

修士学位論文

K2K・SciFi 検出器 IIT の  
LED を用いた性能モニタ

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

031S101N

朝倉 健次

平成 17 年 2 月 10 日

# 概要

K2K 長基線ニュートリノ振動実験は、茨城県つくば市にあるKEK 高エネルギー加速器研究機構 12GeV陽子シンクロトロン加速器からの陽子ビームを用いて、平均 1.3GeVのミューニュートリノ( $\mu$ )ビームを生成し、250km離れた岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデに向けて打ち込み、ニュートリノ振動を測定する実験である。K2K 長基線ニュートリノ振動実験では、KEK 高エネルギー加速器研究機構側に設置した前置検出器と、後置検出器としてスーパーカミオカンデを用いて、ニュートリノの反応を観測している。前置検出器は 1kT水チェレンコフ型検出器、Fine-Grained検出器(FGD)で構成されている。

FGD を構成している Scintillating Fiber 飛跡検出器(Scifi 検出器)での信号読み出しには Image Intensifier Tube(IIT)を使用しており、その安定性をモニタするには、これまではニュートリノビームの出ていない時間にとる宇宙線データを用いていた。これは 1 週間間隔でモニタしており、ニュートリノ run 中に IIT が安定しているかどうかは判らなかった。

本研究の目的は、SciFi 検出器の読み出し機である IIT の性能の、gain の安定性、ヒット検出効率、ヒット頻度、ファイバーバンドルと IIT の光電面との位置関係をニュートリノ run 中にモニタするシステムを構築することである。その目的のために LED を用いることにした。ニュートリノビームは約 2.2 秒に 1 回(1spill)1  $\mu$ sec の時間幅で入射されるので、LED はビーム spill 間(off spill 時)に光らせ、1000 イベント毎にデータを集計してディスプレイ上に plot するようにした。また、LED が特定のファイバーを光らせていることを利用して、ファイバーバンドルと IIT 光電面の位置関係のモニタ(座標モニタ)を構築した。この新しいモニタシステムで 2004 年 10 月 26 日~2004 年 11 月 8 日の間モニタした結果、IIT のゲインは 3.8%以内で安定、IIT のヒット検出効率は  $0.97 \pm 0.03$  で安定していた。座標モニタに関しては、ある 1 本の IIT に対して 1pixel( $\sim 0.18$ mm)のずれを観測した。その他の IIT については  $\pm 0.1$ pixel 以内で安定していた。

ヒットの頻度(noise rate)のモニタの結果、読み出し電子回路周辺の温度の変化に伴う変動が観測された。ADC threshold をオフラインで変更して解析した結果、IIT 自身のゲインの変動ではないことが判った。

LED を用いた IIT の性能モニタは宇宙線によるモニタの弱点を十分に補うことができ、モニタシステムにおいて中心的役割を果たすものとなった。

また、IIT への入射光量とシグナル光のピクセル数の関係についても調べた。本研究で調べる以前は、宇宙線やビームテストで調べていたので MIP 程度の光量の領域でしか調べられていなかった。そのときは 1 次比例と結論付けられていた。本研究では LED を使用して、より大きな光量の範囲まで詳しく調べた。その結果、入射光量と  $N_{pix}$  の関係が 2 次比例の形で近似記述できることが判った。

また、IIT の gain の位置依存性、ADC とピクセル数の関係を宇宙線のデータを使用して確認した。これについては、LED を使用して調べたものではないので付録のところで述べる。本研究の一部として、実際に使用している IIT24 本について位置依存性の存在の有無を調べた結果は、位置依存性の存在を示唆するものであった。Gain のひずみの中心は光電面のほぼ中心で、ひずみの中心から見て内側と外側で gain の差は 10%程度であった。これは K2K・SciFi 検出器におけるイベント解析の結果に付けている誤差に既に含まれており、ニュートリノイベントの解析結果そのものには影響は与えない。

# 目次

	page
序章	
本研究の目的	
論文の構成	6
第1章 ニュートリノ	7
1.1 ニュートリノ	7
1.2 ニュートリノ振動現象	9
1.3 ニュートリノ振動現象の観測	10
1.3.1 大気ニュートリノ異常	10
1.3.2 太陽ニュートリノ	11
第2章 K2K 実験	13
2.1 K2K 実験の概要	13
2.2 振動の探索	14
2.3 実験の構成	15
2.3.1 ニュートリノビームライン	15
2.3.2 前置検出器	18
2.3.2 後置検出器	21
第3章 SciFi 検出器	23
3.1 SciFi 検出器の構造	23
3.1.1 scintillating fiber	24
3.1.2 SciFi sheet	24
3.1.3 SciFi bundle	25
3.1.4 IIT	26
3.2 SciFi 検出器のデータ取得	28

3.3 SciFi バンドルの位置較正	30
第 4 章 改善前の IIT 性能モニタ	31
4.1 ヒット数モニタ	31
4.2 光量モニタ	32
4.3 宇宙線を使用したモニタ	34
4.4 新しいモニタシステムの導入	34
第 5 章 LED を用いた IIT の性能モニタ	35
5.1 セットアップ	35
5.2 distributor	37
5.3 LED	38
5.4 LED モニタにおける efficiency と noise rate	40
5.5 gain の安定性モニタ	46
5.6 座標モニタ	48
5.7 稼働中の LED モニタ	51
5.8 まとめ	70
第 6 章 LED の発光量と IIT の応答	71
6.1 LED の発光量	71
6.2 LED の発光量 IIT の応答	74
第 7 章 結論	76
付録 A IIT の gain の位置依存性	79
付録 B Gain の安定性を示す Npix 分布	105
付録 C 宇宙線の Npix 分布	108
付録 D efficiency の安定性の図	111

# 序章

## ・本研究の目的

つくば神岡間長基線ニュートリノ振動実験(K2K)で前置検出器の 1 つとして使用している Scintillating Fiber 飛跡検出器(SciFi 検出器)は、粒子の飛跡検出を目的として製作され、その役目を果たしてきた。そのみならず、最近では粒子識別も行われ始めており、K2K において大変重要な役割を担っている。SciFi 検出器の読み出し装置である Image Intensifier Tube (IIT)の性能モニタは、ニュートリノビーム照射中の雑音(noise)や週 1 回の宇宙線 run によって行われてきた。Noise では IIT の gain のモニタにはならず、宇宙線による週 1 回のモニタでは、リアルタイムのモニタとはならない。

本研究は、上記のようなこれまでの IIT 性能モニタの問題点を補うリアルタイムモニタの導入とその性能評価を目的とする。そのようなモニタとして、LED を用いたものを導入したが、その発光量と IIT の応答の関係を定量的に測定したのでそれについても報告する。

## ・論文の構成

まず、次章では、背景となるニュートリノとそれにまつわる物理の現状について述べる。第 2 章では K2K 実験全般について述べ、第 3 章では SciFi 検出器について述べる。第 4 章では、LED を用いたモニタ(LED モニタ)を導入する以前の IIT 性能モニタについて述べる。第 5 章では、本研究の主題である LED モニタについて述べる。この章で、LED モニタがどのようなものかと動作結果について詳しく述べる。第 6 章では LED モニタ導入前に行った予備的スタディ、特に入射光量と IIT の応答との定量的関係について述べる。

最後に結論と今後の展望をもってしめくくる。

# 第1章 ニュートリノ

## 1.1 ニュートリノ

現在の素粒子物理学における標準理論では、物質を構成する基本粒子は、スピン 1/2 を持ちかつフレーバーの違いで分類された 6 種類(color の分類を考慮すると 18 種類)のクォークと 6 種類のレプトン、そしてそれらの反粒子であるとされている。

これらの基本粒子は作用する力によって、強い力が作用するクォークと作用しないレプトン、電磁力が作用する荷電粒子と作用しない中性粒子といったように分類されている。また、物質間に働く力(相互作用)はゲージボゾンと呼ばれる媒介粒子の交換によって記述され、次の 4 つに分類されている。すなわち、グルーオンが媒介粒子である強い相互作用、光子が媒介粒子である電磁相互作用、弱ボゾン(W 粒子、Z 粒子)が媒介粒子である弱い相互作用、重力子が媒介粒子である重力相互作用である。

表 1.1 素粒子物理学の標準理論における基本粒子

クォーク		u, d, c, s, t, b
レプトン	荷電レプトン	e, $\mu$ ,
	中性レプトン	$\nu_e, \nu_\mu,$
ゲージボゾン		g, $W, Z$

クォークは陽子や中性子を構成している粒子で、各クォークはcolorと呼ばれる量子数による分類で 3 種類あるとされている。一方、レプトンは 3 種類の荷電レプトンとそれに対応する 3 種類の中性レプトンに分類されている。ニュートリノとはその中性レプトンに対して付けられた名称である。ニュートリノはflavorの違いにより、電子ニュートリノ( $\nu_e$ )、ミューニュートリノ( $\nu_\mu$ )、タウニュートリノ( $\nu_\tau$ )の 3 種類の存在が知られている。

ニュートリノは1930年、パウリによって崩壊でのエネルギー保存則と角運動量保存則を成立させるために存在が予言されてから数年の間に、その質量が電子質量に比べて極めて小さいこと、関与する力が「弱い力」であるため、反応確率が電磁反応よりも極めて小さいことが確認された。それはニュートリノのもつエネルギーによっても異なるが、例えば、太陽ニュートリノ程度のエネルギーに対しては、地球を100億回程度通り抜けて一回物質と衝突する程度の確率である。その後フェルミによって、「ニュートリノ」の名前が与えられ、弱い相互作用の理論が定式化され、その粒子は物理学の構成要員として迎え入れられた。電子ニュートリノは、1956年にReinesとCowanにより発見されており(逆崩壊の観測による反電子ニュートリノ( $\bar{\nu}_e$ )の検出)、自然界には太陽ニュートリノという形で存在し、人工的には原子炉で大量の反電子ニュートリノ( $\bar{\nu}_e$ )が生成される。ミューニュートリノは、1962年にLederman、Schwartz、Steinbergerらによって確認され、宇宙線の成分として存在している。また、 $\Lambda$ やK中間子の崩壊から生じることが判っているため、高エネルギー加

速器実験により大量生産が可能である。そして、タウニュートリノは2000年、Fermi National Accelerator Laboratory(FNAL)で行われていたDONUT実験によって直接検出された。位置分解能がおよそ $1\mu\text{m}$ という原子核乾板と、飛跡の自動認識装置を用い、タウニュートリノの反応から生まれた粒子と、その崩壊過程を飛跡として捕えることに成功している。また、Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire (CERN) にある世界最大の電子・陽電子衝突装置LEPで、中性カレントによる弱い相互作用を媒介する粒子Zボソンの崩壊幅の観測測定によって、軽いニュートリノの世代数が3であることが確認されている。しかし、ニュートリノ研究の歴史はパウリの予言から70年を越えるが、その性質の多くは未だ謎に包まれたままである。それは、ニュートリノには弱い相互作用しか働かない事が、ニュートリノ検出を著しく困難にしているためである。素粒子物理学の標準理論では、左巻きのニュートリノの存在(反ニュートリノは右巻き)のみを仮定している。しかし、ニュートリノは、質量を持つことで、光速以下の速度しか出せず、より速い座標系に移れば進行方向を逆転させ、左巻き成分を右巻きに変えることが出来、右巻き成分の存在が示唆できる。また、唯一基本粒子の中で電荷を持たない中性のニュートリノは、電荷を持つ粒子(電荷の符合によって、粒子・反粒子の区別をつけるディラック粒子)とは違い、本質的に粒子・反粒子の区別がつかない別種の粒子(マヨナラ粒子)である可能性がある。この場合、レプトン数保存の破れが生じるが、大統一理論では、クォークとレプトンを同一の粒子とみなすので、両者の混合が起こり、レプトン数は保存されないので、マヨナラニュートリノであってもよい。実際、その可能性が様々に検討されている。

右巻き成分の存在とレプトン数保存則の破れ的一方または両方が成立すれば、ニュートリノは質量を持つことが出来る。そのため、ニュートリノの質量の有無を検証することが意味するところは大きいといえる。既知の素粒子で質量がゼロのものとしては光子があるが、光子には力を媒介するゲージ粒子という位置づけがあり、質量がゼロであるための正当な理論的裏付けがあるが、ニュートリノに関してはその理論的な根拠はない。実験的には、ニュートリノの質量の直接測定は成功しておらず、表1.2のように、その上限値が得られているだけである。

表1.2 直接測定によるニュートリノの上限値

flavor	質量の上限値	実験法
e	2.5eV(95%CL)	Tritium 崩壊
$\mu$	170keV(90%CL)	+ $\mu^{++}$ $\mu$
	18.2MeV(95%CL)	- 2 $^{-+}$ + - 3 $^{-+2}$ $^{++}$ $^{0+}$



## 1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノの持つ質量と混合角を探る方法の1つがニュートリノ振動である。以下では2つのflavor間での振動を例として述べる。

弱い相互作用をするときの固有状態を  $|i\rangle = (e, \mu)$ 、質量の固有状態を  $|i\rangle = (1, 2)$  とする。 $e$  と  $\mu$  は次の様に角度  $\theta$  を用いて  $|1\rangle$  と  $|2\rangle$  の混合状態として記述される。

$$\begin{pmatrix} e \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

簡潔に記述すれば次式である。

$$|i\rangle = U_{ij} |j\rangle \quad (1.2)$$

ただし、 $U$ は、

$$U \equiv \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

である。弱い相互作用をするときの固有状態が  $|1\rangle$  として発射された、エネルギー  $E$  のニュートリノビームは、時間  $t$  とともに次のように時間発展する。

$$|i(t)\rangle = \sum_j U_{ji} e^{-iE_j t} |j\rangle = \sum_i \sum_{j'} U_{ji} U_{i'j'} e^{-iE_{j'} t} |j'\rangle \quad (1.4)$$

また、 $E$ は次の近似を使用する。

$$E_i = p + \frac{p^2}{2m_i} \quad (1.5)$$

時間  $t$  が経過したときに、 $|1\rangle$  が  $|j\rangle$  に振動している確率  $P(|1\rangle \rightarrow |j\rangle)$  は、

$$P(|1\rangle \rightarrow |j\rangle) = \left| \langle j | |1(t)\rangle \right|^2 = \sum_i \sum_{i'} U_{ji} U_{i'j} U_{i'1} U_{i1} \times \cos[(E_i - E_{i'})t] \quad (1.6)$$

で、上式を計算し、時間  $t$  が経過するまでにニュートリノが走った距離  $L$  を用いて表すと、

$$P(|1\rangle \rightarrow |j\rangle) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2}{4E} L \right) \quad (1.7)$$

となる。ここで  $\Delta m^2$  は、

$$\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2 \quad (1.8)$$

で表される質量の2乗の差である。(1.7)式を  $m^2[\text{eV}^2]$ 、 $E[\text{GeV}]$ 、 $L[\text{km}]$ の単位に変換して書き直すと

$$P(\nu_i \rightarrow \nu_j) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \cdot \frac{\Delta m^2 [eV^2] \cdot L [km]}{E [GeV]} \right) \quad (1.9)$$

となる。ニュートリノ振動実験では、ニュートリノの質量を直接測定しているわけではなく、質量の2乗の差を測定している。また、(1.9)式には混合角  $\theta$  がもう1つの未知数として含まれるため、ニュートリノ振動実験の解析ではそれらの解の存在範囲を求めるにとどまっている。

### 1.3 ニュートリノ振動現象の観測

ニュートリノ振動に関する研究は様々な形で行われてきた。ニュートリノ振動の観測例として、以下の2現象について述べる。

- ・大気ニュートリノ異常
- ・太陽ニュートリノ欠損

#### 1.3.1 大気ニュートリノ異常

大気ニュートリノとは、宇宙線が大気と反応し、生成された粒子が崩壊する過程の中で作られるニュートリノのことである。宇宙線として大気に入射した陽子が、大気中の核子と反応し、中間子やK中間子を生み出す。中間子は大気中でミューニュートリノ( $\bar{\nu}_\mu$ )と $\mu$ 粒子に崩壊する。更に、 $\mu$ 粒子は電子(e)、電子ニュートリノ( $\bar{\nu}_e$ )、ミューニュートリノ( $\bar{\nu}_\mu$ )に崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^+ \quad (1.10)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.11)$$

上式からもわかるように、1個の中間子が崩壊すると、結果として2個の $\bar{\nu}_\mu$ と1個の $\bar{\nu}_e$ が生成される。ニュートリノがそのまま地表に到達すると、理論上は、 $\bar{\nu}_\mu$ と $\bar{\nu}_e$ の数の比は2:1である。しかし、実際の観測結果はそうではなかった。

観測結果を表1.3に載せる。観測結果は、系統誤差や統計誤差などをかなり小さくするために、次式のようにニュートリノの数の2重比を定義し表している。

$$R \equiv \frac{N(\bar{\nu}_\mu + \bar{\nu}_\mu) / N(\bar{\nu}_e + \bar{\nu}_e)_{data}}{N(\bar{\nu}_\mu + \bar{\nu}_\mu) / N(\bar{\nu}_e + \bar{\nu}_e)_{simulation}} \quad (1.12)$$

また、表1.3中に書かれているSub-GeV、Multi-GeVとは、ニュートリノ反応事象を選択する基準で分類したイベントカテゴリー名であり、どちらも電子の運動量は100MeV/c以上、 $\mu$ 粒子の運動量は200MeV/c以上という条件は共通である。両者の違いは、チェレンコフ光から求めたニュートリノのエネルギーが、Sub-GeVでは1.33GeV以下、Multi-GeVでは

1.33GeV以上という点である。

表1.3 大気ニュートリノの観測結果

実験施設・実験名	R値 ± 統計誤差 ± 系統誤差
スーパーカミオカンデ(Sub-GeV)	$0.64 \pm 0.03 \pm 0.05$
スーパーカミオカンデ(Multi-GeV)	$0.60^{+0.07}_{-0.58} \pm 0.09$
カミオカンデ(Sub-GeV)	$0.60^{+0.06}_{-0.05} \pm 0.05$
カミオカンデ(Multi-GeV)	$0.57^{+0.08}_{-0.07} \pm 0.07$
IMB	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.07$
Soudan2	$0.51^{+0.05}_{-0.07} \pm 0.14$
Frejus	$1.00 \pm 0.15 \pm 0.08$
NUSEX	$0.99^{+0.35}_{-0.25} \pm^{***}$

## 1.3.2 太陽ニュートリノ

太陽の内部では核融合反応が起こっており、一連の連鎖反応の後、4個の陽子(p)からヘリウム原子核( )と2個の陽電子(e<sup>+</sup>)と2個の電子ニュートリノ( )が生成されている。このニュートリノの測定強度が予想値よりも有意に小さいというのが太陽ニュートリノ欠損問題である。この問題は、1968年にR.Davisらによって示唆された。R.Davisらは、四塩化炭素615tをいれたタンク内で太陽ニュートリノとの反応で生じるアルゴン原子を測定するという放射化学法と呼ばれる方法を用いて、一定の閾値以上のエネルギーをもつ太陽ニュートリノの積分強度を測定した。その結果、観測した測定強度は標準太陽モデルによる予測値の1/3~1/4しかなかった。その後、カミオカンデ(日本)、SAGE(ロシア)、GALLEX(イタリア)でも同様に、太陽ニュートリノの強度は予測値よりも低く観測され、太陽ニュートリノ欠損問題として確立した。

太陽ニュートリノ振動の確実な証拠は、2001年にスーパーカミオカンデの1258日分のデータとカナダのSNOからの荷電カレント反応の結果を比較することにより示された。SNOはカナダのサドバリー-Creighton鉱の地下2000mにあり、装置中央部の1000tの重水とその外側の5000tの軽水で構成されている。SNOでは、荷電カレント反応(軽水中に9438本の光電子増倍管が取り付けられ、チェレンコフ光のパターンから観測する)、中性カレント反応(反応で生成された中性子を捕らえるために、重水素と中性子との反応で生まれる6MeVの線

を計測したり、 $^3\text{He}$ 中性子カウンターを重水に入れて観測したりする方法などが用いられる)、電子散乱の反応を用いて太陽ニュートリノを捕らえている。スーパーカミオカンデによる電子散乱の結果とSNOからの荷電カレント反応の結果から  $\nu_e$  が  $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$  に変わることが示唆され、更に、2003年のSNOによる中性カレント反応の結果によってより確実なものとなった。

中性カレント反応の結果が全ニュートリノについて測定をしていることから、太陽ニュートリノ ( $\nu_e$ ) が  $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$  に変わり、振動がおきていることがほぼ確実なものと考えられている。しかし、それぞれの実験はニュートリノ検出のエネルギー閾値が異なるため、測定値/予想値のエネルギー依存性も見られる。そこで、これらの測定値を真空中でのニュートリノ振動で説明できると考えると、 $m^2 \approx 10^{-11} \sim 10^{-10} \text{eV}^2$  という解が与えられる。また、物質中での共鳴的ニュートリノ振動(MSW)効果を考慮すると、4つの実験が矛盾無く説明でき、 $m^2 \approx 10^{-5} \text{eV}^2$  あたりに見られるパラメーター領域が得られる。

このように蓄積されたすべての太陽ニュートリノ実験データを総合的に解析すると、ニュートリノ振動パラメーターは大混合角度解が強く示唆される。ニュートリノ振動パラメーターは、混合角の大小、振動する距離によりSMA(Small Mixing Angle)解、LAM(Large Mixing Angle)解、LOW(Low  $m^2$ )解、Just-so(真空振動)解と呼ばれている。これらはニュートリノ振動のエネルギー依存性、物質のニュートリノ振動に与える効果が重要な意味を持っている。

表1.4 太陽ニュートリノ観測結果

実験名	観測手段	エネルギー閾値	観測値/予測値
Homeatake	Cl	814keV	0.34
カミオカンデ	水チェレンコフ	7.0MeV	0.55
SNO	重水チェレンコフ	6.75MeV	0.35
SAGE+GALLEX+GNO	Ga	233keV	0.58
スーパーカミオカンデ	水チェレンコフ	6.5MeV	0.49

## 第2章 K2K実験

K2K実験とは、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構と、岐阜県飛騨市神岡町にある東京大学宇宙線研究所宇宙素粒子研究施設の2地点間で行われる、つくば神岡間長基線ニュートリノ振動実験の愛称である。この章では、K2K実験の装置、現状等について述べる。

### 2.1 K2K実験の概要

K2K実験は1999年6月に始動した実験で、加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験としては世界初の実験である。茨城県つくば市にある、高エネルギー加速器研究機構(以後、KEK)の12GeV陽子シンクロトロン加速器で加速された高エネルギー陽子ビームを用いて、平均エネルギーが1.3GeVの、ほぼ純粋な $\mu$ (98.2%)ビームを生成している。KEK所内に設置された前置検出器及び、岐阜県飛騨市神岡町にある東京大学宇宙線研究所宇宙素粒子研究施設付属の大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置「スーパーカミオカンデ」(以後、SK)にてニュートリノを検出し、その両者の比較からニュートリノの振動の有無を探索・検証する実験である。図2.1に概念図を示す。

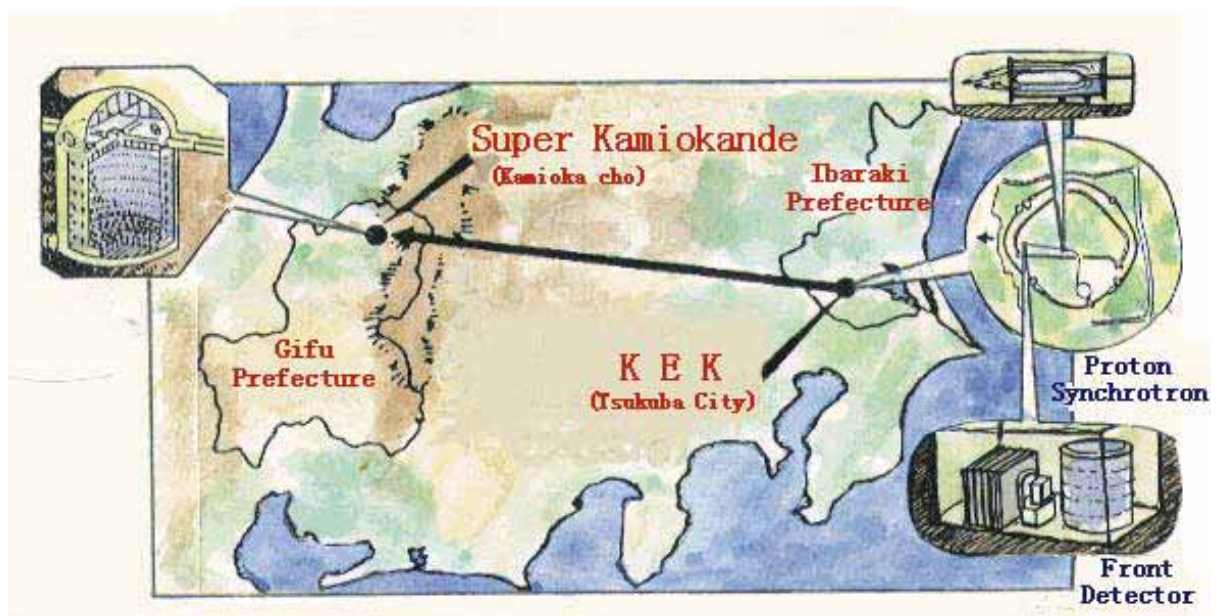


図 2.1 K2K 実験の概念図

KEK所内に設置されたビームモニタと前置検出器では、加速器で生成された直後のニュートリノビームのエネルギースペクトル、角度分布、フラックス、成分を測定し、250km離れたSKで観測されるであろうエネルギースペクトルを予測し、実際に観測されたエネルギースペクトルと比較している。この比較により、ニュートリノ振動の有無を検証し、振動パラメータ(  $\theta^2$ 、 $\sin^2 2\theta$  )の決定を行っている。

## 2.2 振動現象の探索

ニュートリノ振動現象を検証する方法として、appearance 実験(出現検証実験)と disappearance 実験(消滅検証実験)の2つの方法がある。K2K 実験はこの両方法を用いて検証している。以下に appearance 実験と disappearance 実験の2つの方法について述べる。

### ・ appearance 実験

生成したニュートリノが他のフレーバーのニュートリノに振動したとして、その振動先のニュートリノを検出する実験である。3フレーバーで考えたとき、生成したニュートリノが  $\mu$  のとき、 $\tau$  もしくは  $e$  に振動する。しかし、もし  $\tau$  に振動したとしても、弱荷電カレント準弾性散乱(CCQE)で  $\tau$  粒子(質量  $1.77\text{GeV}/c^2$ )を生成するための閾値が  $3.46\text{GeV}$ であるため、K2K実験で生成しているニュートリノではその閾値を超えないため、CCQE反応を起こすことはできない。従って、K2K実験では  $\mu$   $e$  の振動モードのみを検証することになる。また、K2K実験で生成しているニュートリノビームには数%の  $\tau$  が含まれているため、前置検出器でその混入率を測定し、SKでの  $\tau$  の反応を観測、比較することでappearance実験としての検証を行っている。

### ・ disappearance 実験

生成されたニュートリノが振動したとして、その振動先で数が減っていることを確認する実験である。K2K実験では、生成された  $\mu$  の減少の割合を測定して振動現象の検証をしており、次の2段階で解析を行っている。

#### 1. $\mu$ イベント数の比較

前置検出器での  $\mu$  イベント数から、振動現象を起こさなかったときにSKで観測が期待される  $\mu$  イベント数と、実際に観測された  $\mu$  イベント数との比較をし、ニュートリノ振動現象の検証を行う。 $\mu$  イベント数が通常の散乱による減少以上に減っていることを観るのである。

#### 2. $\mu$ イベントのエネルギースペクトルの比較

ニュートリノの減少がニュートリノの振動によるものであるならば、イベント数の減少割合はニュートリノのエネルギーに依存する。前置検出器から予想さ

れる  $\mu$  イベントのエネルギースペクトルと、SKで観測された  $\mu$  イベントのエネルギースペクトルを比較することにより、ニュートリノ振動の有無を検証することが可能である。また、振動パターンをフィッティングすることで振動パラメータを決定することができる。

これらの振動モードに対する K2K 実験の探索領域を図 2.2 に示す。カミオカンデ、スーパーカミオカンデでの観測結果による許容領域も同時に示している。青実線右側の領域が K2K 実験において 90%の信頼度で検出可能な振動パラメータ領域である。Disappearance モードでは、SK での大気ニュートリノの観測から得た許容領域の半分以上を探索できる。

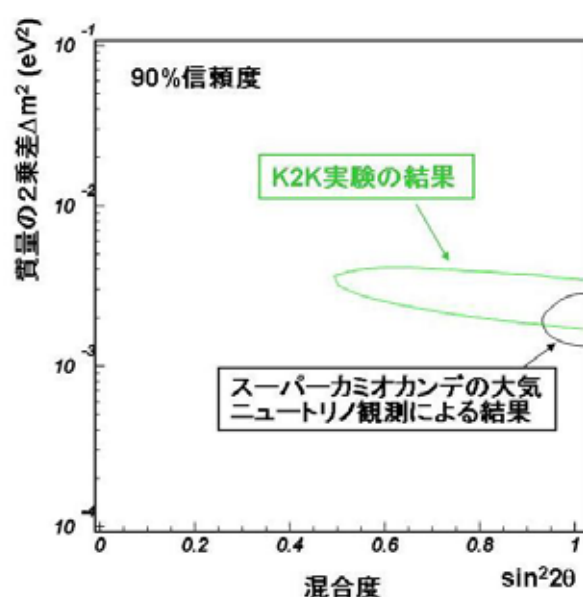


図 2.2 K2K 実験における探索可能なニュートリノ振動パラメータの領域を示した図

## 2.3 実験の構成

### 2.3.1 ニュートリノビームライン

K2K実験ではKEK所内にある12GeV陽子シンクロトロン加速器(KEK-ps)を使用している。この加速器から12GeVに加速された陽子ビームを取り出す。ビームspillは2.2sec毎に1.1  $\mu$  secの時間幅である。ビームの強度はおよそ  $6 \times 10^{12}$ 個/spillで、1spillに約100nsec間隔で50 ~ 60nsecのバンチが9個含まれている。

取り出された陽子ビームは北カウンターホールを通過し、K2K実験用に延長した陽子ビームラインへと導かれる。陽子ビームはそのビームラインを150mほど北に走った後、SKの方向に約90°西に曲げられ、ターゲットステーションへと入っていく(図2.3)。

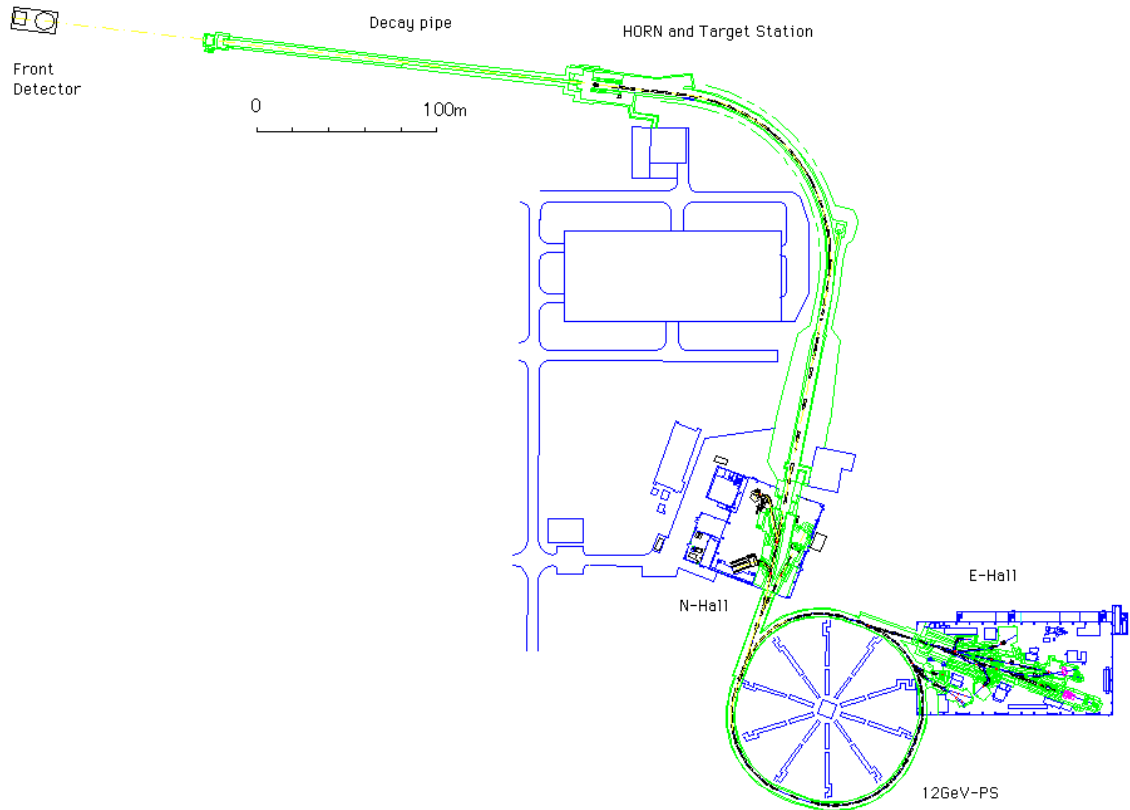


図2.3 ニュートリノビームライン

陽子ビームはターゲットステーションに入った後、電磁ホーンシステム内のアルミニウム標的に照射される。アルミニウム標的は直径3cm、長さ65cmで、上流側と下流側の2つある電磁ホーンのうちの上流側のものと一体となっている。陽子ビームがアルミニウム標的に衝突すると、 $\pi$ 、K中間子等の2次粒子が生成される。生成された2次粒子は図2.4に示すような、電磁ホーンシステムによって作られる磁場により正電荷の粒子のみが選別され、SKの方向に集束される。この電磁ホーンシステムを使用することでニュートリノのフラックスは、電磁ホーンシステムを使用しない場合に比べて14倍に上がる。



## Magnetic Horn system

(for Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment)

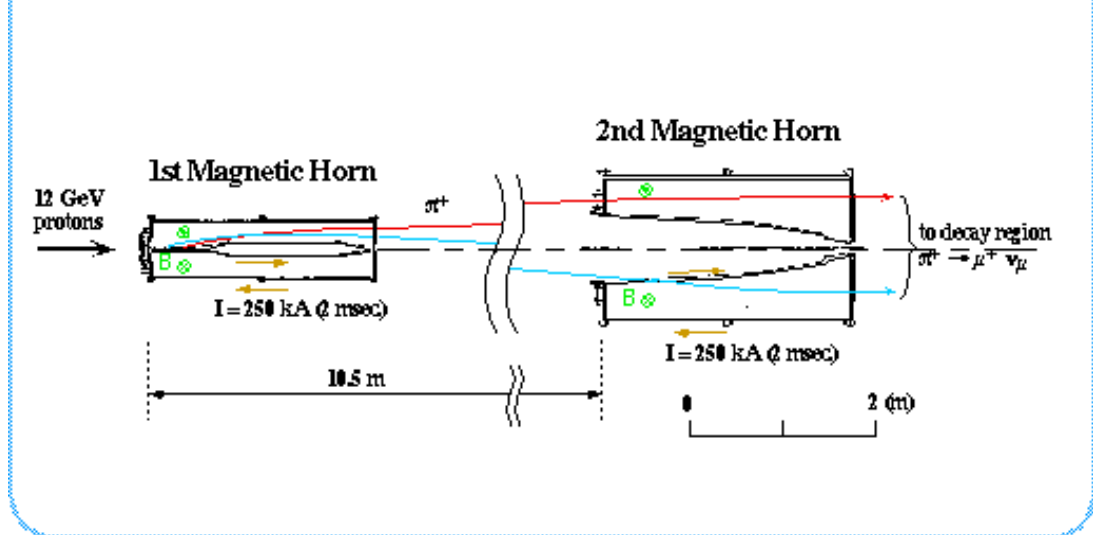


図2.4(a) 電磁ホーンシステム模式図

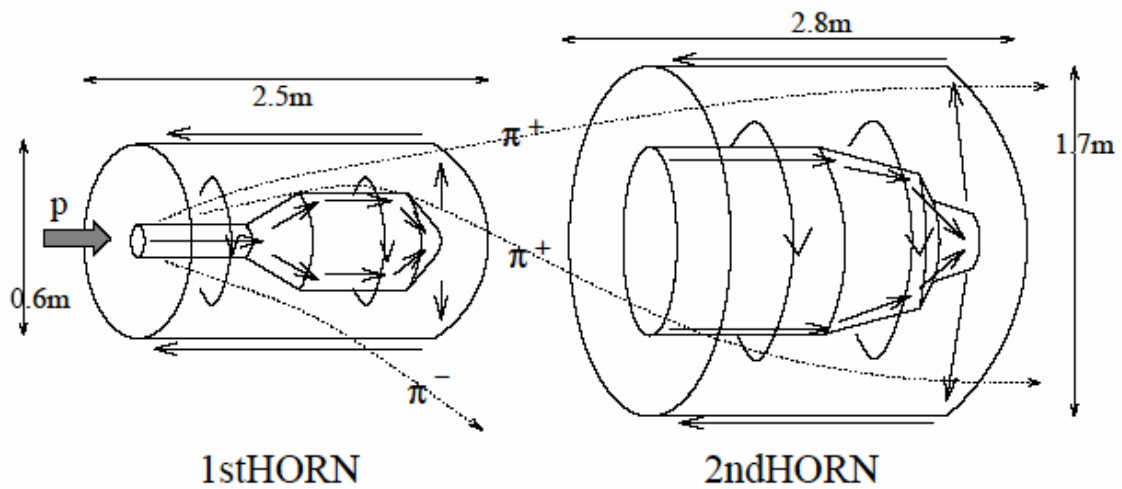


図2.4(b) 電磁ホーンシステム模式図

電磁ホーンシステムの直後には 中間子モニタ(PIMON)が設置されている。PIMONはリングイメージ型ガスチェレンコフ検出器で、チェレンコフ角から運動量分布を、チェレンコフ光の方向からビームラインに対する角度分布を測定している。これらの分布からニュートリノビームの運動量とエネルギーのスペクトルを予測している。

集束された  $\pi^+$  は崩壊トンネル内で次式のように崩壊し、ニュートリノを生成する。



崩壊トンネルの後ろにはビームダンプが設置されており、陽子や、崩壊トンネル内で崩壊

しなかった  $\mu^+$ 等はここで止められる。

ビームダンプの直後には  $\mu$  粒子モニタ(MUMON)が設置されており、spill毎のビームのプロファイル(中心位置、強度変化)を測定していて、ニュートリノビームが神岡に向かっていることを確認している。

MUMONの後ろには長さ100m程度の土層があり、 $\mu^+$ がほぼ全て止められ、前置検出器にはほぼ純粋なニュートリノが入射する。

また、ビームラインで生成されるニュートリノで、 $\mu$ 以外ニュートリノは次式の反応によって生成される。



これらの反応によって生成される  $\mu$ 以外のニュートリノが、 $\nu_e$ が1.3%、 $\bar{\nu}_\mu$ が0.5%含まれていると予想されている。

これらのビームラインの建設及び設計はGPS(Global Positioning System)によって、ビームラインから見たSKの位置の誤差が $\pm 1$ mの精度で行われた。SKで予想されるニュートリノフラックスは、約1kmの範囲でフラットであるので、3mradの精度を保てればよい。MUMONでspill毎にニュートリノビームの方向は測定しており、約1mradの精度でSKにニュートリノビームに向かっていることが確認されている。

## 2.3.2 前置検出器

前置検出器はビームダンプの80m下流、標的から300m下流に位置している。ニュートリノビームはSK方向に発射するため、水平方向から18.8mrad下に曲げられている。そのため、検出器は16m掘り下げられた地下ホール内に設置されている。

前置検出器は図2.5に示すように、上流から、1キロトン水チェレンコフ型検出器(以後、1KT)、Fine-Grained検出器(以後、FGD)の2つから構成されている。これらの検出器ではニュートリノビーム生成直後のエネルギースペクトル、フラックス、 $\nu_e$ の混入率、ニュートリノビームの方向等を測定している。

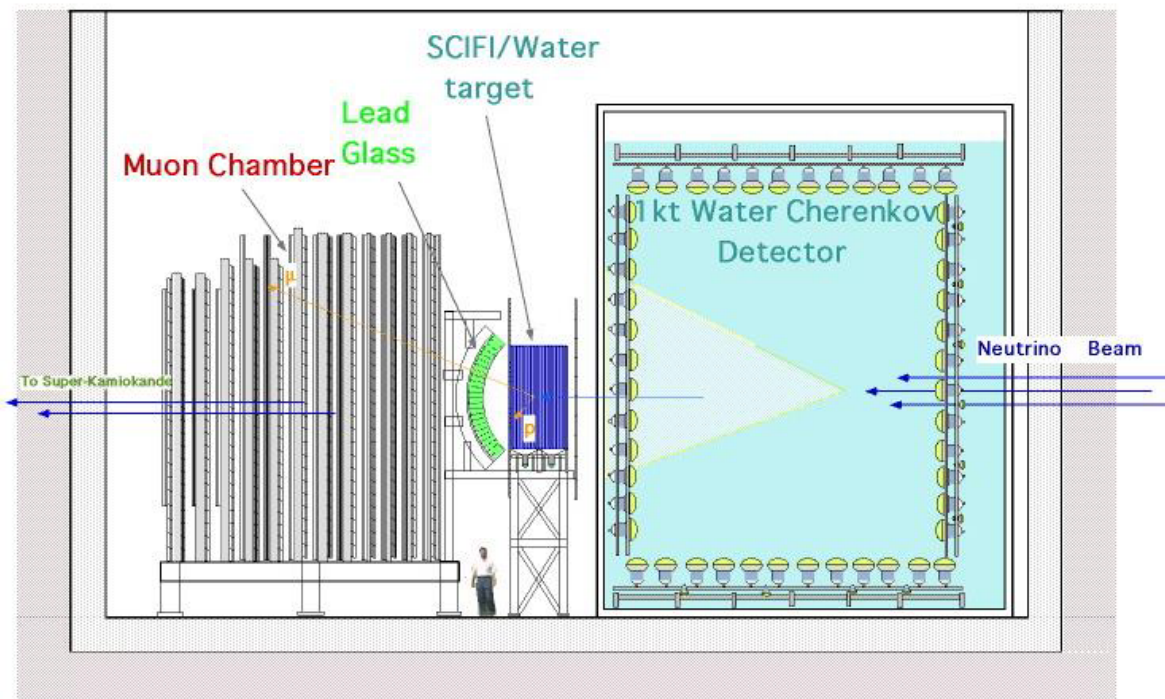


図2.5 K2K前置検出器(2003年10月以前モデル)

(ニュートリノビームは右から入射され、神岡(左)方向へと進む)

### <1KT>

1KTはSKと同型の水チェレンコフ光検出器で、前置検出器の最上流にある。水槽内には1,000 tの超純水で満たされている。水槽は内水槽と外水槽に分かれており、直径20インチの光電子増倍管(PMT)が内水槽の内側に680本、直径8インチのPMTが内水槽の外壁に68本取り付けられている。外壁に取り付けられたPMTは、1KTの外側で相互作用し生成された粒子が水槽内に入って起こしたイベントとニュートリノビームによるイベントとの識別をする役割を果たしている。また、SKと同型の検出器、解析方法にすることで、検出器の持つ系統的な誤差をキャンセルすることができ、振動現象の解析において直接的な比較が可能となっている。

荷電粒子が、物質中を通過する光速以上で通過するときに発生するチェレンコフ光を検出し、その光量分布、時間情報、リングパターンから通過粒子の同定をしている。1KTはニュートリノ反応事象数の絶対値を測定しており、SKでのニュートリノ反応事象数の予測をしている。また、約1%混入している $\bar{\nu}_\mu$ のフラックスも測定している。

### <FGD>

FGDは次のように構成されている。2001年7月以前(K2K - )は、シンチレーティングファイバー飛跡検出器(SFT)、ベトロー・トリガーカウンタ(VETO)、鉛ガラスカロリメータ(LG)、 $\mu$ 粒子飛程検出器(MRD)の4つで構成され、2001年7月以後(K2K - )は、SFT、VETO、

全感知型シンチレータ飛跡検出器(SciBar)、MRDの4つで構成されている。

これらの検出器では、FGD最上流に位置するSFT内の水標的中の核子と  $\mu^-$  とが次式で表される弱荷電準弾性散乱反応(CCQE)を起こして生成した  $\mu^-$  の飛程とニュートリノビームに対する散乱角を測定することができる。

$$\mu^- + n \rightarrow \mu^- + p \quad (2.5)$$

このような反応を選び出すと、検出器で測定した  $\mu^-$  のエネルギー  $E_\mu$  と散乱角  $\theta_\mu$  から次式によりニュートリノのエネルギー  $E$  が求められる。

$$E = \frac{E_\mu m_N - m_\mu^2/2}{m_N - E_\mu + p_\mu \cos \theta_\mu} \quad (2.6)$$

ここで  $m_N$  は核子の質量、 $m_\mu$  は  $\mu^-$  の質量、 $p_\mu$  は  $\mu^-$  の運動量である。FGDでは(2.6)式を用いて  $\mu^-$  のエネルギーの再構成を行っている。

### 2.3.3 後置検出器

K2K実験において後置検出器として使用しているスーパーカミオカンデ水チェレンコフ型検出器は岐阜県神岡町の神岡鉱山の地下1,000mに設置されている。地下深くに位置するため、バックグラウンドとなる宇宙線は強度が地表の $10^{-5}$ 倍、頻度は2Hzと非常に小さくなっている。図2.6に示すように、検出器は高さ41.4m、直径39.3mの円筒形をした水槽で、その中に約50,000tの超純水が満たされている。内部の水槽は光学的に内水槽、外水槽に分かれており、2001年までは直径20インチのPMTが内水層の内壁に11,146本、直径8インチのPMTが内水槽の外壁に1,885本外向きに取り付けられていた。大量のPMTが破損する事故に見舞われた後は、PMTが約47%の本数の状態で測定を行なっている。

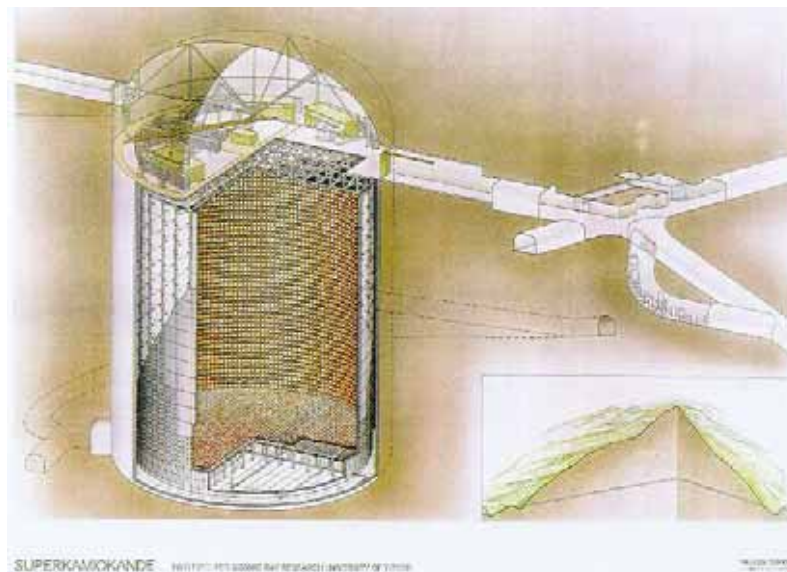


図2.6 スーパーカミオカンデ水チェレンコフ型検出器(SK)

内水槽は粒子の主たる検出器であり、外水槽は岩盤からの $\gamma$ 線や中性子等のバックグラウンド、および外部から入射する宇宙線の除去、また外部に抜ける粒子の識別等に用いられる。スーパーカミオカンデでの弱荷電準弾性散乱反応によるニュートリノイベントは、チェレンコフ光が作るリングパターン等によって $\nu_e$ によるものか、 $\nu_\mu$ によるものかを区別することが出来る。 $\nu_e$ によって $e^-$ が生成された場合、電子はシャワーを起こしながら走るため、チェレンコフリングは幾重にも重なったように観測される。イベント例を図2.7に示す。一方、 $\nu_\mu$ によって $\mu^-$ が生成された場合、相互作用をあまりせず水中を走るため、 $\mu^-$ のみによるリングが見られる。このイベント例を図2.8に示す。このように、リングのタイプによりニュートリノの識別が可能である。

このように識別された $e^-$ 起源のイベントは、 $\nu_e$ の解析に用いられる。また、 $\nu_\mu$ の解析を行うにはエネルギースペクトルを測定しなければならないので、反応点とそこから発生した粒子が全て内水槽に含まれるイベントが用いられる。

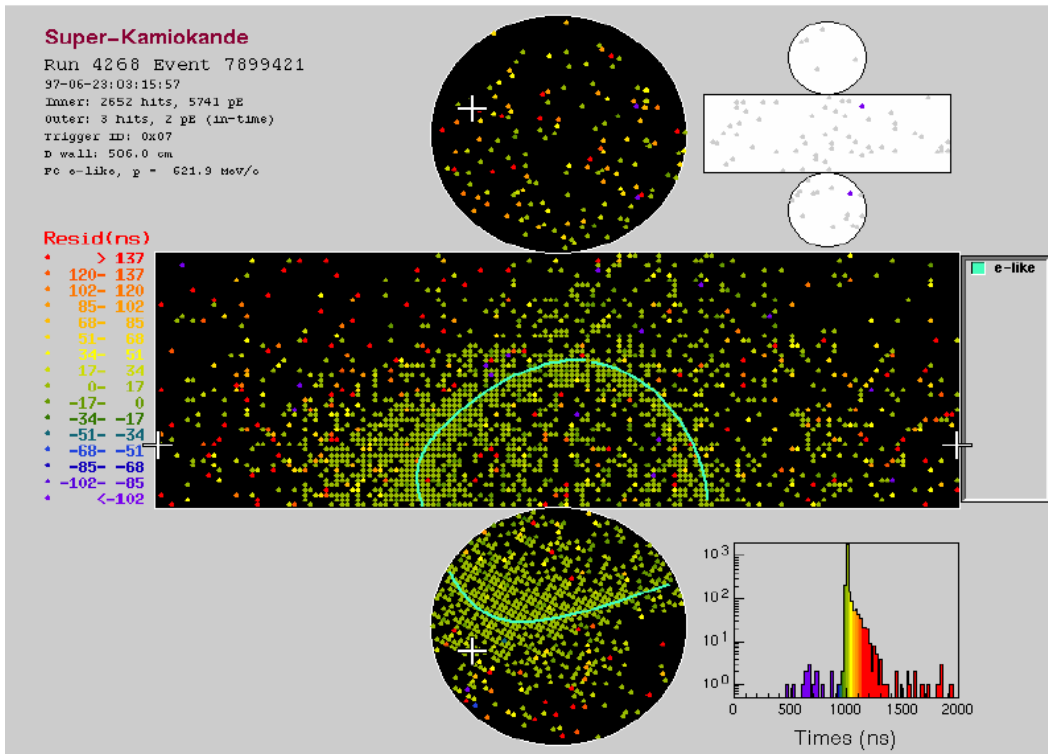


図2.7 eイベントによるチェレンコフ光  
 (複数のチェレンコフリングが重なる)

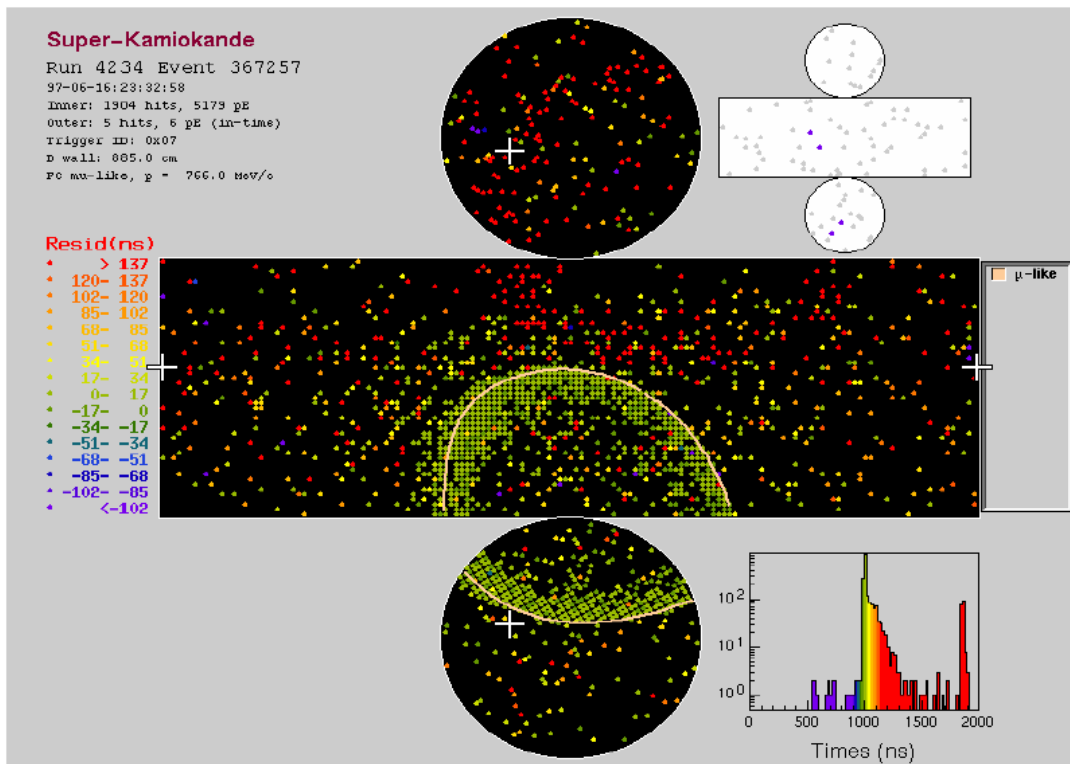


図2.8  $\mu$ イベントによるチェレンコフ光  
 (単一のチェレンコフリングが観測されている)

## 第3章 SciFi 検出器

K2K 実験前置検出器を構成している SciFi 検出器は、ニュートリノ反応事象により発生した粒子の飛跡を検出することを目的に建設されたものである。この章では、SciFi 検出器について、その構造とシグナルの読み出し方法を中心に述べる。

### 3.1 SciFi 検出器の構造

SciFi 検出器の正式名称は「scintillating fiber 飛跡検出器」である。その概観を図 3.1 に示す。

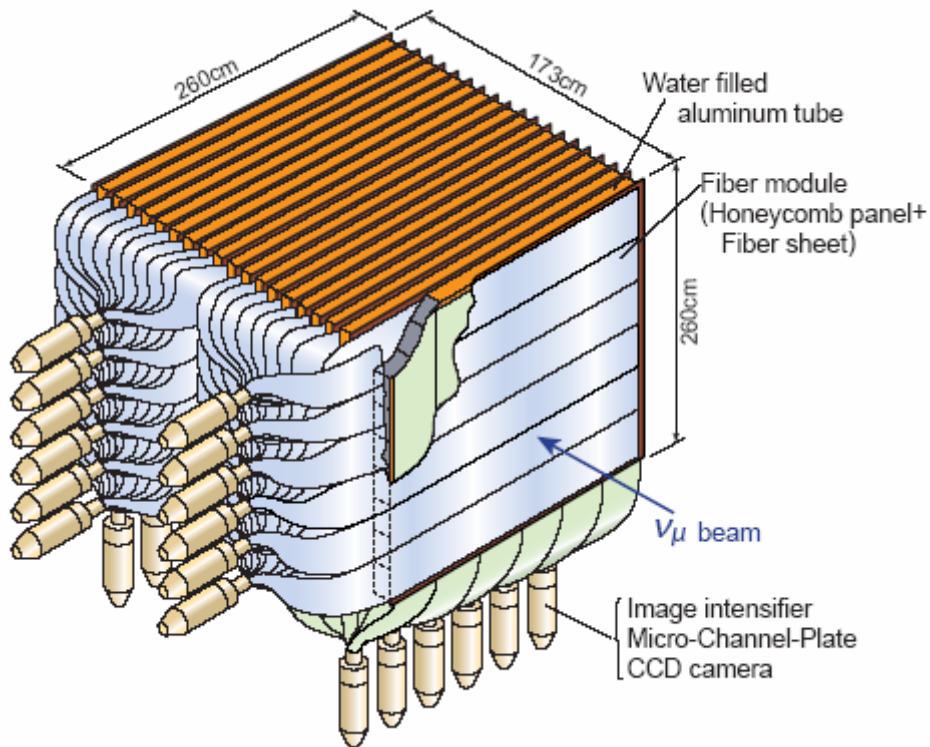


図 3.1 SciFi 検出器概観図

### 3.1.1 Scintillating fiber

Scintillating fiber(以下 SciFi)を使用して作られたのが SciFi 検出器である。SciFi は、荷電粒子が通過すると自らが発光する fiber で、光 fiber の 1 種である。SciFi 検出器に使用されている SciFi は直径が 0.7mm で、Kuraray 社 SCSF78M 改良 11 と呼ばれるものである。Kuraray 社 SCSF78M 改良 11 は、中心部のコアと呼ばれる部分と、それを覆う 2 層のクラッド部分で構成されている。発光はコアで起こり、クラッドでその光を全反射することにより多く伝搬させる。そのため、屈折率は表 3.1 のように fiber の内側より外側が小さくなっている。

表 3.1 Kuraray 社 SCSF78M 改良 11 の材質と屈折率

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

ポリスチレンは 340nm 付近にピークを持つ波長のシンチレーション光を出す。コアに混入されている波長変換蛍光体によって吸収・再放出が段階的に行われ、減衰長が長く伝搬しやすい 430nm 付近の波長へと変換される。

### 3.1.2 SciFi sheet

3.1.1 で述べた SciFi をシート状にしたものが SciFi sheet である。SciFi 検出器では、飛跡の検出効率を上げるために 2 層積みに並べられている。

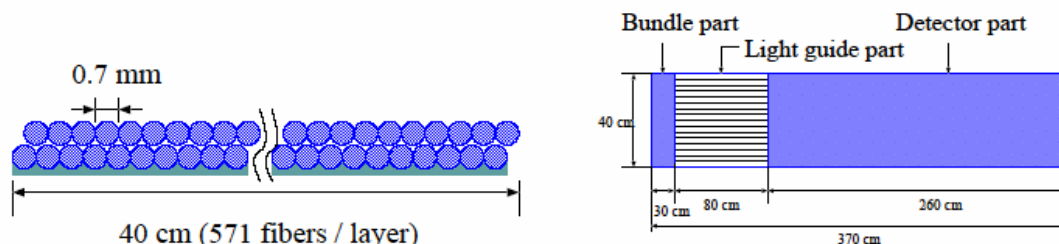


図 3.2 SciFi sheet の断面図(左)と全体図(右)

積みにすることで、少なくとも 1 層目か 2 層目のどちらかの fiber を光らせることになり、検出効率上がる。この SciFi sheet を honeycomb board と呼ばれる板の表と裏に 6 枚づつ、表面と裏面で SciFi sheet が互いに直交するように貼り付けた(図 3.3)board 20 枚が SciFi 検出器内に並べてある。



Board と board の間には、 $241.7\text{cm} \times 16\text{cm} \times 6\text{cm}$  のアルミコンテナが 15 個ずつ垂直に並べてある。このアルミコンテナの中には、ニュートリノの標的として純水が満たされている。純水を標的として設定しているのは、K2K が後置検出器として使用しているスーパーカミオカンデ水チェレンコフ検出器が、純水を標的として使用しているためである。スーパーカミオカンデ水チェレンコフ検出器と同じ標的とすることで、核内効果を同じにし、系統誤差を抑えることがねらいである。

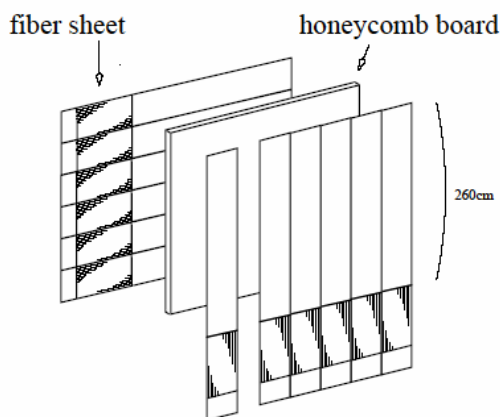


図 3.3 honeycomb board への SciFi sheet の取り付けの様子

### 3.1.3 SciFi bundle

SciFi sheet の読み出し部分は 5 分割され、図 3.4 で示すように円形(直径 10cm)に組まれている。これを SciFi bundle という。SciFi sheet 10 枚分が 1 つの bundle に組まれ、240 枚の SciFi sheet は最終的に 24 個の SciFi bundle となって読み出される。円形に SciFi bundle が組まれている理由は、読み出し器である IIT(後述)光電面が直径 10cm の円形だからである。

また、SciFi bundle 内での SciFi sheet 間の光学的分離のため、 $200\ \mu\text{m}$  のアクリルフィルムが間に挿入されていて、SciFi bundle の表面は、専用の研磨機で研磨されている。

SciFi bundle をファイバーバンドル、バンドルと呼ぶこともある。

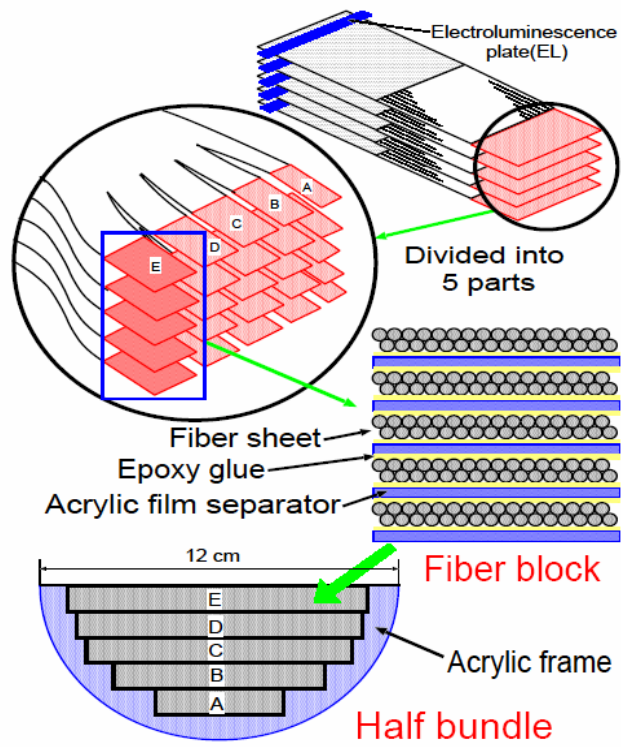


図 3.4 SciFi bundle の製作過程を表した図

### 3.1.4 IIT

SciFi 検出器は飛跡検出器である。飛跡を検出するためには SciFi の位置情報と輝度情報が必要である。そのため、SciFi 検出器の読み出しには IIT-CCD チェーンが使用されている。通常、前段 IIT、後段 IIT、光学レンズ、CCD カメラのセット(IIT-CCD チェーン)を指して IIT と呼んでいる。

前段、後段 IIT(Image Intensifier Tube)は光電子増倍管と同様に、微弱な光を光電子に変換し、高圧電場により増幅する装置である。しかし、光電子増倍管とは違い、位置情報を保存する。そのため、2次元の画像情報が得られ、SciFi bundle のどの fiber が光ったかが特定でき、荷電粒子の SciFi 検出器内での飛跡を再構成できるのである。

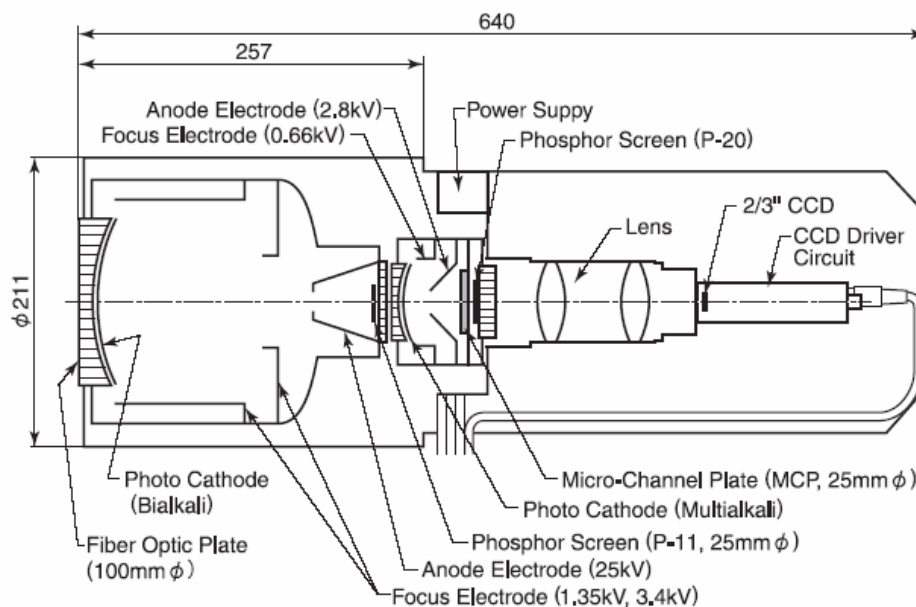


図 3.5 IIT-CCD チェーンの模式図

(前段の静電型IIT、後段のMCP型IIT、光学レンズ、CCDカメラによって構成されている)

IIT への印加電圧はゲート信号がかけられていて、2.2sec ごとに発射されるニュートリノビームのタイミングに合わせてあり、S/N 比を高める工夫が施されてある。ゲート信号の時間幅は 100  $\mu$  sec で、これは、IIT 後部の蛍光体の減光時間 100  $\mu$  sec にあわせてある。

光信号は IIT による増幅後、光学レンズを通して、画像のサイズを 1/3 に縮小され、CCD カメラによって撮影される。CCD カメラは 768  $\times$  493 画素(pixel)の解像度をもっており、1pixel は実空間上の \* \* \* \* \*  $\mu$  m に相当する。

## 3.2 SciFi 検出器のデータ取得

CCD カメラからのビデオ信号は CCD 画面の画素毎に 24 台の Flash ADC(Analog to Digital Converter)によって 8bit(256 階調)の輝度情報に変換され、CCG(Clock and Coordinate Generator:サンプリング用クロック信号及び座標データ生成モジュール)により座標情報を与えられ、FIFO(First In First Out)メモリに記録された後、ワークステーションに送られる。

ワークステーションでは、輝度情報に対して適当な閾値(threshold)を設定し、その threshold を超える輝度情報を持つ pixel のデータを記録する。これを hit pixel と呼び、ニュートリノデータの解析では、hit pixel から飛跡を再構成している。

また、光信号はクラスターとして pixel の集合として CCD 画面上に現れ、そのクラスターを構成する pixel の数(Npix : Number of pixels)によってデータ解析は行われている。

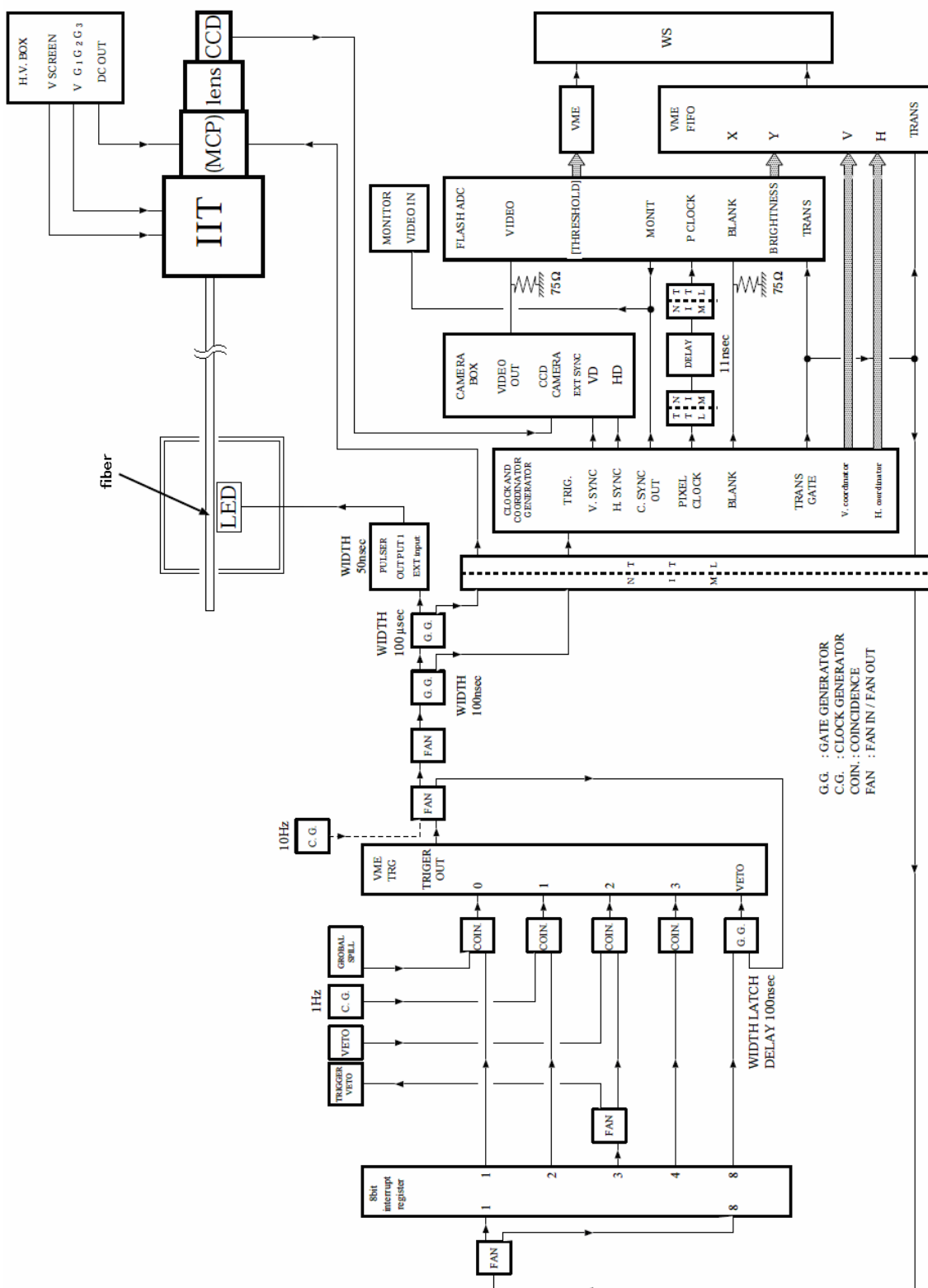


図 3.6 SciFi 検出器データ取得の setup

### 3.3 ファイバーバンドルの位置較正

以後 SciFi bundle を意味しファイバーバンドルと表記する。尚、それを略してバンドルと表記することもある。

SciFi 検出器では、荷電粒子の通過による位置情報を IIT を用いて、SciFi bundle 表面での光の位置と輝度情報として読み出している。従って、荷電粒子が通過した fiber を特定するためには、各 fiber と CCD 画面上の座標との対応が正確である必要がある。SciFi 検出器では、CCD 画面上での SciFi bundle の位置を較正するため、EL (Electro-Luminescent plate) と呼ばれる蛍光版を利用している。SciFi sheet の片側 1 層の両端と 10 本ないし 20 本の間隔で 1 本を EL によって光らせる(図 3.7)。

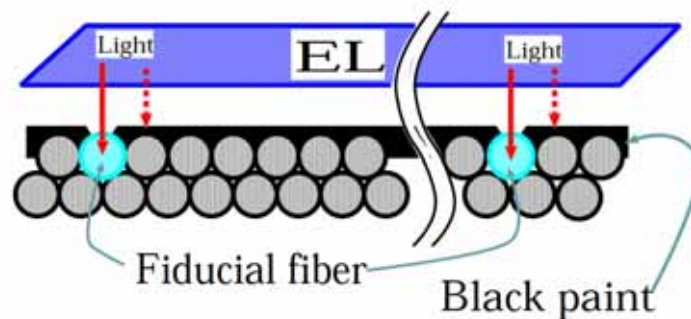


図 3.7 EL によって fiber を光らせるときの模式図

各 IIT に対して、ファイバーバンドルがどのように接しているのかを示す map 情報が存在し、SciFi データの解析に用いられている。ファイバーバンドルと IIT 光電面との位置関係がずれると、荷電粒子の通過位置を正しく算出できなくなるので、EL を光らせ、特定の fiber を光らせることで map 情報を修正し、位置較正をしている。

通常ファイバーバンドルと IIT 光電面の位置関係はずれないと考えられ、K2K 実験が開始されるときに調べられた結果でもずれなかったため、EL はニュートリノ run の開始時と終了時に光らせるだけである。従って、地震等のアクシデントで、万が一、ニュートリノ run 中にバンドルがずれても、ずれた時刻は特定できず、解析で使用する map 情報を使い分けるべきタイミングが不明であった。

## 第4章 改善前の IIT 性能モニタ

IIT の性能をモニタすることは、本研究による新しいモニタシステムの導入前も行われてきた。モニタに使用してきた手段は宇宙線やニュートリノ run 中のヒットである。この章では、LED を使用したモニタを導入する前のモニタについて述べる。

### 4.1 ヒット数モニタ

ニュートリノビームは 2.2sec 毎に  $1\mu\text{sec}$  の時間幅で入射される。ニュートリノが入射されている時間を on spill、それ以外を off spill と呼んでいる。Off spill 中に、クラスター(塊)として IIT の CCD 画面上に出現するヒットの数(noise のヒットのみと考えるとよい)を数えてモニタするのがヒット数モニタである。図 4.1 にヒット数モニタを載せる。横軸が時間(hour)で、0 が現在を、-20 は 20 時間前を表す。縦軸は各 IIT の CCD 画面上の 1spill(1 イベント)あたりの平均ヒット数である。このヒット数モニタは、1sub run file(1000spill) 毎に 1plot 追加し、更新される。IIT が安定していれば、出現するヒットの数も安定しているはずだという考えのもとに作られ、使用されてきた。図 4.1 に IIT 番号 1 をサンプルとして実際に稼動しているときのものを載せる。途中 plot した点が消えているのはニュートリノビームの run が止まっていたからである。

このヒット数モニタは安定していることは確認できるが、値が変動したときにはその変動の程度は gain の変動を反映したものではないため、ニュートリノイベントの解析には利用できない。このヒット数モニタは IIT の gain の安定性に関してモニタできていない点が問題点である。

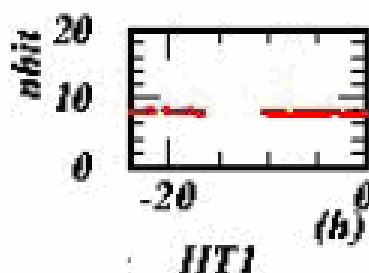


図 4.1 ヒット数モニタ

(縦軸はクラスターとして認識した数、横軸は時間(hour)で 0 が現在を-20 は 20 時間前を表す。途中で plot が消えているのはニュートリノビームの run が止まっていたからである。)

## 4.2 光量モニタ

4.1 のヒット数モニタだけでは、IIT の gain の安定性はモニタできない。Gain の安定性をモニタするために作られたのが Npix モニタである。Npix とはヒット認識されたクラスターを構成する pixel の数(Number of pixels)である。図 4.2 に IIT 番号 1 を例として実際に稼動しているときのものを載せる。図 4.2 の縦軸は CCD 画面上でヒット認識されたクラスターの 1spill あたりの Npix の合計(total Npix)、横軸は図 4.1 のヒット数モニタと同様、時間(hour)を表す。尚、図 4.1 と同様に途中で plot が消えているのはニュートリノビームの run がと止まっていたからである。この Npix モニタもヒット数モニタと同様に 1sub run file(1000spill)毎に 1plot 追加し、更新される。IIT の gain が変化すれば、Npix 値も変化するので、IIT の gain の安定性をモニタすることができる。しかし、一定の光量を入射しているわけではないので、安定性はモニタできても、gain の変動を正しくモニタしているとは言えないので、何らかの原因による変動、変化の有無のみをモニタできるにすぎない。

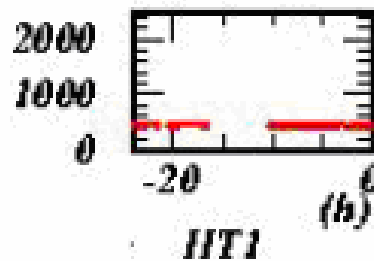


図 4.2 Npix モニタ

(縦軸は認識されたクラスターの pixel 総数(Number of pixels)、横軸は時間(hour)で 0 が現在を表し、-20 は 20 時間前を表す。途中で plot が消えているのはニュートリノビームの run が止まっていたからである。)



### 4.3 宇宙線を使用したモニタ

4.1、4.2 はニュートリノ run 中に使用していた。しかし、IIT の性能をモニタするにはそれらだけでは不十分である。そのため、実際には、主に宇宙線を用いて IIT の性能の安定性をモニタしていた。宇宙線が SciFi に落とすエネルギーは最小電離作用をする粒子(MIP)である。安定した光源を利用して、ゲインの安定性として 4.2 と同様に  $N_{pix}$  値をモニタしていた。

また、SciFi 検出器を通過した宇宙線のデータを使用するため、飛跡上にないヒットを noise であるとし、1 トリガーあたりの noise の数(以後 noise rate)もモニタしていた。そして、飛跡があるので、ヒット認識していなければならない場所にヒットが存在しているかどうかを調べることで、IIT のヒット検出効率(以後 efficiency)もモニタしていた。図 4.3 に IIT 番号 1 を例として宇宙線によるモニタの例(月毎にまとめてある)を示す。図 4.3 の上段は  $N_{pix}$ 、中段は efficiency、下段は noise rate をそれぞれ縦軸にとってモニタしたものである。

宇宙線のデータをとる機会はニュートリノビームの出ていない時間に限られ、加速器のメンテナンスをする週 1 日の間隔でしかデータがとれず、ニュートリノ反応事象がおきている最中の IIT の性能はモニタすることができていなかった。1 週間単位でのモニタはできていたが、1 週間のリズムで IIT の性能が変動していたとしても、それはモニタできていなかったのである。

ニュートリノビームが出ている最中の IIT の性能の様子を知ることが必要であるにも関わらず、それに至っていなかったのが問題点であった。

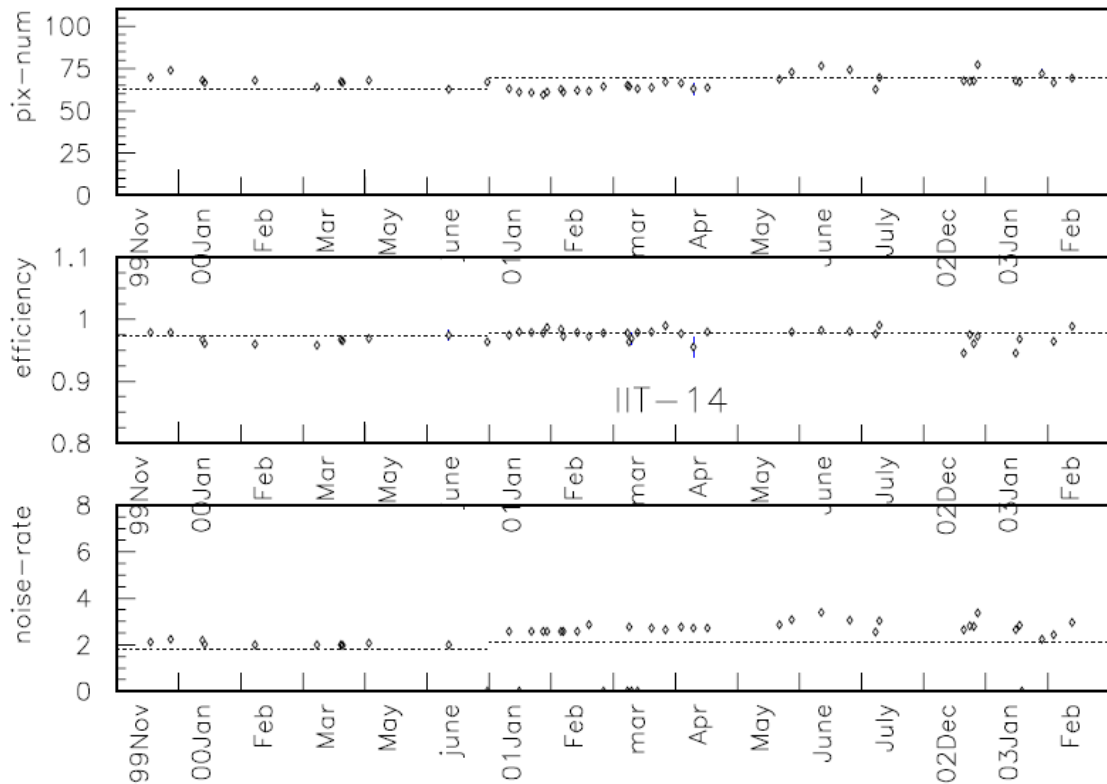


図 4.3 宇宙線によるモニタ(IIT 番号 1)

(上段は宇宙線によるクラスターの平均  $N_{pix}$ 、中段は検出効率、下段は noise クラスターの数の平均値をそれぞれ縦軸にとったもので、横軸はいずれも時間(month))

## 4.4 新しいモニタシステムの導入

これまでの K2K・SciFi 検出器 IIT の性能モニタは、宇宙線によりゲインの安定性、efficiency、noise rate を週 1 回の頻度で、ニュートリノ run 中には noise によるヒットをモニタしていた。週 1 回の宇宙線モニタでは、リアルタイムモニタにはならず、ニュートリノ run 中に noise のヒットのみをモニタしても、ゲインの安定性や efficiency をモニタすることにはなっていない。

本研究では新しいモニタシステムとして、LED を用いた IIT のゲインの安定性、efficiency、それらに加えて、ファイバーバンドルと IIT の光電面との位置関係をニュートリノ run 中に連続してモニタするシステムを構築した。次章でそれらについて述べる。

## 第5章 LED を用いた IIT 性能モニタ

本研究の目的は、これまで使用されてきた IIT の性能モニタにおける諸問題を解決することである。その諸問題を解決するために導入したのが、LED を用いたモニタである。この章では本研究で導入した、LED を用いた IIT 性能モニタがどのようなモニタであるのかを中心に述べる。

### 5.1 セットアップ

LED を用いた IIT 性能モニタは、ニュートリノビームが出ている on spill trigger ではなく、ニュートリノビームが出ていない off spill trigger を pulse generator に入力し、LED を光らせる仕組みである(図 5.1)。off spill trigger を使用することで K2K 実験におけるニュートリノ反応事象への影響は出ない。

IIT には fiber bundle がセッティングされており、モニタに使用する LED は各 fiber bundle に対して 1 個ずつ取り付けられた(図 5.2)。即ち、IIT1 本に対して LED1 個を使用している。

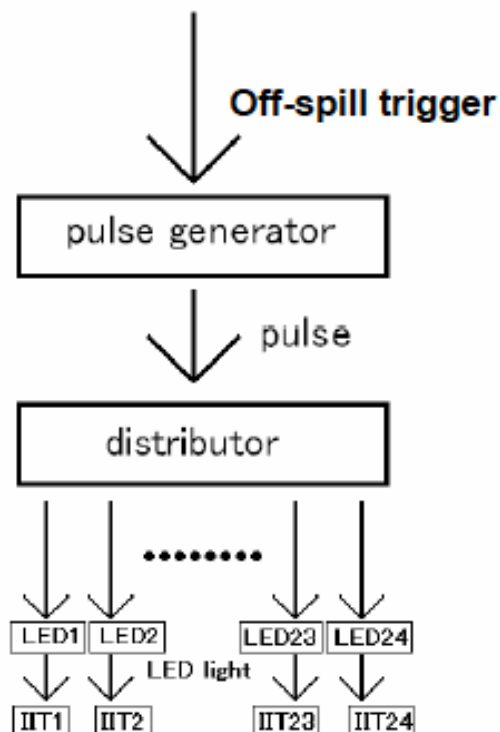


図 5.1 LED を光らせる setup

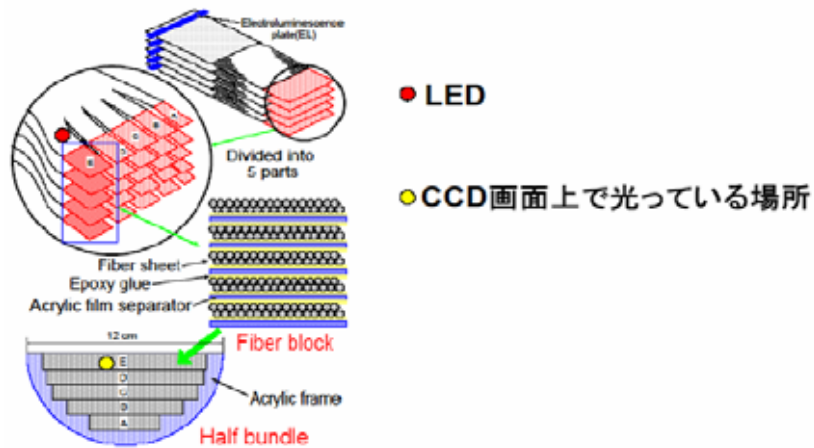


図 5.2 SciFi bundle と LED

Pulse generator を使用して LED を光らせるのだが、pulse generator には 24 個の出力端子がないので、24 個の LED を同時に光らせることは不可能である。そこで、distributor(NIM module) (図 5.3)を使用することで 24 個の LED を同時に光らせるようにした。distributor は linear fan out の機能を持っており、1 個の入力チャンネルと 26 個の出力チャンネルがある。この distributor に関しては 6.2 で述べる。

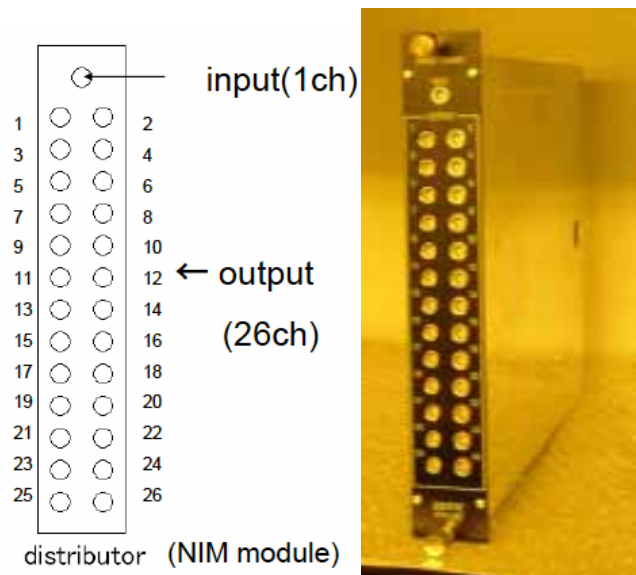


図 5.3 distributor(前面から見た図)

## 5.2 distributor

distributor を使用して pulse generator から出力された pulse 電圧を 24 個の LED に分配する。オシロスコープで調べた結果、モニタ用に使用している distributor は入力電圧の半分の電圧が出力されることが判った。また、出力する電圧に限界を持っており、最高で 1.3V であることが判った(図 5.4)。

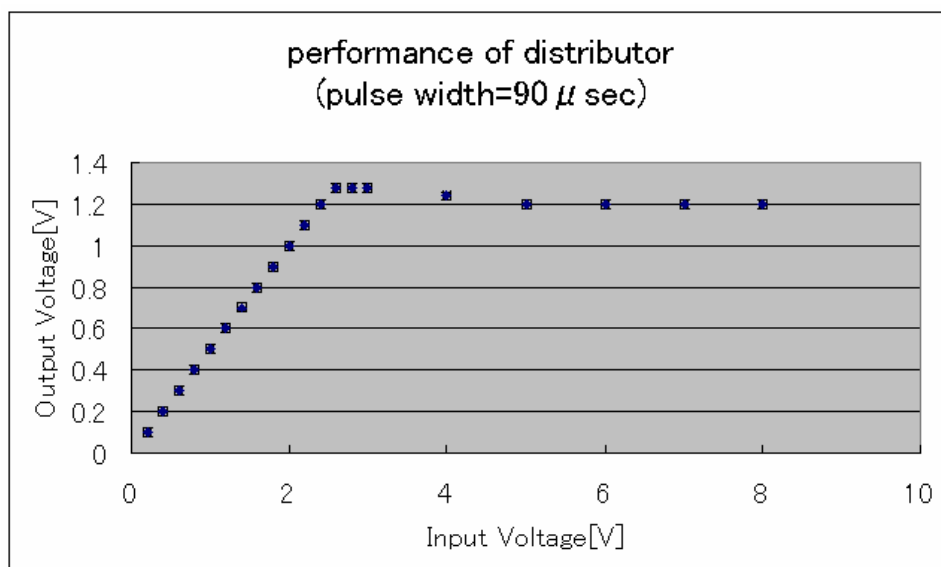


図 5.4 distributor の反応

従って、LED には 1.3V までしか電圧が印加できない。発光量を調整するには(特に発光量を上げるには)LED に送る pulse 電圧の時間幅(width)を調整することになる。実際に width を変えて確認した結果のうち、IIT 番号 4 の場合を例として図 5.5 に載せる。図 5.5 の横軸は LED に送り込む pulse の width[ $\mu$  sec]、縦軸は Npix 値である。Width に比例して Npix 値が変化していることが確認できる

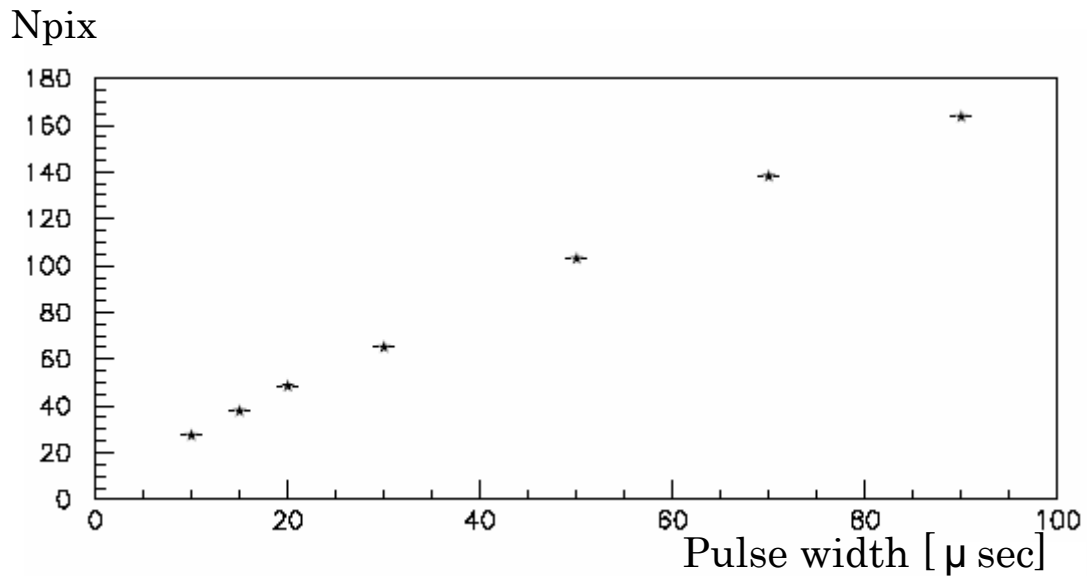


図 5.5 LED への pulse 電圧の width[ $\mu$  sec](横軸)と Npix(縦軸)  
(pulse の時間幅に比例して Npix 値が変化している)

### 5.3 LED

LED の付いた器具は、LED と抵抗の付いた回路部分と fiber1 本を挟み込むための溝が掘ってある底の部分の 2 個 1 セットである(図 5.6)。LED の回路は抵抗 1 個がついたシンプルなもの、モニタでは 750 の抵抗を使用している(図 5.7)。第 6 章で述べる予備実験に関しては、抵抗は 997 を使用した。また、実際に SciFi 検出器に取り付けた状況を図 5.8、図 5.9 に載せる。図 5.8 は X 層をしたから見たもの、図 5.9 は Y 層を上から見たものである。

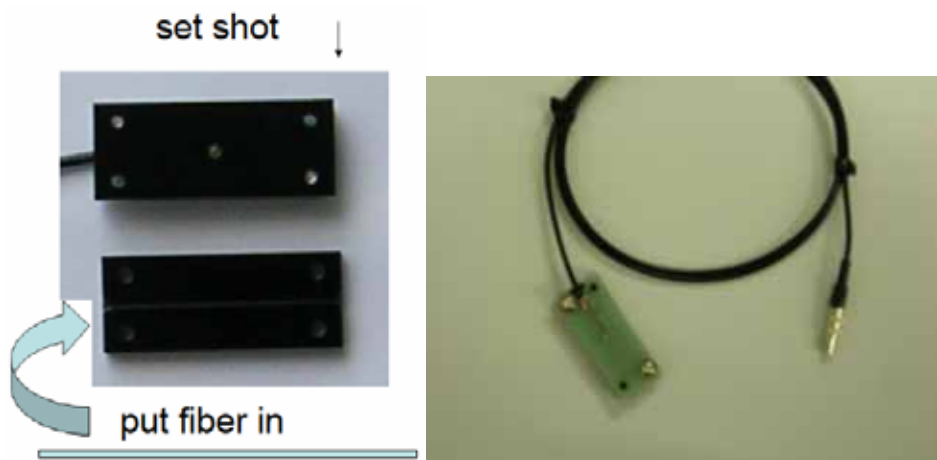


図 5.6 LED set

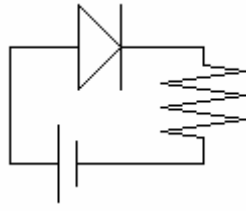


図 5.7 LED の回路図  
(抵抗の大きさは 750 、第 6 章での予備実験では 997 )

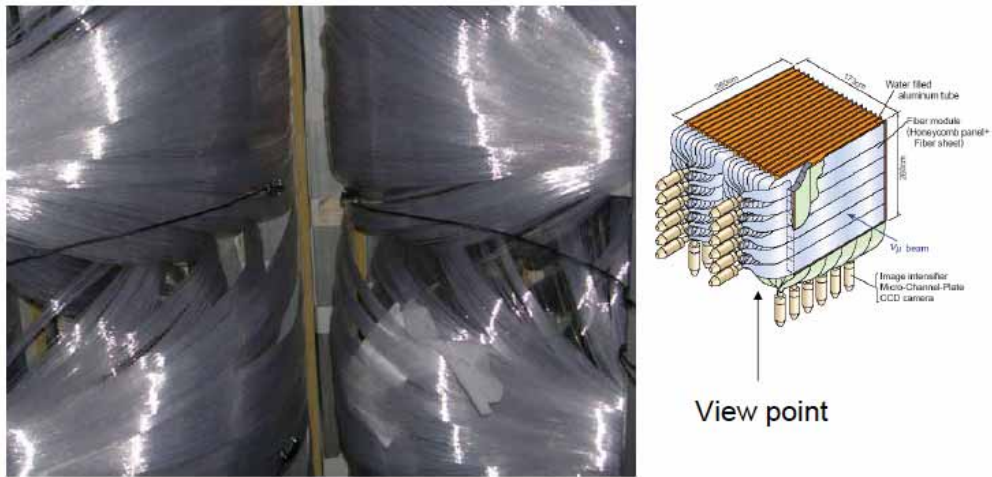


図 5.8 LED install(X-layer)

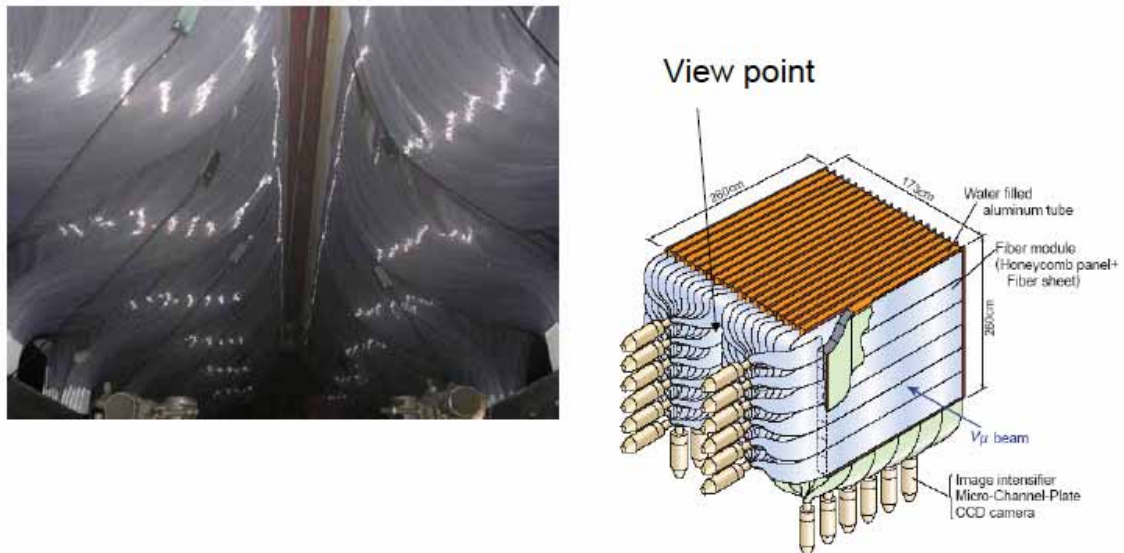


図 5.9 LED install(Y-layer)

## 5.4 LED モニタにおける efficiency と noise rate

イベント毎に LED が光るので、1 file に書き込まれたイベント数に対して、IIT が LED 光を何回認識したかでヒット検出効率(accuracy)を定義した。例えば、1 file に 1000 イベント分データが書き込まれ、LED 光を 969 回認識した場合、accuracy=0.969 であるとする。

LED 光であるかどうかの認識方法は、各 IIT に対して LED 光の中心位置をあらかじめ出しておき、その中心から一定の範囲内で最大のクラスターサイズを持つものを LED 光であるとしてカウントするという方法である。図 5.10 は 1000 イベント分の積分画像で、LED の光がどの位置であるかを目でみて確認するためのものである。図 5.11 は図 5.10 を X 軸に射影したもの、図 5.12 は Y 軸に射影したものである。LED 光の中心は簡単に探すことができた。

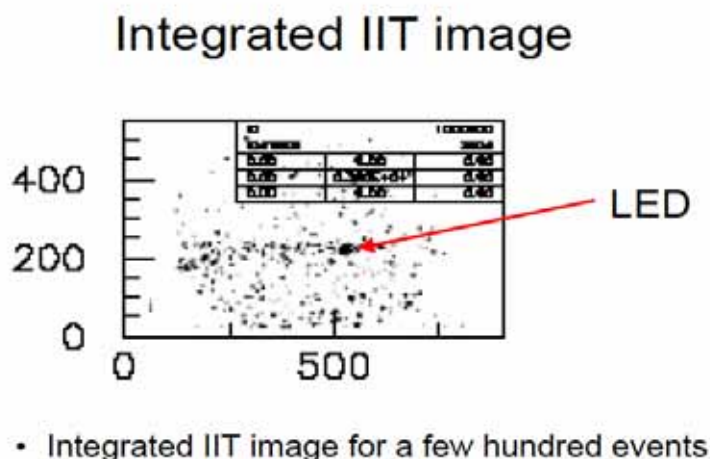


図 5.10 IIT の CCD 画面をグラフ上に表したもの(1000 イベント分を積分)  
(縦軸は CCD-y、横軸は CCD-x)



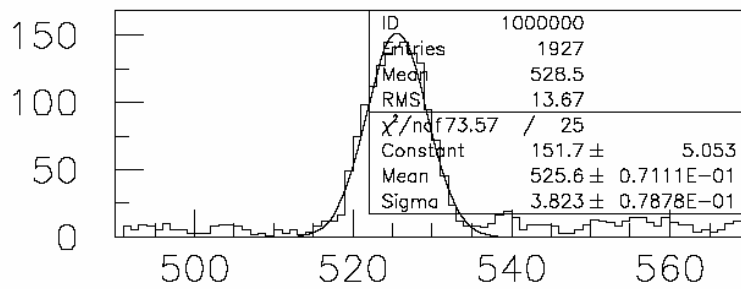


図 5.11 図 5.10 を X 軸に射影

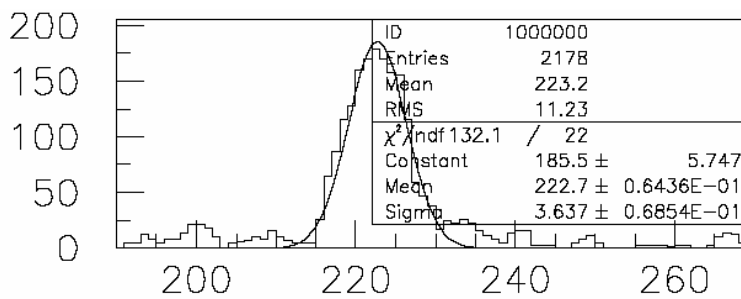


図 5.12 図 6.10 を Y 軸に射影

## Npix distribution in LED region

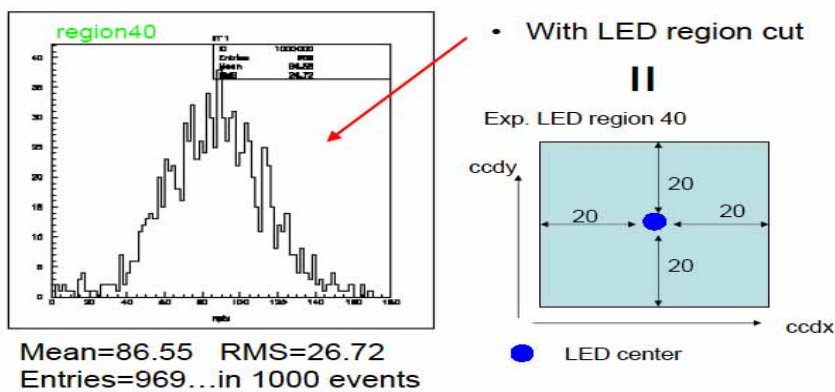


図 5.13 efficiency と LED 領域の定義の説明図

(LED 光の中心座標から 5sigma をとり LED 領域とし、その中で最大の Npix をもつクラスターを LED 光としてモニタ用のデータとして使用する)  
(1000 イベント中 969 回認識した場合 efficiency=0.969 とする)

図 5.13 は最大のクラスターを探す領域の定義と efficiency を表したものである。図 5.11、図 5.12 で探した LED の中心座標から片側 5sigma(単位は pixel)をとり、それを LED 領域とし、LED 領域の中で最大の Npix 値をもつクラスターを LED 光であると定義しイベントごとに選出する。その後 1000 イベント毎に平均値を計算し、ディスプレイ上に plot する。また、LED の領域外のクラスター全てを noise のヒットであるとし、各 IIT の CCD 画面上にある全ての noise クラスターの数数を数えて、イベント数(=1000)で割り、noise rate と定義した。

2004 年 10 月 26 日~2004 年 11 月 8 日の期間について、図 5.14 に、IIT 番号 10 を例に efficiency(上段)、と noise rate(下段)のモニタをまとめたものを載せる。途中 plot 点がないのはニュートリノビームの run が止まっていたからである。また、IIT 番号 4 については SciFi 検出器の読み出し電子回路の周辺の温度の変化のグラフ(温度モニタ)を付加して図 5.15 に載せる。図 5.14 では IIT 番号 10 は安定して動いている様子が見える。図 5.15 では IIT 番号 4 が安定していないように見える。

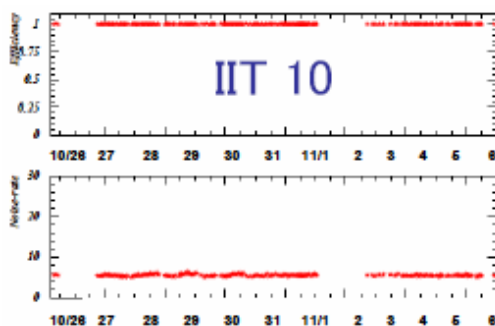


図 5.14 IIT 番号 10 の efficiency(上段)と noise rate(下段)  
(横軸は時間(日付)、安定している様子が見える。)

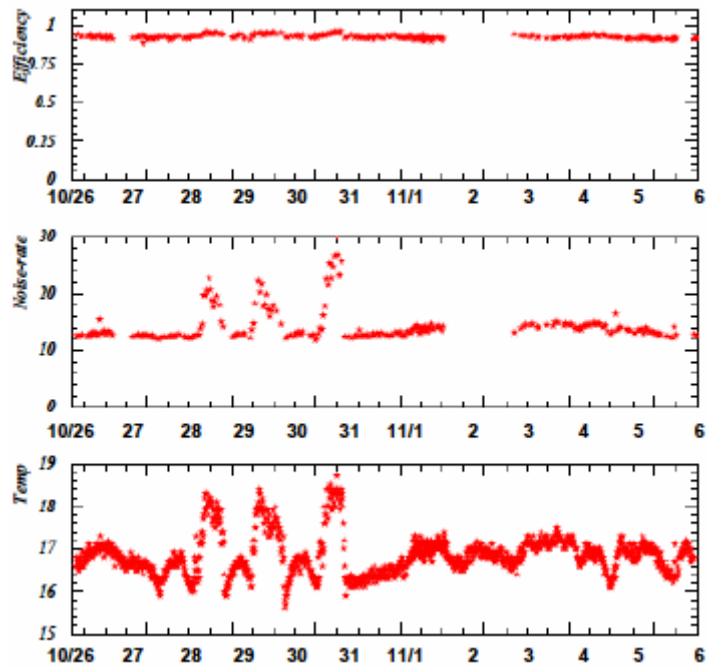


図 5.15 IIT 番号 4 の efficiency モニタ(上段)、noise rate モニタ(中段)と  
温度モニタ(下段)

(横軸はいづれも時間(日付)、温度の変化とともに noise rate が変化している。)

Noise rate が大きく変化している様子が 2004 年 10 月 28 日から 10 月 31 日の間でモニタされている。その原因は、図 5.15 の温度モニタから、noise rate は読み出し電子回路の周辺の温度の変化による影響であると考えられる。従って、その分を考慮すれば、IIT そのものはこの期間は安定していたのではないかと考えられる。

そこで、温度依存による noise の影響を抑えることができるかどうか、光量の閾値 (threshold : ADC で 0 ~ 255) を変えて調べてみた。Threshold の値を Default 値 (IIT 番号 4 に対しては 9) から 1 ずつ上げて default 値 + 10 まで efficiency と noise rate の変化を温度が、普段の 16 のときのデータと、最も温度が高くなったときの 19 のときのデータと比較した。表 6.1 に IIT4 の場合のものを示す。また、表 5.1 をグラフ化したものを図 5.16、図 5.17 に載せる。

表 5.1 threshold の変化と efficiency、noise rate

Threshold の変更値	16		19	
	Efficiency	Noise rate	Efficiency	Noise rate
+0(default=9)	0.997 ± 0.002	12.393 ± 0.111	1.000 ± 0.000	25.524 ± 0.160
+1	0.997 ± 0.002	8.656 ± 0.093	1.000 ± 0.000	10.513 ± 0.103
+2	0.997 ± 0.002	6.260 ± 0.079	1.000 ± 0.000	7.091 ± 0.084
+3	0.994 ± 0.002	4.682 ± 0.068	0.989 ± 0.003	5.361 ± 0.073
+4	0.991 ± 0.003	3.706 ± 0.061	0.984 ± 0.004	4.253 ± 0.065
+5	0.985 ± 0.004	3.074 ± 0.055	0.983 ± 0.004	3.393 ± 0.058
+6	0.979 ± 0.005	2.495 ± 0.050	0.973 ± 0.005	2.687 ± 0.052
+7	0.975 ± 0.005	2.083 ± 0.046	0.967 ± 0.006	2.187 ± 0.047
+8	0.965 ± 0.006	1.753 ± 0.042	0.963 ± 0.006	1.829 ± 0.043
+9	0.955 ± 0.007	1.475 ± 0.038	0.951 ± 0.007	1.531 ± 0.039
+10	0.943 ± 0.008	1.306 ± 0.036	0.939 ± 0.009	1.325 ± 0.036

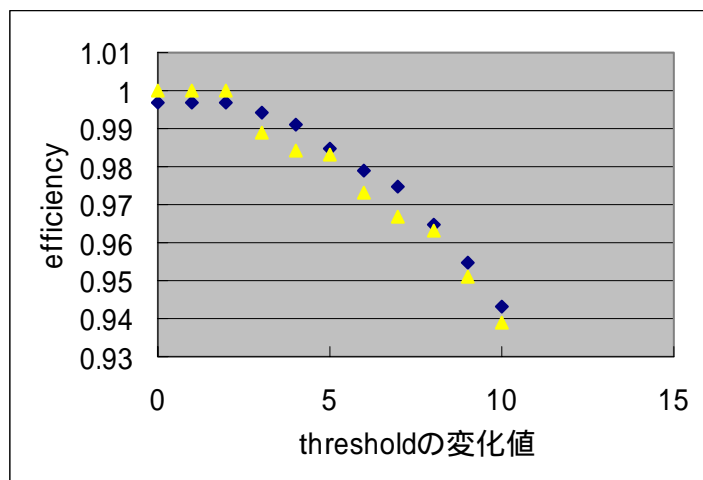


図 5.16 threshold の変化と efficiency の変化  
(threshold 値の増加とともに efficiency が落ちている)

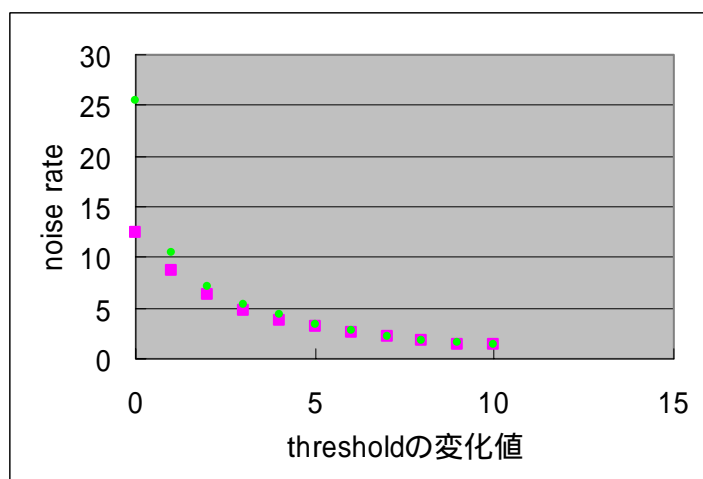


図 5.17 threshold の変化と noise rate の変化  
(threshold 値の増加により noise としてヒット認識する数が減っている)  
( と■が 16 、 ▲と●が 19 のデータを表す)

図 5.16、5.17 は と■が 16 、 ▲と●が 19 のデータである。IIT 番号 4 の場合、ピクセル数を数えるときの threshold を 2 上げると、efficiency の平均値が落ちずに、19 のときの noise rate と 16 のときの noise rate が同程度に小さくなった。これを受け、Threshold を 2 上げてデータを処理しなおした結果が図 5.18 である。温度変化による影響が抑えられている。

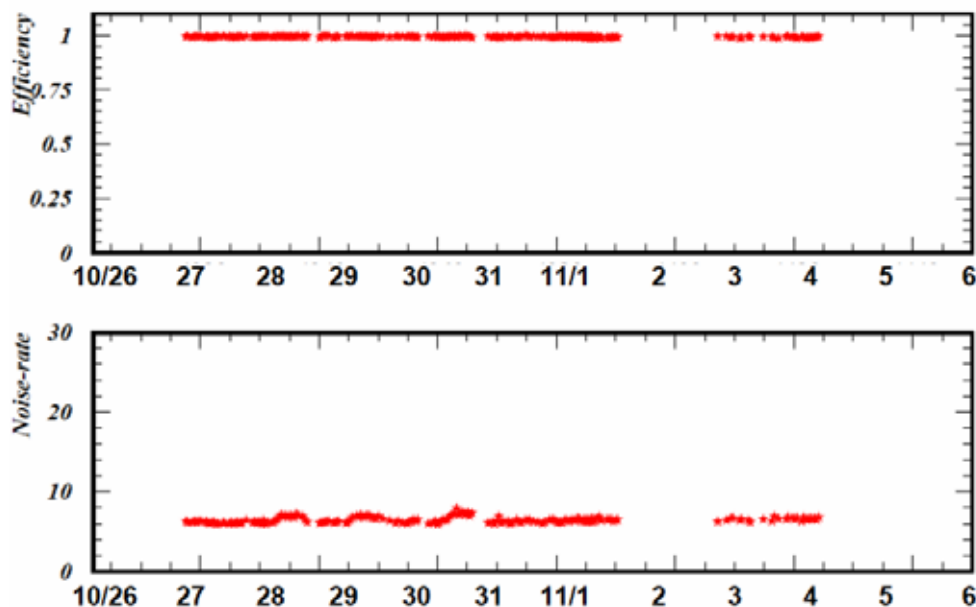


図 5.18 threshold を 2 上げた場合の IIT 4

以上から、温度変化による影響(特に noise rate の変化)はオフラインで抑えられると言える。また、IIT そのものはこの期間は安定していたと考えられ、温度変化の激しい期間の実際のニュートリノ反応データの解析は threshold を変えることで補正できると考えられる。

## 5.5 gain の安定性モニタ

IIT の性能をモニタする際、最も重要なのが IIT の gain のモニタである。gain がどの範囲で安定しているのかを知っておくことは実験上必要なことである。入射光量が一定であれば、 $N_{pix}$  は gain に比例していると考えられ、また LED の発光量の変動は少ないと考えられる。従って、IIT の gain の安定性のモニタは LED による入射光に対する  $N_{pix}$  をモニタすればよい。

2004 年 10 月 26 日~2004 年 11 月 8 日の  $N_{pix}$  のモニタをまとめたものを図 5.19 に示す。横軸が時間(日付)、縦軸が  $N_{pix}$  である。また、図 5.20 は同じ IIT 番号 21 のこの期間の  $N_{pix}$  分布である。フィットの結果から変動幅(標準偏差/平均値)は 3.8%(この IIT が最大)であったので、gain はこの範囲で一定であったと言える。

また、前節で述べた激しい noise rate の変動を見せた IIT であるが、オフライン補正の結果(図 5.21)が示すように、一定の gain(変動幅 2.1%)であった。ここからも、温度とともに変化したのは、読み出し電子回路の方であり、gain は安定していたことが確認できる。尚、他の IIT の分も含めた 24 本分に対する図 5.21 と同様の  $N_{pix}$  分布を付録に載せる。

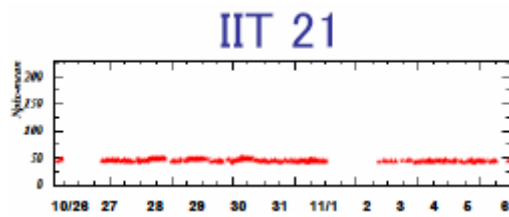


図 5.19 Npix モニタ

(縦軸は LED 光の平均  $N_{pix}$ 、横軸は時間(日付)、threshold は default 値)

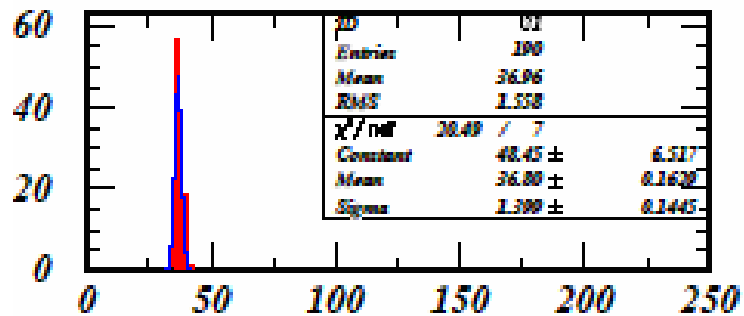


図 5.20 モニタに plot した  $N_{pix}$  の 分布 (IIT 1)

(横軸は  $N_{pix}$ 、縦軸はモニタに plot した数、threshold を調整したものを使用)

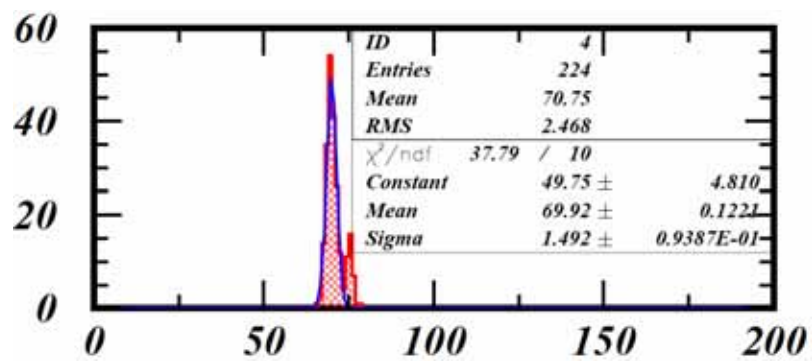


図 5.21 threshold を調整した後の IIT 番号 4 の  $N_{pix}$   
(ディスプレイ上に plot した点の分布)

## 5.6 座標モニタ

IITの性能モニタにLEDの使用を導入することで、LED光のCCD座標をモニタすることが可能になった。座標モニタはfiber bundleがいつどの方向にどれだけずれたかをモニタするものであり、図5.11、図5.12で示した標準偏差から0.1pixel(約0.018mm)の精度を持っていると考えられる。実際に座標のズレがモニタされた例を図5.22に示す。図5.22の中央付近に引いてある2本の破線は13日以後に安定して観測されている座標の中心 $\pm 0.5$ pixel(精度 $\times 5$ )でガイドラインとして引いてある。図5.22はIIT番号が17のもので、10月12日と10月13日の間にfiber bundleがx方向に-1pixel、y方向には殆ど動いていないことがモニタされている。比較のため他のIIT(16)のものを図5.23に示す。バンドルの位置較正に使用するELを光らせて取ったデータで、fiber bundleのmap情報を修正した結果で確認してみると、LEDを付けたfiberの座標はx方向に-1pixel修正されている。mapの修正値とLEDによるモニタでみた座標のずれが一致している。座標モニタはfiber bundleとIIT光電面の位置関係をモニタできていると言ってよい。尚、この時のずれ方は図5.24(a)が示すように回転によるものであった。また、図5.24(b)には、比較のため他のIIT(16)についても同様にELを光らせたデータを載せておく。

LEDモニタの導入により実現した座標モニタは、大変有効であり、地震等のアクシデントによるfiber bundleのずれをニュートリノrun中でも発見できる。これまではどのタイミングで使用するmapを切り替えれば良いか判らなかったが、座標モニタの導入によりそれが可能となった。

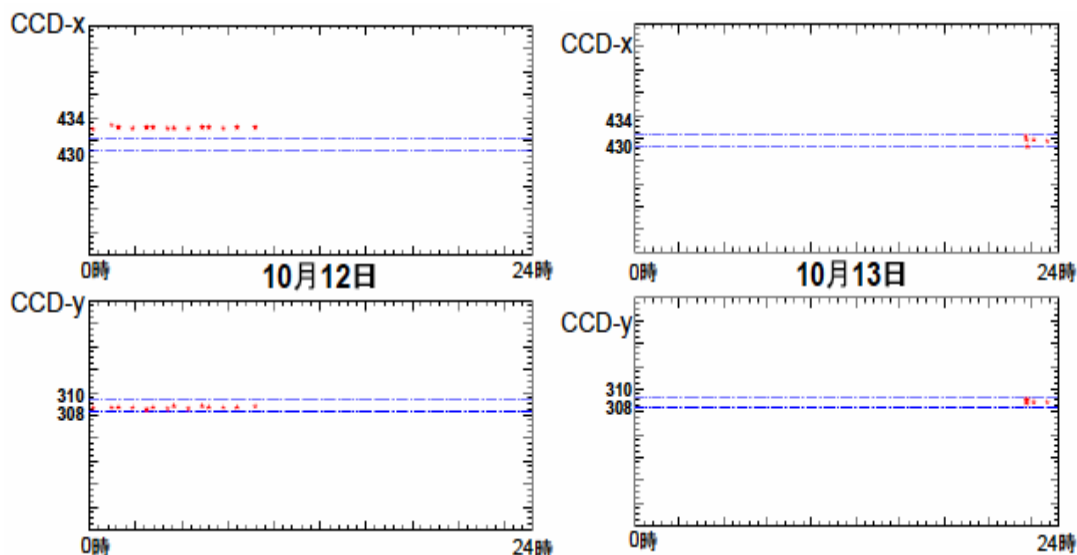


図 5.22 座標モニタ例(IIT 17)

(左は10月12日のCCD-x、CCD-y、右は10月13日のCCD-x、CCD-y、  
中心付近の2本の破線は13日以後に安定して観測されている範囲(幅は1pixel))



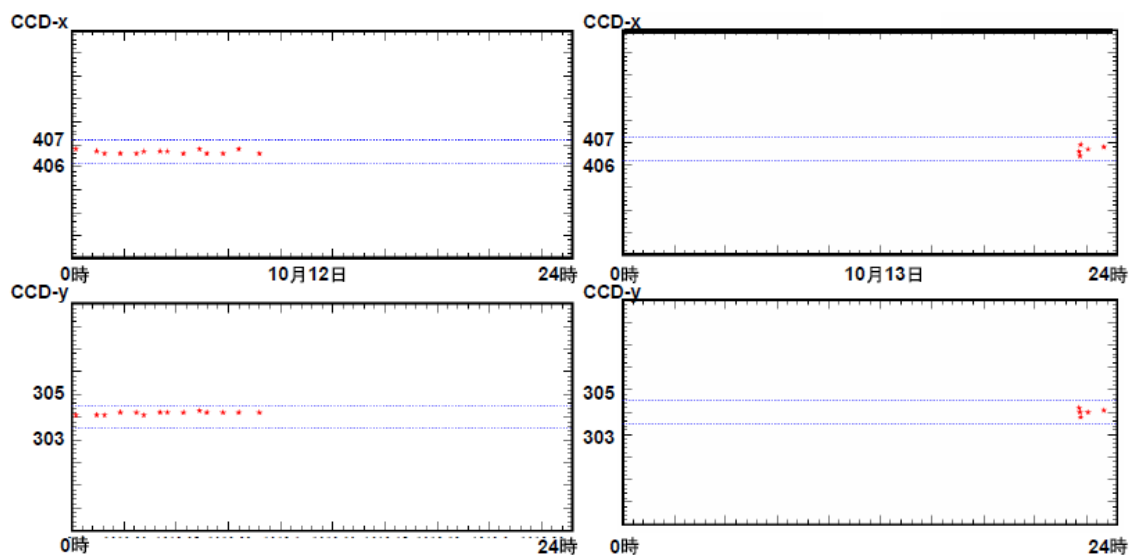


図 5.23 座標モニタ例(IIT 16)

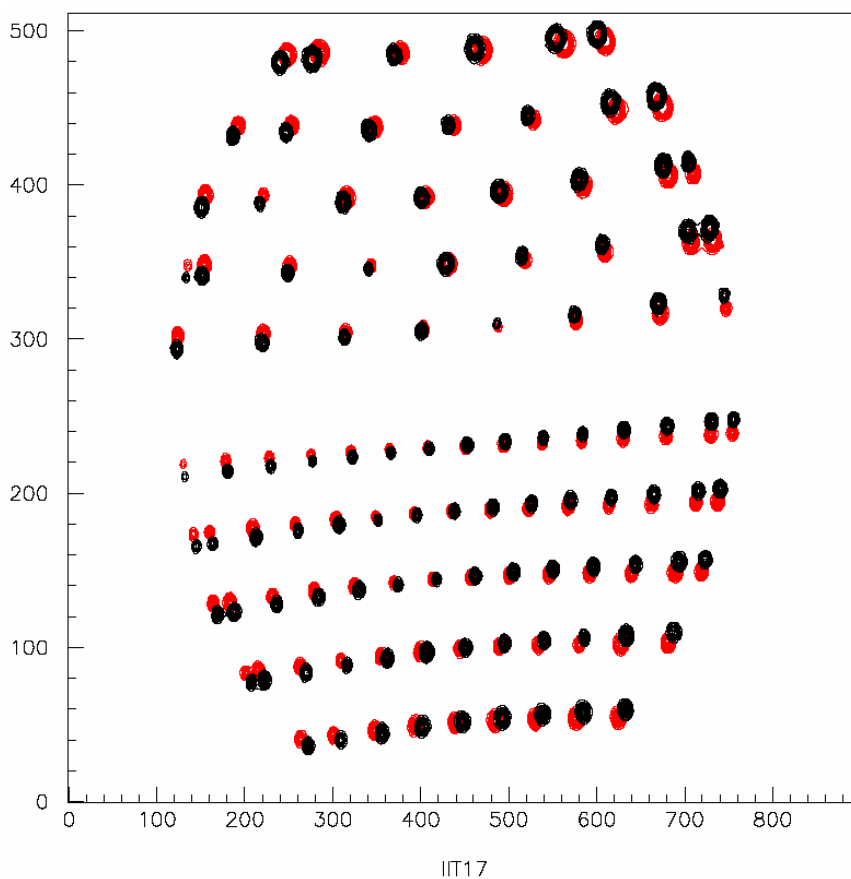


図 5.24(a) map 修正前後の比較(IIT 17)

(横軸=CCD-x、縦軸=CCD-y、へわずかに回転補正されている)

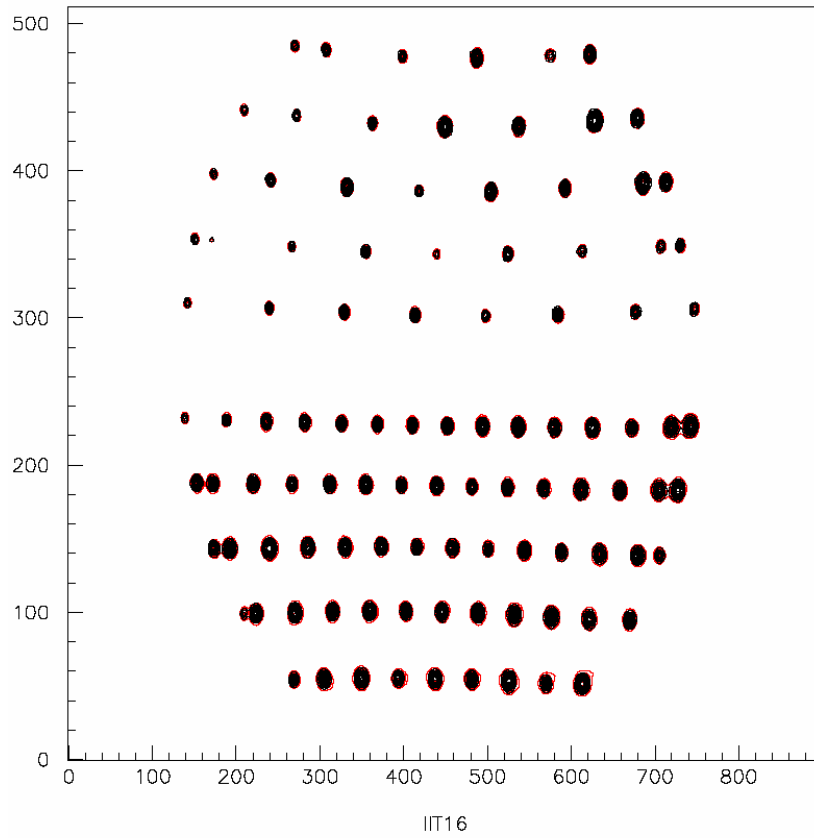


図 5.24(b) map を修正する前後の比較(IIT 16)  
 (バンドルの動きはない)

## 5.7 稼働中の LED モニタ

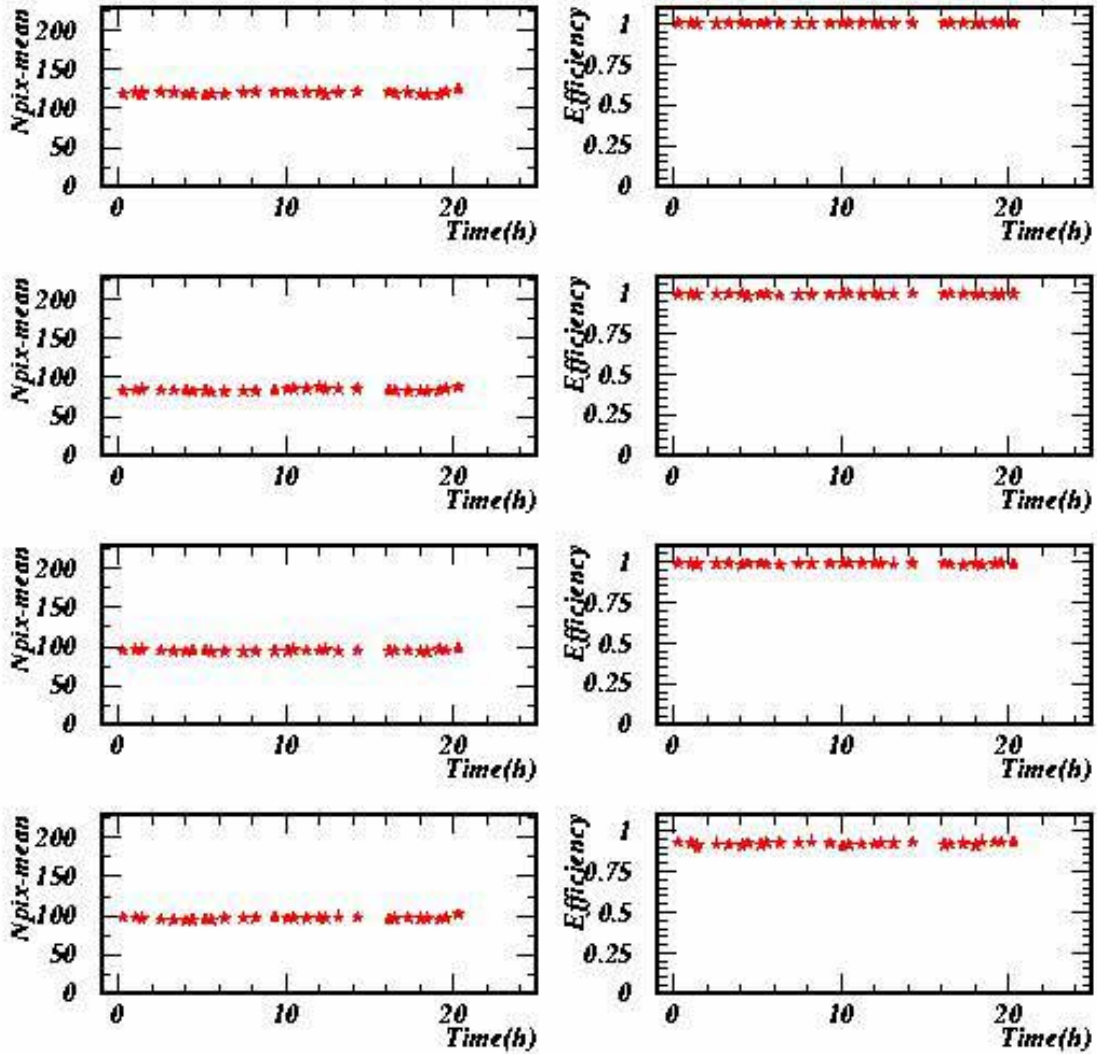
実際に稼働しているときの LED モニタ(再現)を図 5.25 に示す。モニタは 1 data file(1000 イベント)ができる(平均で約 36 分)ごとに 1 点ずつ plot が追加され、更新される。LED モニタは、3 つに分割して表示している。1 つ目は Npix(左)と efficiency(右)、2 つ目は noise rate、3 つ目は座標(左が x 座標、右が y 座標)である。稼働中のモニタは 24 時間スケールで表示しておりモニタの横軸は時刻(時)である。

宇宙線でのモニタ間隔が 1 週間であることに比べると、非常に短い間隔でモニタしている。更に、LED を使用することで、LED 使用以前に不足していた部分、特に gain の変化のモニタがより詳しく測定できるようになった。

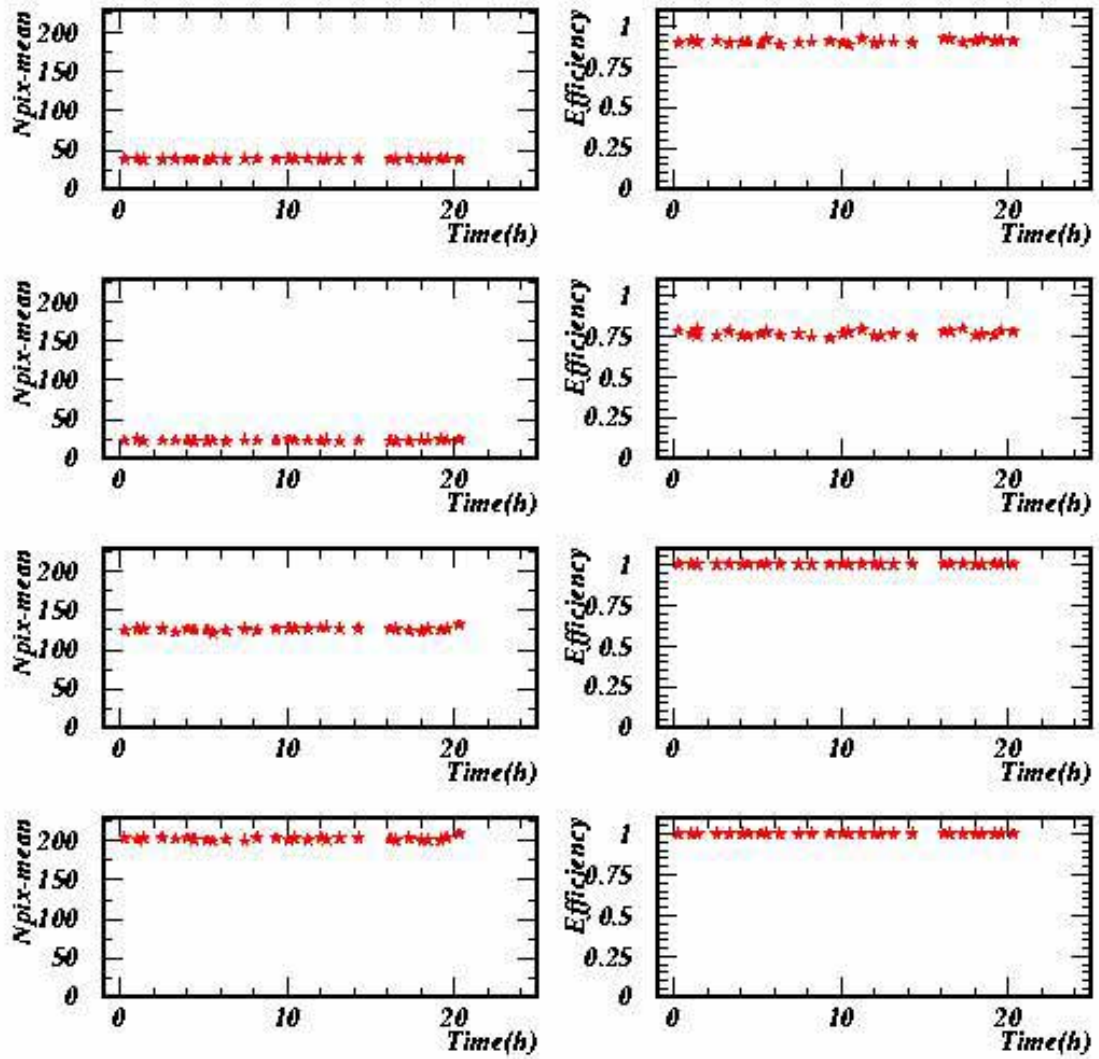
しかし、だからといって宇宙線によるモニタが不要になったわけではない。LED によってモニタしていて、何らかの変化が見られたとき、LED の発光量が不安定になった可能性も考えられるからだ。LED でモニタし、安定していることが確認されている間は LED モニタで十分だが、何か変化があったときは、光源が MIP である宇宙線によるモニタと見比べ、その上で変化に関する結論を出す必要がある。

また、モニタが稼働している間は threshold は default 値のままであり、読み出し電子回路の周辺の温度変化に起因する変化も含めてモニタしている。

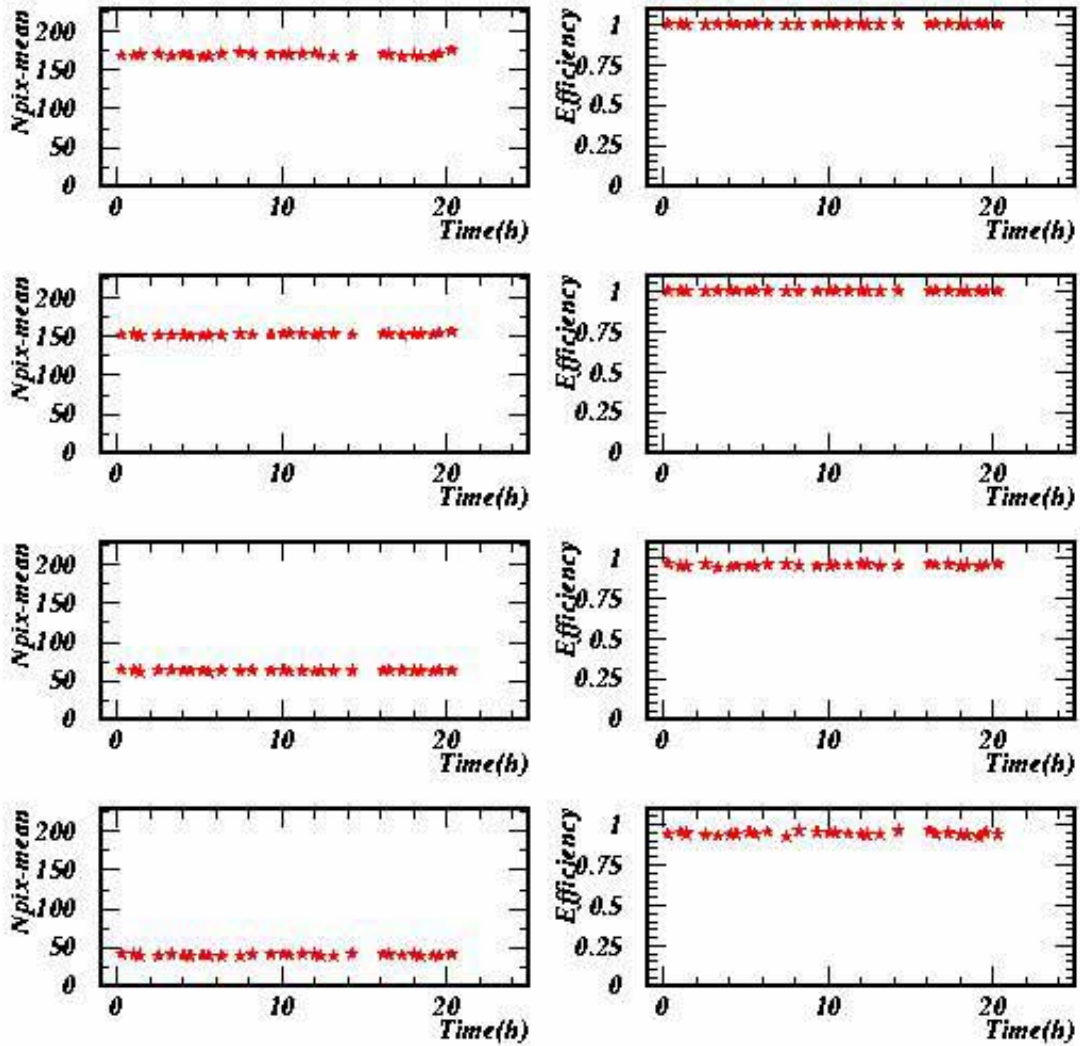
# IIT 1-4



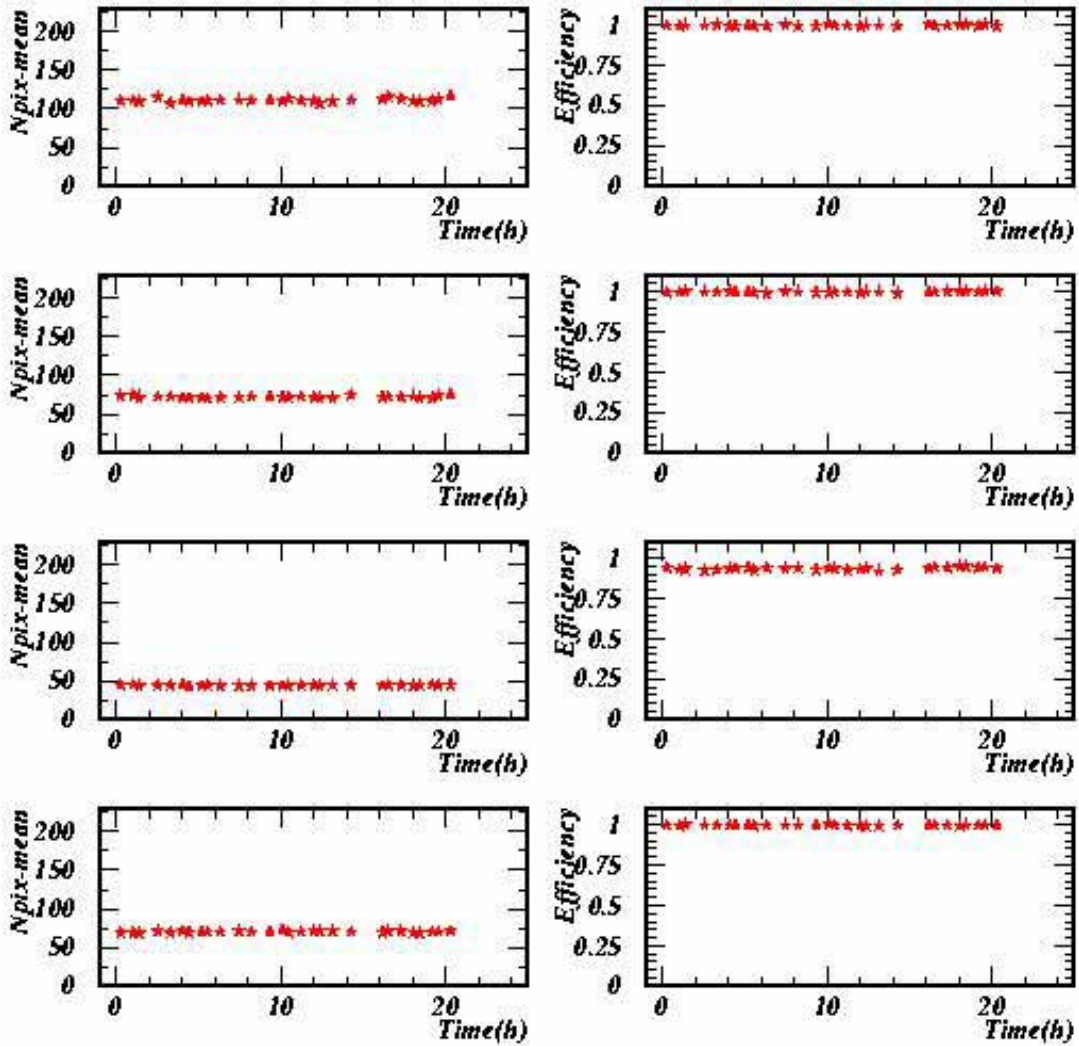
# IIT 5-8



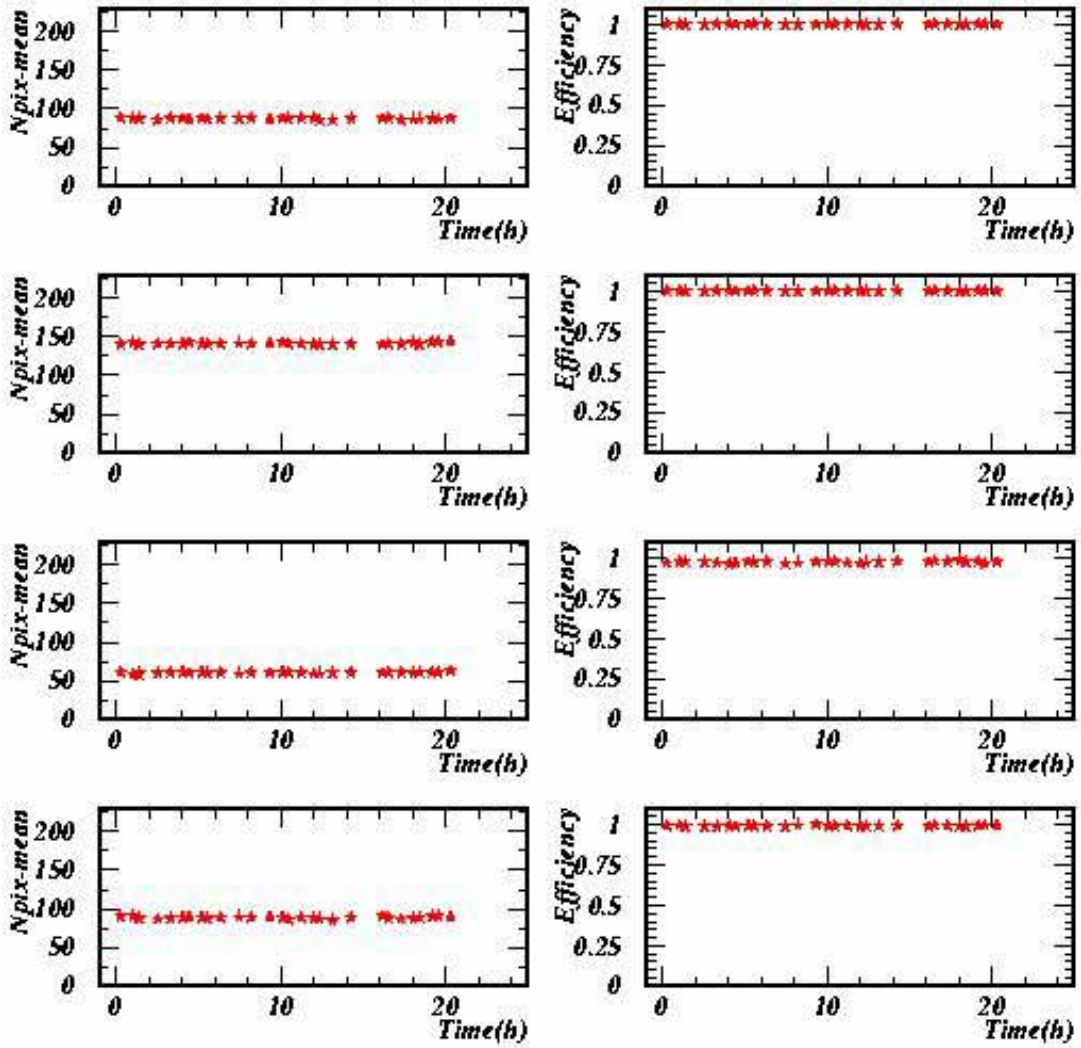
# IIT 9-12



# IIT 13-16

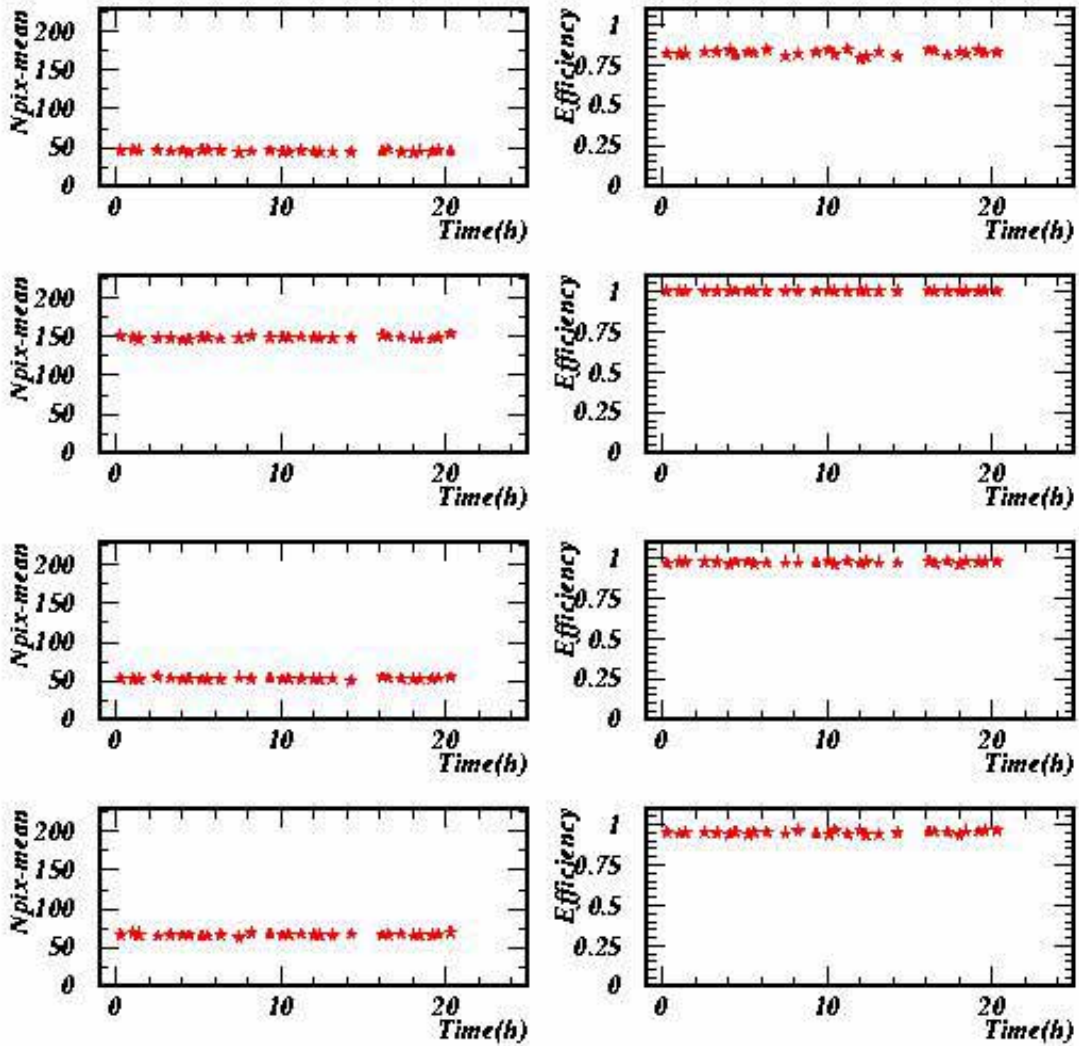


# IIT 17-20

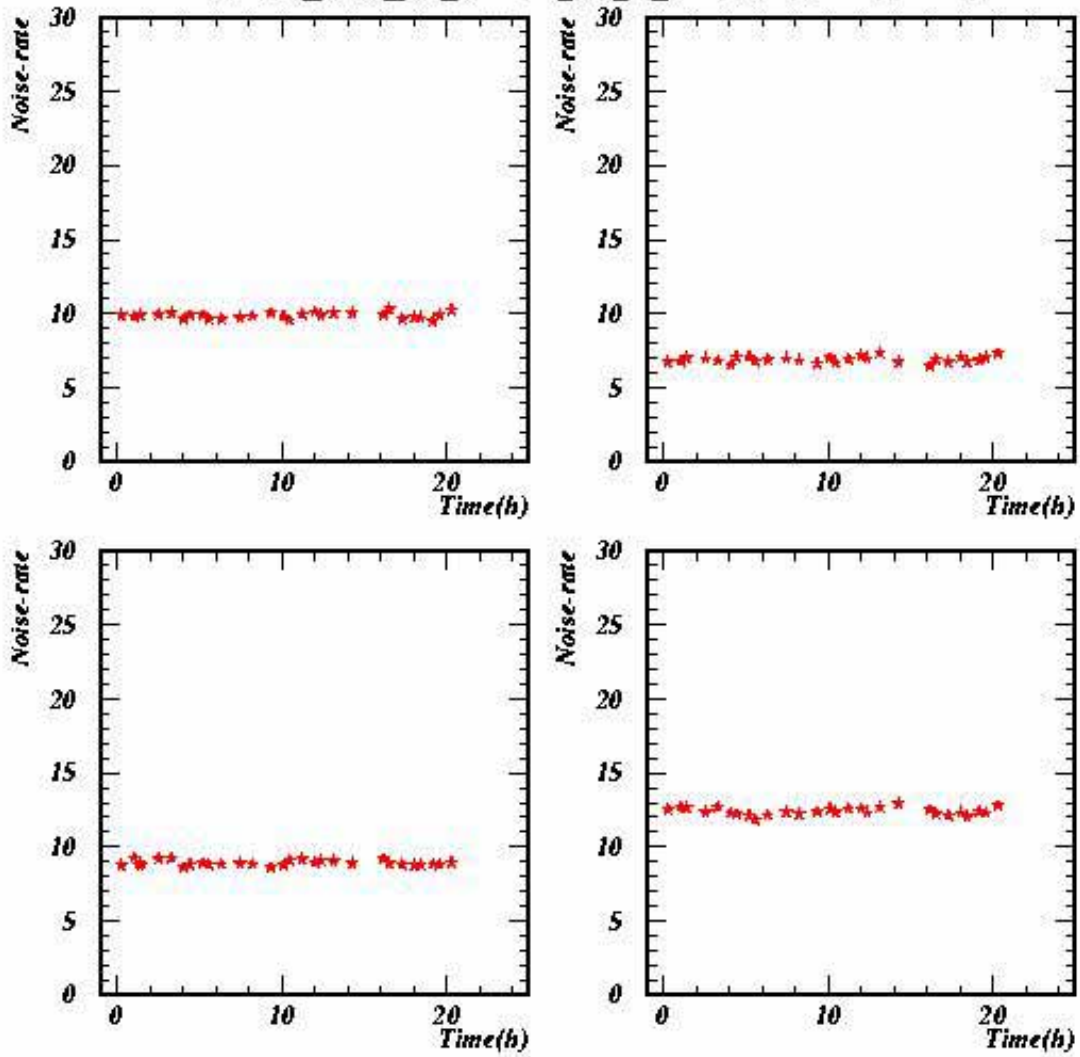




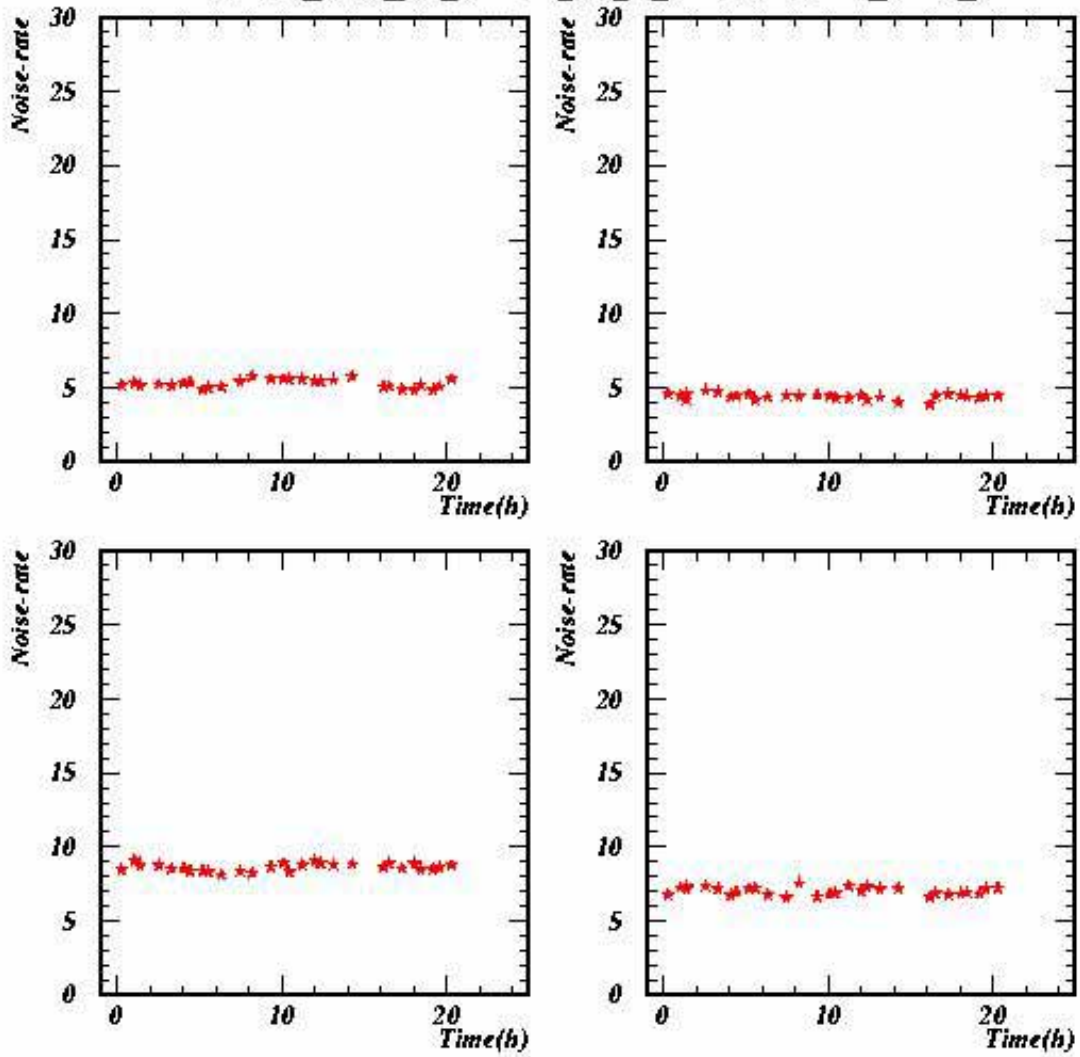
# IIT 21-24



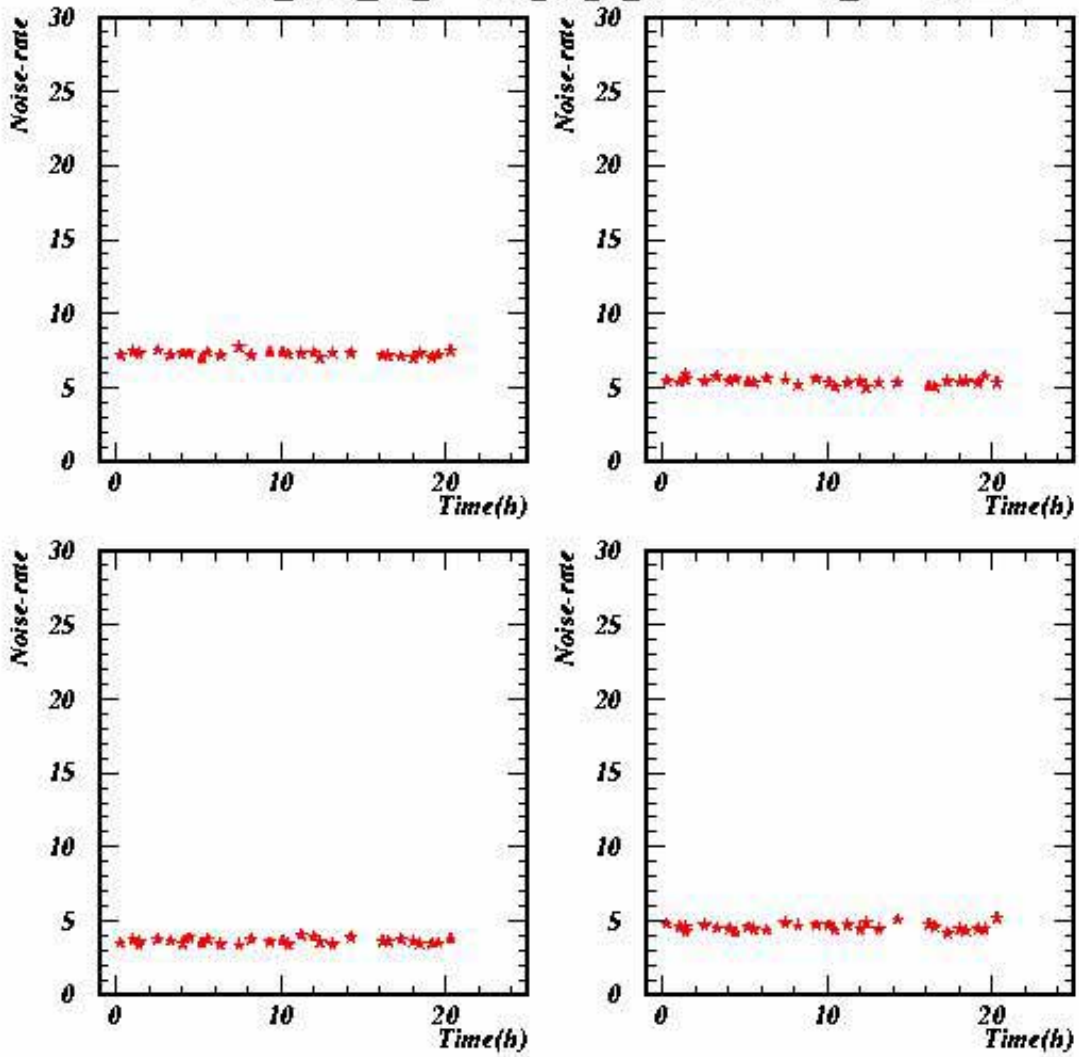
# Noise-rate IIT 1-4



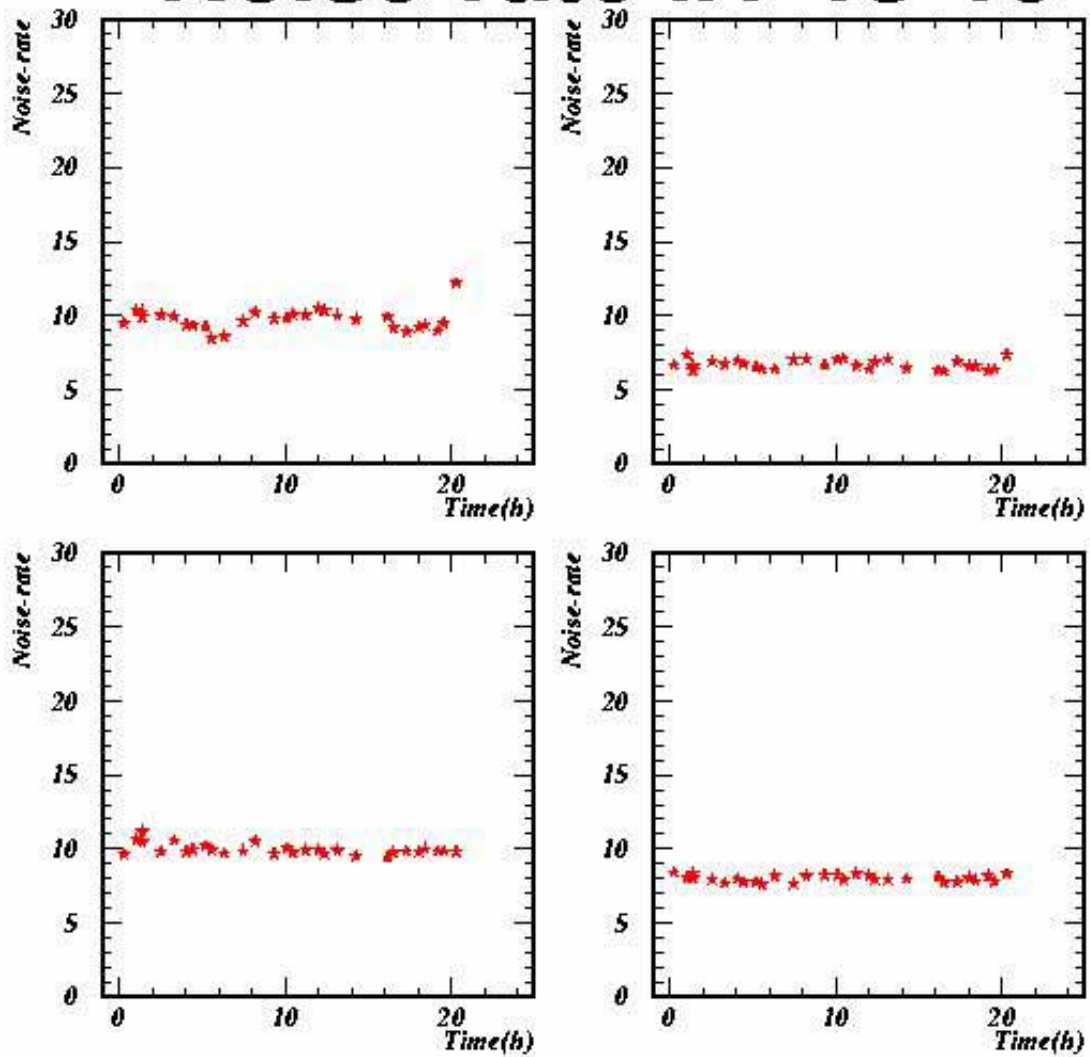
# Noise-rate IIT 5-8



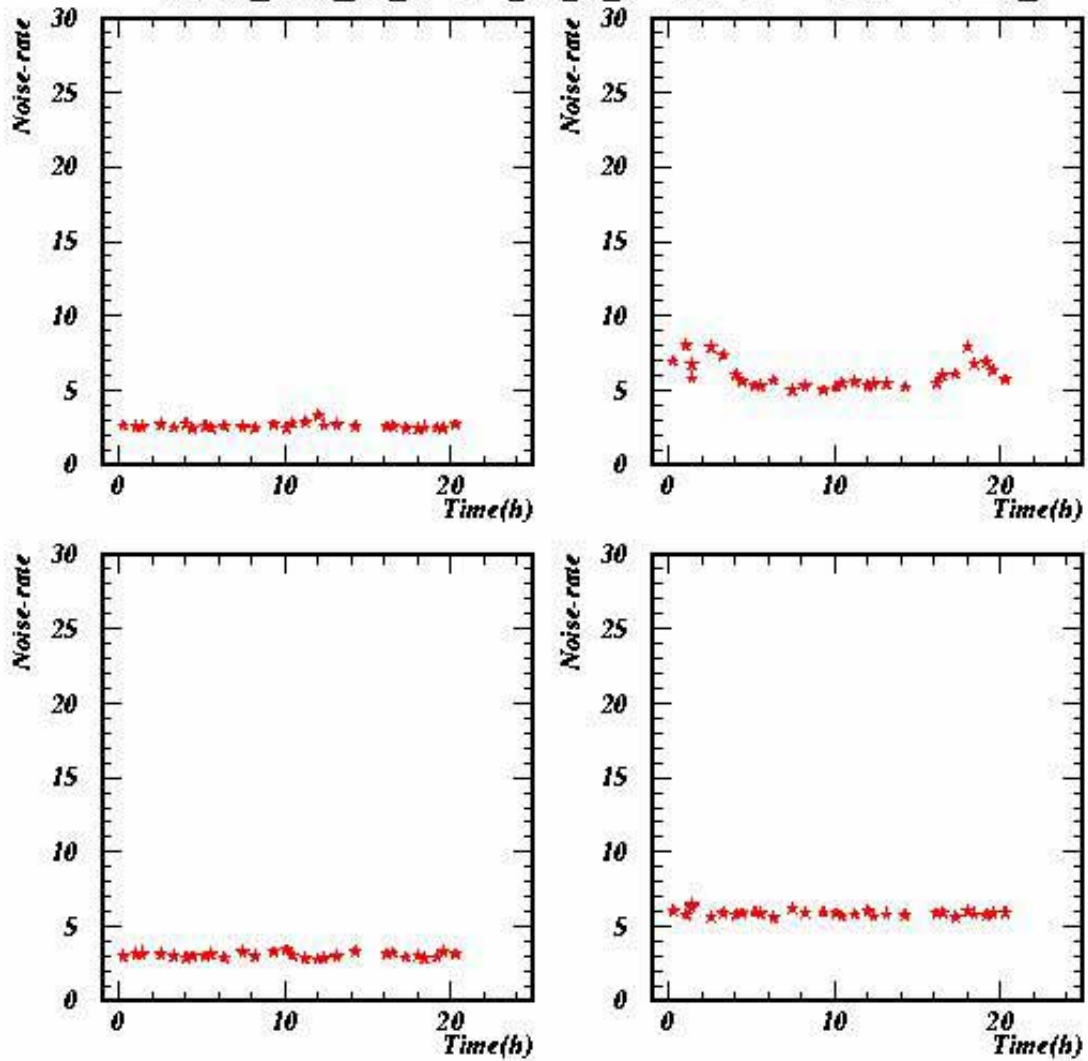
# Noise-rate IIT 9-12



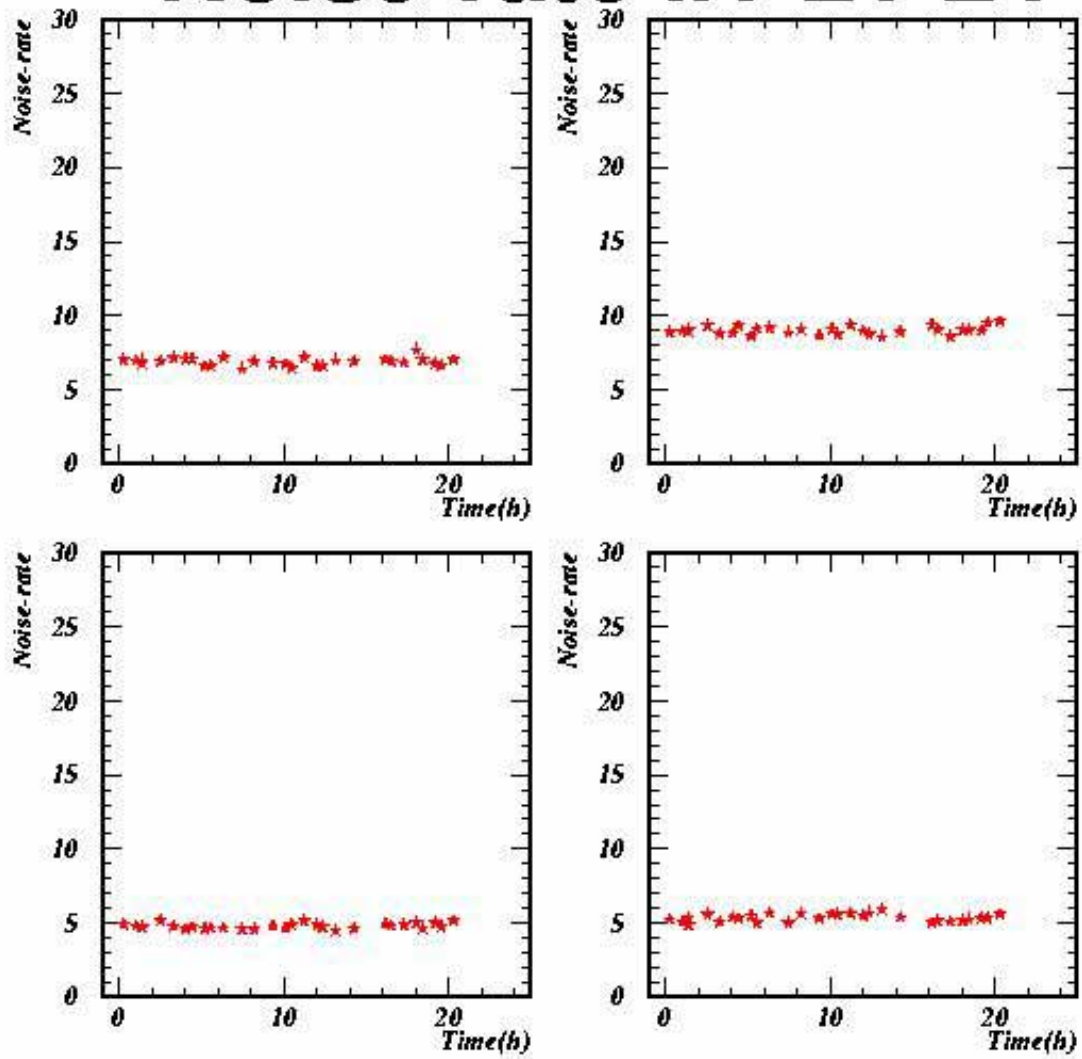
# Noise-rate IIT 13-16



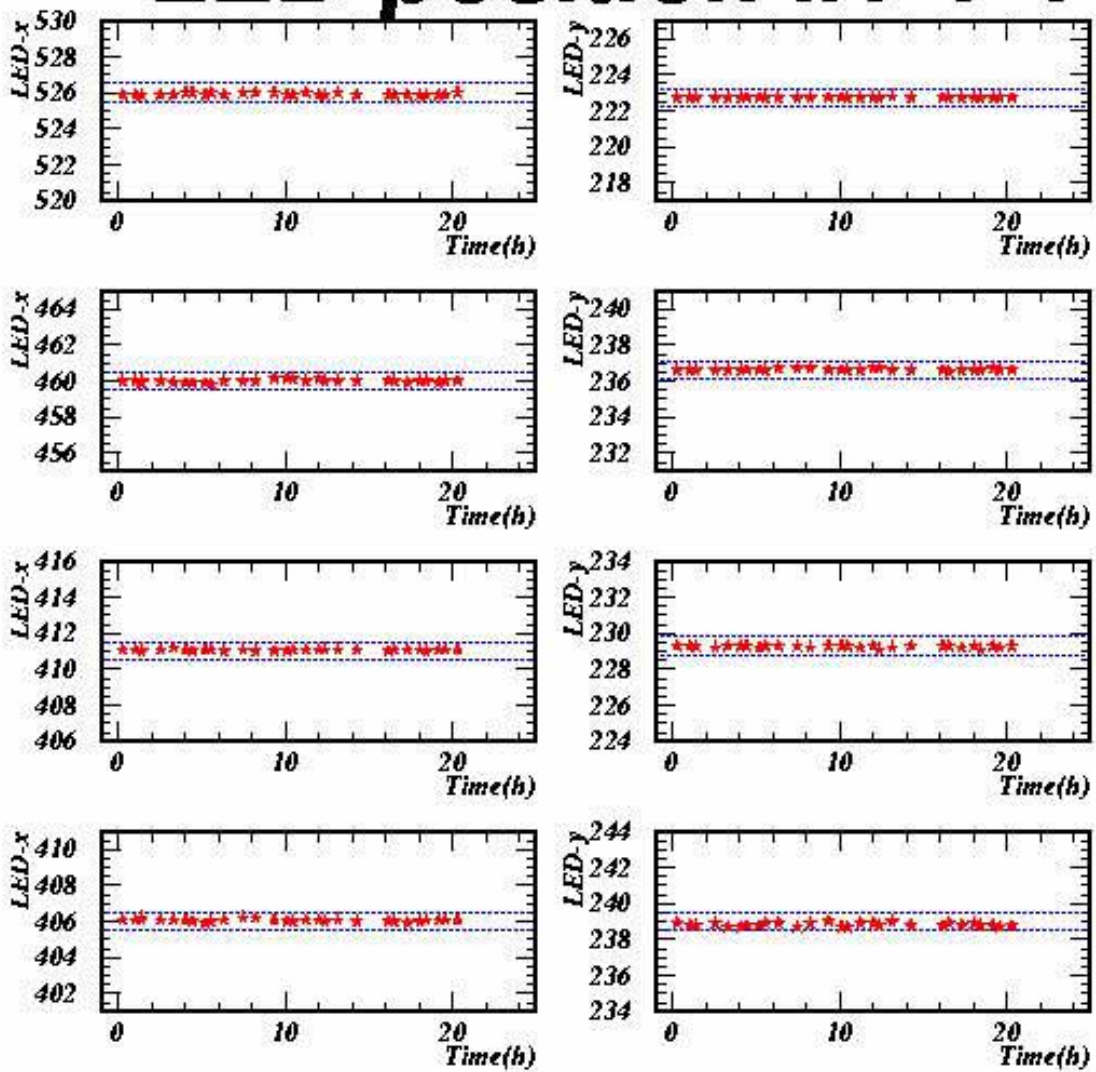
# Noise-rate IIT 17-20



# Noise-rate IIT 21-24

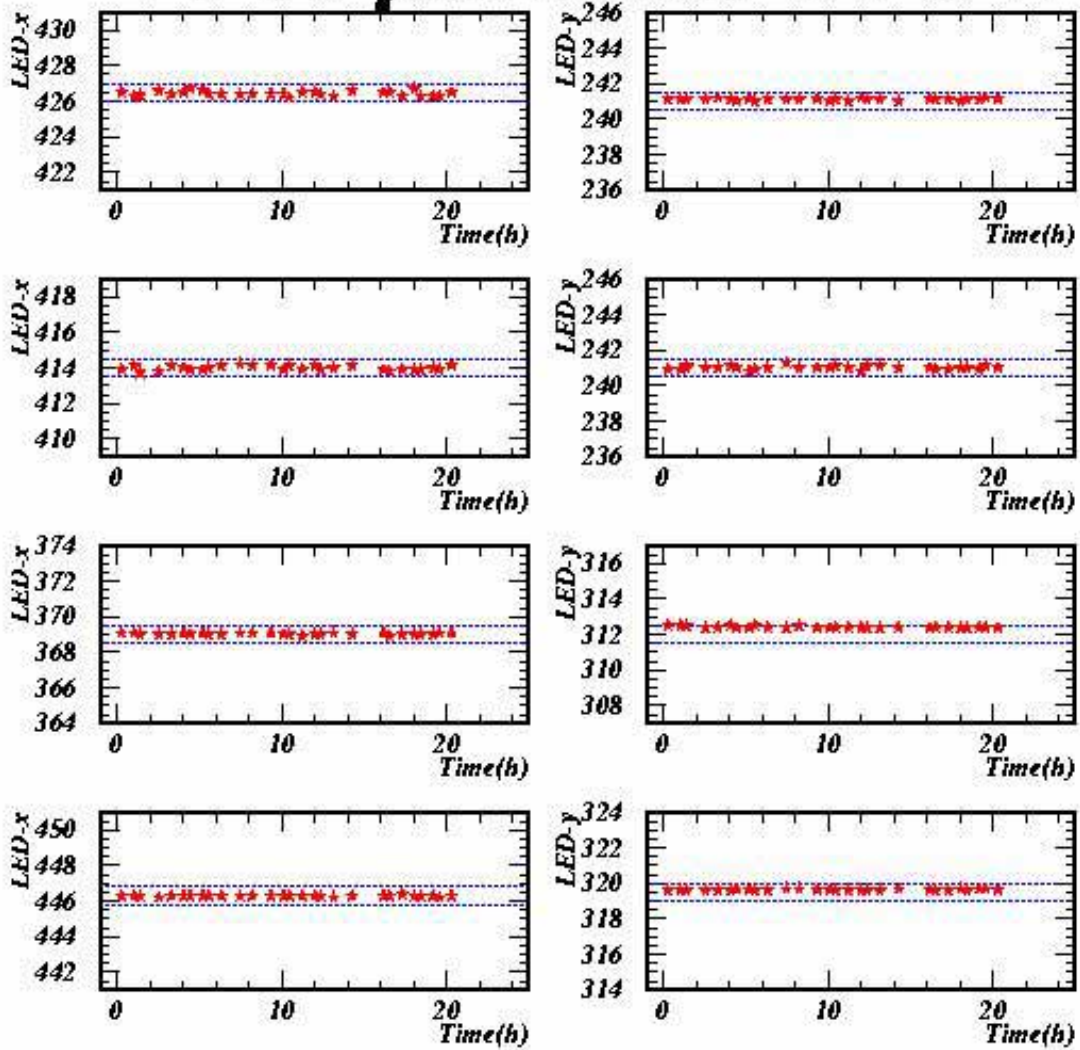


# LED-position IIT 1-4

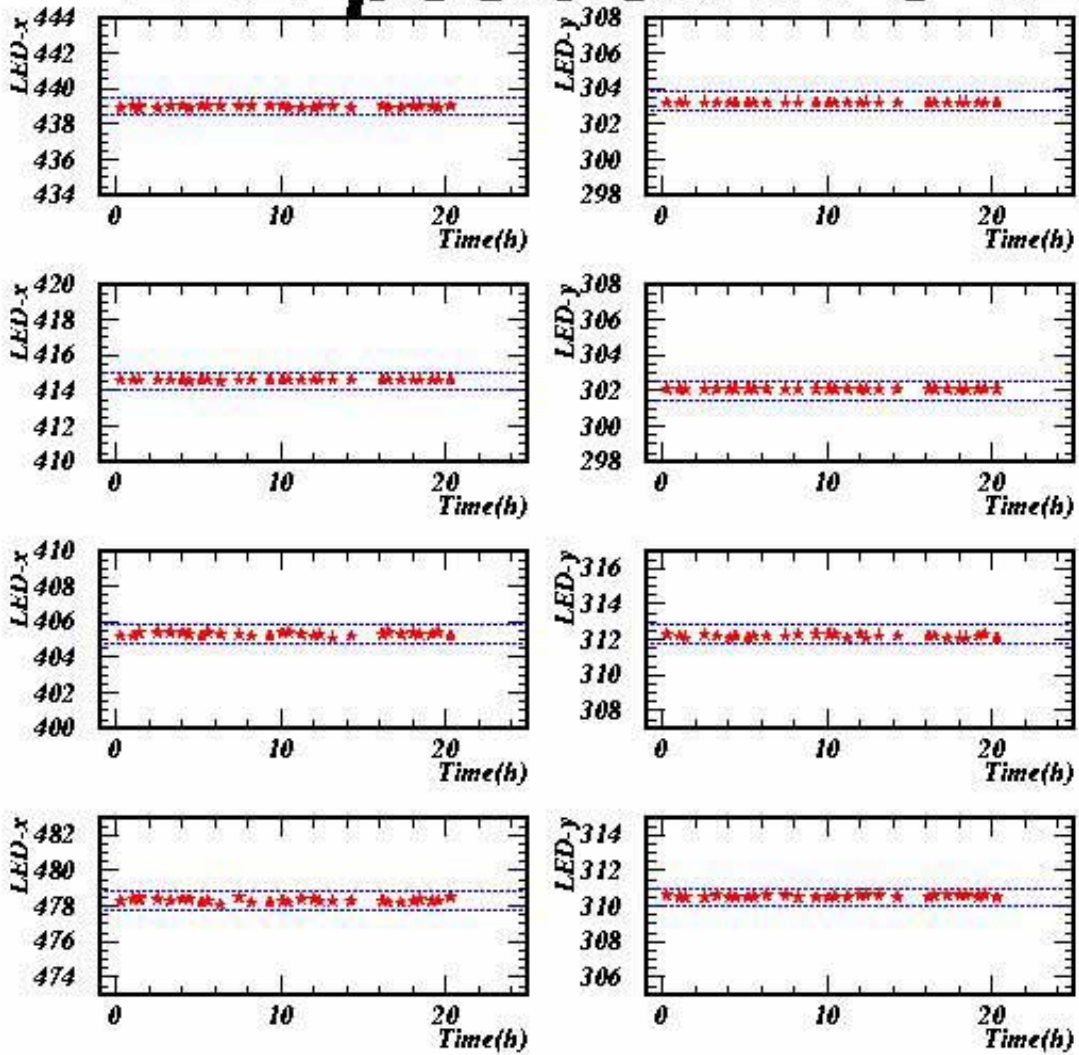




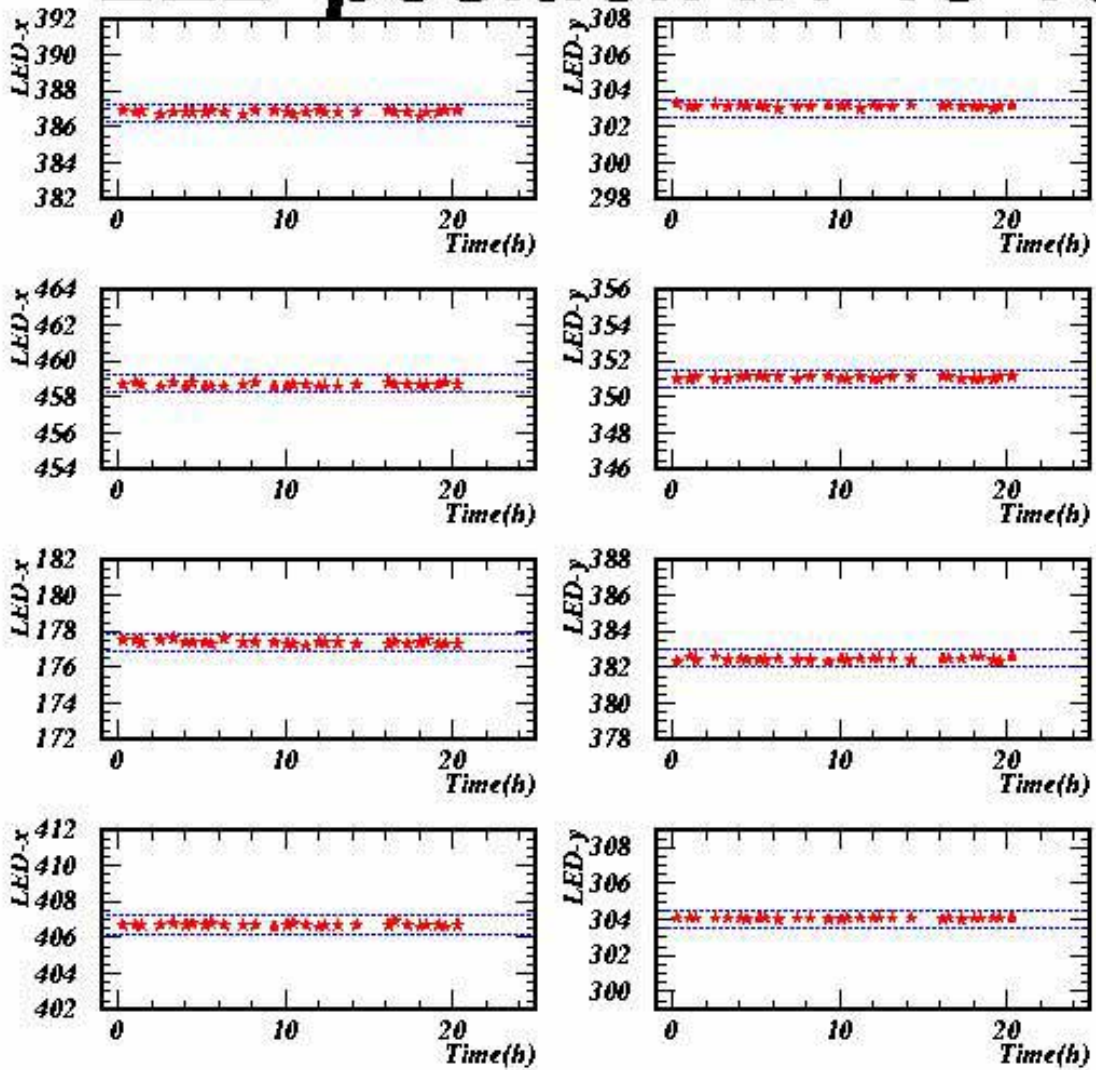
# LED-position IIT 5-8



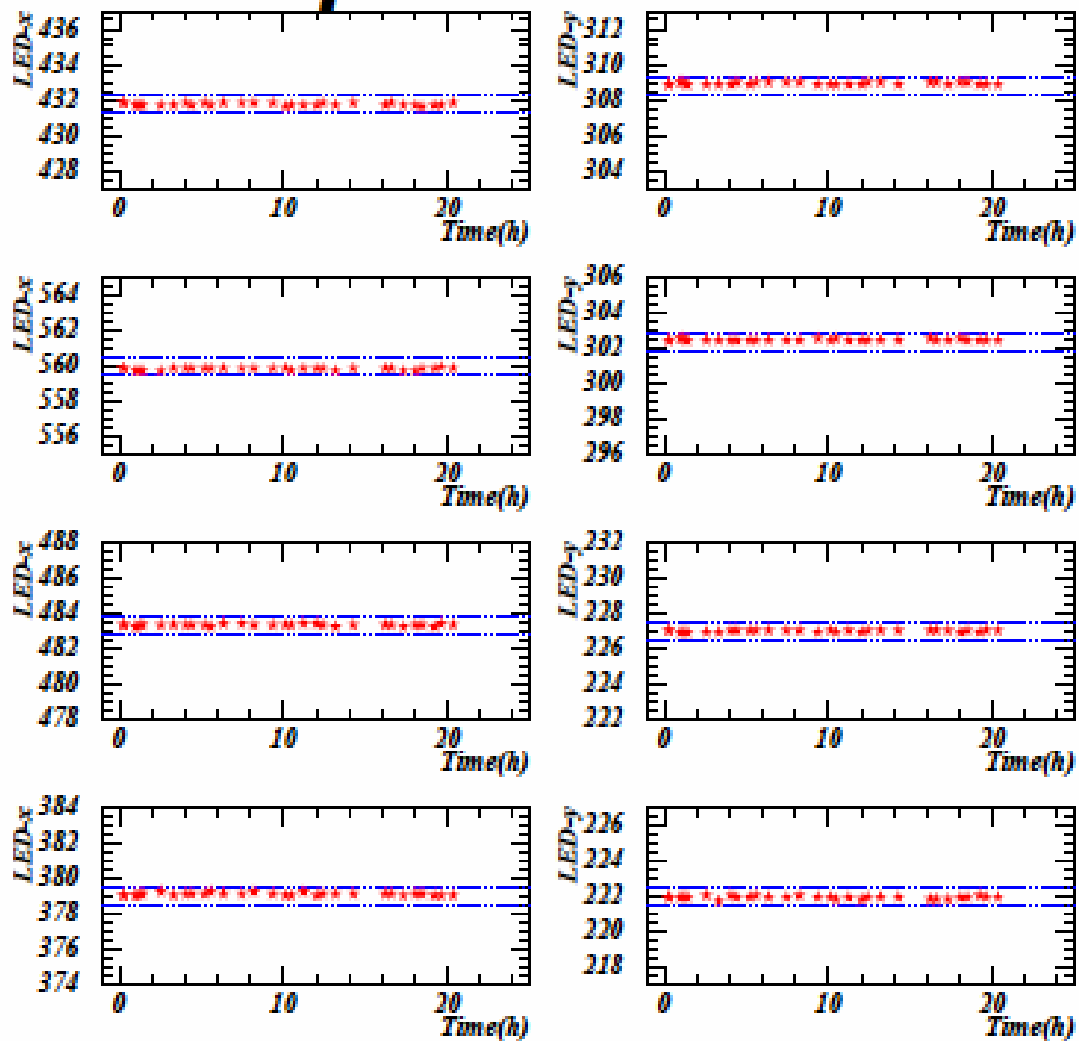
# LED-position IIT 9-12



# LED-position IIT 13-16



# LED-position IIT 17-20



# LED-position IIT 21-24

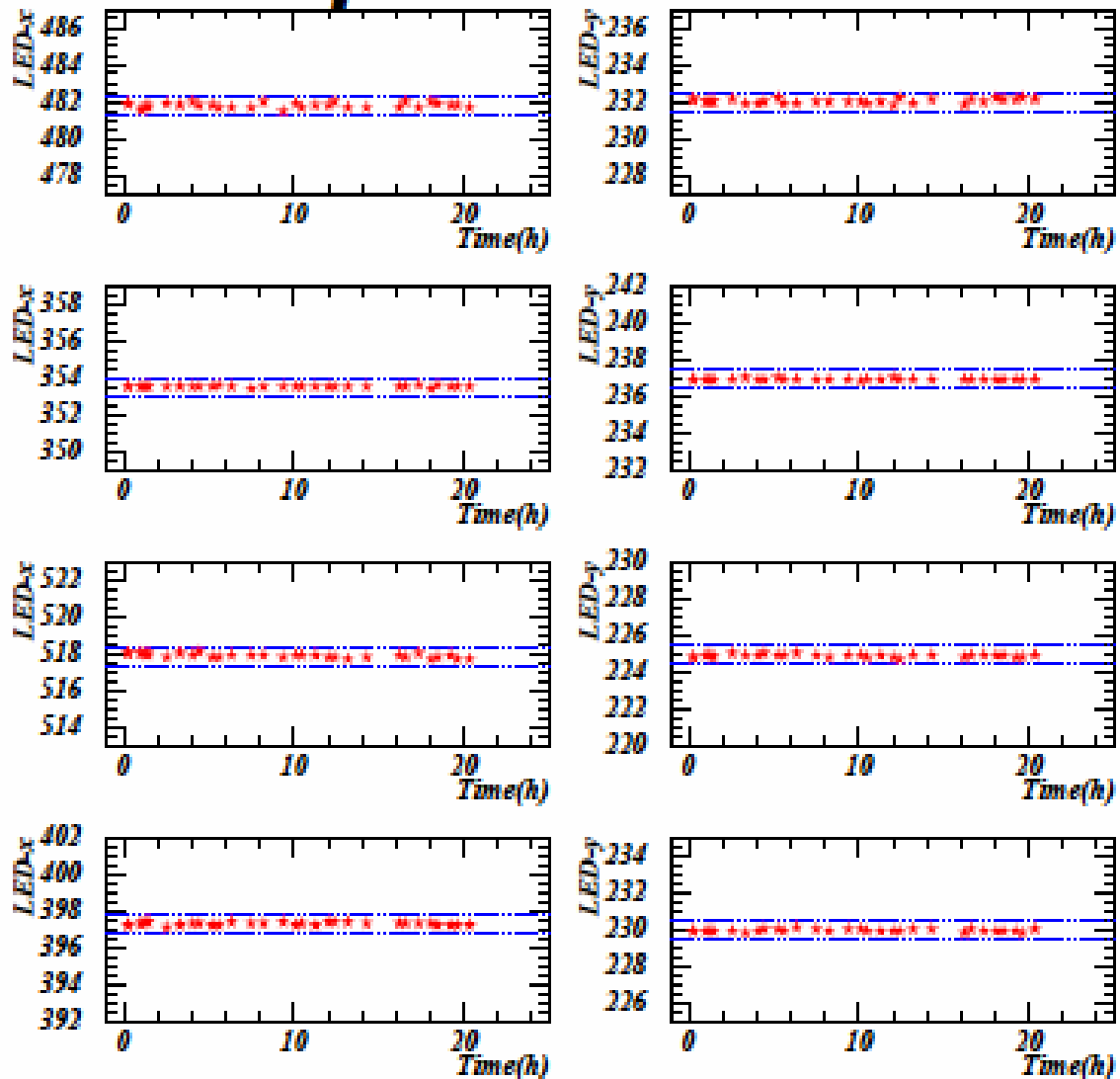


図 5.25 稼働中の LED モニタ(再現)

(座標モニタの縦軸の表記が LED-x、LED-y となっているが、  
CCD-x、CCD-y と同義である)

## 5.8 まとめ

K2K・SciFi 検出器の状態モニタとして使われてきたのは off spill 中のヒット数モニタ、Npix モニタ、週 1 回の宇宙線によるモニタであるが、それらには複数の問題点があった。ニュートリノビームが出ているときに稼動していたヒット数モニタ、Npix モニタは noise を見ており、一定の光量が IIT に入射されているわけではなく、gain の変動があっても正しくモニタすることができていなかった。

光の検出効率や、gain の変動(または安定性)をモニタするために、モニタの中心的役割をしていたのが、宇宙線によるモニタであった。宇宙線が落としていくエネルギーは MIP で、gain の安定性モニタの絶対的指標として使われていた。しかし、モニタとして宇宙線のデータをとる機会が週 1 回のペースでしかなく、ニュートリノビームが出ている最中のことはモニタ出来ていなかった。そのため、1 週間のサイクルで IIT の状態が変化していてもそのことを知ることはできなかった。

それらの問題を解決するために本研究では LED を使用することにした。ニュートリノビームが出ている最中に LED を光らせ、リアルタイムでモニタすることが可能となっただけでなく、LED で一定の光量を IIT に入射するため、gain の変化もモニタできるようになった。実際に安定していると思われる時期のデータから、IIT の gain は、3.8%以内である。

Noise の量に関しては、IIT のデータの読み出し電子回路の周辺の温度の変化に依存するが、threshold を調整することでその影響を抑えることが可能であることが判った。また、特定の fiber を光らせているので LED 光の座標をモニタすることで、fiber bundle がいつどの方向にどれだけずれたかがリアルタイムで判るようになった。ニュートリノ run 中にそのずれがモニタできることで、何らかのアクシデントで fiber bundle がずれても、そのタイミングを発見することができ、ニュートリノイベント解析で使用するファイバーバンドルの map を切り替える run 番号が特定できるようになった。

宇宙線ではリアルタイムのモニタになっていないという点と、noise では gain のモニタになっていないという 2 点の大きな欠点を LED を使用することで補うことができた。しかし、モニタ上で変化が見られると、LED の発光量が変動した可能性もあるので、絶対的なモニタとしては、宇宙線によるモニタと比較することで行うことになる。

## 第6章 LEDの発光量とIITの応答

この章では、予備のIITを用いて行った、IITの光電面への入射光量とIITの応答について述べる。

### 6.1 LEDの発光量

この予備実験で使用したLEDの回路は997の抵抗を直列につないだシンプルなものである(LEDの写真と回路図は前章)。LEDに順方向の電圧をかけると、LEDの中を電子と正孔が移動して電流が流れる。電子と正孔がぶつかると結合し、電子と正孔が各々持っていたエネルギーよりも、小さなエネルギーの状態「再結合」状態になる。その時に生じるエネルギーの差が光のエネルギーに変換され発光する。これがLEDの発光原理である。そのため、LEDの発光量(p.e.数)は、LEDに流れる電流に比例すると考えられる。回路に流れている電流と発光量の関係を実験で調べた結果を図6.1に示す。図6.1は、抵抗にかかる電圧をオシロスコープで調べ、回路に流れている電流を算出し、その値を横軸に、PMTで測定した発光量(p.e.)を縦軸にとったものである。図6.1が示すように、確かにLEDの発光量は電流に比例している。

しかし、LEDの発光量が回路全体に印加する電圧に比例しているわけではない。図6.2はLED回路全体に印加する電圧を横軸に、オシロスコープで観測した抵抗への印加電圧を縦軸にとったものである。この図から、回路全体に印加する電圧が小さくなるにつれて、LEDでの電圧降下が占める割合が大きくなると考えられる。結果、抵抗への印加電圧が回路全体への印加電圧に比例せず、回路全体への印加電圧と回路に流れる電流が比例しないのだと考えられる。LEDの発光量を調節するには、抵抗にかかる電圧に注意し、回路に流れる電流を調節するのがよい。実際にこの関係を調べる以前に、SciFi検出器にLEDを取り付けて抵抗を変えてみたが、結果( $N_{pix}$ 値)の変化は(ほとんど)見られなかった。IIT番号4番でのその結果を参考として図6.3に示す。図6.3の上段は250のときの $N_{pix}$ 分布、下段は750のときの $N_{pix}$ 分布で、このときにLED回路全体には1.3Vの電圧が印加されていた。 $N_{pix}$ 値の平均値は、抵抗が3倍(1/3倍)に変化してもそれに相当するような変化は見られていない。図6.3の結果を見たときは $N_{pix}$ 値が(ほとんど)変わらない理由が解らなかったが、抵抗にかかっている電圧と回路に流れる電流を調べることで解決をみた。

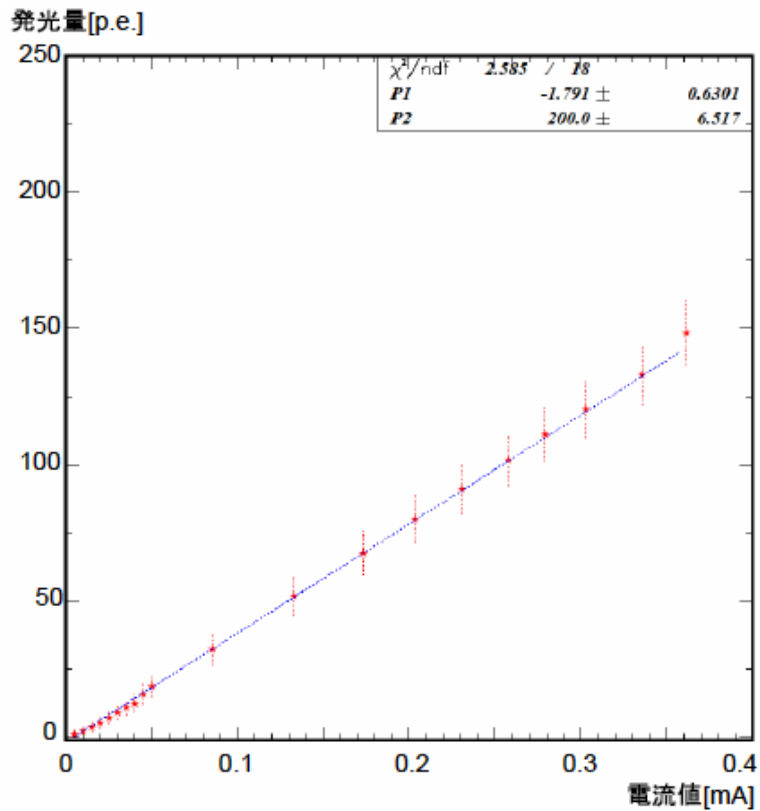


図 6.1 電流(横軸)と発光量(縦軸)  
(発光量が電流に比例していることが確認できる)

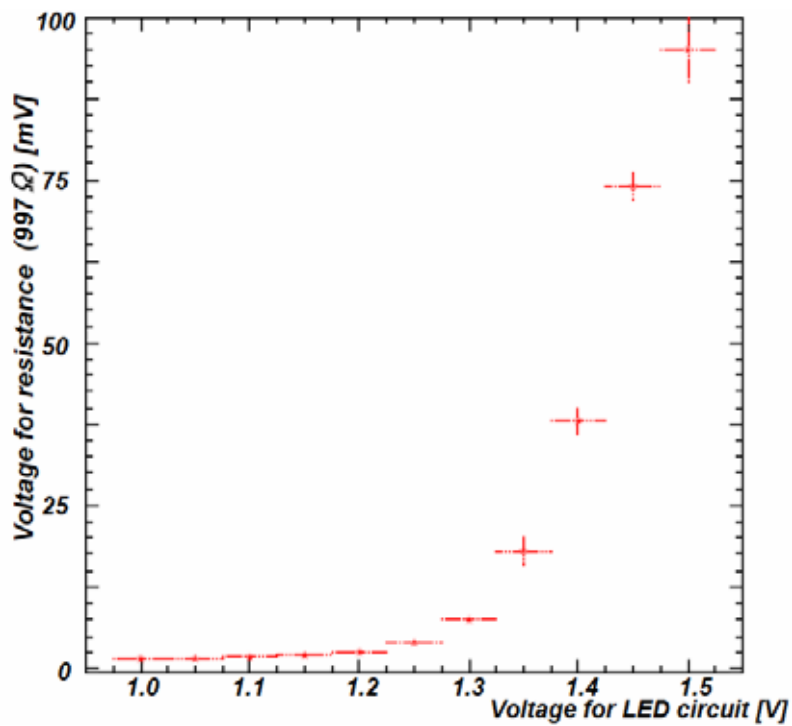


図 6.2 LED 回路への印加電圧(横軸)と抵抗部分への印加電圧(縦軸)  
(回路全体への印加電圧が小さくなると抵抗部の電圧と比例関係ではなくなる)



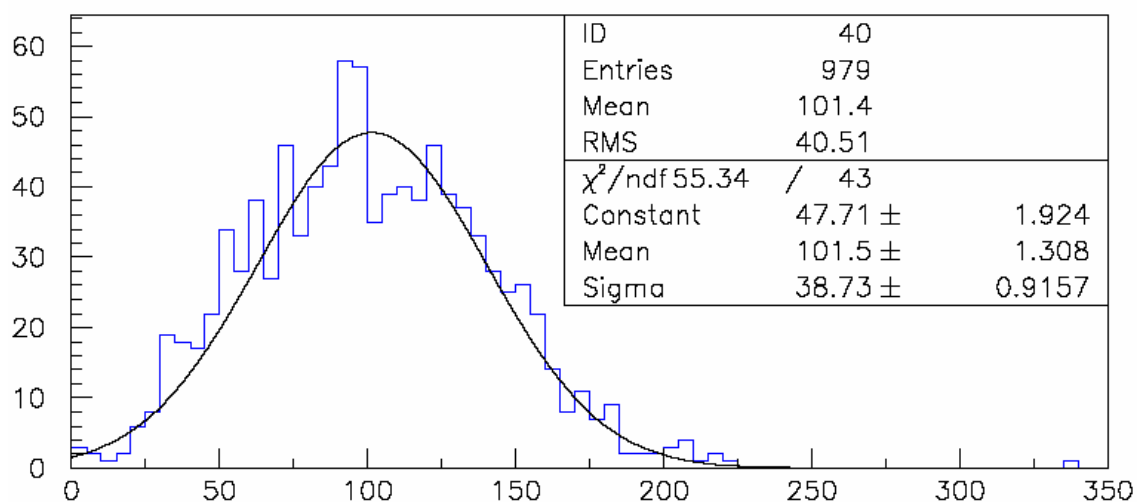
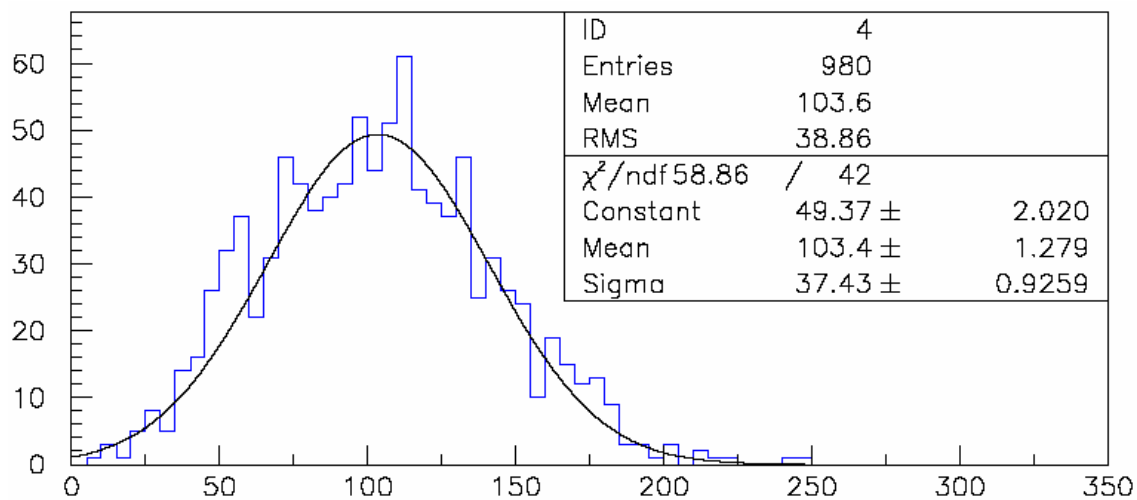


図 6.3 抵抗を変えたときの Npix の変化(縦軸はイベント数、横軸は Npix)  
 (上段:250 、下段:750 、抵抗を変えても Npix 値に変化は見られない)

## 6.2 LED の発光量と IIT の応答

K2K・SciFi 検出器におけるニュートリノ反応等のイベント解析では、荷電粒子の通過で発光する Scintillating Fiber からの光シグナルを使用しているが、光量のパラメータとして使用しているのは、CCD 画面上で光っている pixel の数( $N_{pix}$  : Number of pixels)である。IIT 光電面に入射する光量(p.e.数:photo-electron 数)と  $N_{pix}$  の関係は宇宙線のデータやビームテストで調べたこともあったが、入射光量が MIP 程度の領域しか調べられておらず、その光量の領域では、両者は比例関係にあると考えられてきた。本研究に伴う予備実験で、その関係をより詳しく調べてみた。LED 光を IIT に入射した結果が、図 6.4 である。横軸は  $N_{pix}$ (Number of pixels)、縦軸は LED に流れる電流[mA]である。電流と LED の発光量は比例している(図 6.1)が、電流と  $N_{pix}$  は 1 次比例ではないことが判った(図 6.4 では 2 次関数でフィッティングをしている)。LED の光量を入射して調べる以前は、宇宙線のデータや、ニュートリノ反応事象データを使用していて、見ている p.e.数が比較的小さい領域をみていた。実際、図 6.5 で p.e.数 30 くらいより下の領域をみてみれば、1 次比例とみることもできる。しかし、本研究で LED を使用して測定することで、宇宙線では得られない光量の領域まで詳しくデータを取ることができ、入射光量(p.e.数)と  $N_{pix}$  の関係がより詳しく知ることができた。その関係はおよそ 2 次比例の関係であると考えられ、フィッティングによる結果では次式の関係であった。

$$N_{p.e.} = 0.62 + 0.097 \times N_{pix} + 0.00073 \times (N_{pix})^2 \quad (6.1)$$

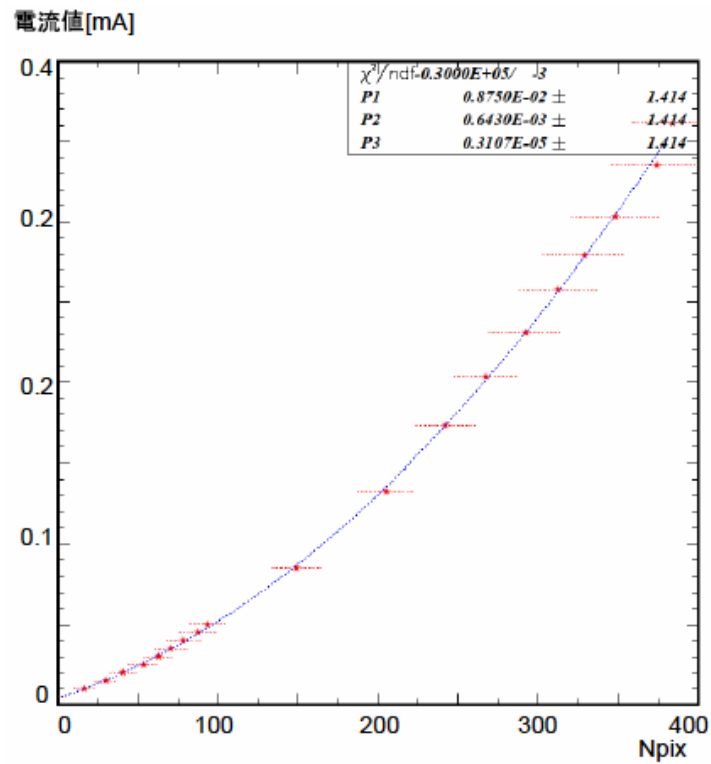


図 6.4 LED 電流(縦軸)と Npix(横軸)

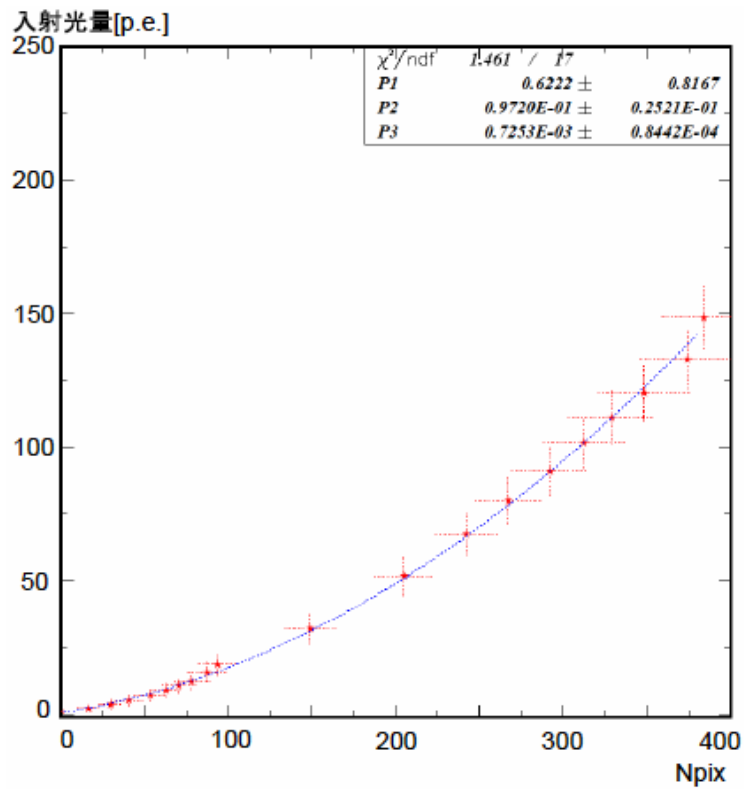


図 6.5 IIT への入射光量(縦軸)と Npix(横軸)

## 第7章 結論

K2K ニュートリノ振動実験において前置検出器の Fine-Grained Detector の一部として SciFi 検出器は、飛跡検出器として大きな役割を果たしてきた。最近では飛跡検出に留まらず、粒子識別も行われ始めており、SciFi 検出器は K2K 実験で大きな役割を担っている。その SciFi 検出器の安定性、特に読み出し機である IIT(Image Intensifier Tube)の安定性をモニタすることは、大変重要なことである。本研究で新しいモニタシステムを構築し導入する前は、1週間で1日だけ、加速器のメンテナンスのためニュートリノビームが止まる日があり、その日にとる宇宙線のデータで確認することにほぼ依存していた。従って、モニタしている時間の間隔は1週間単位となってしまうっており、1週間のリズムで IIT の gain、efficiency、noise 量が変動していたとしてもモニタとしては観測できていなかった。そのため、ニュートリノ run 中の gain、efficiency、noise 量の変動或いは安定度が把握できず、ニュートリノ run 中の変化をイベント解析に反映することは不可能であった。しかし、ニュートリノビームが出ている最中に何もモニタしていなかったわけではない。ニュートリノ run 中のモニタは、off spill でのヒットを観ていた。ヒットが Noise であると考えられるので、一定の光量が IIT に入射しているという保障はなく、何も変化がないという安定性はモニタできていたが、gain の変動を正確にモニタするには至っていなかった。

本研究ではモニタの時間間隔を短くしリアルタイムでモニタする、一定の光量を IIT に入射するという目的で LED をモニタに用いた。まず、ニュートリノビームが 2.2 秒毎に入射されるが、入射直後(off spill)に LED を光らせることでニュートリノイベントには支障のないようにした。ニュートリノビームが入射される度に LED を光らせるので、宇宙線に比べて非常に短い時間間隔でモニタすることが可能となり、ニュートリノ run 中の IIT の gain の安定性、efficiency、noise 量をリアルタイムでモニタするようになった。Gain は 3.8%以内で安定しており、efficiency は  $0.97 \pm 0.03$ (宇宙線以上の光量を入射している IIT の efficiency の平均値を使用)であった。Noise の量は読み出しに使用する電子回路の周辺の温度に依存する部分が大いだが、オフラインで threshold 値を調整することで影響を抑えることが可能であることが判った。電子回路の温度の依存を抑えた状態では noise の量も安定している様子がモニタでき、LED をモニタの道具として導入することで、宇宙線でモニタしていた頃の欠点を補うことができた。また、モニタに使用している LED は特定の scintillating fiber を光らせるので、fiber bundle と IIT の光電面の位置関係がどのようにずれたか、或いは安定しているかをモニタすること(座標モニタ)が可能となった。EL を光らせて調べるのとは違い、ニュートリノ run 中にずれ具合を確認できるのが特徴である。この座標モニタでは、実際に 1pixel(実空間で約 0.18mm)のずれを観測することができた。地震等の突然のアクシデントでニュートリノビームが入射されている最中に fiber bundle がずれても、モニタの時間間隔が短いので、どのタイミングでどの方向にどれだけずれたかが判る。そして、ニ

ユートリノイベントのデータを解析する際、fiber bundle の map をどのデータファイルから切り替えるべきかを知ることが可能となった。

モニタで何か変化があったときには、LED の発光量の変動も原因となる可能性があるのが絶対的なモニタとしては使用できないが、宇宙線によるモニタと比較していくことで、LED の発光量が安定しているのかが確認でき、その上で gain や efficiency の変化を定量的に読み取ることが可能である。LED を用いた IIT の性能モニタはこれまでのモニタの欠点を補充する大変優れたモニタであると言える。

また、シグナル光に対する IIT の応答は、宇宙線やビームテストでしか調べていなかったもので、MIP 程度の範囲でしか知ることができていなかった。その範囲においては、入射光量と  $N_{\text{pix}}$  が比例しているという結果であった。本研究に伴い予備実験として、LED を用いてその関係をより大きな光量の範囲まで拡大して調べた結果、入射光量の  $1/2$  乗に比例していると思われる結果を得た。これまで得られなかった光量の領域まで調べることができ、より詳しく両者の関係を知ることができたので、 $N_{\text{pix}}$  から入射光量を求め、SciFi 検出器を通過した荷電粒子のエネルギーの算出の際の精度を上げることが期待される。

## 謝辞

本修士論文をまとめるにあたって、数多くの方々にお世話になりました。この場をかりてお礼を申し上げます。

初めに、K2K実験の責任者である京都大学の西川公一郎教授、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の中村健蔵教授には、本実験に参加させて頂いたことを深く感謝致します。そして、神戸大学粒子物理学大講座の武田廣教授、野崎光昭教授には、K2K実験の参加の機会を与えて頂いたことを深く感謝します。

指導教官である神戸大学の原俊雄助教授には常日頃から、研究だけでなく、幅広い知識と教養を教えて頂きました。青木茂樹助教授には、研究に関する数々の的確な御指導、細やかな御助言を頂きました。そして、鈴木州助手には、日常生活から本研究に至るまで、様々な御助言を頂きました。最後まで見捨てないで、御指導下さった先生方に、深く感謝致します。

岡山大の作田誠教授には、本研究を進めるに当たって数々の貴重な御指導、御助言を頂き、大変感謝しています。また、同じK2K・SciFiグループの石田卓助手には、ソフトウェアに関することをはじめ多岐にわたる御指導を頂きました。ありがとうございます。また、KEKの早戸良成助手には、心から感謝しています。

神戸大学の先輩であるKEKの岩下大器様には、大変お世話になりました。SciFi検出器の解析について細かく一から教えて頂いたことはもちろん、常に、冷静に論理的に物事を見た上での御助言は、本当にためになりました。

本研究に必要な道具の作成では神戸大学工学部機械工作センターの皆様適切な御助言とご指導を頂きました。大変感謝致します。

皆様には、本研究の物理的な細かいサポートや本当に困った時にいつも助けて頂きました。数々の御協力と支えなしには、本研究を進めることも、本修士論文を書き上げることも出来なかったと思います。ありがとうございました。

神戸大学の先輩である関口舞様には、研究生活の心構えなどを教わりました。有難うございます。また、同じ神戸大学のK2Kグループである森口曜様、青山祐三様には、実験に関する意見を頂いたり、データ処理の協力を頂いたり大変お世話になりました。

大学や研究機関を越えて、たくさんの方々感謝しています。私が神戸大学、同大学院の計6年間を研究も含めて、楽しく充実した日々が過ごせたのは皆様のおかげです。心からお礼を申し上げます。

最後に、私のことを暖かく見守り続けてくれた家族と友人たちに深く感謝します。

## 付録 A IIT の gain の位置依存性

IIT の光電面に同じ光量が入射していても、その入射位置によって gain に差があれば  $N_{\text{pix}}$  値にも違いが出る。K2K・SciFi イベント解析において IIT の位置依存性問題は大変重要な問題で、位置依存性があると考えるのが通常である。しかし、解析で付加する誤差範囲内であると考え意見が多く、位置依存性問題に対して結論を出す或いは正式に見解を示すことがなされてこなかった。そこで、付録として、IIT の gain の位置依存性について、実機 24 本がどうなっているのか、宇宙線のデータを使って調べてみた。その結果をこの付録で紹介する。ヒストグラムは横軸が  $N_{\text{pix}}$ 、縦軸がイベント数で、1 ページで IIT1 個分を載せ、順番に IIT 番号が 1 番から 24 番まで載せる。CCD 画面の領域の区切り方は、次の図 A.1 で示すように楕円形に 3 つに区切り、更に、第 1 象限から第 4 象限のように 4 つに分け、合計 12 の領域に分けた。また、ヒストグラムの並び方については図 A.2 でも示すが、図 A.1 とできるだけ領域の配置が同じになるようにしてある。尚、区切りとして設定した楕円の大きさは、CCD 座標の大きさで、一番小さい楕円が長軸が 250 短軸が 160、中間の大きさの楕円は長軸が 375、短軸が 240、図 A.1 で最も大きく描いている楕円は CCD 画面上の fiber bundle の領域を模式的に描いたものである。

画面の内側と外側で gain に違いがあると考えられていたが、今回調べた結果では、その傾向が示唆されるものであった。更に、画面の中心が gain のひずみの中心とは必ずしもなっていない結果を得た。だが、個体差はあっても、ひずみの中心は CCD 画面の中心付近であることは共通していた。また、gain の差は宇宙線で見るとは、10%程度であった。

統計数が少ないためにヒストグラムのフィッティングがうまくできていないものもある。

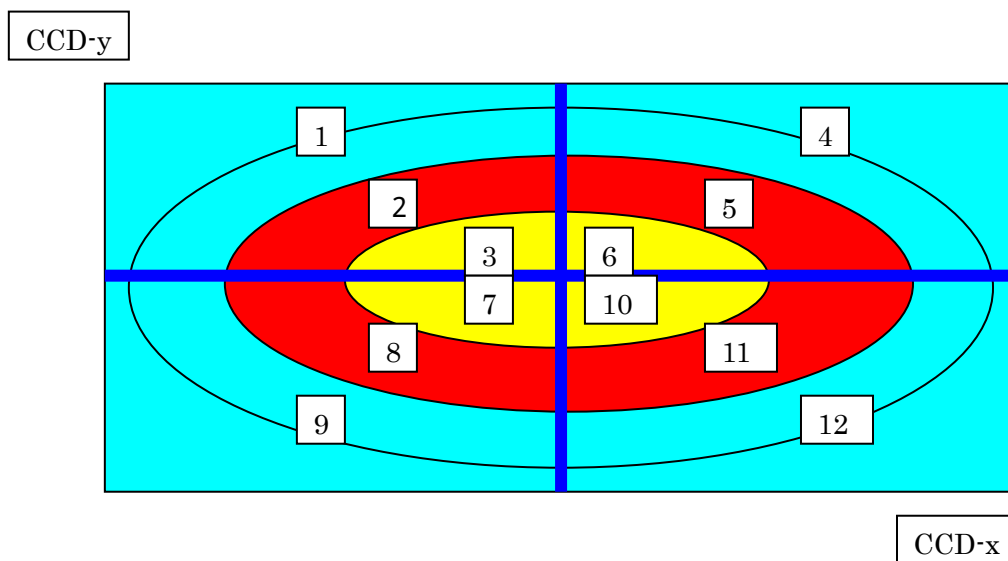
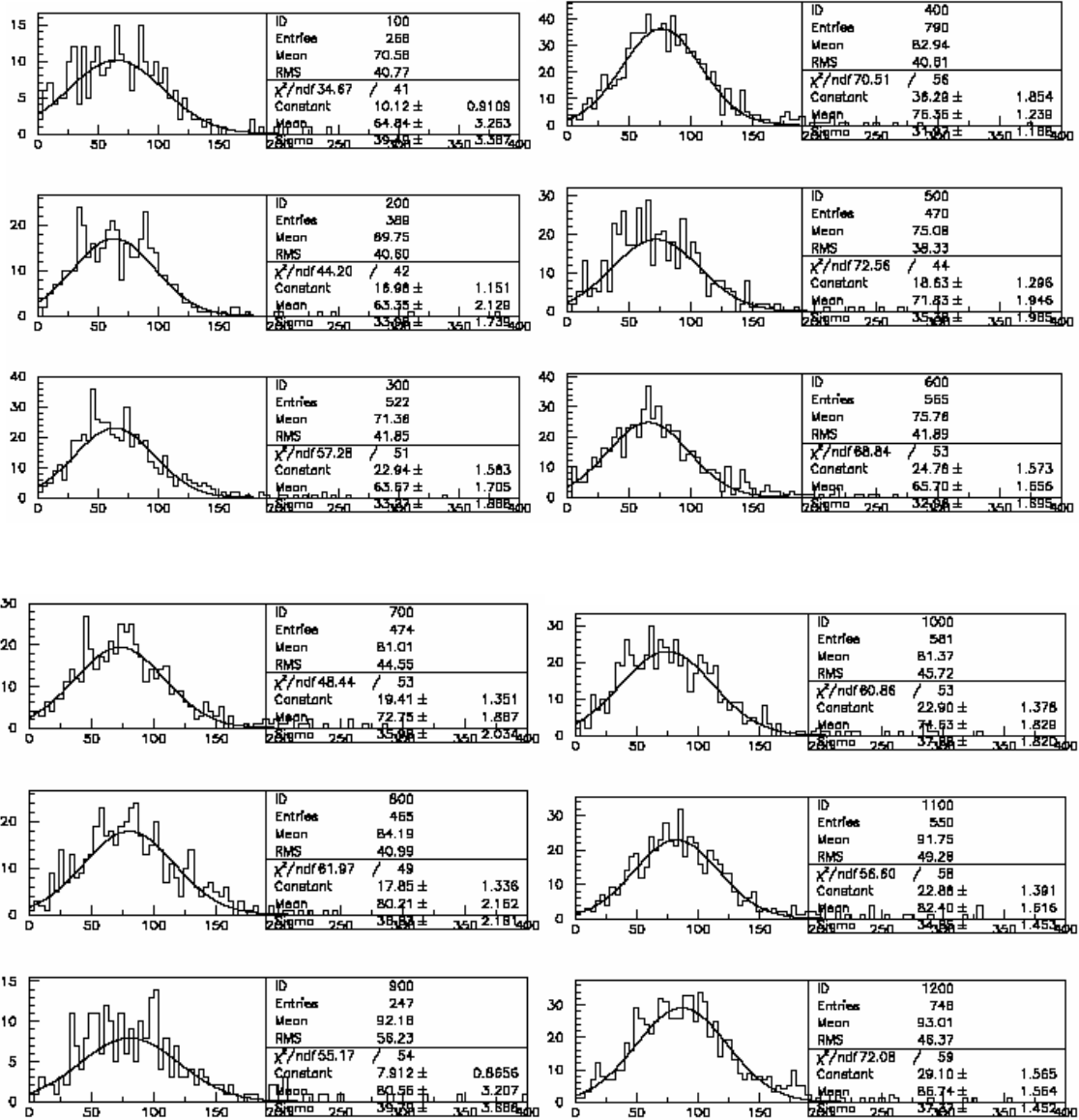


図 A.1 CCD 画面の区切り方

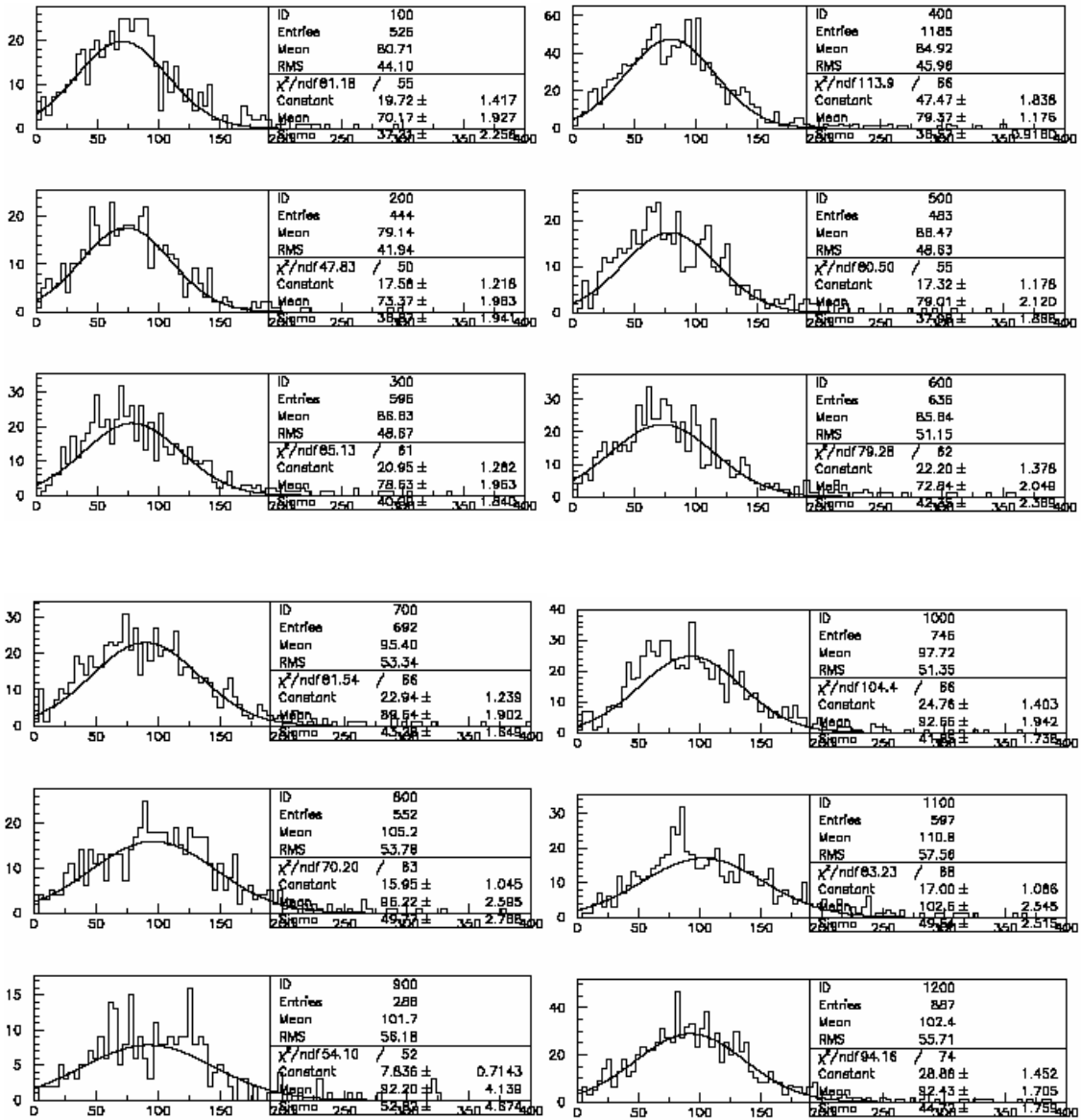
1	4
2	5
3	6
7	10
8	11
9	12

図 A.2 ヒストグラムの並び方  
(番号は図 A.1 の領域番号)

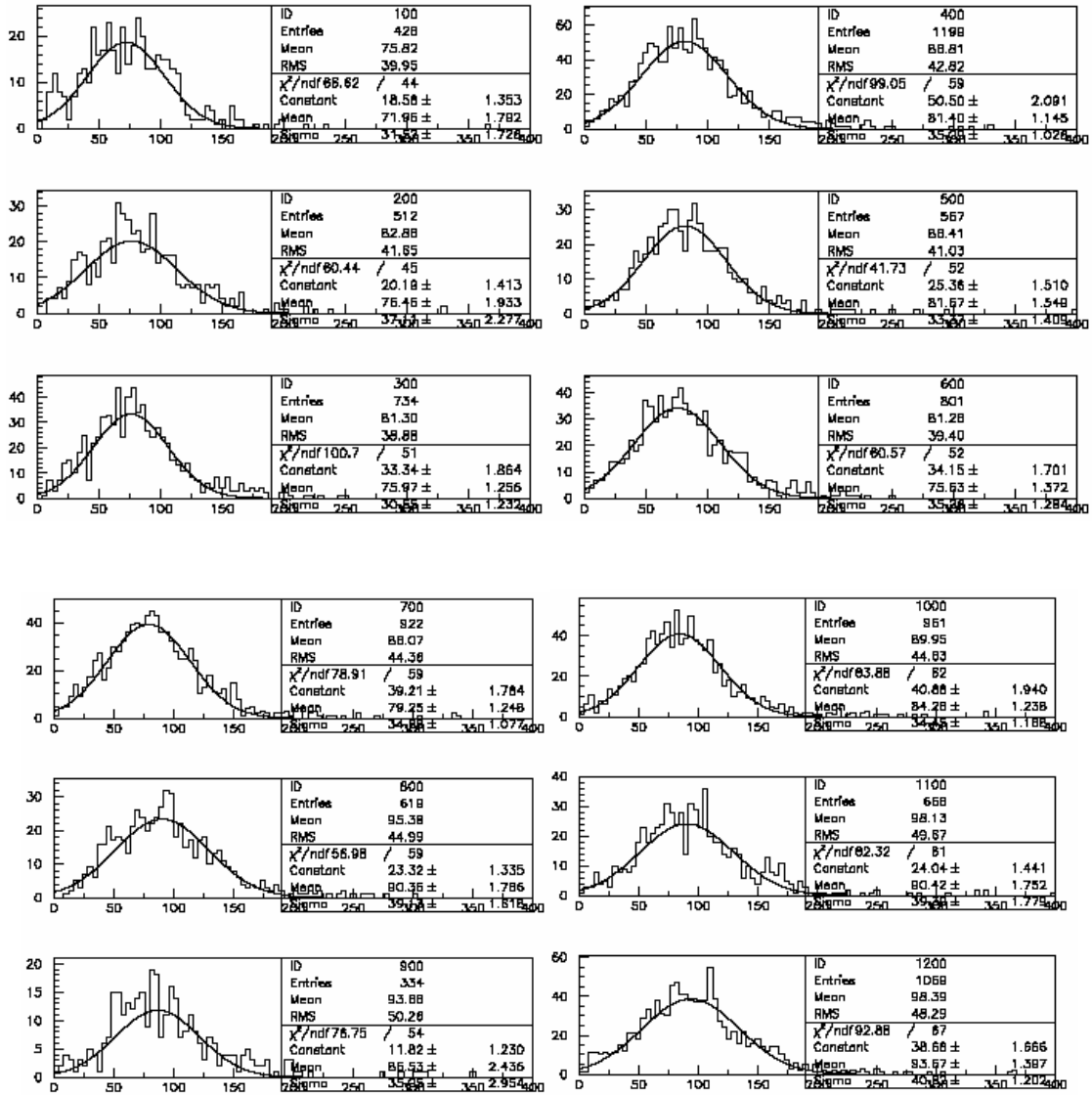




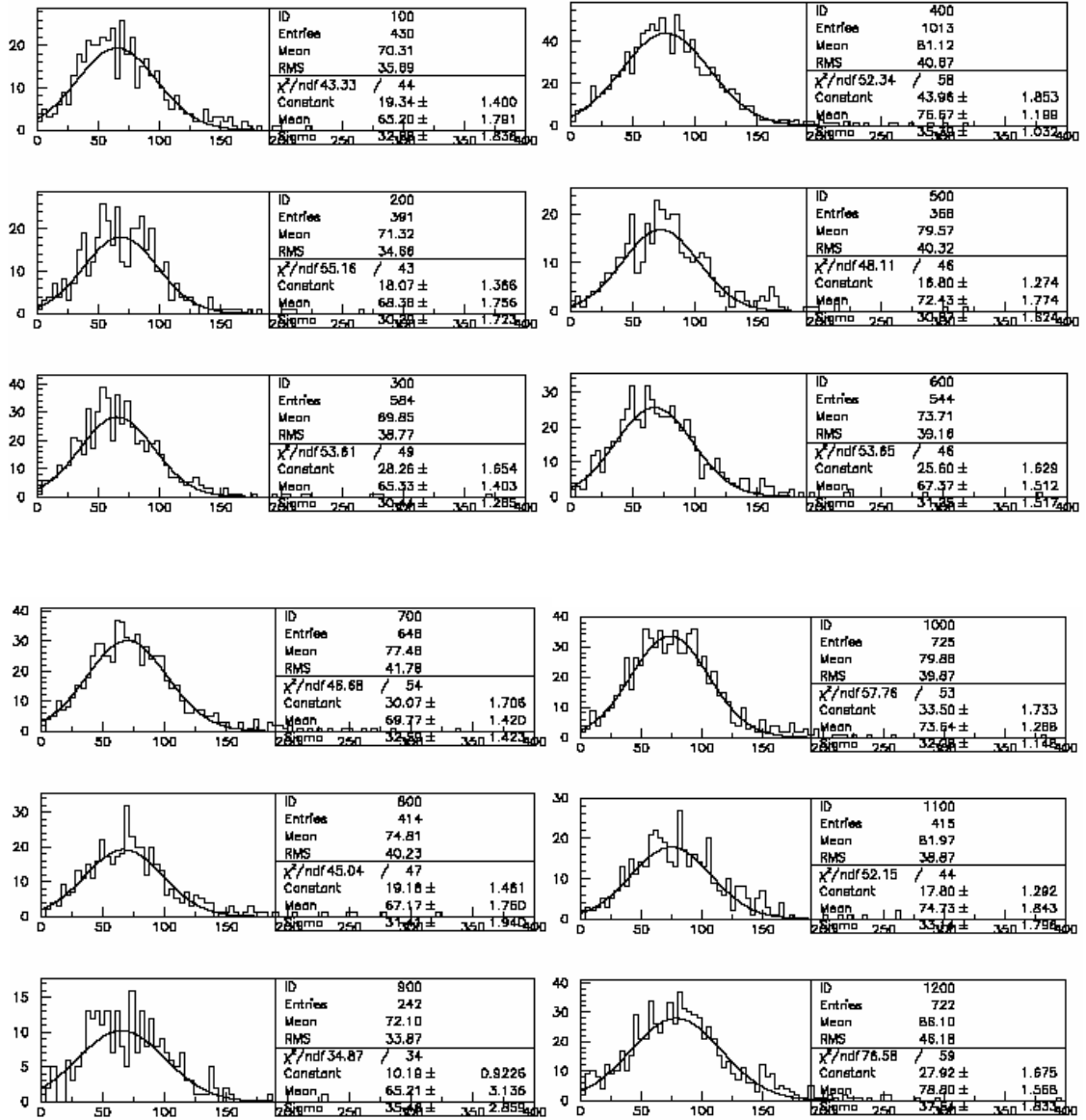
IIT 1



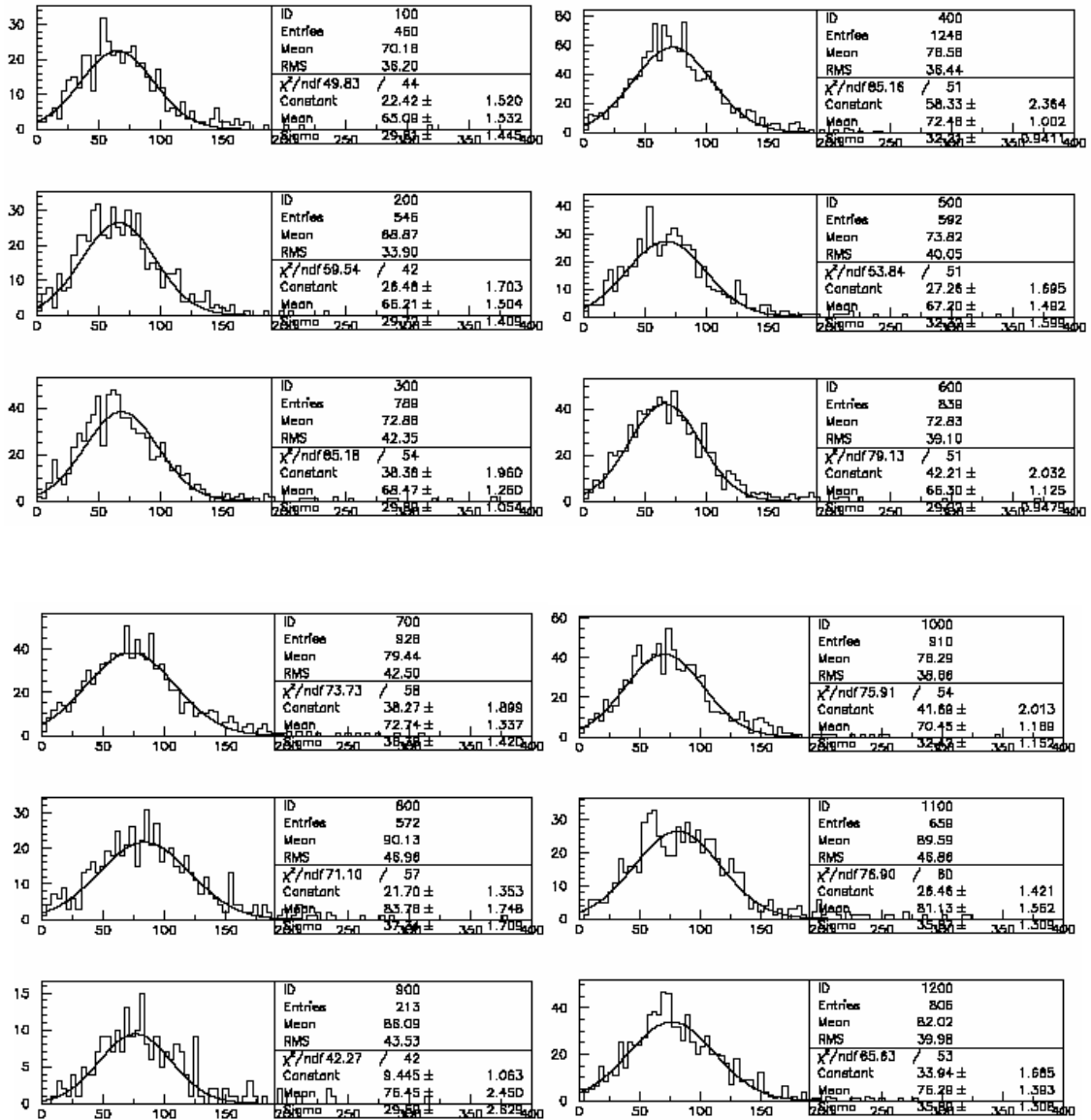
IIT 2



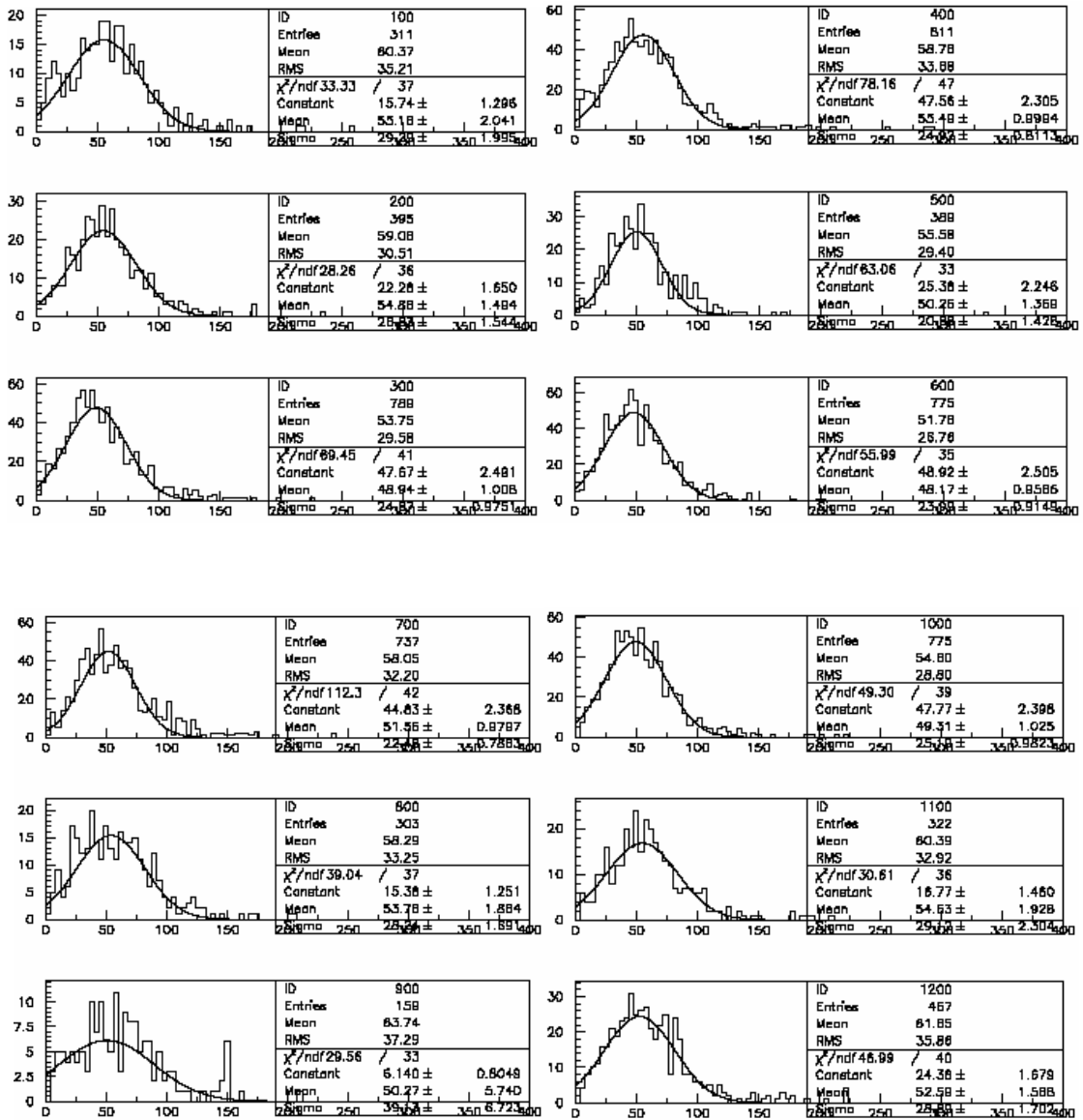
### IIT 3



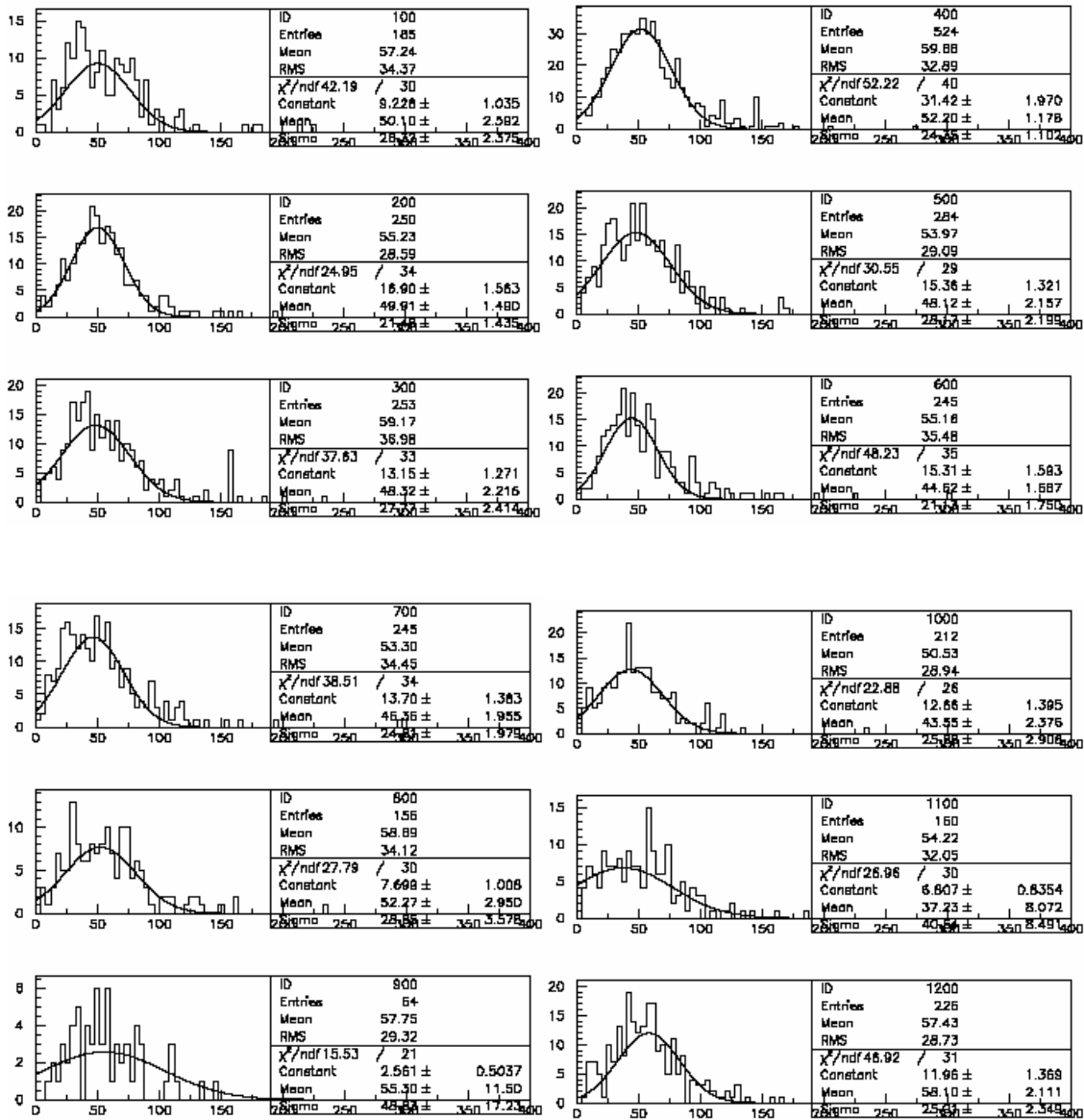
IIT 4



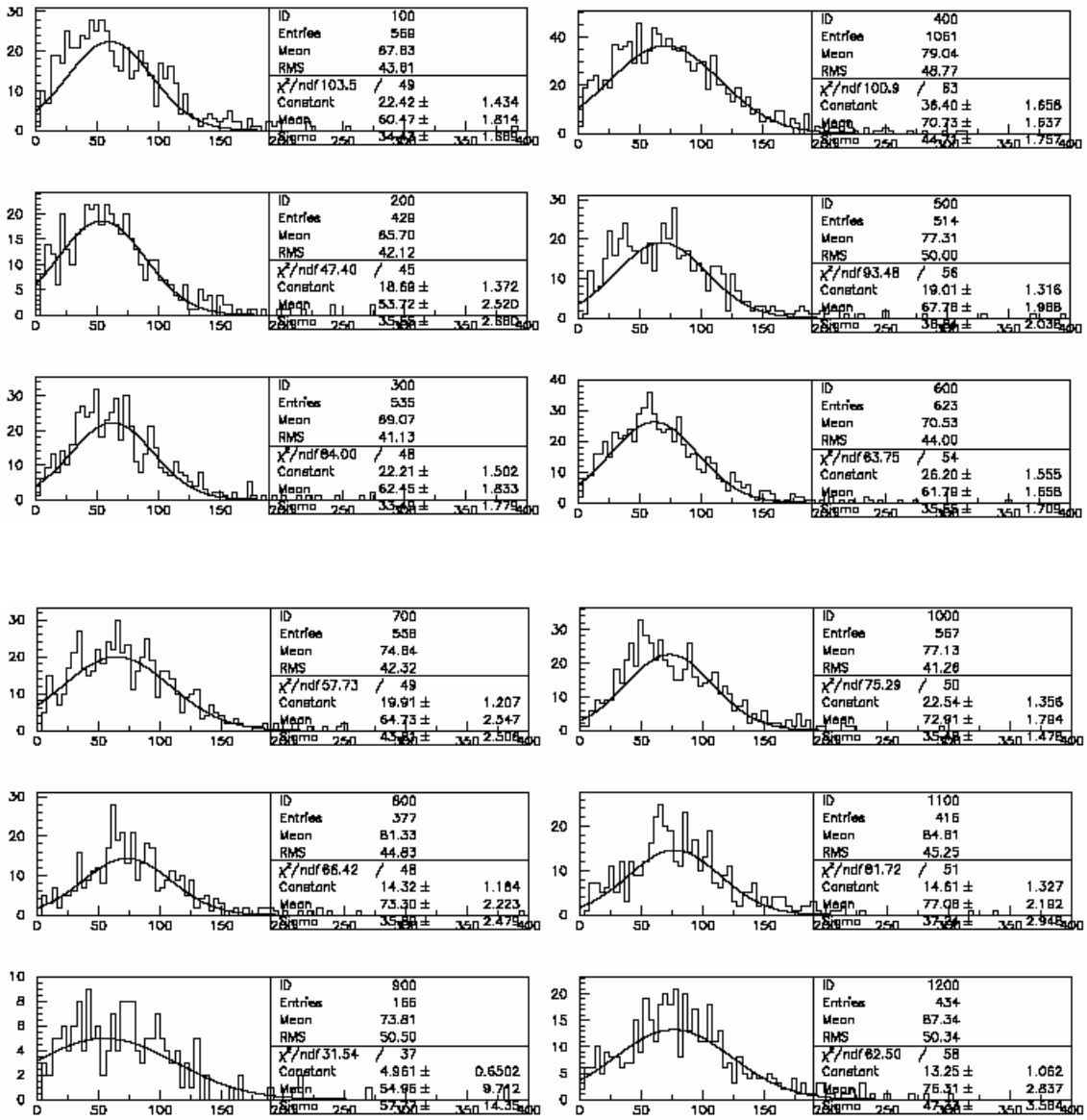
### IIT 5



### IIT 6

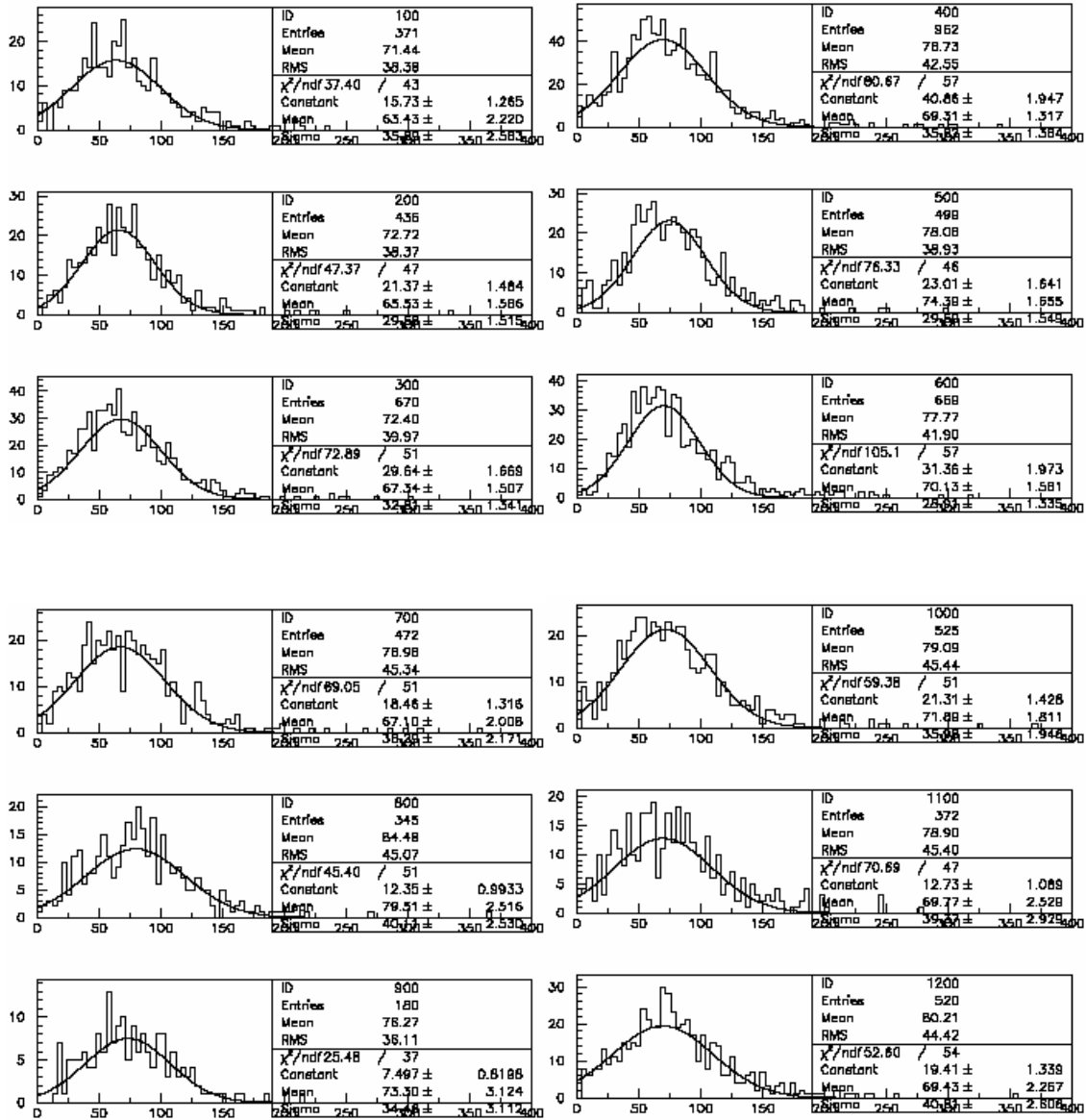


IIT 7

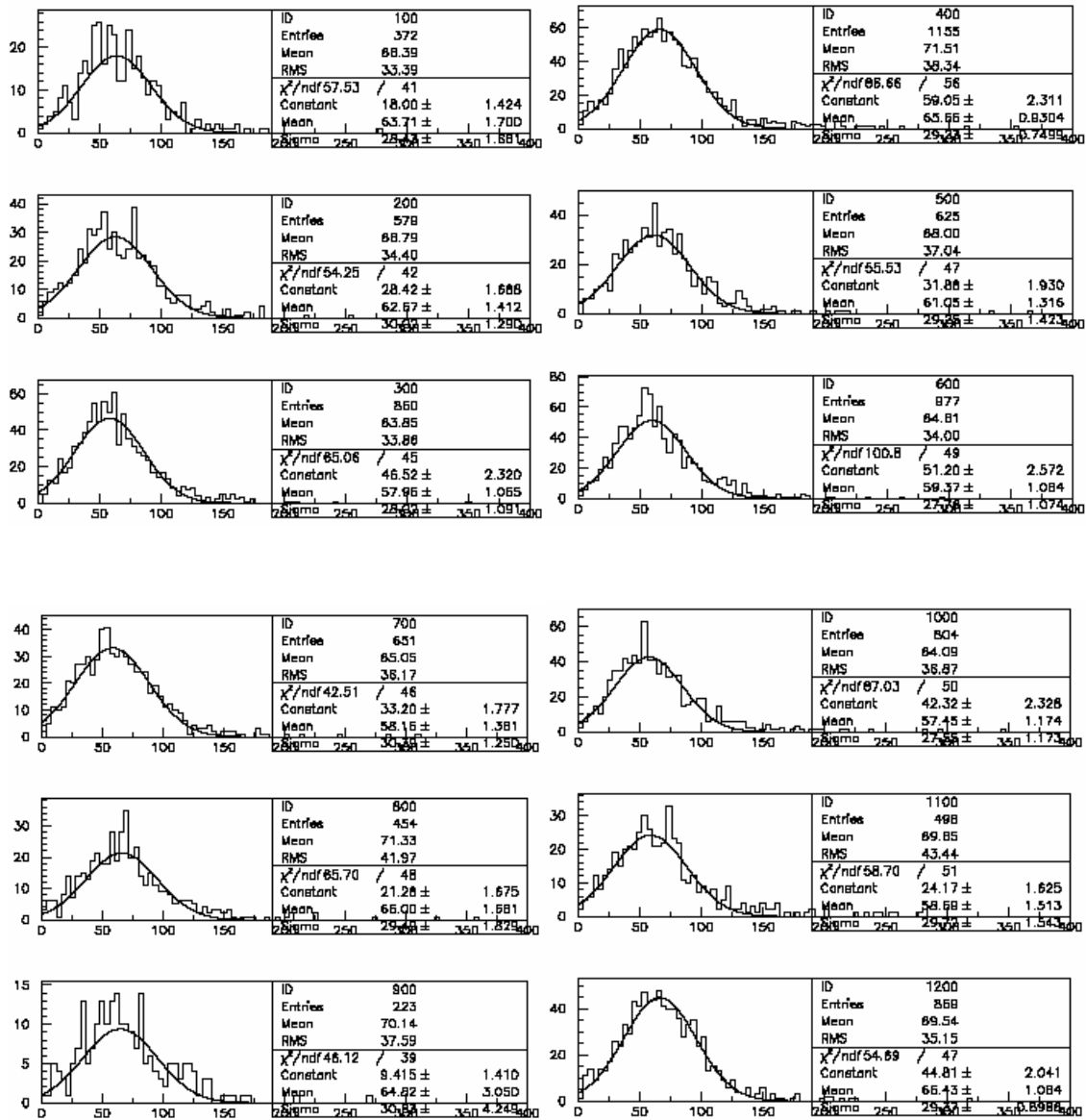


IIT 8

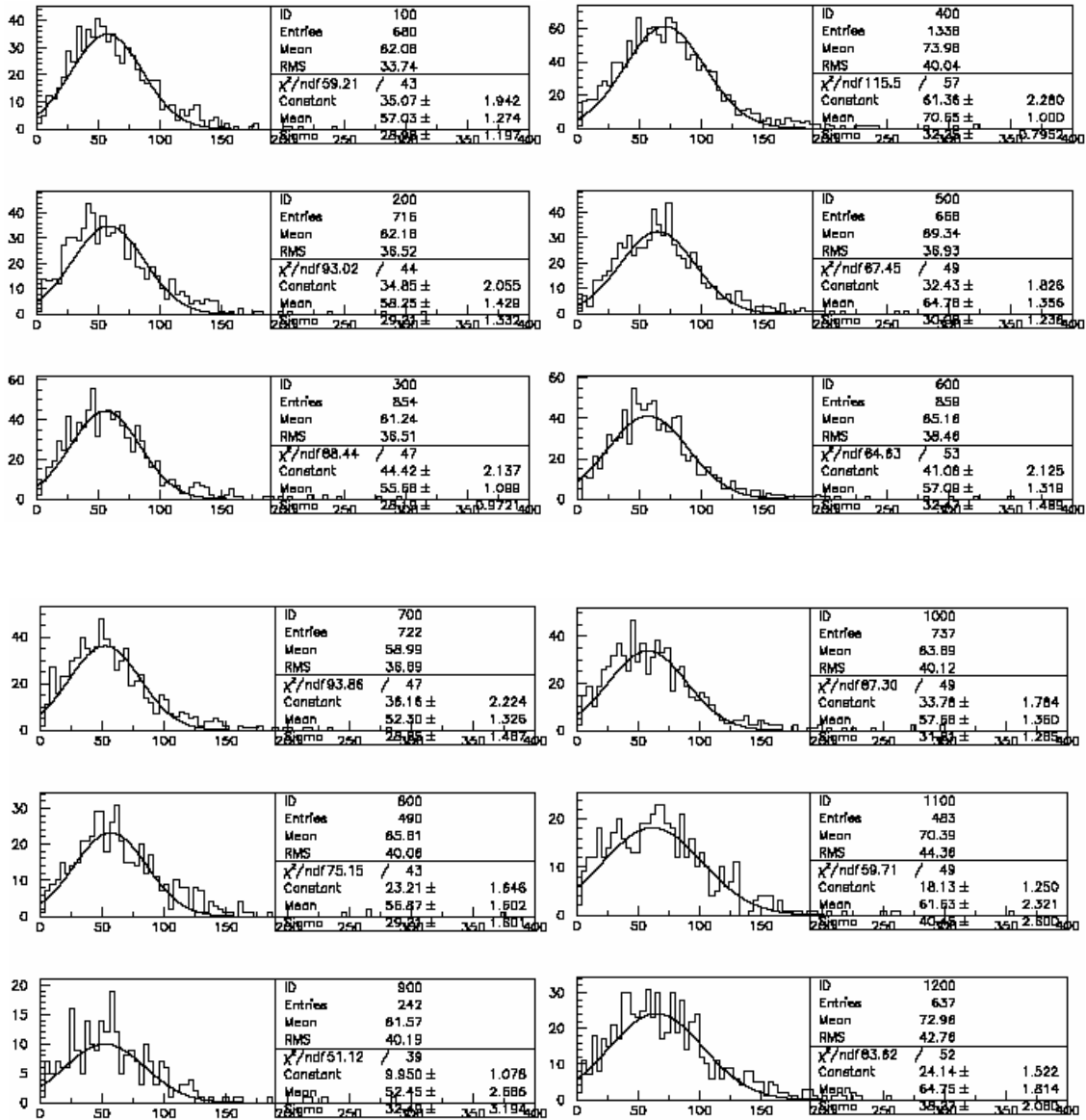




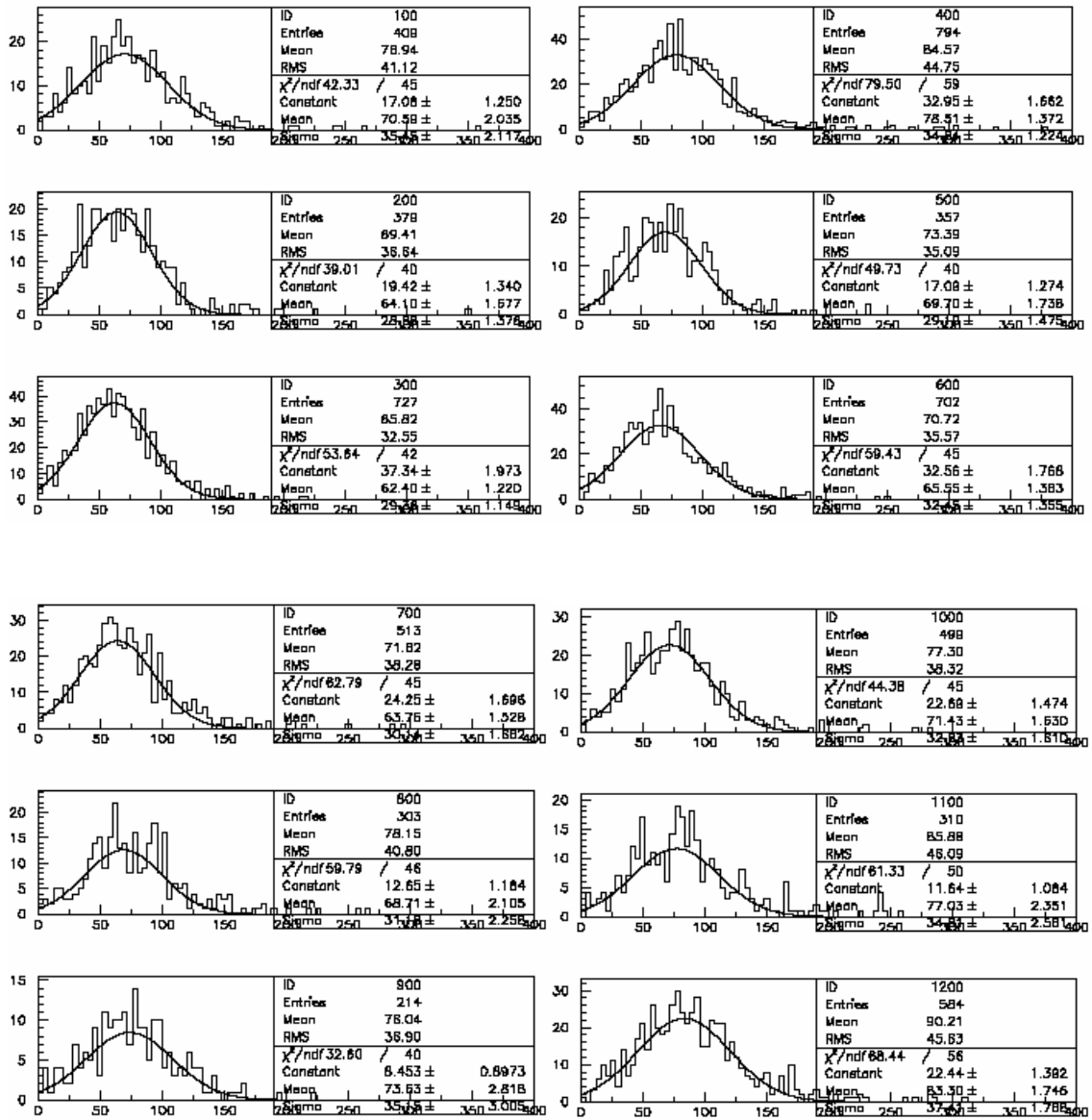
## IIT 9



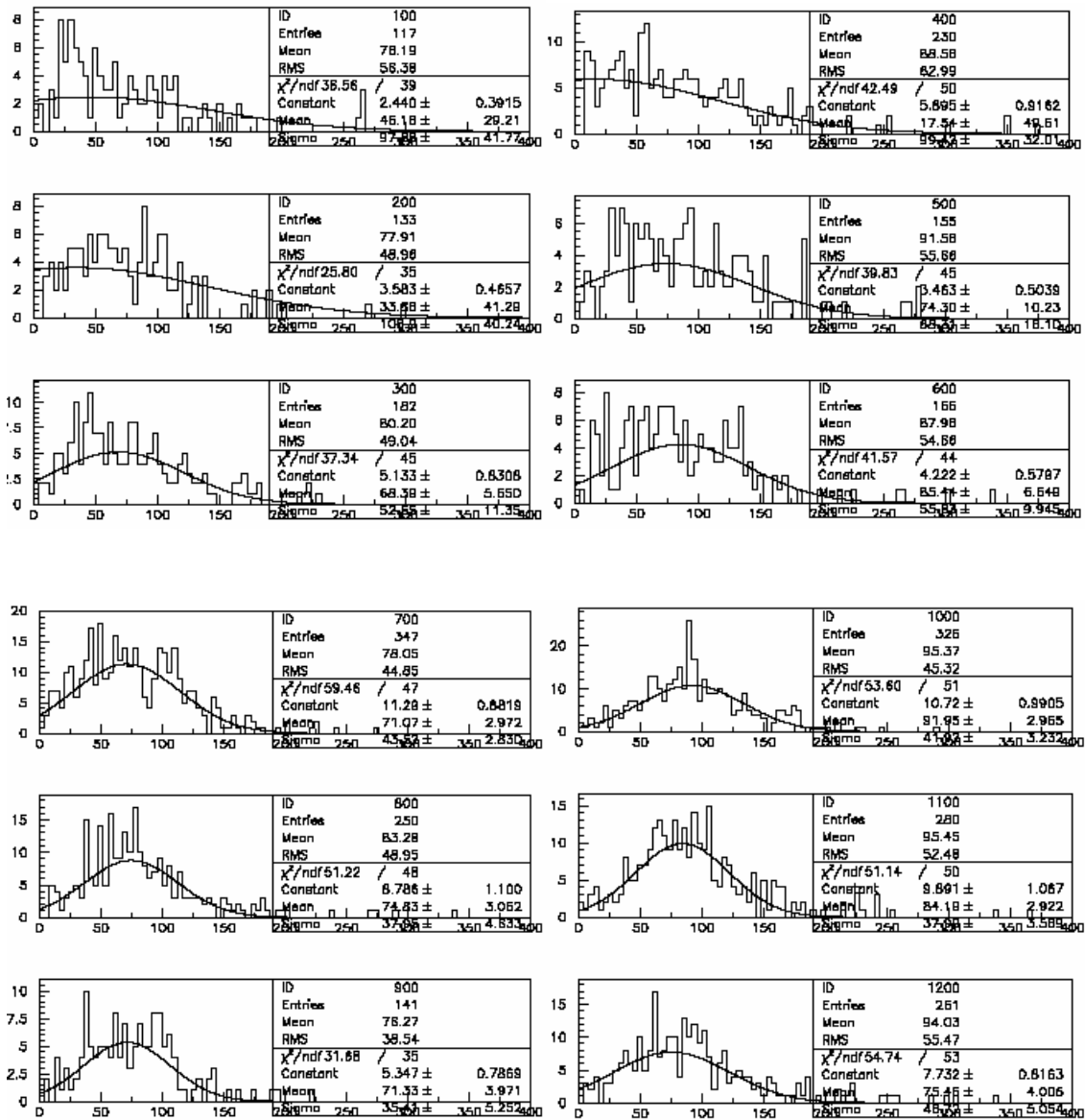
IIT 10



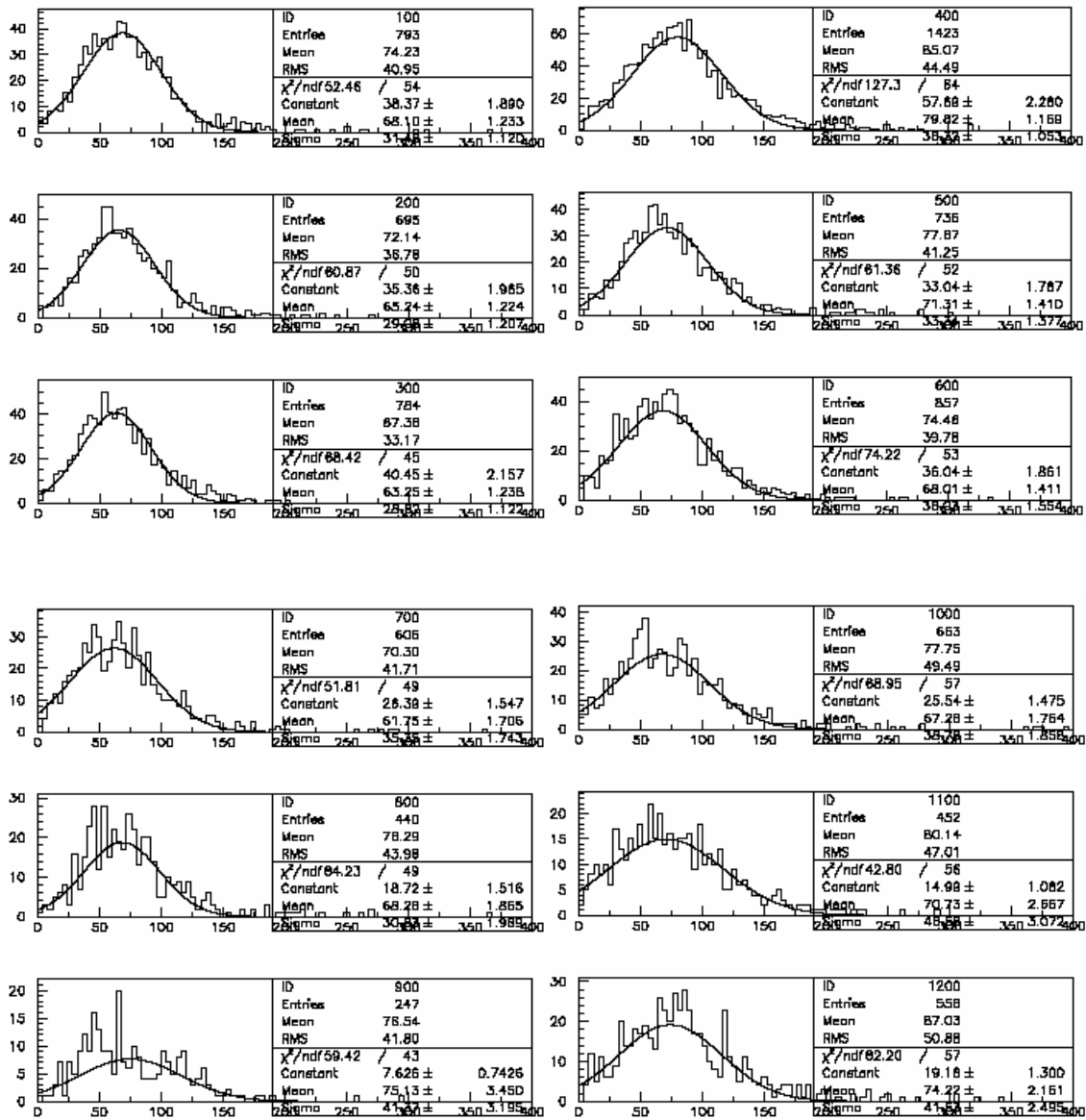
IIT 11



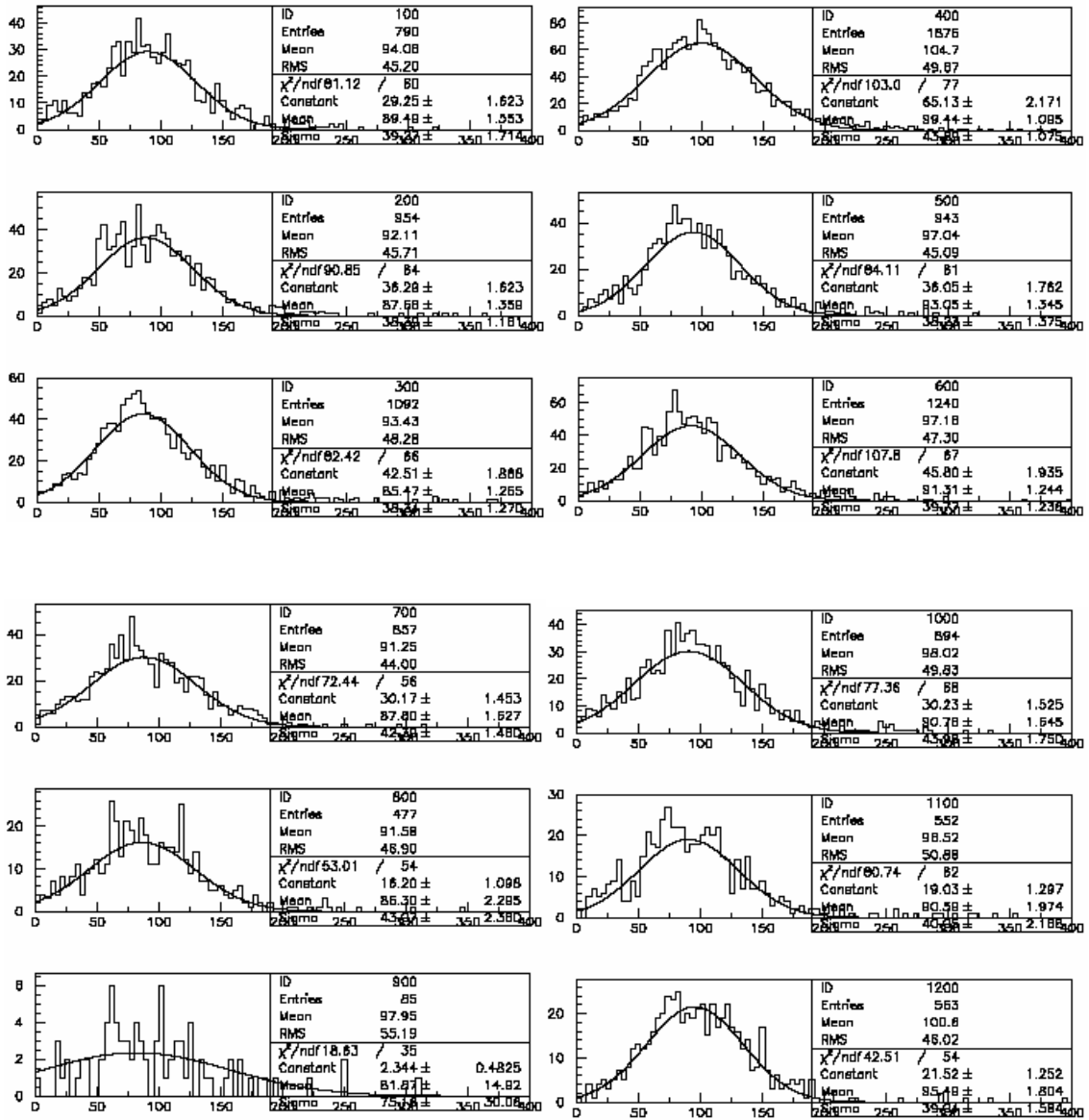
IIT 12



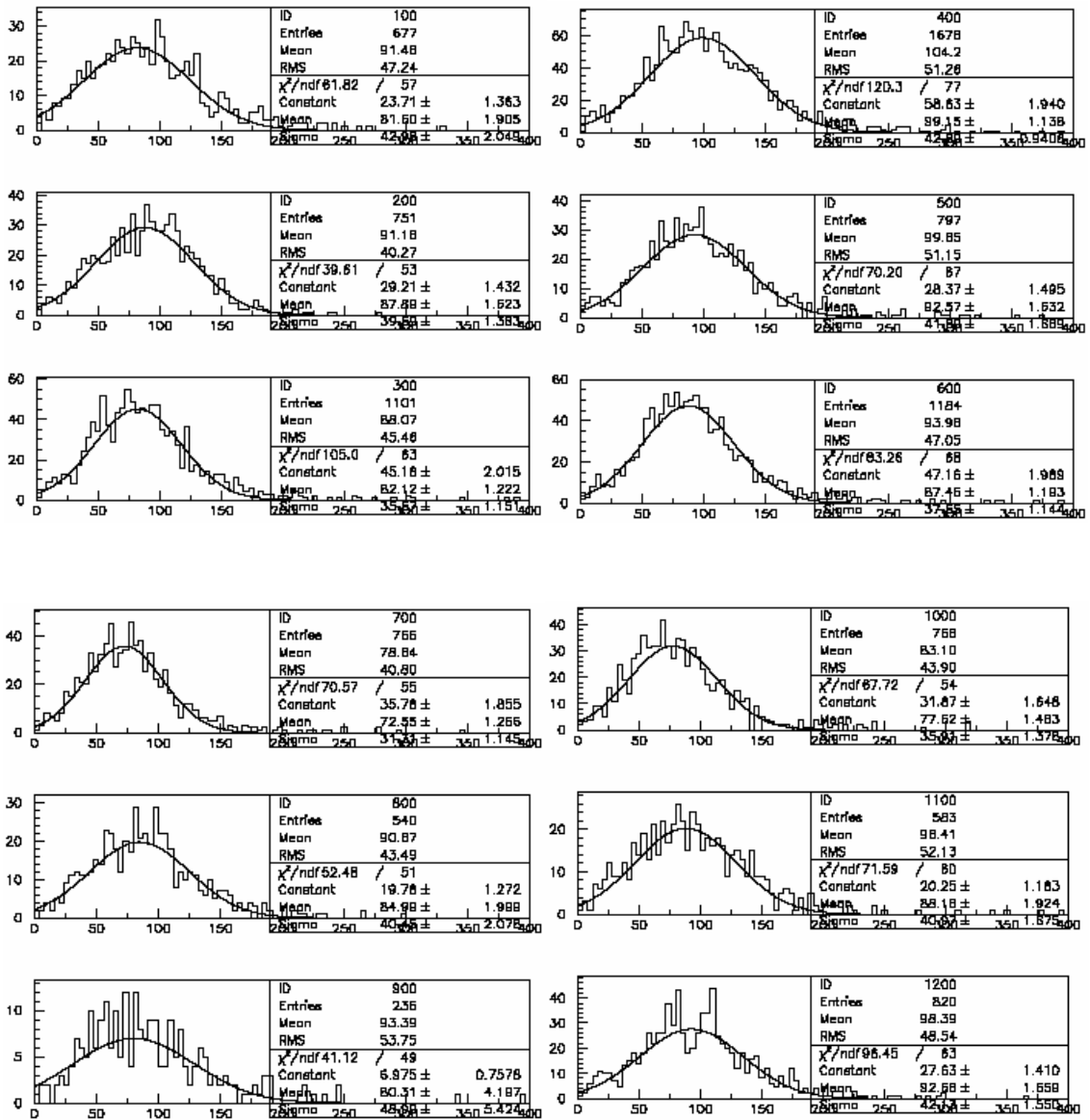
IIT 13



IIT 14

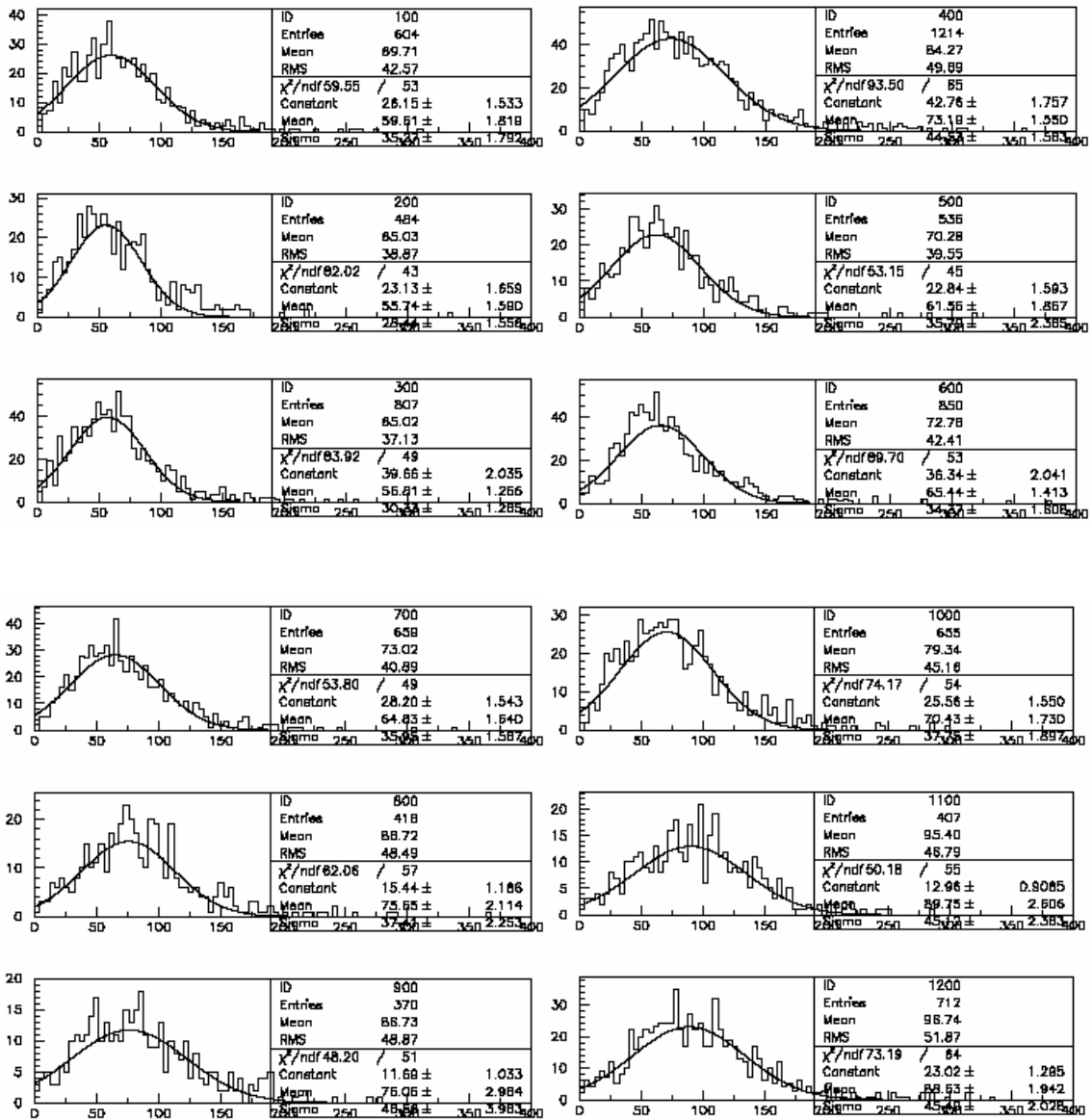


IIT 15

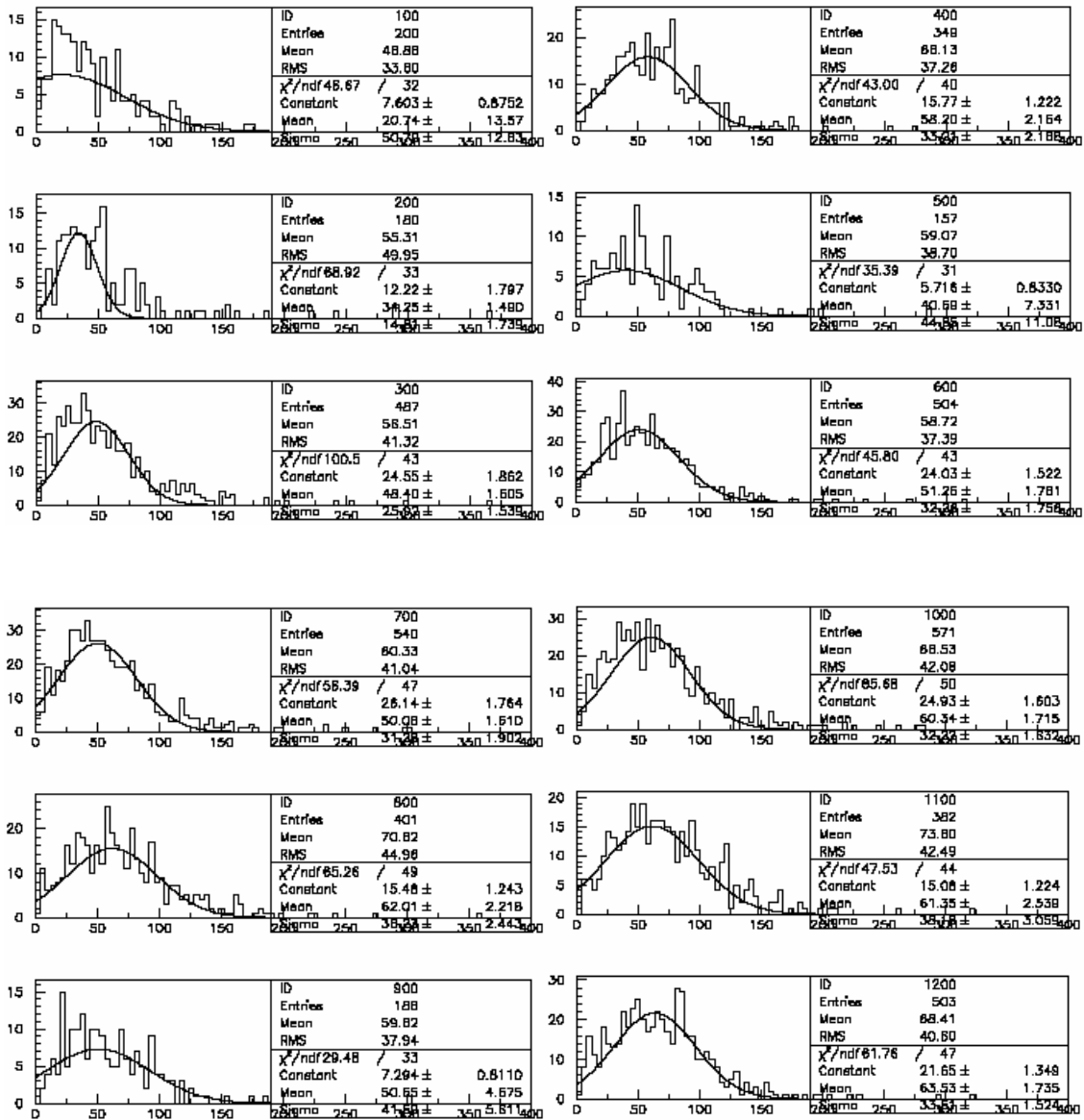


IIT 16

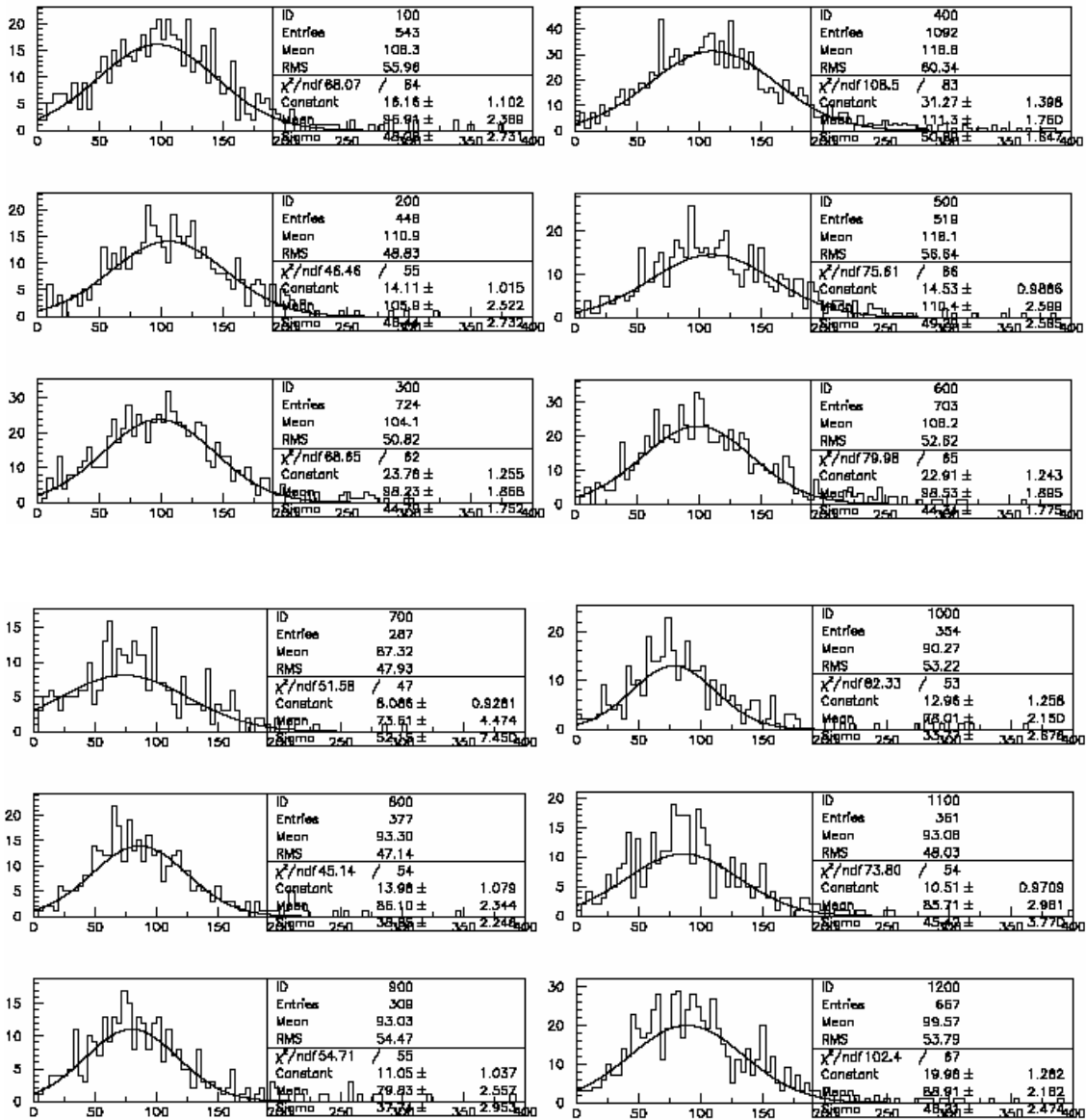




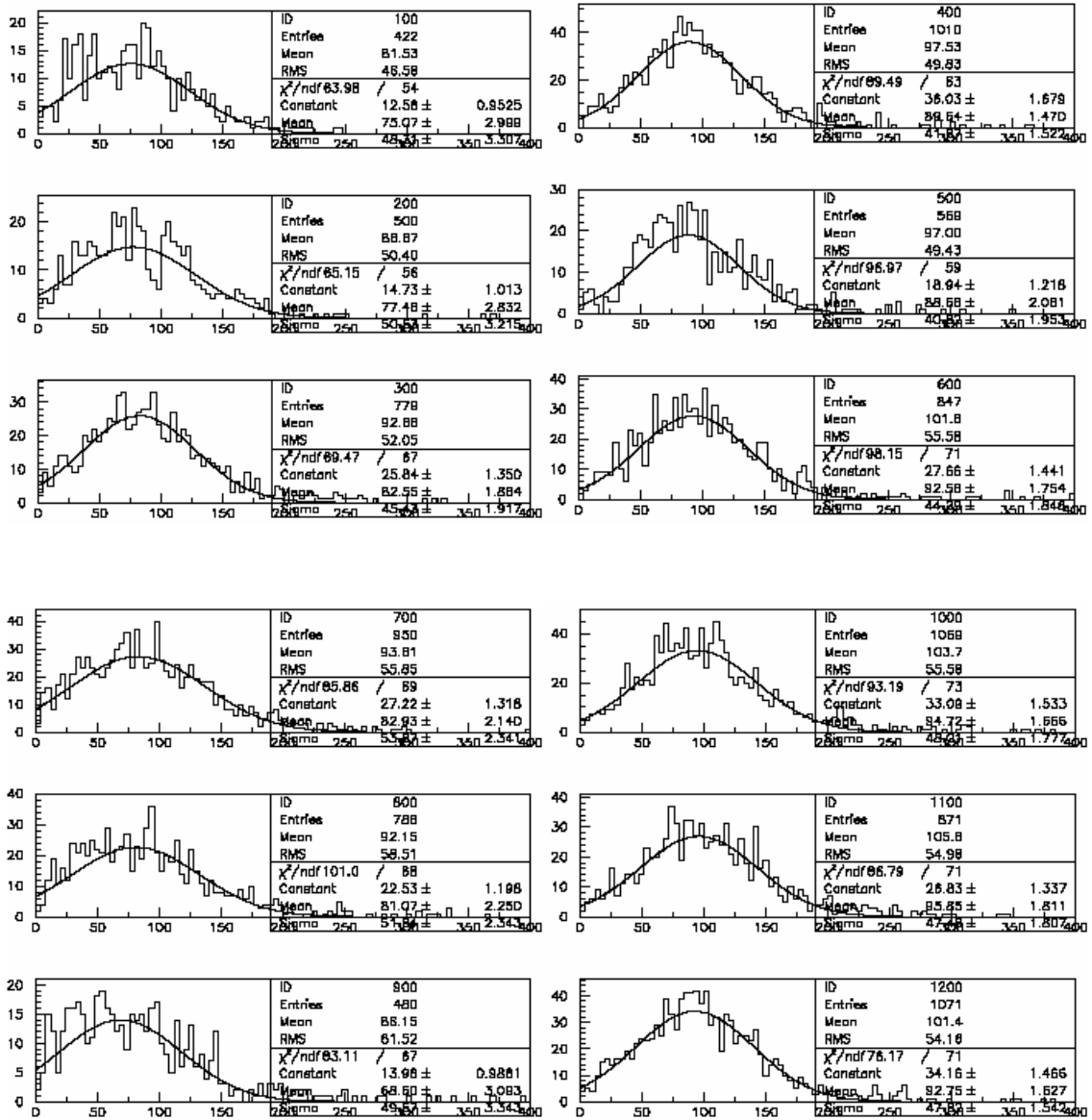
IIT 17



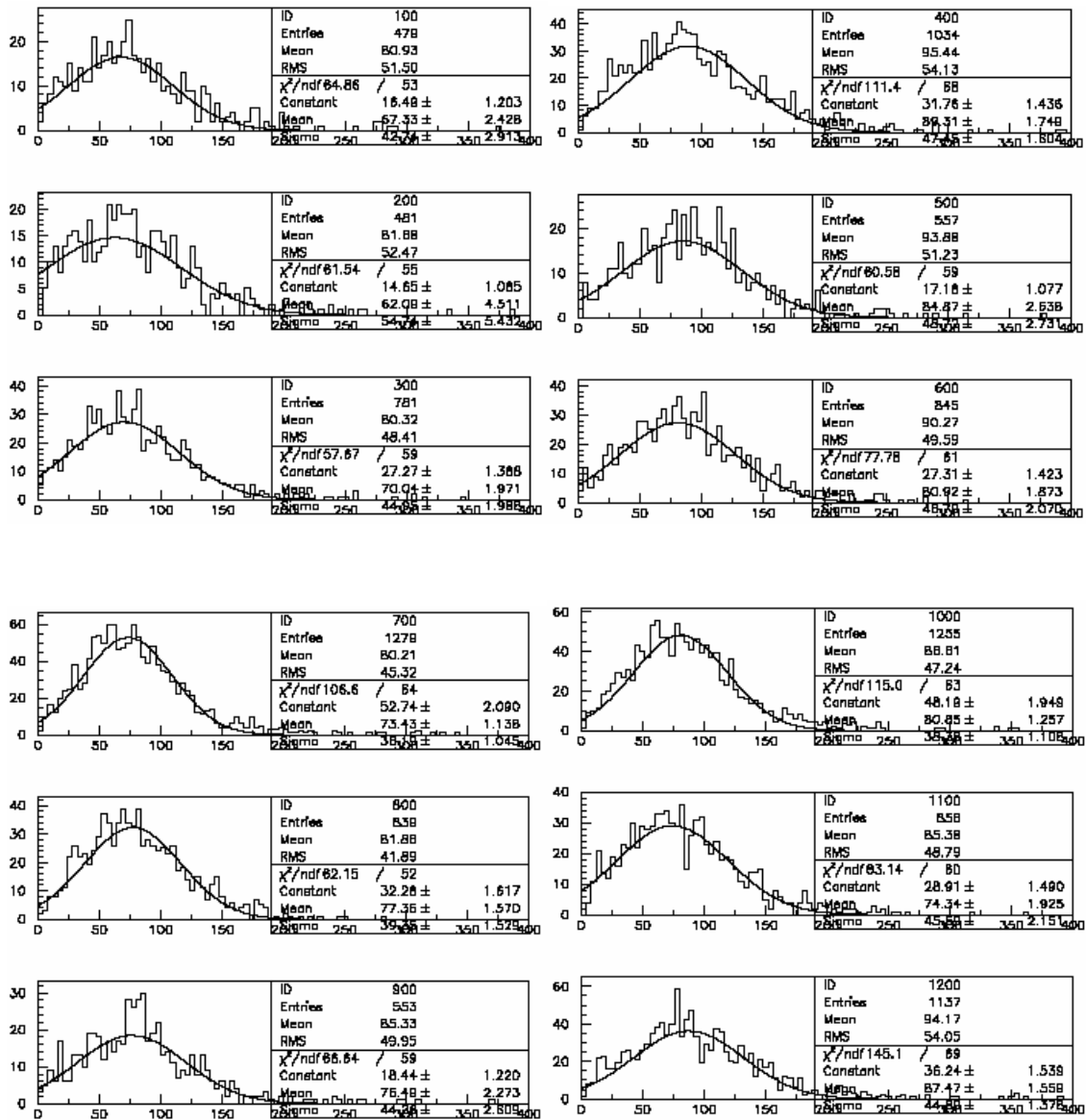
IIT 18



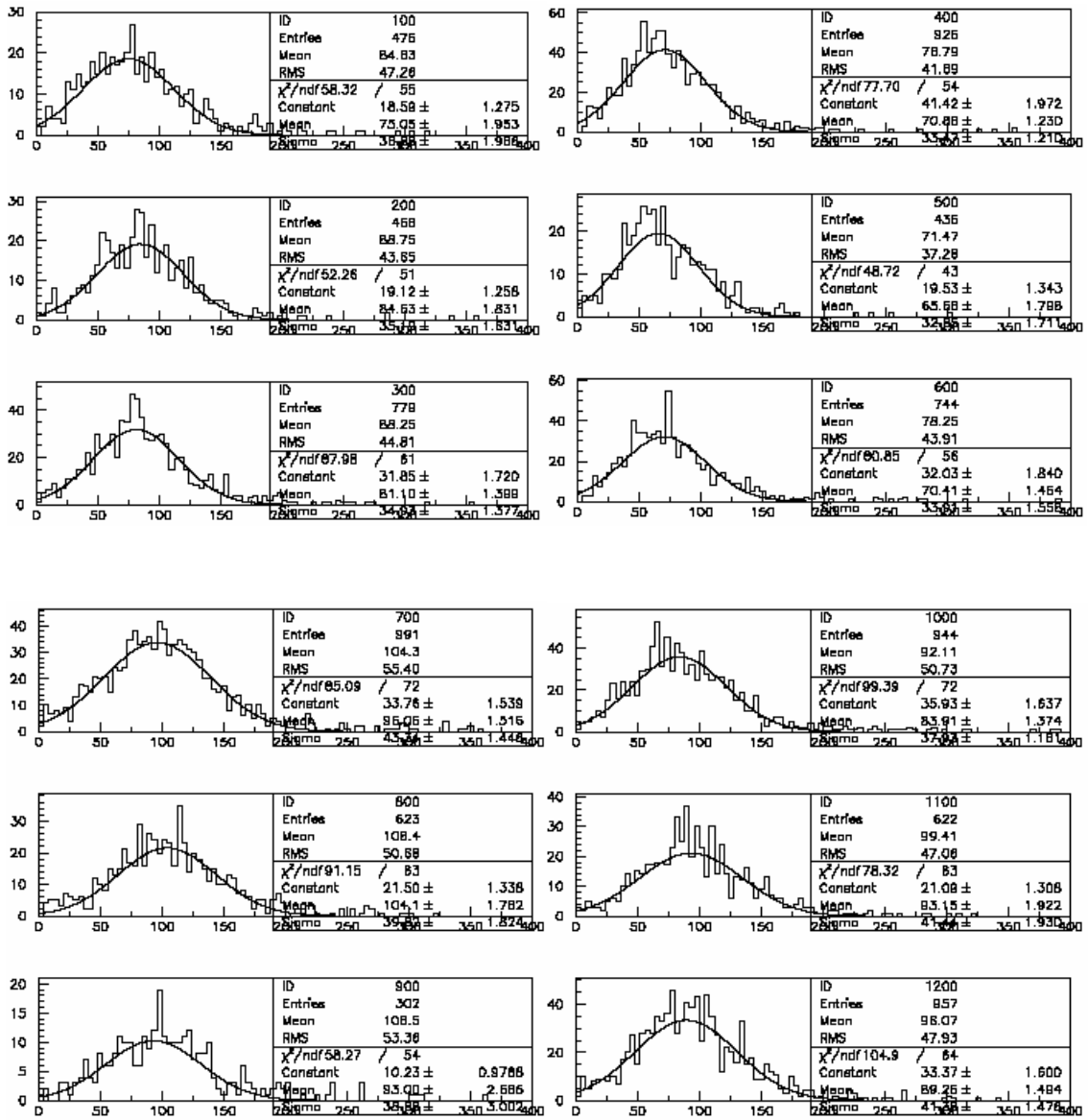
IIT 19



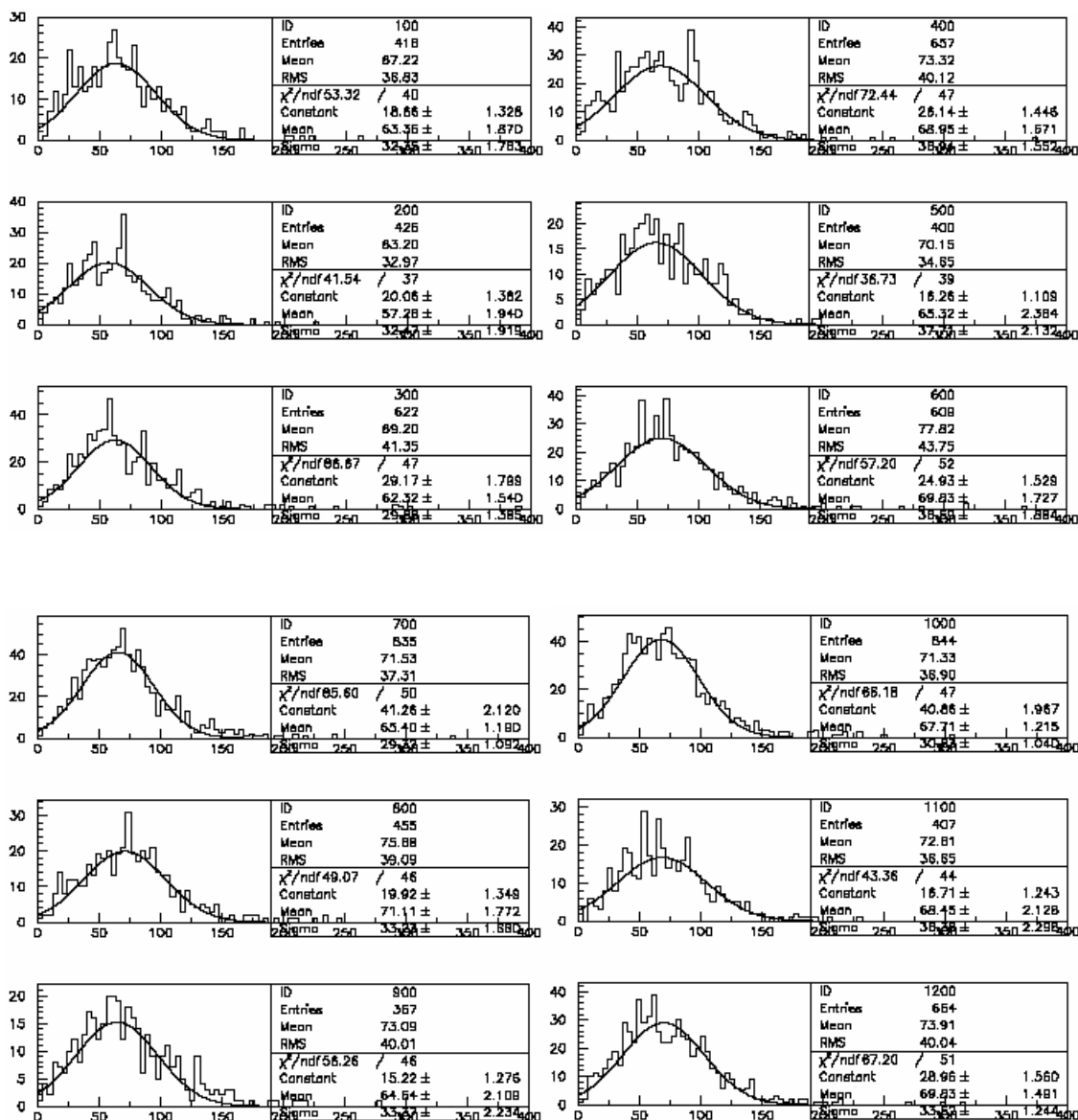
IIT 20



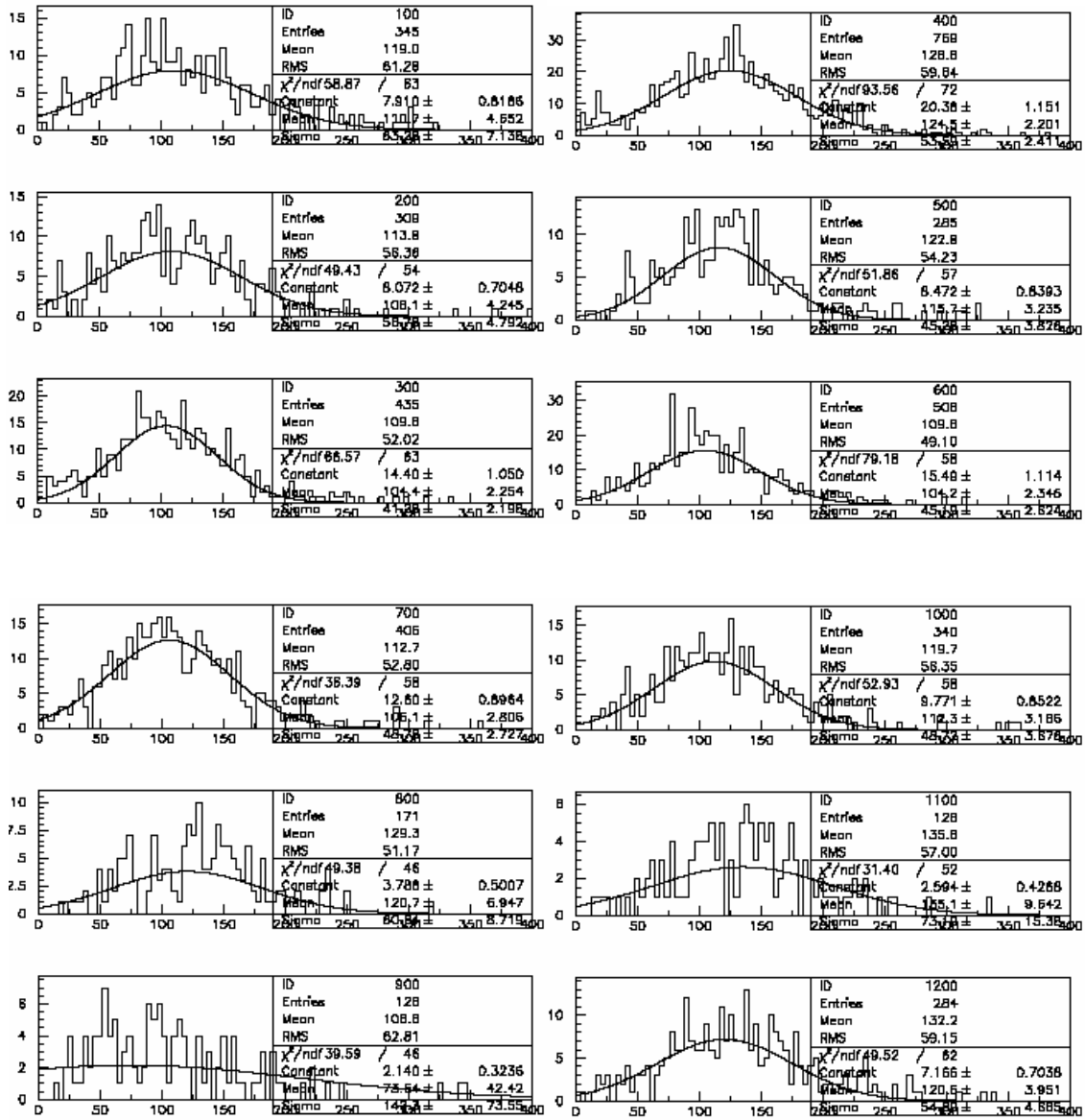
IIT 21



IIT 22



IIT 23

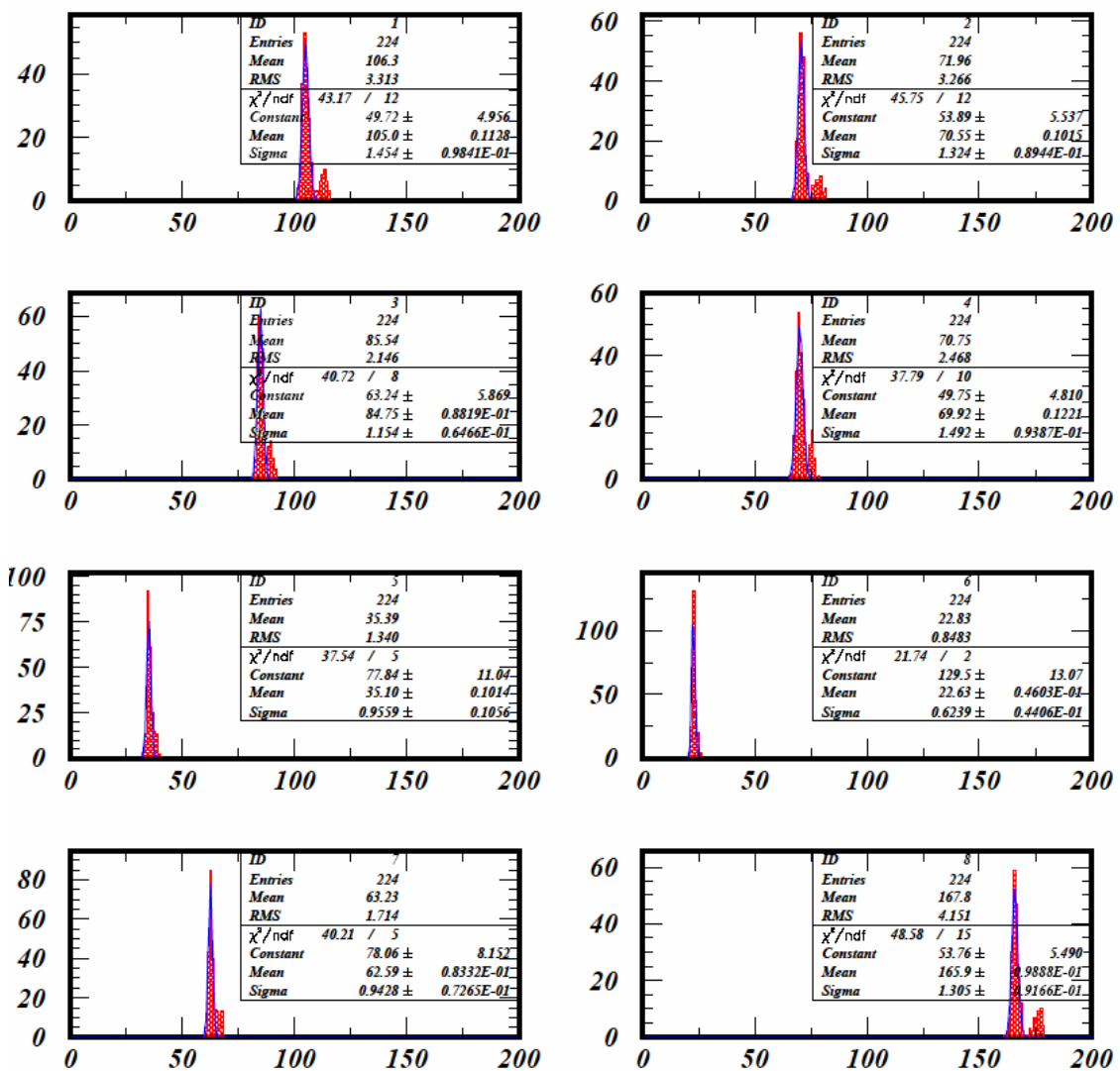


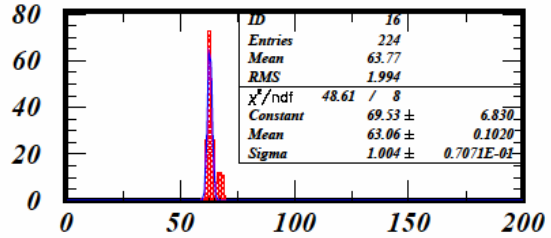
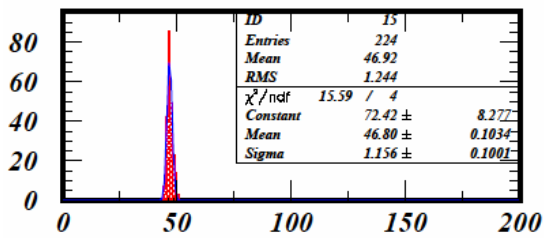
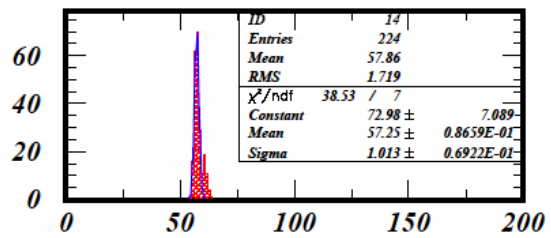
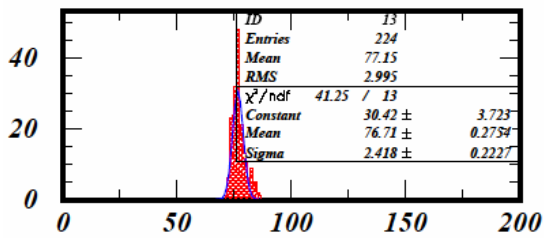
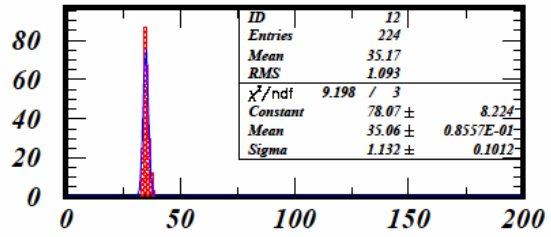
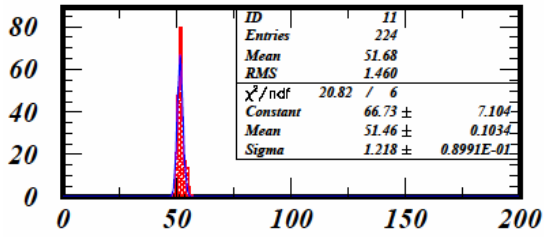
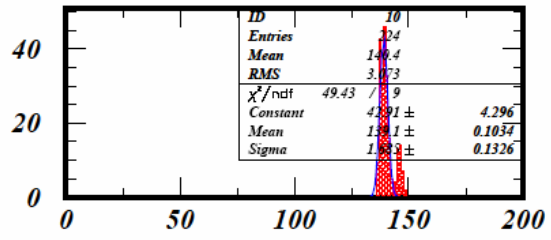
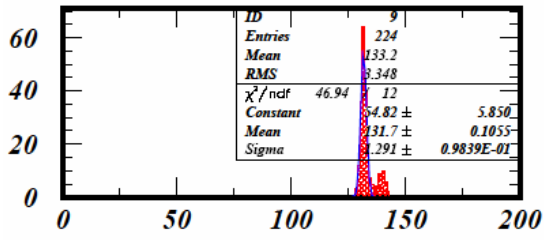
IIT 24



## 付録 B Gain の安定性を示す Npix 分布

2004年10月26日~2004年11月6日の期間にディスプレイ上に plot した点を集めてヒストグラムにした。フィッティングの sigma と mean から sigma/mean を計算した結果、3.8%以内で gain は安定しているといえる。





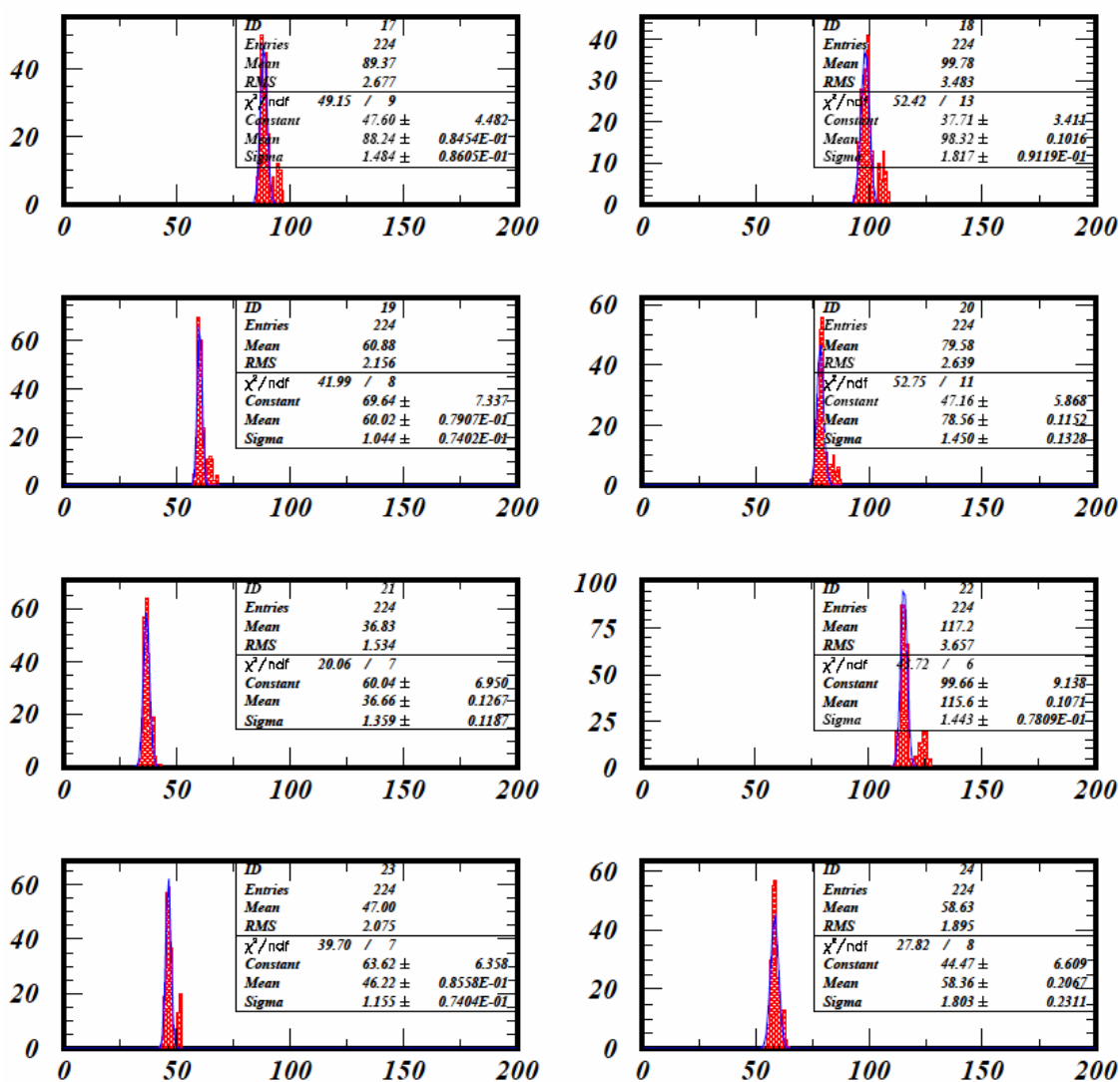
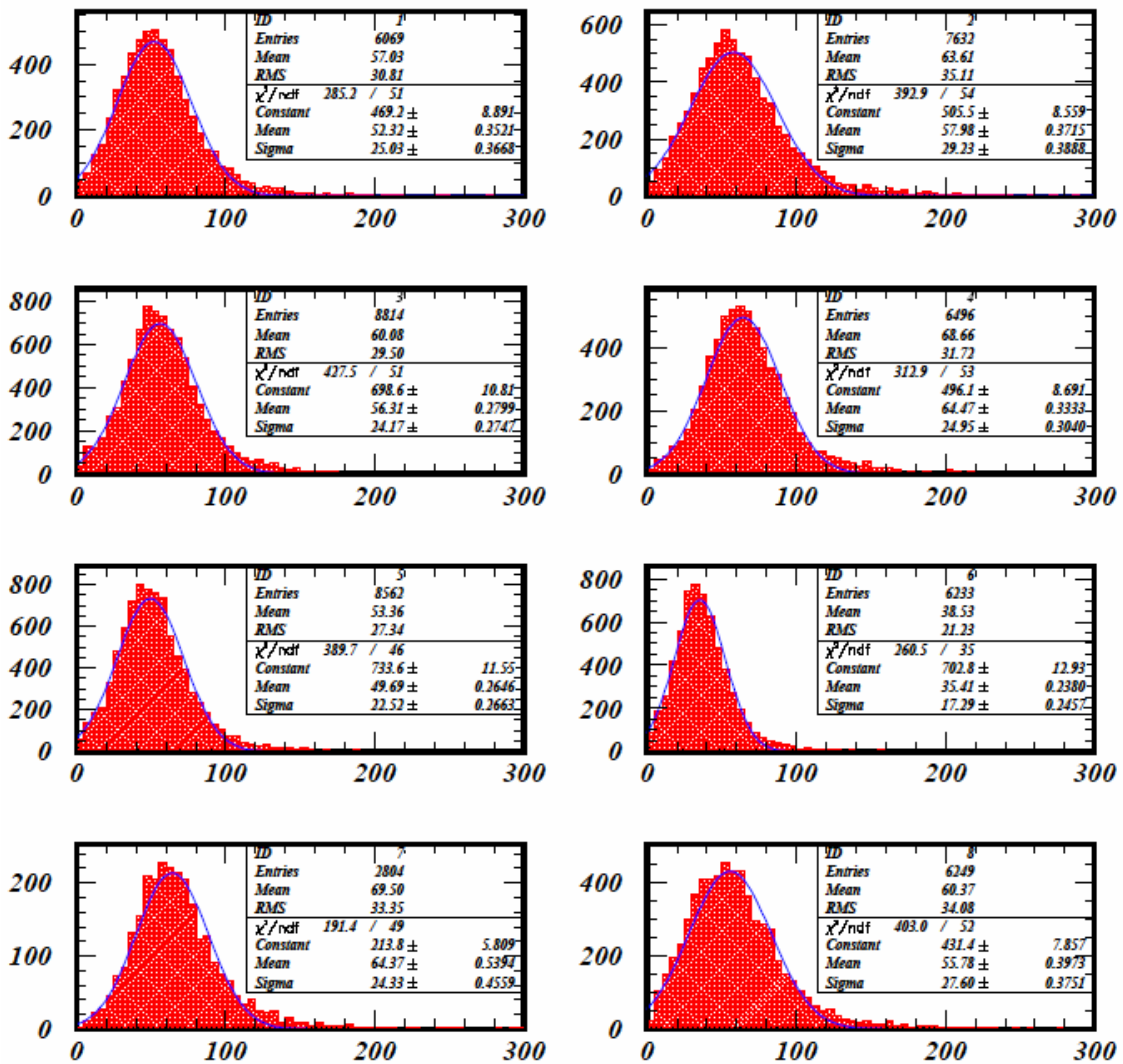
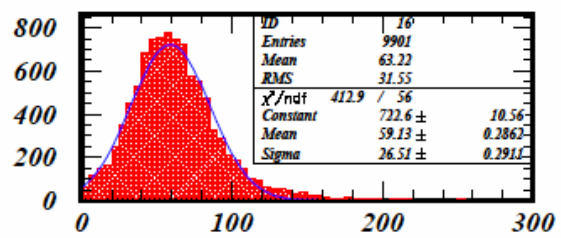
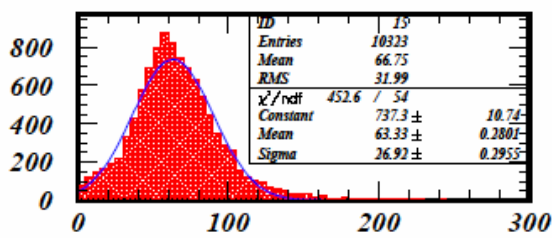
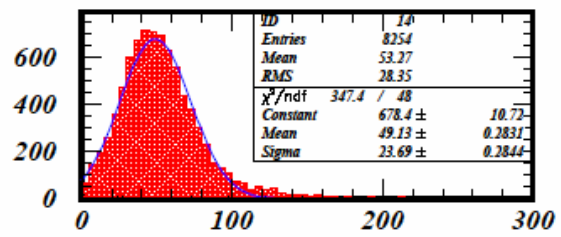
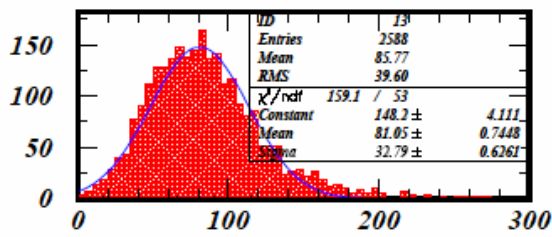
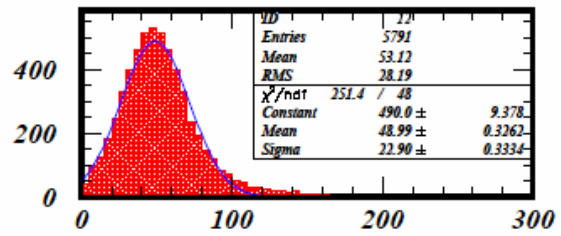
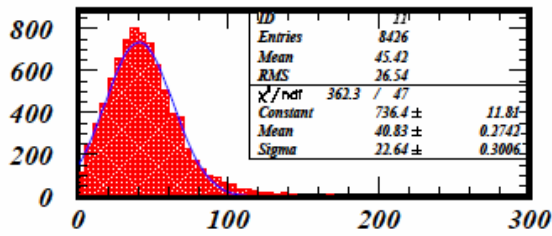
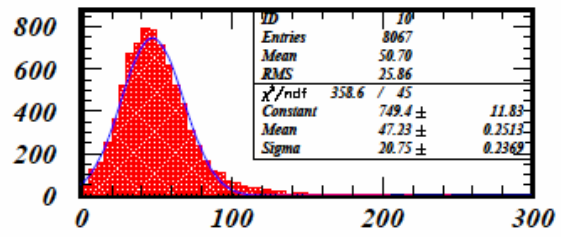
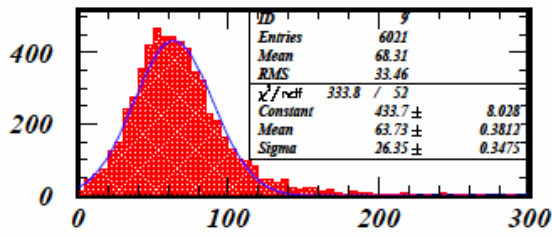


図 B Gain の安定性を示す Npix 分布  
 (ディスプレイ上に plot した点を集計した結果、gain の安定性は 3.8%以内である)

## 付録 C 宇宙線の Npix 分布

宇宙線データから Npix 値の分布を出した。この結果は付録 D で使用する。





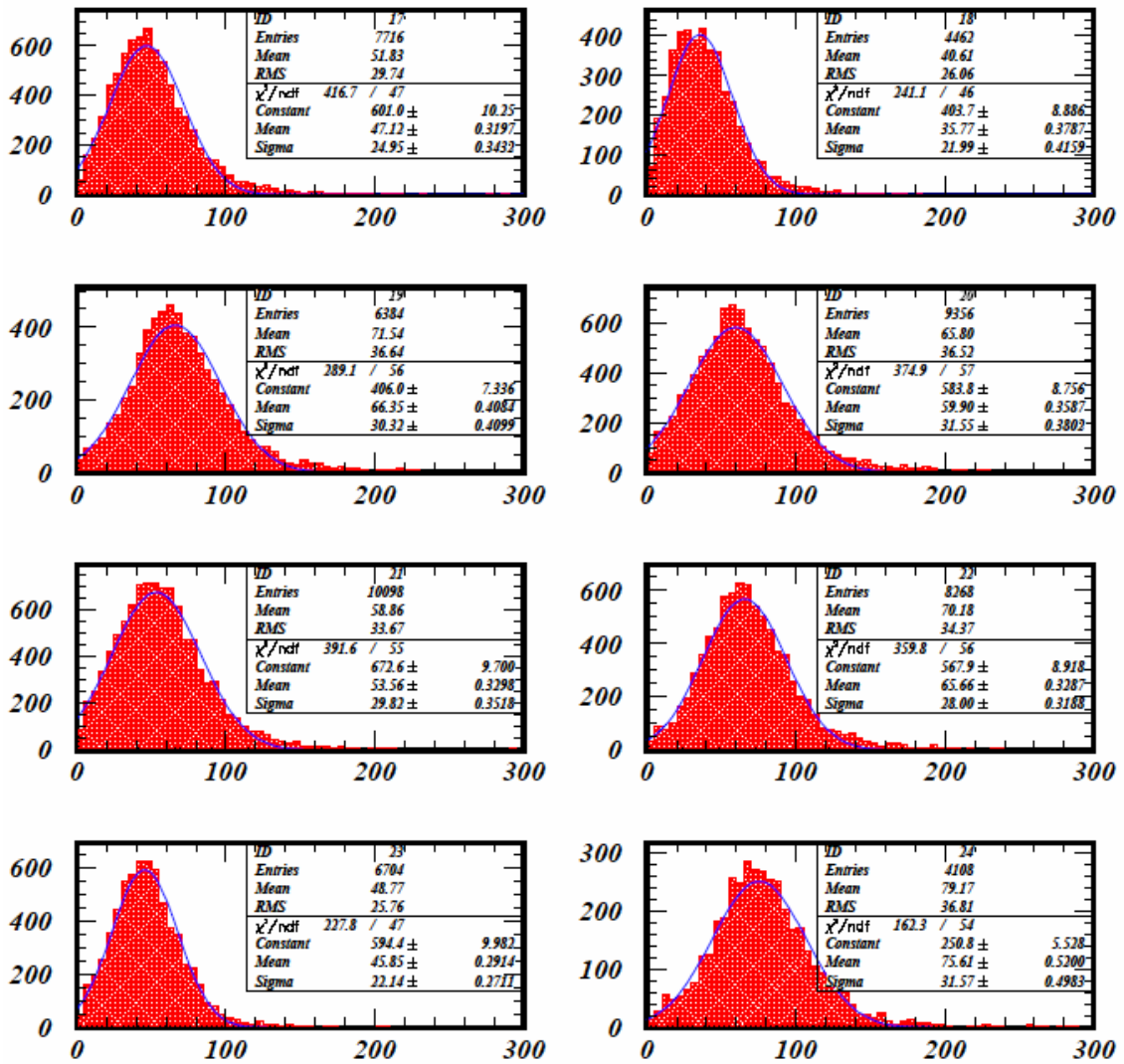
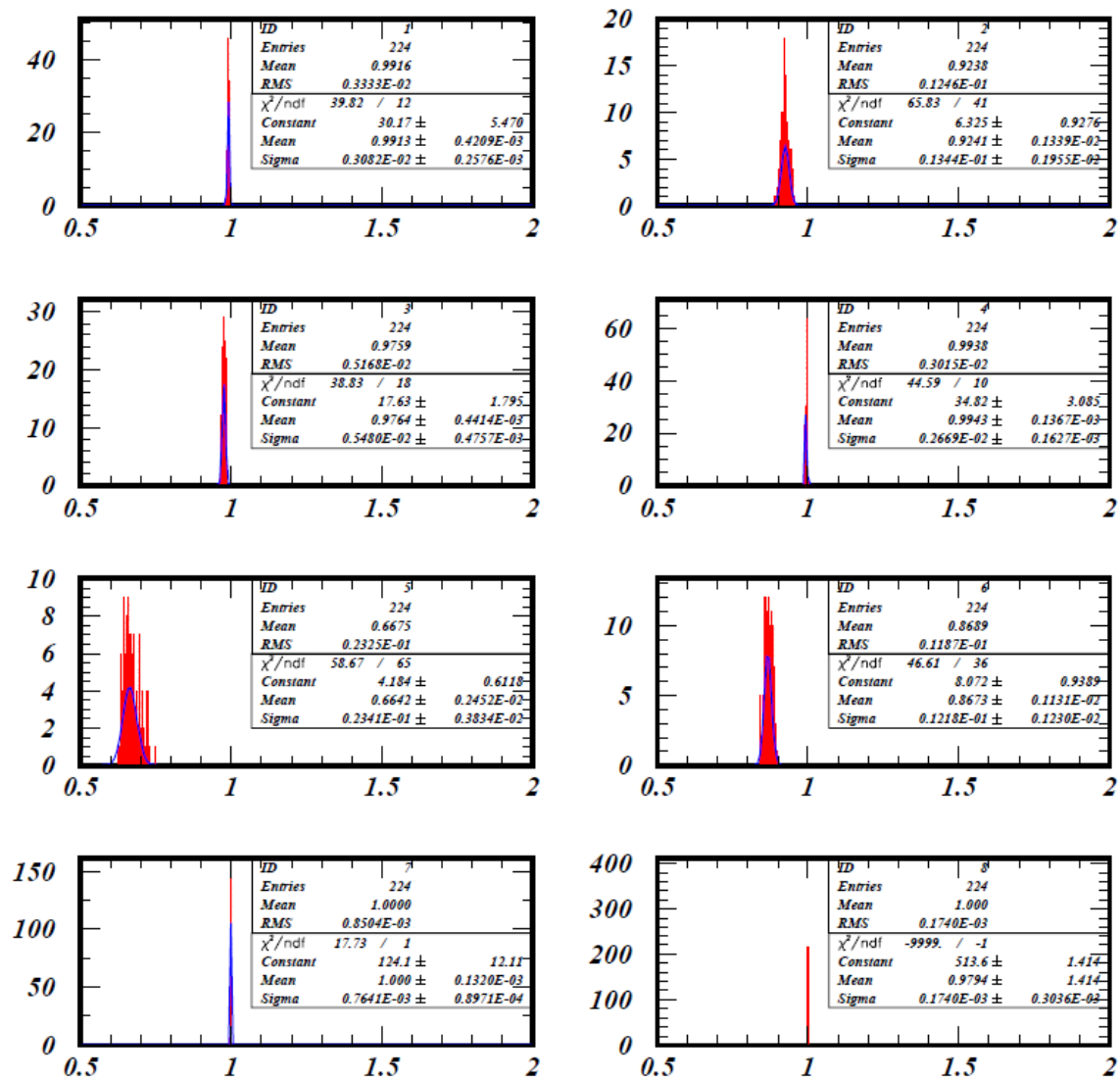
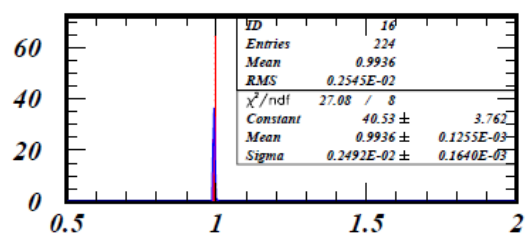
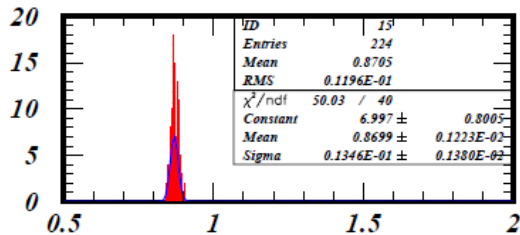
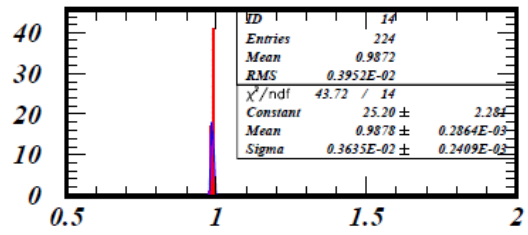
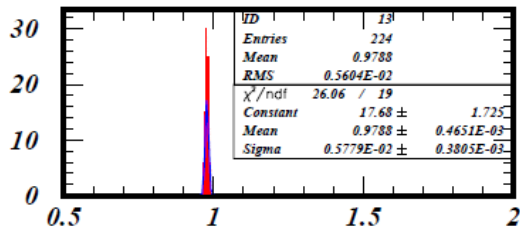
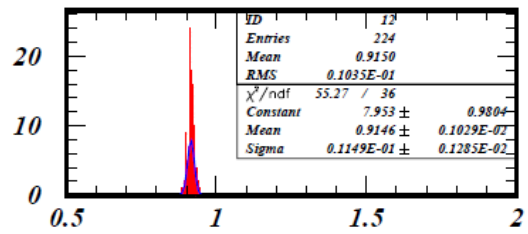
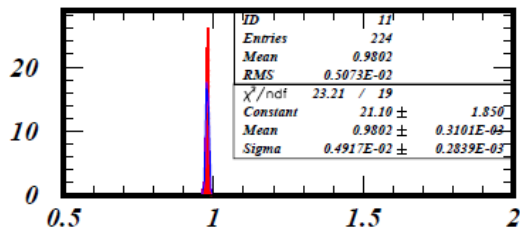
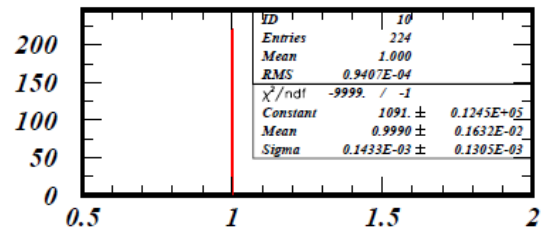
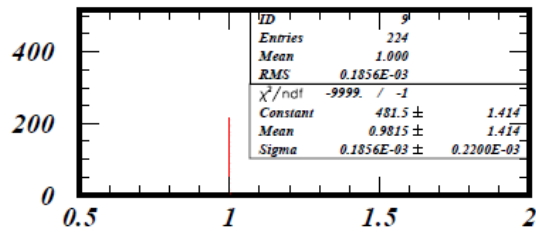


図 C 宇宙線の  $N_{pix}$  分布

## 付録 D efficiency の安定性の図

Efficiencyについても付録Bと同様にヒストグラム化した。付録B、CのNpix値の分布から、 $(\text{sigma}/\text{mean})^2$ を計算し、LEDによる入射光量が宇宙線による値以上であるもので efficiencyの平均値を求めると、 $0.97 \pm 0.03$ であった。







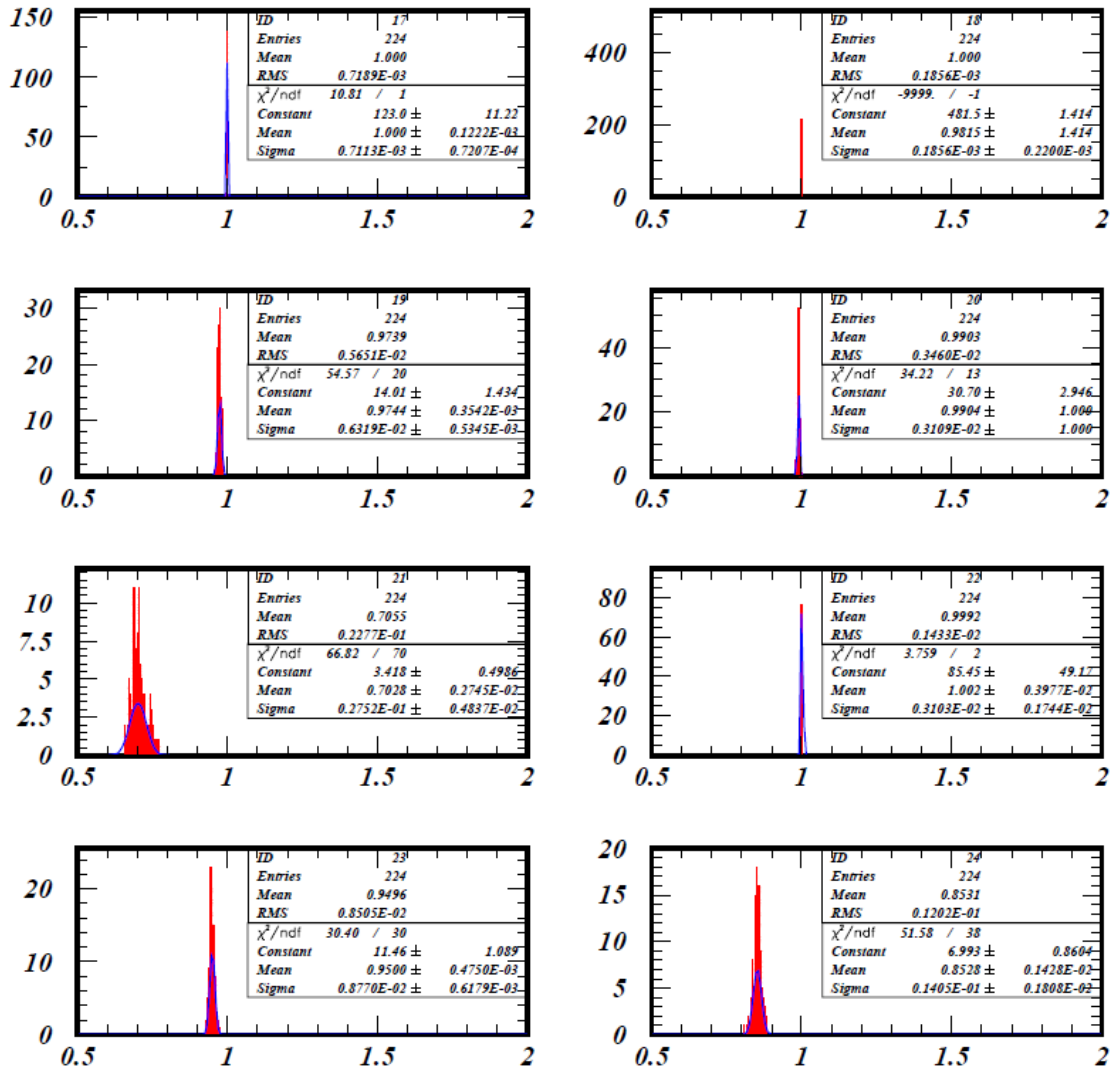


図 D efficiency の安定性を示すヒストグラム  
(モニタした結果を集計、 $0.97 \pm 0.03$  で安定)

## 関連図書

- [1]S.L.Glashow, Nucl.phys.22, 579 (1991)
- [2]S.Weinberg, Phys.Rev.Lett.19, 1264 (1967)
- [3]A.Salam, “Elementary Particle Physics”, Nobel Symp.No.8
- [4]Ch.Weinehimer *etal*, Phys.Lett.B460, 219 (1999)
- [5]W.Pauli, “Zur älteren un neuen Geschichte des Neutrinos”, Collected Papers by W.Pauli, ed.R.Kronig and U.P.Weisskopf(Interscience Pub, N.Y.1964) Vol.2, p.1312
- [6]F.Reines, C.L.Cowan, Jr., Phys.Rev.92, 830 (1953)
- [7]M.Nakamura *etal*, “Result from DONUT-Direct observation of  $\nu_e$  interaction”, Nucl. Phys. B(proc. Suppl.)77, 259 (1999)
- [8]J.Mnich for LEP collaborations and the LEP Electroweak Working Group, Preprint CERN-EP/99-143, October 1999
- [9]M.V.Lobashev *etal*, Phys.Lett.J, B460pp, 227 (1999)
- [10]K.Assamagan *etal*, Phys.Lett. B335, 231 (1994)
- [11]R.Barate *etal*, E.phys.J. C2, 395 (1998)
- [12]Particle Data Group, Eur. Phys.J. C15, 1-878(2000)
- [13]M.Nakagawa, H.Okonogi, S.Sakata and A.Toyoda, Prog. Ther. Phys. 30, 727 (1962)
- [14]T.Kajita *etal*, for the Super-kamiokande and Kamiokande Collaborations. Nucl.phys. Proc.Suppl., 77, 123-132 (1999)  
Y.Fukuda *etal*, Phys.Rev.Lett. 81, 1562 (1998)
- [15] Y.Fukuda *etal*, Phys.Lett. B335, 237 (1994)
- [16]R.Becker-Szendy *etal*, Phys.Rev. D46, 3720(1992)
- [17]K.Daum *etal*, Z.Phys. C66,417 (1995)
- [18]M.Agelietta *etal*, Europhys.Lett. 8, 611 (1989)
- [19]W.W.M.Allison, Phys. Lett. B391, 491 (1997)
- [20]Y.Fukuda *etal*, Phys. Rev. Lett. 77, 1683 (1996)
- [21]Delft Hitech Inc. “Technical Handbook of the Image Intensifier” (1994)
- [22]岩下 大器, 神戸大学自然科学研究科博士論文 (2003)
- [23]横山 広美, 東京理科大学博士論文 (2004)
- [24]岩下 大器, 神戸大学自然科学研究科修士論文 (2000)
- [25]関口 舞, 神戸大学自然科学研究科修士論文 (2004)

