをかける時の初段 IIT 内での急激な電場の変化の影響で新たなノイズが発生していることが考えられる。詳しい原因は現在調査中である。

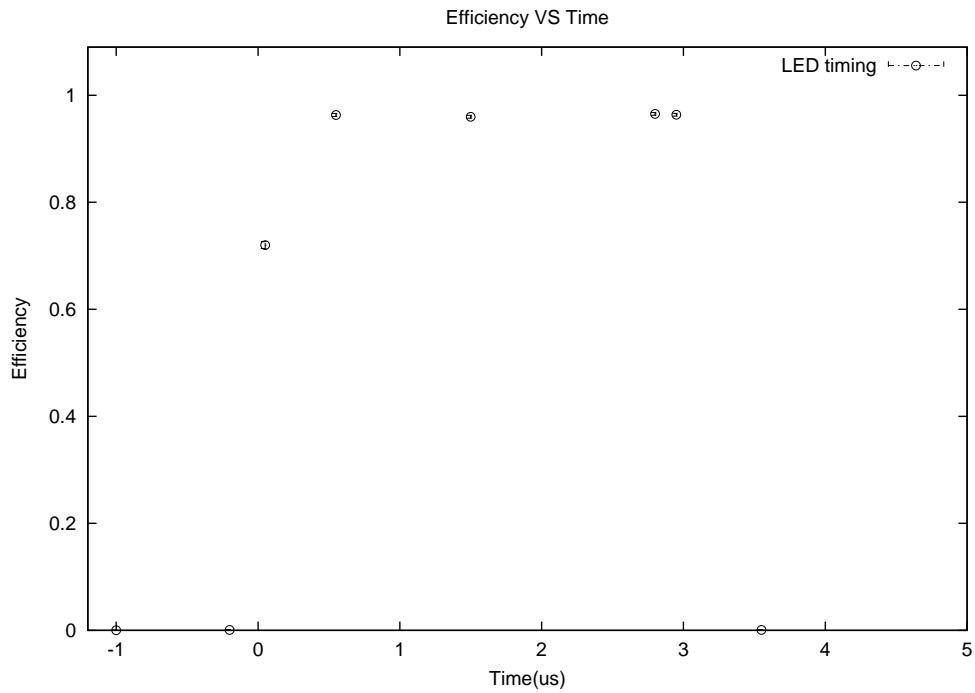


図 50: 初段ゲートの開閉に要する時間の測定。横軸は初段ゲートが開くときを 0 とした場合の LED の発光のタイミング、縦軸は検出効率である。初段ゲート ($3\mu\text{s}$) に対して図 49 のタイミングで LED を発光させたときのシグナルの検出効率を求めた。ゲート開放 $0.5\mu\text{s}$ 後の検出効率は 95% あり、その後も安定している。また、ゲート閉鎖 $0.5\mu\text{s}$ 後にはシグナルは検出されない。従って、ゲートの開閉には $0.5\mu\text{s}$ あれば十分であるといえる。

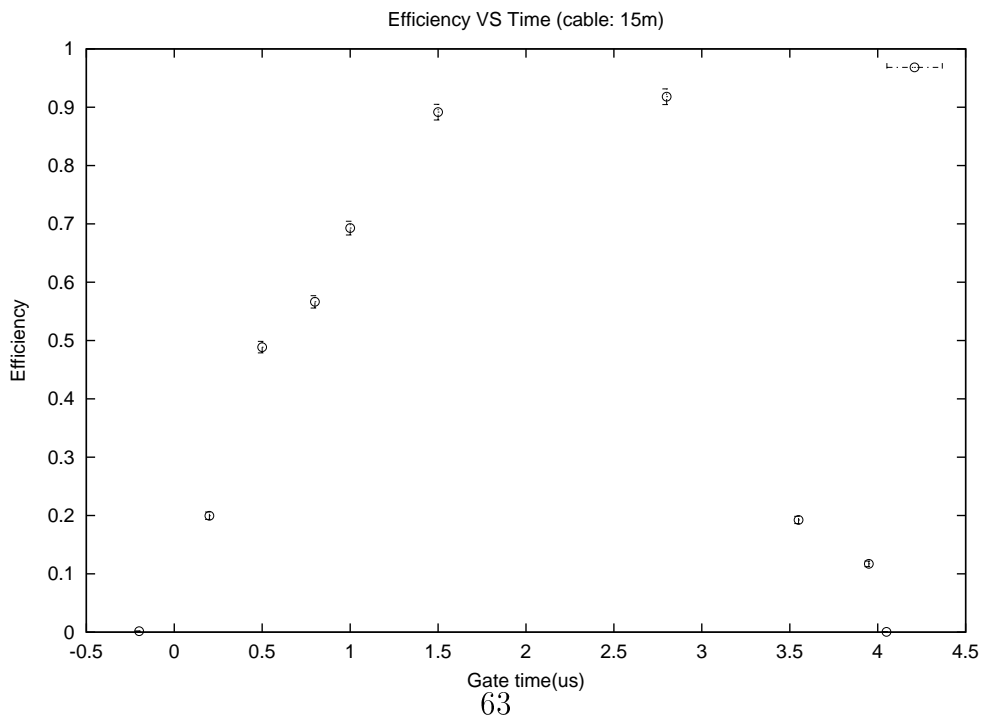


図 51: 初段ゲートの開閉に要する時間の測定。横軸は初段ゲートが開く時を 0 とした場合の LED を発光させるタイミング、縦軸は検出効率である。ゲート開放後検出効率が落ち着くまで $1.5\mu\text{s}$ かかっており、また、完全に閉鎖するまでの時間は $1\mu\text{s}$ である。電源ケーブルの長さが 5m の場合と比べ、ゲートの開閉に要する時間は長くなっている。

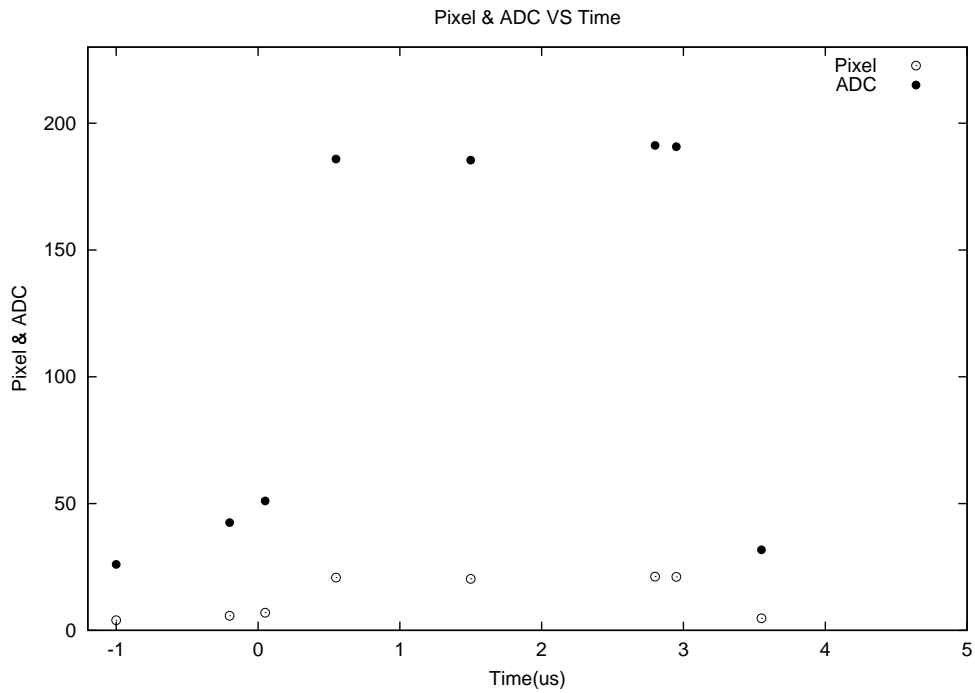


図 52: 初段ゲートに対しての LED の発光のタイミングとシグナルクラスターサイズ及び ADC 和の関係。横軸は初段ゲートが開く時間を 0 とした時の LED の発光時間、縦軸は、クラスターサイズおよび ADC 和の平均値。初段ゲートが完全に開いている時のクラスターサイズ及び ADC 和は初段ゲートを使用しない場合のシグナルと同等である。また、ゲートが閉鎖されている時のクラスターサイズ及び、ADC 和はノイズのそれと同等である。初段ゲートが正しく機能していることが分かる。

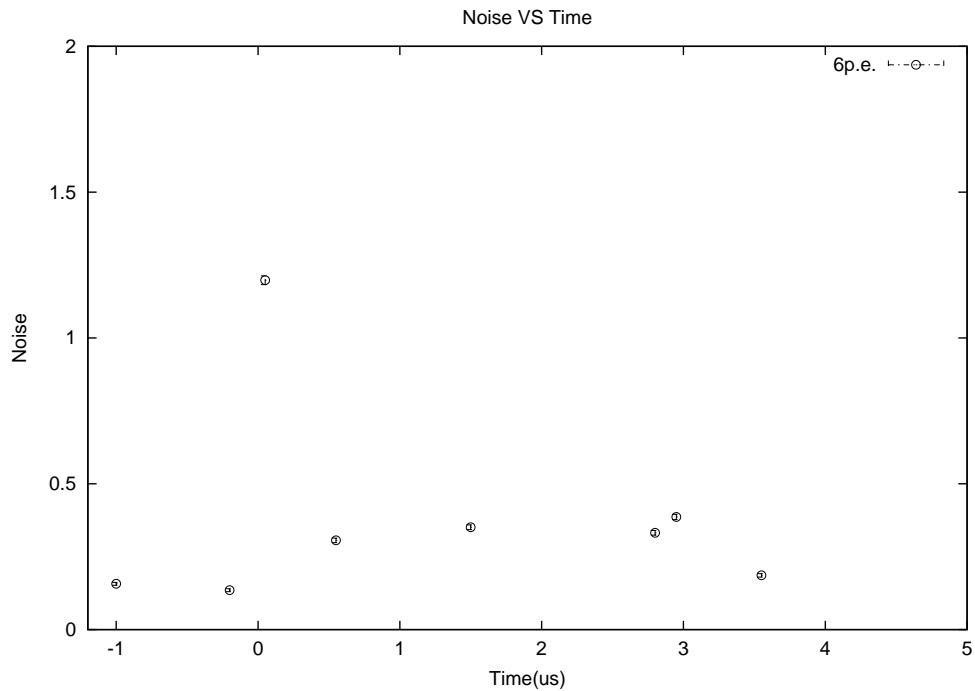


図 53: 初段ゲートに対しての LED の発光タイミングとノイズ数の変化。横軸は初段ゲートが開く時間を 0 とした時の LED の発光時間、縦軸は 1 画面当たりの平均ノイズ数。ゲート開放時のノイズ数の増加は、ゲートをかける際の初段 IIT 内部の電場の変化により生じたものと考えられる。

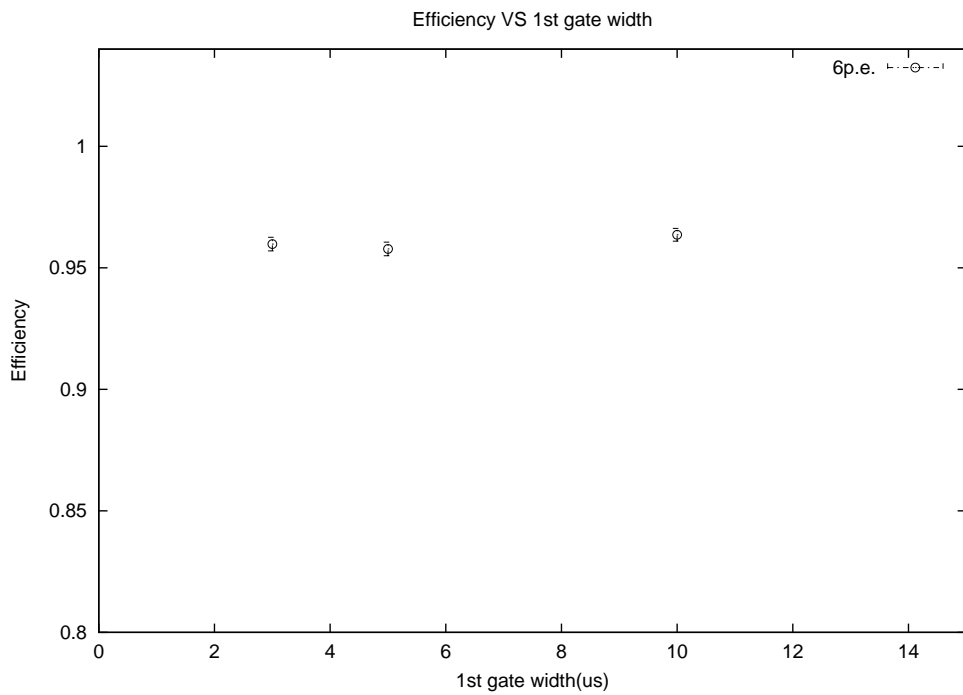


図 54: 初段ゲートの幅と検出効率の関係
横軸が初段ゲート、縦軸が検出効率である。ゲート幅を $3\mu\text{s}$ まで短くしても検出効率に変化はない。

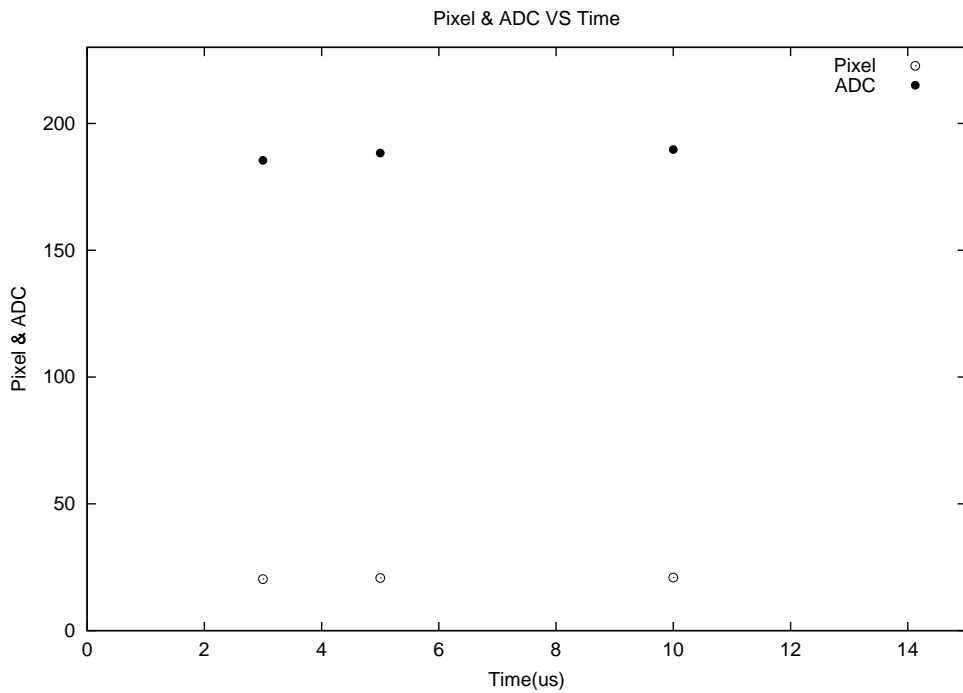


図 55: 初段ゲートの幅とシグナルクラスターのクラスターサイズ及び ADC 和の関係
初段ゲートの幅が変わっても、シグナルクラスターのクラスターサイズ及び ADC 和は一定であることが分かる。

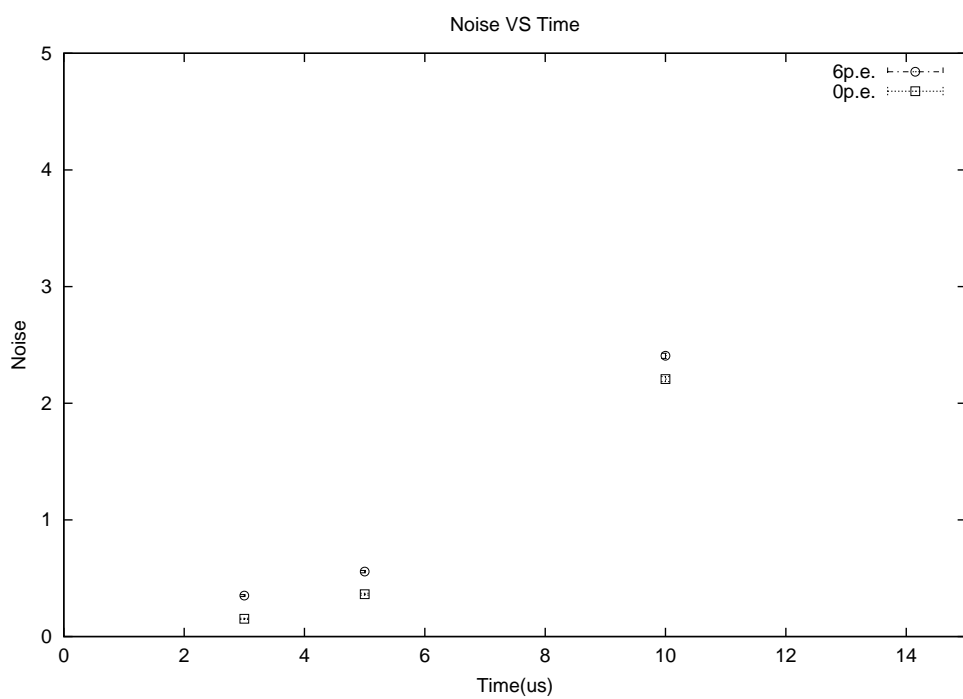


図 56: 初段ゲートの幅とノイズの関係
 横軸が初段ゲート、縦軸がノイズの数である。ゲート幅を短くするにつれ、ノイズも減っている。

表 9: 初段ゲート幅と検出効率、シグナルのクラスターサイズ、ADC 和、ノイズの関係。6p.e. 相当の光量を入射した場合。

1st gate(μs)	Efficiency	Pixel	ADC	Noise
3	0.959 ± 0.013	20.3	185.4	0.351 ± 0.008
5	0.957 ± 0.013	20.7	188.3	0.557 ± 0.011
10	0.963 ± 0.013	20.9	189.6	2.407 ± 0.022

表 10: 初段ゲート幅と検出効率、シグナルのクラスターサイズ、ADC 和、ノイズの関係。光量を入射しない場合。

1st gate(μs)	Efficiency	Pixel	ADC	Noise
3	0.000 ± 0.000	4.00	23.0	0.152 ± 0.006
5	0.000 ± 0.000	4.50	29.2	0.363 ± 0.009
10	0.004 ± 0.000	5.86	49.7	2.207 ± 0.021

表 11: 初段ゲートを使用しない場合。MCP ゲート幅は $100\mu s$ であり、6p.e. 相当の光を入射していた場合。

MCP gate(μs)	Efficiency	Pixel	ADC	Noise
100	0.950 ± 0.013	19.4	168.6	1.021 ± 0.014

表 12: 初段ゲートを使用しない場合。MCP ゲート幅は $100\mu s$ であり、光を入射しない場合。

MCP gate(μs)	Efficiency	Pixel	ADC	Noise
100	0.001 ± 0.000	4.3	27.5	1.023 ± 0.014

6.5 ビームテスト

この節では、粒子の飛跡(以後トラック)の数を調べることににより初段ゲート幅とノイズの関係を調べる。粒子のトラックを数えることにより、ノイズヒットに影響されず、ゲート時間のみに依存したノイズの評価ができる。

6.5.1 準備

IITで粒子のトラックを見るために、SciFiを束ねてブロック状にしたものを準備する。まず2層に俵積みにしたSciFi(KURARAY : SCSF-78M)シートを準備し、幅5cmの大きさに切る。次にそれをファイバーの方向に対して15cmの長さに切り、5cm×15cmのSciFiシートにする。これを8枚重ね接着する。これを全部で4つ作り、最後にその4つを重ねる。図57が完成図であり、これをファイバーバンドルと呼ぶ。これは、ビームの通過によるトラックの本数を調べるためのものである。このファイバーバンドルの全体を光らせた場合の断面図は図58であり、SciFiシートを8層重ねた部分を4つ確認できる。この面をIITに取り付ける。

ビーム軸に対し、このファイバーバンドルの上流側と下流側に図59のような位置関係でシンチレータを置く。両方のシンチレータを通過した粒子は、必ずファイバーバンドルを通過する位置関係になっている。この2つのシンチレータには光電子増倍管が取り付けられており、それらから同時に信号が来た場合、コインシデンス信号を出力する(このことをコインシデンスをとると定義する)。コインシデンス信号があればファイバーバンドルに粒子が通過したといえる。また、初段ゲートが開いている間、もしくは初段ゲートを使用しない場合ではMCPゲートが開いている間のコインシデンス信号の数を数え、ビーム強度のモニターとする。これはIITからのシグナル情報と対応づけて記録する。その他のIITのDAQのセットアップは前章と同じである。

ビームはKEKの π^2 ビームラインを使用し、粒子の運動量は1GeV/cである。ビームは2秒に一回、約1.55sの幅で出力される。その1.55sの間に20Hzのランダムトリガーをかけたデータを集める。5000トリガーを1セットとし、十分な数の統計(コインシデンス信号100以上)が得られるまで繰り返す。

6.5.2 解析方法

まず、MCPゲート幅は100 μ sで固定し、初段のゲート幅を3,5,10,20,50,80 μ sと変化させ、ゲート幅に対して検出効率とノイズがどう変わるのかを調べる。次にMCPゲートの幅を10,20,50,100,200,500,1000と変化させ、初段ゲート(幅3 μ s)を使用した時と使用しなかった時を比較し、初段ゲートの有無によるノイズの差を調べる。

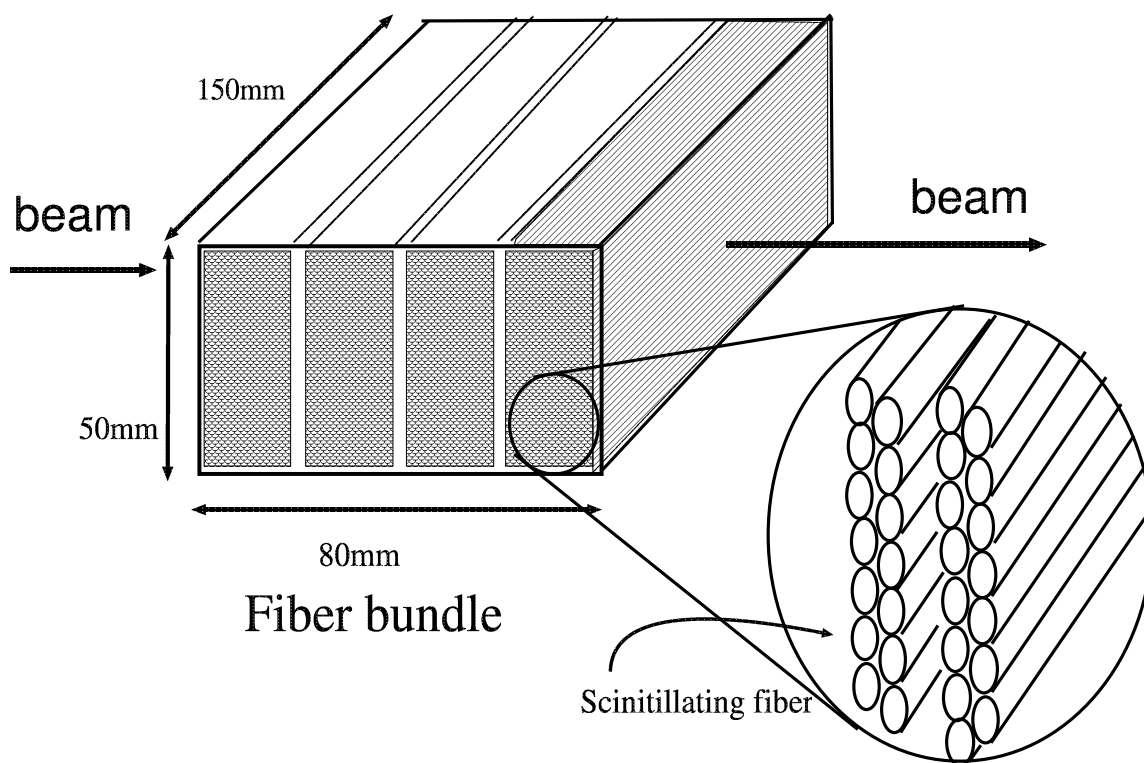


図 57: ファイバーバンドルの模式図

ビームテストの解析方法は、まず、1つの画面に映っているトラックの本数を目で数え記録する。ここで、トラックの数を数えるときの決まりを決めておく。まず、トラックは図 60 のようなファイバーバンドルをまっすぐに通過したもののみを使う。図 61 のように途中で核子と衝突し、方向が変わってしまったものや、直線だが、宇宙線もしくは、バンドル外で衝突し散乱して入ってきたと考えられる、斜めのトラックなどは除外する。また、2トラック以上のイベントは統計が少ないため、今回の解析には使用しない。

次に、トラックのあるイベントの場合で、前後のシンチレータに同時にシグナルがあるかどうかを調べる。トラックが映っており、なおかつコインシデンス信号がある場合、そのトラックを「シグナルトラック」と定義する。また、コインシデンス信号はないがトラックは写っているという場合を「ノイズトラック」と定義する。検出効率を以下の式で定義する。

$$\text{検出効率} = \frac{\text{コインシデンスがありトラックも映っているイベントの数}}{\text{コインシデンスの数}} \quad (19)$$

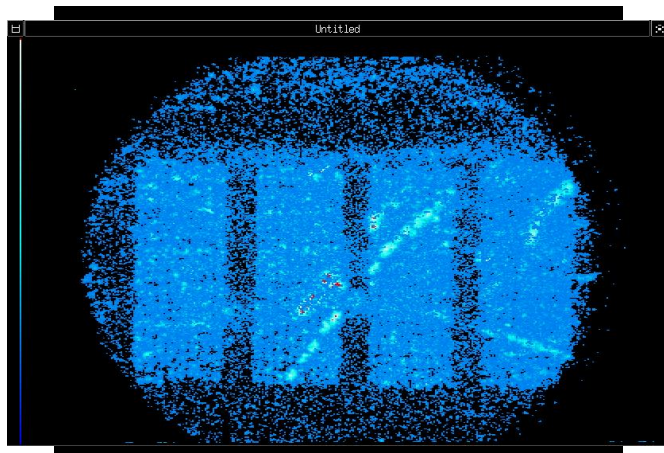


図 58: トラックの画像を足し合わせたもの。4つの部分に分かれているファイバーバンドルの端面の状態が分かる。円に見えるのは IIT の光電面の形である。

トラック数を比較する場合、データのトリガー数(トリガーをかけデータを取った数)とその時のビーム強度を考慮に入れなければならない。そこで、トラック数をトリガー数で割り、さらにビーム強度で割る操作をする。それにより、ほぼ同じ条件でトラック数を比較することができる。今後使用するトラック数はこの操作をしたものである。ここで、ビーム強度は、初段ゲートが開いている時の、単位時間(1 μ s)当たりのコインシデンスの数である。

$$\text{規格化後のノイズトラック数} = \frac{\text{規格化前のノイズトラック数}}{\text{トリガー数} \times \text{ビーム強度}} \quad (20)$$

$$\text{ビーム強度} = \frac{\text{コインシデンス信号の数}}{\text{トリガー数} \times \text{ゲート幅}} \quad (21)$$

6.5.3 実験結果

解析の結果を以下に示す。図 62 は初段ゲートの幅とトラックの検出効率の関係である。ゲート幅が 20 μ s 以上の場合の検出効率はほぼ 100% である。ビームテストでは、LED テストの場合と異なり、粒子の通過するタイミングを調整できないため、初段ゲートが完全に開放する前に粒子が通過した場合、シンチレータからのシグナルはあるがトラックは

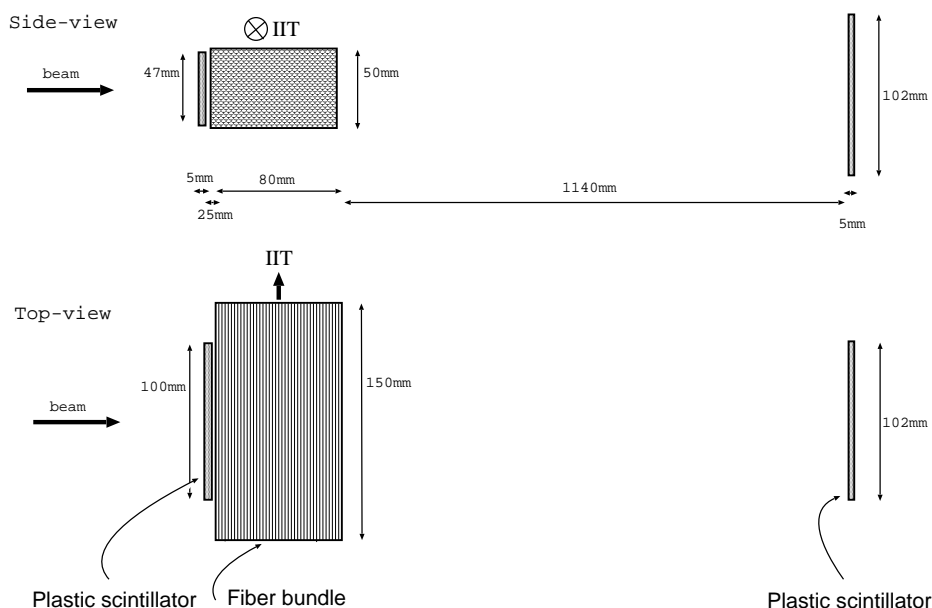


図 59: ファイバーバンドルと前後のシンチレータの位置関係。前後のシンチレーターを通過した粒子はファイバーバンドルを通過するような位置関係になっている。

映っていない状況があると予想される。この結果よりゲート幅が短いほどその傾向をみる事ができるが、検出効率には問題ない。

次に、初段ゲート幅とノイズトラック数についての関係を図 63 に示す。初段ゲートの幅とノイズトラック数は比例関係にあることが分かる。

図 64 に、初段ゲートを使用した場合、使用しなかった場合の MCP ゲート幅とノイズトラック数の関係を示す。初段ゲートを使用しない場合では MCP ゲートの幅を広げるに従い、ノイズトラック数も比例して増加する。そのため、MCP ゲート幅 $500\mu\text{s}$ 以上のデータは DAQ の処理が追いつかず、取れなかった。一方、初段ゲートを使用した場合では、いくら MCP ゲート幅を広げてもトラックの本数は初段ゲートの幅に依存するため一定である。初段ゲートを使用せず MCP ゲート幅 $100\mu\text{s}$ のみの場合に対し、初段ゲート (幅 $3\mu\text{s}$) を導入すると、ノイズトラックの数は 1.4% になる。つまり、実機に初段ゲートを導入することにより、SciFi トラッカー上で発生するランダムノイズを 1.4% に減らすことができる。

初段ゲートのゲート幅を $t_{\mu\text{s}}$ と定義し MCP ゲート幅を $100\mu\text{s}$ に固定した場合 (A) と、初段ゲートを使用せず MCP ゲート幅を $t_{\mu\text{s}}$ と定義した場合 (B) で、検出効率及びノイズトラック数を比較した。図 65 はゲート幅 t と検出効率の関係である。初段ゲートを使用した A の場合ではゲートの幅によらず検出効率は一定 (ほぼ 100%) であるが、MCP ゲー

トのみを使用した B の場合では検出効率はゲート幅に依存しており、ゲート幅が $20\mu\text{s}$ 以下では検出効率は 90% 以下である。また、図 66 は A と B でノイズ数を比較した結果である。両方ともゲート幅に比例してノイズトラック数が増えるが、2 つの間には差がある。これは MCP ゲートのみの B の場合、初段 IIT 後部の蛍光面での発光時間の幅により、ゲートが開く前のノイズトラックも取り込んでいるためと考えられる。MCP ゲートのみでは実際にゲートを開放している以前の光も取り込むが、初段ゲートを導入することにより、高い検出効率を保ったままゲート幅を短くでき、ゲートが開放されている時のシグナルのみを取ることが可能となる。

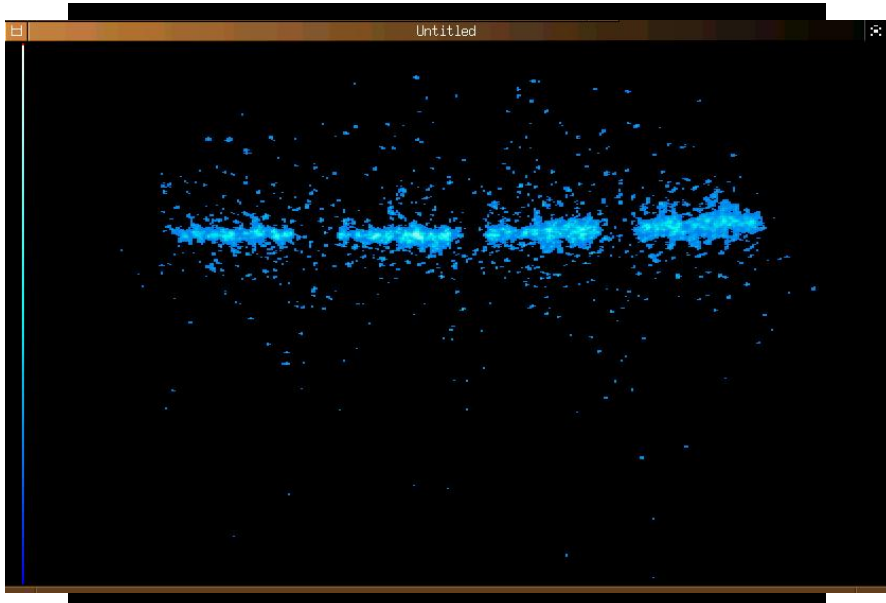


図 60: ファイバーバンドル内をまっすぐに通過している粒子のトラック。4つのパートに分かれた SciFi の束を通過しているのが良く分かる。



図 61: ファイバーバンドル内で散乱した粒子のトラック。粒子は左方向から入射し、途中で核子と衝突している。

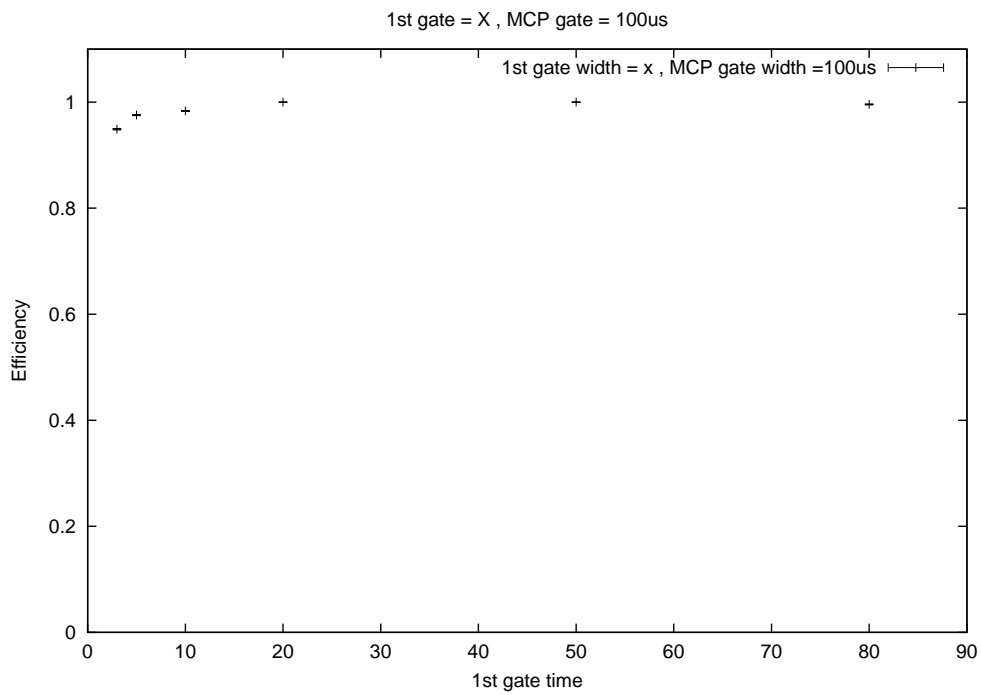


図 62: 初段ゲート幅とトラックの検出効率の関係。ゲート幅によらず検出効率は一定である。

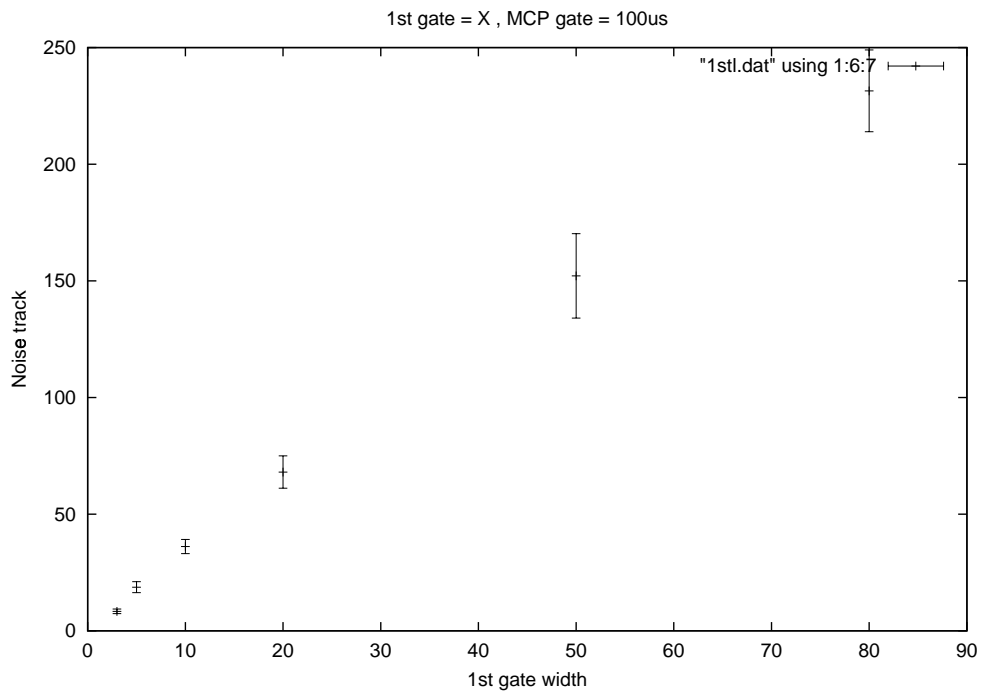


図 63: 初段ゲート幅とノイズトラックの本数との関係。ゲート時間に比例してノイズが増えている。

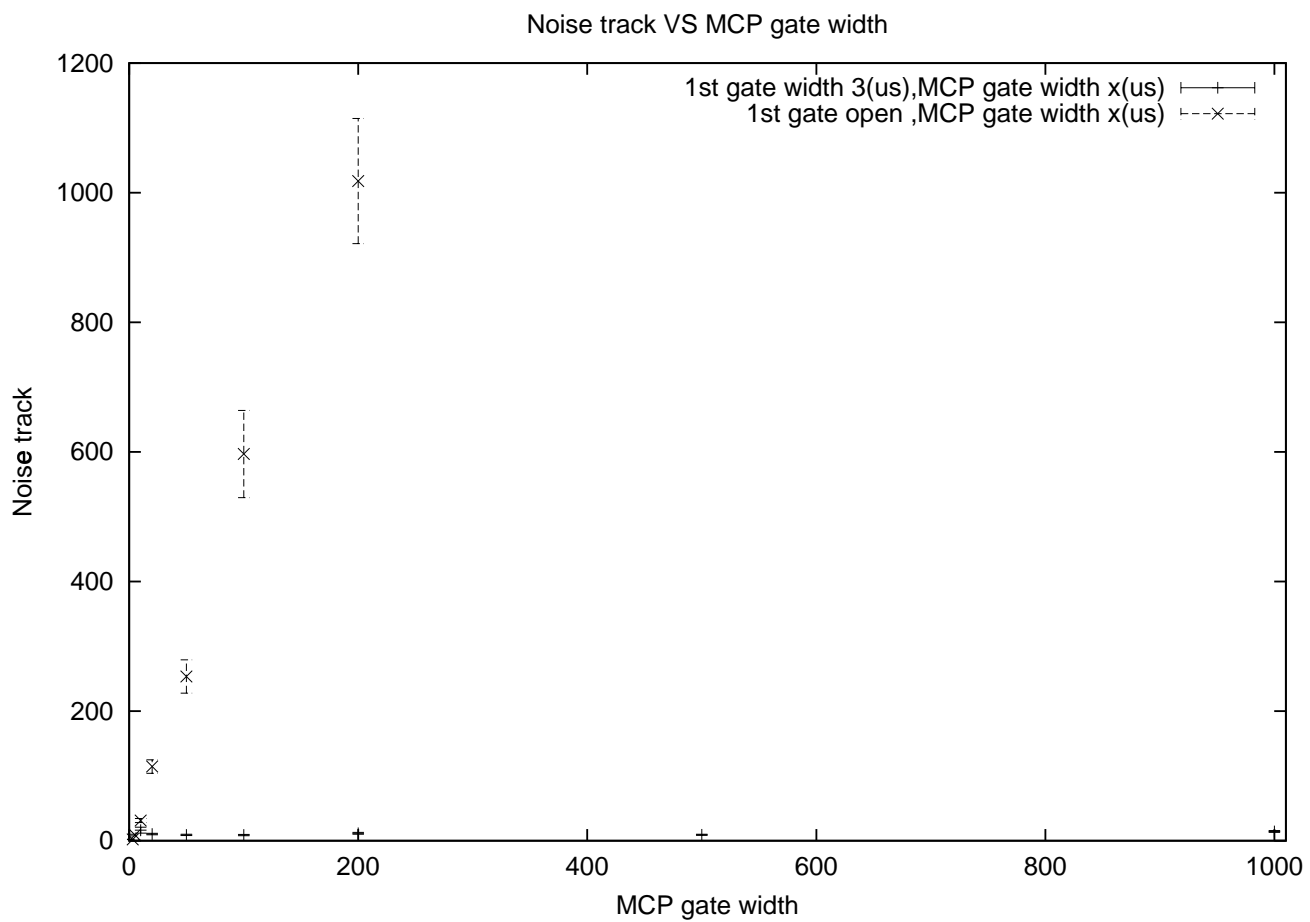


図 64: 初段ゲートを使用した場合と使用しなかった場合の MCP ゲート幅とノイズトラックの関係。横軸は MCP ゲート幅、縦軸はビーム強度で規格化後のノイズトラック数。

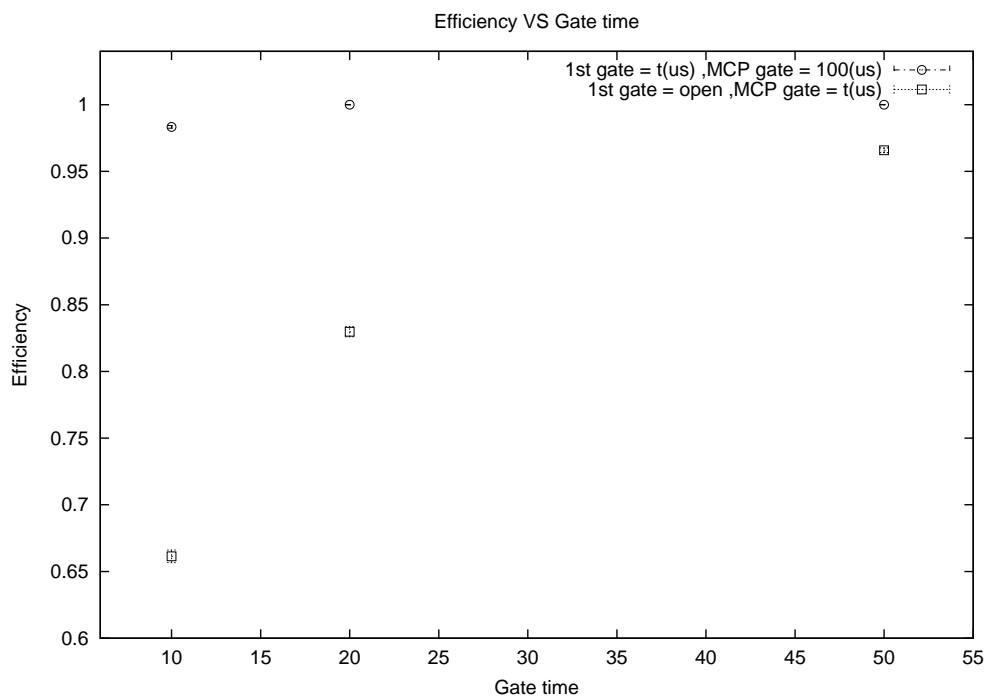


図 65: 初段ゲートと MCP ゲートを同じゲート幅にしたときのゲート幅と検出効率の関係。MCP ゲートはゲート幅が短くなるにつれ検出効率が落ちているが、初段ゲートではほぼ一定である。

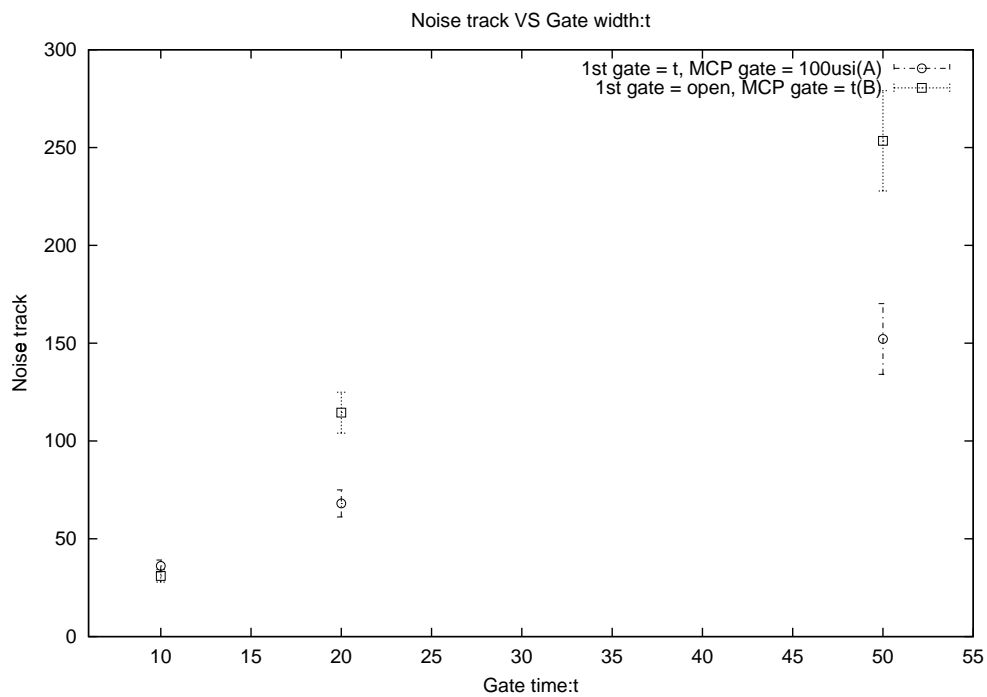


図 66: 初段ゲートと MCP ゲートを同じゲート幅にしたときのゲート幅とノイズトラック数の関係。MCP ゲートは初段ゲートと同じゲート時間でもゲートが開く前に光った光を保持するためノイズトラック数は初段ゲートを使用した場合とくらべて多い

7 結論

K2K 実験では、SciFi 飛跡検出器の情報の読み出しに、24本の IIT を使用している。本研究では、IIT のゲート方法に関して性能評価を行なった。

現在、IIT のゲートは、MCP で $100\mu\text{s}$ の幅のゲートをかけている。この幅を短くすることにより、ランダムに発生するノイズを減らすことができる。検出効率を落さな範囲でゲート幅を短くし、ノイズの減少量を調べたところ、8p.e. 相当の光を入射した場合、 $60\mu\text{s}$ まで短くしても検出効率が落ちず、その時のノイズは、 $100\mu\text{s}$ の場合と比べて、47%である。次に、実機の MCP ゲート幅を $60\mu\text{s}$ にして、宇宙線テストを行なった。その結果、ヒット検出効率は $96.6\pm 0.1\%$ から $95.0\pm 0.1\%$ に落ちたが、ノイズ混入率は 62% になった。検出効率をほとんど落さず、ノイズを 4 割減らすことができた。今回は、一部の IIT が大きく検出効率を落したため、MCP ゲートは $60\mu\text{s}$ では使用しないことになった。今後、更に宇宙線テストを行ない、MCP ゲート幅を細かく変化させ最適な値を探す必要がある。

一方、今回初めて静電型 IIT にゲート機能を付けた場合の性能評価を行なった。その結果、このゲートは開閉に $1.5\mu\text{s}$ かかり、初段ゲートを $3\mu\text{s}$ で使用しても検出効率に影響を与えず動作することが分かった。初段ゲートを $3\mu\text{s}$ で使用すると、現在の MCP ゲートのみの場合と比べ、IIT 内で発生するランダムノイズは 15% になる。また、IIT に入射する光のノイズを 1.4% まで減らすことができる。

初段ゲートを導入することにより、数 μs のゲートをかけることが可能となり、ランダムノイズを大幅に減りトラッキング精度の向上につながる。このゲート方法を使用した IIT は今後さまざまな実験において有効である。

A $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の振動確率の計算

ここでは、 ν_μ が ν_τ へ変化する場合の確率を計算する [10]。まず、弱い作用の固有状態と、それとは独立に質量の固有状態を以下のようにおく。

$$\left. \begin{array}{l} |\nu_\mu \rangle \\ |\nu_\tau \rangle \end{array} \right\} \text{弱い相互作用の固有状態} \quad (22)$$

$$\left. \begin{array}{l} |\nu_1 \rangle \\ |\nu_2 \rangle \end{array} \right\} \text{質量の固有状態}$$

弱い相互作用の固有状態は、質量の固有状態の重ね合わせで表せる。そのまた逆も同様に表せる。ここで θ は混合角である。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\mu \rangle \\ |\nu_\tau \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1 \rangle \\ |\nu_2 \rangle \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} |\nu_1 \rangle \\ |\nu_2 \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_\mu \rangle \\ |\nu_\tau \rangle \end{pmatrix} \quad (24)$$

ニュートリノが空間を伝播する時、質量の固有状態の時間発展は Schrödinger 方程式に従う。つまり、 E をエネルギー固有値とすると、時刻 t における、質量の固有状態は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} |\nu_1(t) \rangle &= |\nu_1(0) \rangle e^{\frac{-iE_1 t}{\hbar}} \\ |\nu_2(t) \rangle &= |\nu_2(0) \rangle e^{\frac{-iE_2 t}{\hbar}} \end{aligned} \quad (25)$$

$t = 0$ の時、

$$\begin{aligned} |\nu_\mu(0) \rangle &= |\nu_1(0) \rangle \cos\theta + |\nu_2(0) \rangle \sin\theta \\ |\nu_\tau(0) \rangle &= -|\nu_1(0) \rangle \sin\theta + |\nu_2(0) \rangle \cos\theta \end{aligned} \quad (26)$$

より、 t 秒後の $|\nu_\mu(t) \rangle$ は

$$\begin{aligned} |\nu_\mu(t) \rangle &= |\nu_1(t) \rangle \cos\theta + |\nu_2(t) \rangle \sin\theta \\ &= |\nu_1(0) \rangle e^{\frac{-iE_1 t}{\hbar}} \cos\theta + |\nu_2(0) \rangle e^{\frac{-iE_2 t}{\hbar}} \sin\theta \\ &= (|\nu_\mu(0) \rangle \cos\theta - |\nu_\tau(0) \rangle \sin\theta) e^{\frac{-iE_1 t}{\hbar}} + (|\nu_\mu(0) \rangle \sin\theta + |\nu_\tau(0) \rangle \cos\theta) e^{\frac{-iE_2 t}{\hbar}} \sin\theta \\ &= |\nu_\mu(0) \rangle \left(e^{\frac{-iE_1 t}{\hbar}} \cos^2\theta + e^{\frac{-iE_2 t}{\hbar}} \sin^2\theta \right) + |\nu_\tau(0) \rangle \left(-e^{\frac{-iE_1 t}{\hbar}} + e^{\frac{-iE_2 t}{\hbar}} \right) \sin\theta \cos\theta \end{aligned} \quad (27)$$

ν_μ が t 秒後に、 ν_μ として観測される確率 (振動しない確率)
 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ を計算する。

$$\begin{aligned}
P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) &= \left| \langle \nu_\mu(t) | \nu_\mu(0) \rangle \right|^2 \\
&= \left| \langle \nu_\mu(0) | \nu_\mu(0) \rangle \left(e^{\frac{-iE_1 t}{\hbar}} \cos^2 \theta + e^{\frac{-iE_2 t}{\hbar}} \sin^2 \theta \right) \right. \\
&\quad \left. + \langle \nu_\tau(0) | \nu_\mu(0) \rangle \left(e^{\frac{-iE_1 t}{\hbar}} + e^{\frac{-iE_2 t}{\hbar}} \right) \sin \theta \cos \theta \right|^2 \\
&= \left(e^{\frac{iE_1 t}{\hbar}} \cos^2 \theta + e^{\frac{iE_2 t}{\hbar}} \sin^2 \theta \right) \left(e^{\frac{-iE_1 t}{\hbar}} \cos^2 \theta + e^{\frac{-iE_2 t}{\hbar}} \sin^2 \theta \right) \\
&= \cos^4 \theta + \sin^4 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left(e^{\frac{i(E_1 - E_2)t}{\hbar}} + e^{\frac{-i(E_1 - E_2)t}{\hbar}} \right) \\
&= (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta)^2 - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \left(\frac{1}{4} \sin^2 2\theta \right) (2 \cos \{ (E_1 - E_2)t \}) \\
&= 1 - \frac{1}{2} \sin 2\theta + \left(\frac{1}{4} \sin^2 2\theta \right) (2 \cos \{ (E_1 - E_2)t \}) \\
&= 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta [1 - \cos \{ \frac{(E_1 - E_2)t}{\hbar} \}]
\end{aligned} \tag{28}$$

故に、 ν_μ が ν_τ へ振動する確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$ は

$$\begin{aligned}
P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) &= 1 - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \\
&= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta [1 - \cos \{ \frac{(E_1 - E_2)t}{\hbar} \}]
\end{aligned} \tag{29}$$

ニュートリノの質量が、運動エネルギーに比べて小さい時、以下のような近似ができる。

$$\begin{aligned}
E &= \{ (PC)^2 + (mc^2)^2 \}^{\frac{1}{2}} \\
&\approx PC \{ 1 + \frac{1}{2} (\frac{mc^2}{PC})^2 \} \\
&= PC + \frac{m^2 c^3}{2P}
\end{aligned} \tag{30}$$

そこで、 $E_1 - E_2$ を計算する。

$$\begin{aligned}
E_1 - E_2 &\approx P_1 C + \frac{m_1^2 c^3}{2P_1} - P_2 C - \frac{m_2^2 c^3}{2P_2} \\
&\quad \text{運動量はそろえてあるため、} \\
&= \frac{m_1^2 - m_2^2}{2P} \cdot c^3 \\
&= \frac{\Delta m^2}{2P} \cdot c^3 \\
&\quad (\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|)
\end{aligned} \tag{31}$$

よって、

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \{1 - \cos(\frac{\Delta m^2}{2P\hbar} \cdot c^3 \cdot t)\} \\ &= \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\Delta m^2 \cdot c^3 \cdot t}{4P\hbar} \\ &= \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\Delta m^2 \cdot c^2 \cdot L}{4P\hbar} \\ &\quad (L = ct(\text{飛行距離})) \end{aligned} \tag{32}$$

$E \sim Pc$ と近似し、次のような単位で考える。

$$\begin{aligned} \Delta m^2 &= |m_1^2 - m_2^2| \quad \frac{(eV)^2}{E} \\ &\quad L \quad (Km) \end{aligned} \tag{33}$$

以上より

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2(1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L}{E}) \tag{34}$$

B 初段IIT 後部にあるの蛍光面の発光時間

MCP 型 IIT は、上流側にある初段 IIT からの光信号を受け、その光を増幅する役割を果たしており、またそれにはゲート機能がついている。ゲートの幅は理想的には初段ゲートに入射した光の幅であれば良いのだが、初段 IIT 後部にある蛍光面には発光に時間の幅があるため、それに依存したゲート幅になる。減衰長は光量により異なっており、 $30\mu\text{s}$ から $100\mu\text{s}$ の間である。ここでは 6p.e. 相当の光を入射した場合の検出効率の減衰長を調べる。

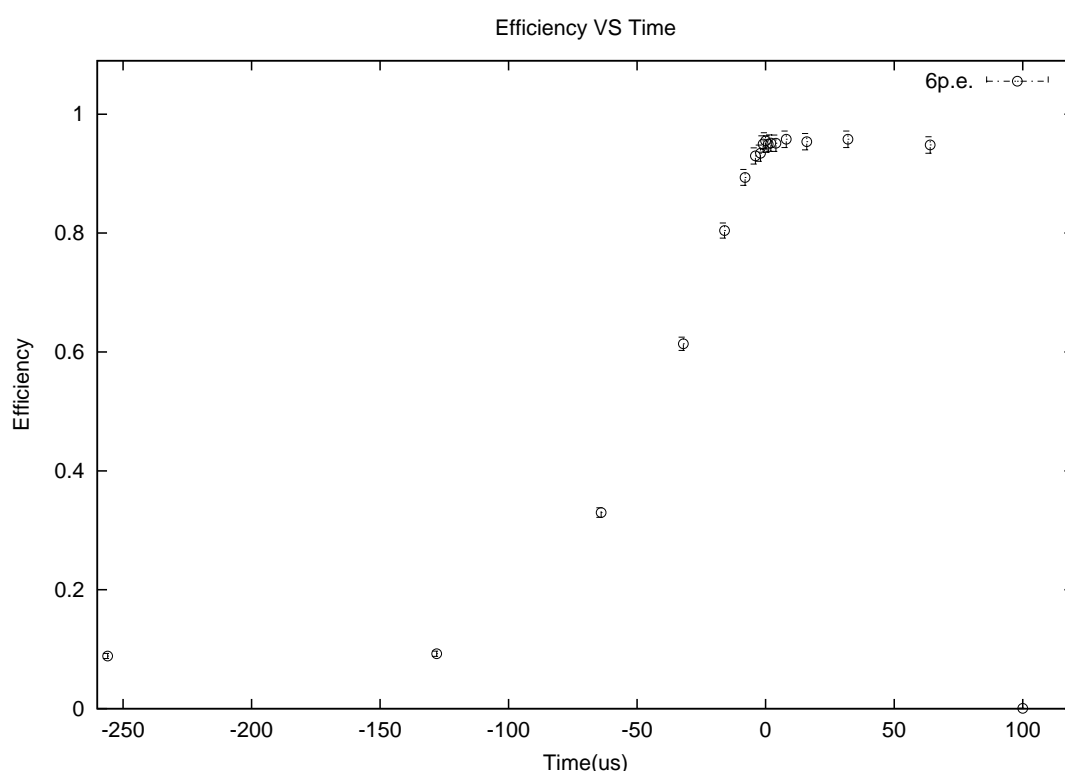


図 67: MCP ゲートに対して LED を光らせるタイミングをずらした場合の検出効率。時刻 0 に MCP ゲートが開き、時刻 $100\mu\text{s}$ に閉じている。6p.e. 相当の光を入射している。

図 67 は、MCP ゲートに対して LED の発光タイミングをずらした場合の検出効率の変化である。時刻 0 の時に MCP ゲートが開放し、時間 $100\mu\text{s}$ の時に閉鎖している。図より発光後 $100\mu\text{s}$ 経てば検出される確率は 10% 以下になることが分かった。つまり MCP ゲートの幅は多くても $100\mu\text{s}$ あれば十分であるといえる。また、検出効率が $\frac{1}{e}$ になるのはおよそ $60\mu\text{s}$ である。

IIT に入射する光のノイズは、この図のプロットをつなげた場合の曲線と X 軸との間の

面積に比例する。図より、MCP ゲートが開放する以前に光ったノイズの割合が全体のおよそ3割占めていることが分かる。

謝辞

この論文をまとめるにあたって、多くの方々に多岐にわたりお世話になったことを感謝致します。

直接の指導教官である原俊雄先生には、研究から社会勉強に至るまで丁寧に指導して頂きました。

また、発達科学部の青木茂樹先生、理学部の鈴木州先生には、毎週の打ち合わせや研究生活において、適切な御指導、御助言を頂きました。

また、高エネルギー大講座の武田廣教授、野崎光昭教授をはじめ先生方には学部生時代から物理についての基礎を詳しく教えていただきました。

京都大学の西川公一郎先生、高エネルギー加速器研究機構の中村健蔵先生には実験の責任者としてお世話になりました。

SCIFI グループとして研究に取り組んできた素粒子原子核研究所の作田誠助教授、石田卓助手、早戸良成助手には実験において様々な御指導、御助言を頂きました。

浜松ホトニクスさんの遠藤様には IIT の改造、性能評価の際たいへんお世話になりました。

東北大学の長谷川琢哉助手、California 大学の峰俊一博士、KEKCOE の丸山和純博士、理研の小浜光洋博士、京都大学の稲垣隆宏、大阪大学の吉田誠さん、神戸大学の岩下大器さんには、高エネルギー加速器研究機構での研究に多岐に渡り御指導、御助言を頂きました。

東京理科大の佐藤朗さんにはビームテストの時、余っているビームを使わせて頂きました。また、御指導、御助言を頂きました。岸正太郎さん、横山広美さんには、高エネルギー加速器研究機構での研究などにおいて協力して頂きました。

神戸大学 OB の北村雅裕さん、佐藤幸一さん、久米剛生さん、恩地正裕さん、藤井公雄さん、竹中和彦さんには、さまざまのことを助言していただき、手伝っていただきました。

神戸大学の太田智子さん、高月美知代さん、野田俊介君、西山正吾君、須賀陽介君、中田太志君には、神戸でたいへんお世話になりました。

最後に、陰で支えてくれた家族に心から感謝します。

参考文献

- [1] Particle Data Group. Review of particle physics. *The European Physical Journal*, p. C15 1, 2000.
- [2] Y.Fukuda et al.(Super-Kamiokande Collaboration). *Phys. Rev. Lett.* 81, 1998.
- [3] 門脇徹人. 東京理科大学理工学研究科修士論文, 1999.
- [4] 田代和也. 修士論文, 1998.
- [5] A.Suzuki et al.(K2K Collaboration). *Nucl. Instr. and Meth.*, p. A453, 2000.
- [6] 越後慎也. 修士論文, 1998.
- [7] 岸正太郎. 修士論文, 2000.
- [8] 北村雅裕. 修士論文, 1999.
- [9] 恩地正裕. 修士論文, 2000.
- [10] 原俊雄. ニュートリノ振動講義ノート, 1997.
- [11] 西川公一郎. K2K ニュートリノ振動の実験. 高エネルギーニュース, 2000.
- [12] 後藤雅之. 東海大学大学院理学研究科修士論文, 1997.
- [13] 稲垣隆宏. 東京大学理学系研究科修士論文, 1998.
- [14] 藤井公雄. 修士論文, 2000.
- [15] 竹中和彦. 修士論文, 2000.
- [16] 岩下大器. 修士論文, 2000.
- [17] 生田誠三. $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ 文典. 朝倉書店, 2000.