

K2K実験における SciFi 検出器と 現在までの成果

神戸大学自然科学研究科
岩下大器

1. K2K実験
2. SciFi 検出器
3. SciFi 検出器のデータ解析
および性能
4. 現在までの成果
5. まとめ

1.K2K実験

(つくばー神岡間長基線ニュートリノ振動実験)

ニュートリノ

弱い相互作用する質量0?の粒子

質量あるほうが自然?

質量あればホットダークマターの候補

質量の測定法

- ★ 運動学的直接測定
例: β 崩壊における電子のスペクトル観測
- ★ ニュートリノ振動現象の観測

ニュートリノ振動 (2 flavor)

$$\begin{cases} \nu_e = \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta \\ \nu_\mu = -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta \end{cases}$$

距離
↓
飛行

ν_e, ν_μ : 弱い相互作用の固有状態

ν_1, ν_2 : 質量相互作用の固有状態

θ : 固有状態の混合角

Δm^2 : $|m_{\nu_1}^2 - m_{\nu_2}^2|$

} $\neq 0$ 仮定

遷移確率

$$P(\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 \cdot L}{E_\nu} \right)$$

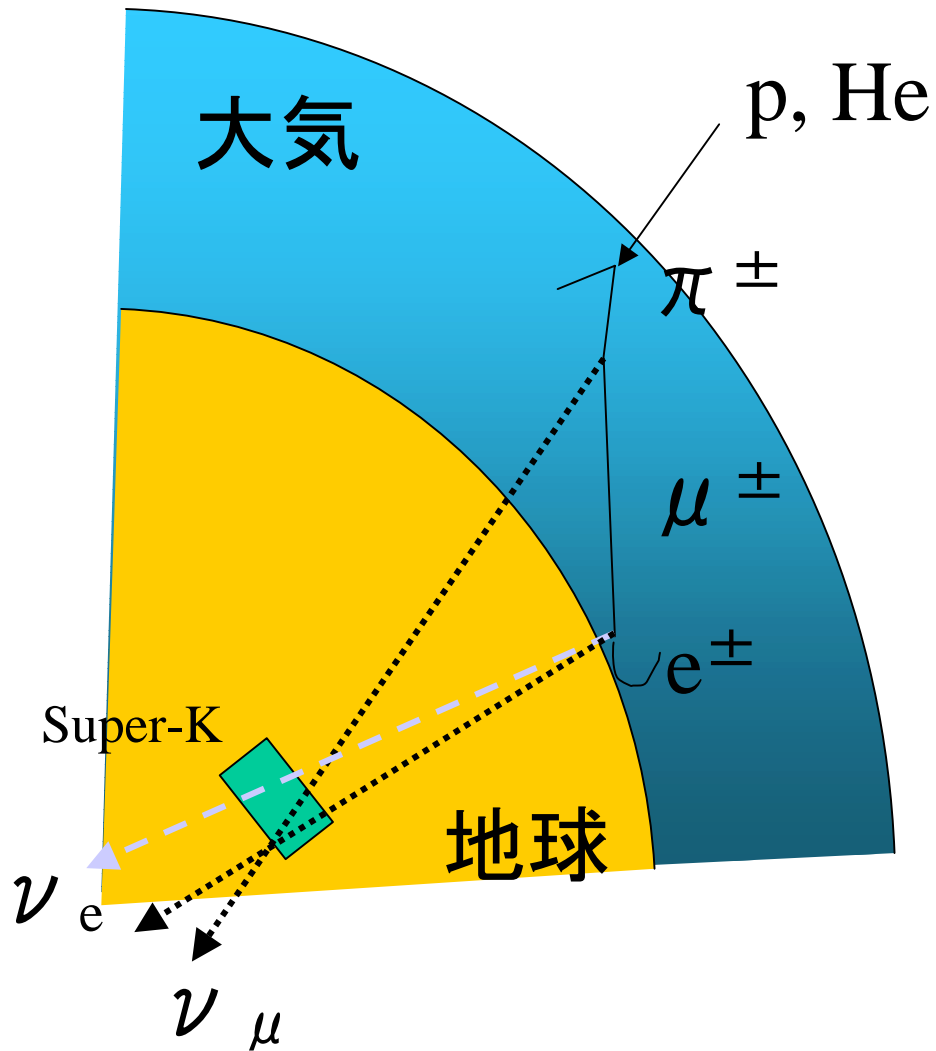
L: 2点間の距離 (250km@K2K)

E_ν : ニュートリノエネルギー (平均1.3GeV@K2K)

L離れた2点でニュートリノの数を比較

→ $\sin^2 2\theta \cdot \Delta m^2$ のパラメータ空間探索

大気ニュートリノにおける ニュートリノ振動の観測



$\nu_\mu : \nu_e = 2:1$ 期待、しかし ν_μ 少ない

Sub-GeV

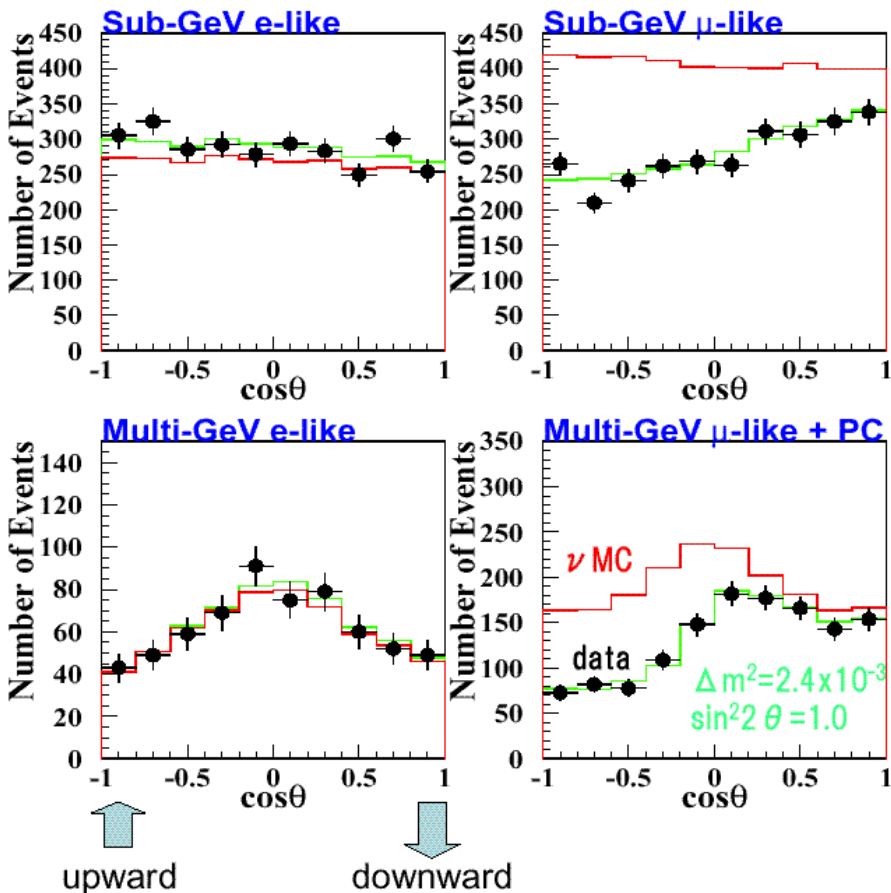
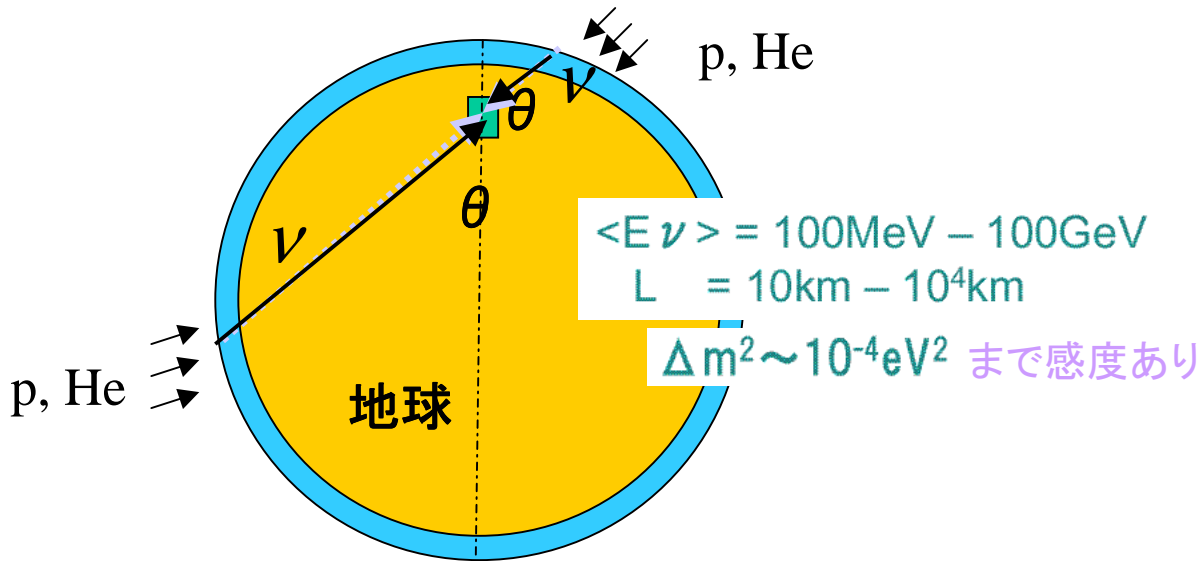
$$\frac{(\mu/e)_{\text{data}}}{(\mu/e)_{\text{M.C.}}} = 0.64 \pm 0.02 \pm 0.05$$

Multi-GeV

$$\frac{(\mu/e)_{\text{data}}}{(\mu/e)_{\text{M.C.}}} = 0.68 \pm 0.03 \pm 0.08$$

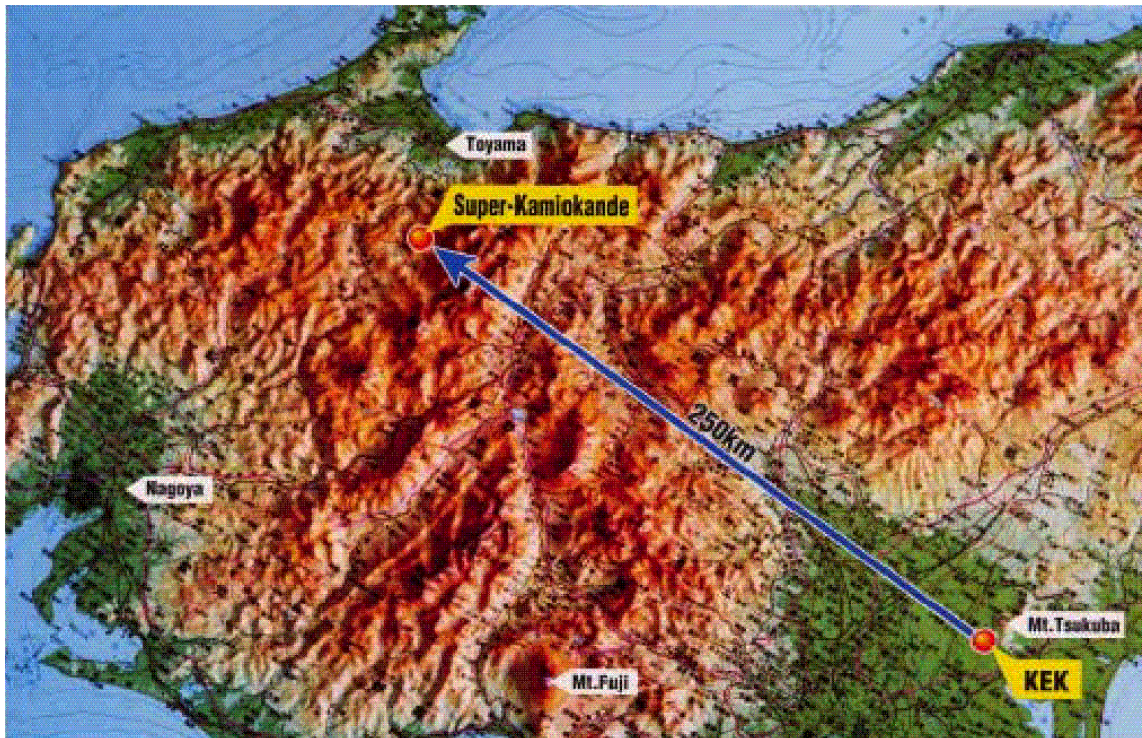
@FC&PC 79.3ktyr, 1289 days

大気ニュートリノ 天頂角分布



大気ニュートリノ異常は
ニュートリノ振動で説明できる

長基線ニュートリノ振動実験

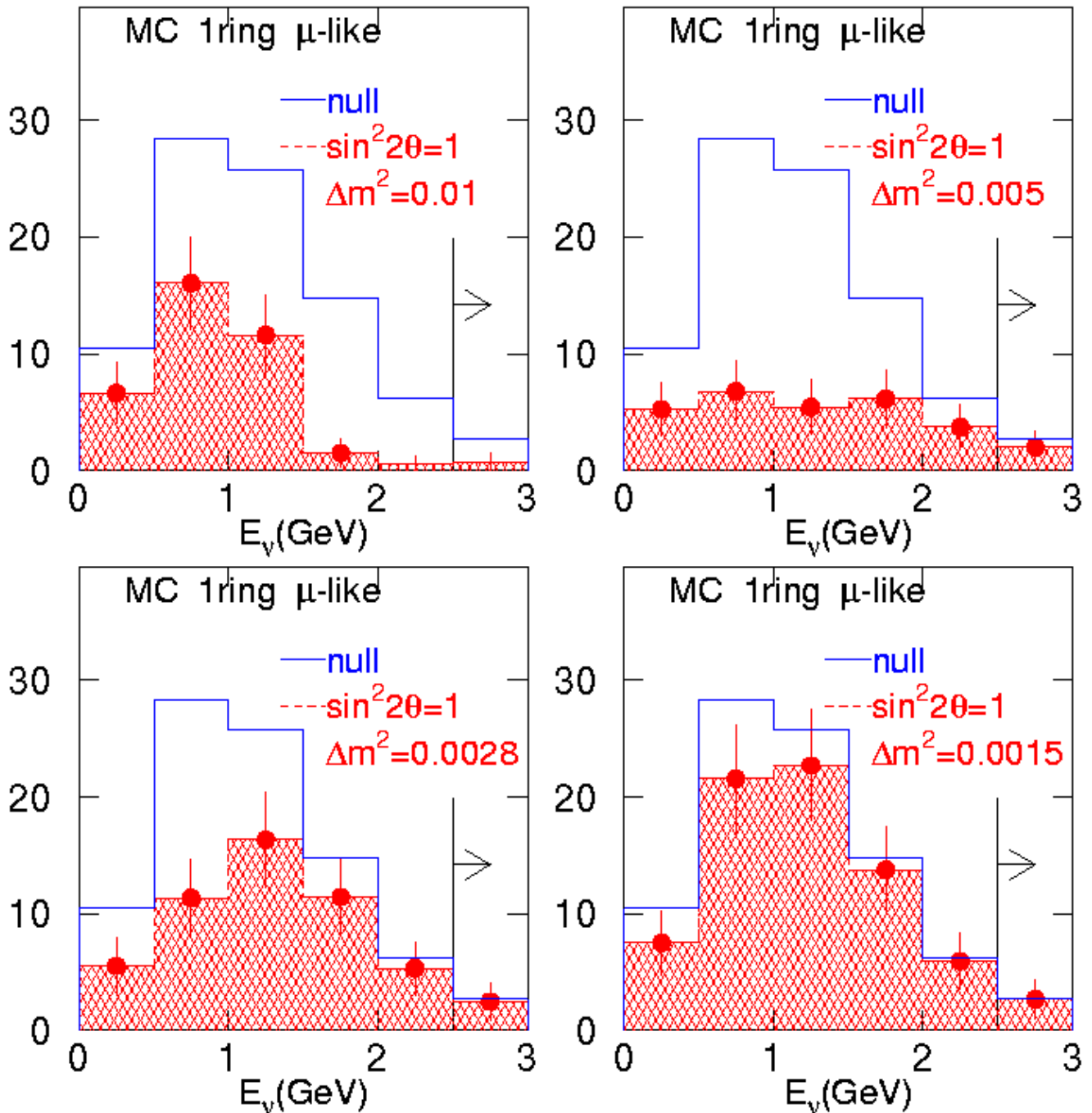


- 人工的に作ったニュートリノビーム(98% ν_μ)を用いてニュートリノ振動を検証
- SKが示唆する $\nu_\mu \rightarrow \nu_x$ モードで disappearance 実験
- K2K approved at 1994

世界初の長基線ニュートリノ振動実験

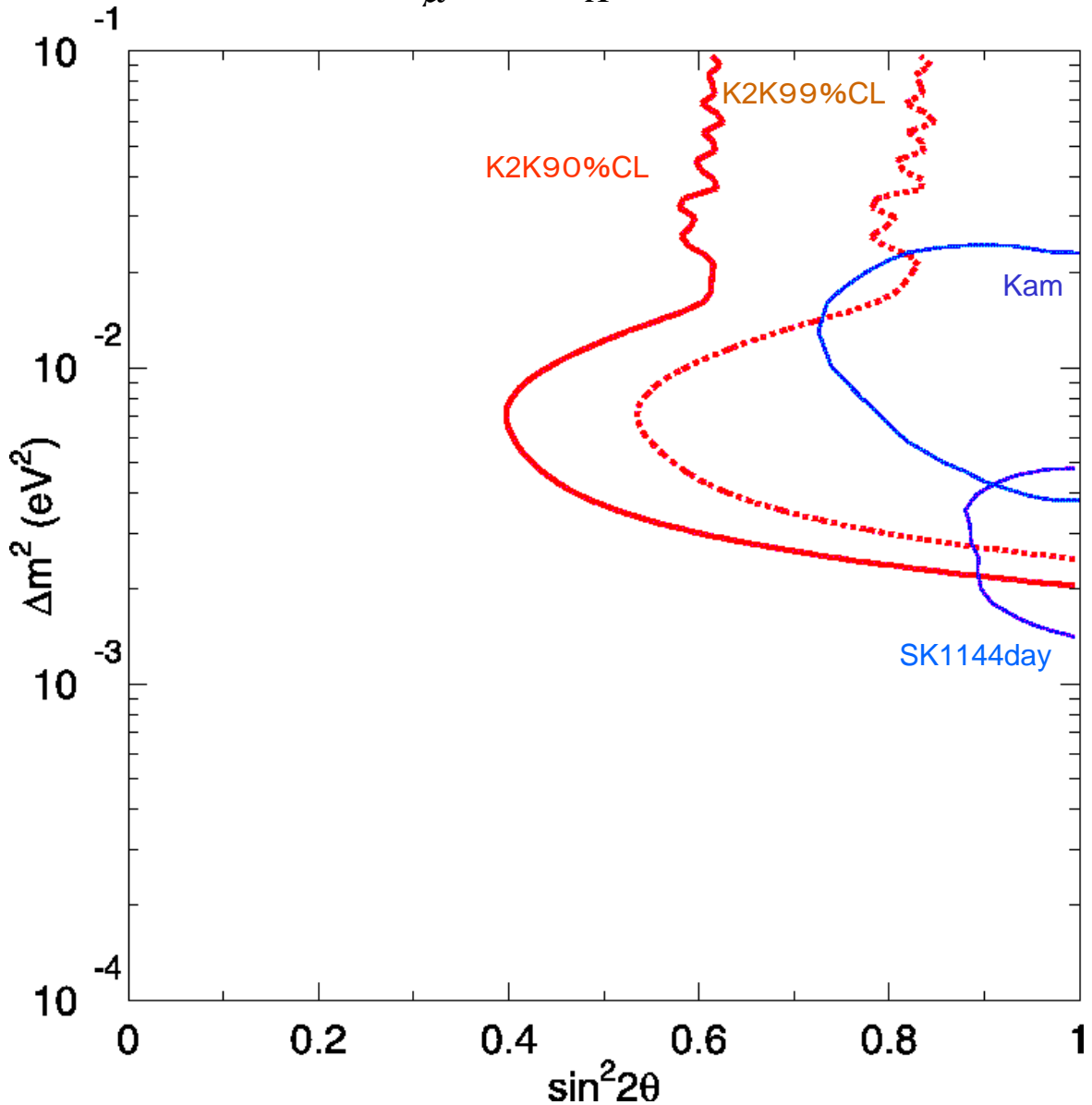
振動による ニュートリノスペクトルの歪み

- ニュートリノ振動はエネルギーに依存する
→エネルギーごとに遷移確率が変わる



大気ニュートリノとK2Kの パラメータ比較

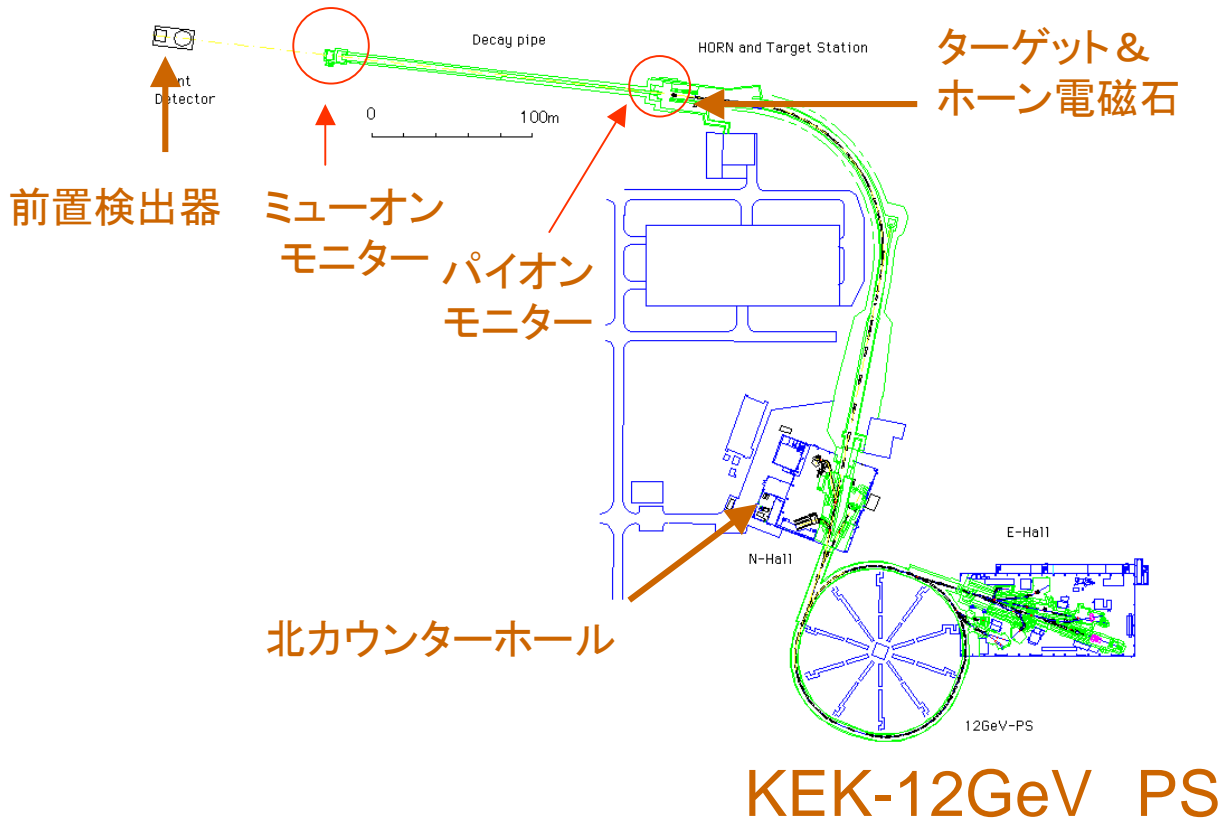
$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_X$$



- K2K はSK-Kamiokaが示唆する領域をほぼカバーしている

K2Kのセットアップ

ニュートリノビームライン



- 1999年2月速いビーム取り出し成功
- 同6月より安定稼動(physics run)
- 2001年7月までで 9.2×10^6 スピル、
 4.8×10^{19} Proton On Target 達成
(実験終了までに 10^{20} P.O.T. 予定)

ターゲット&ホーン電磁石

- ターゲット

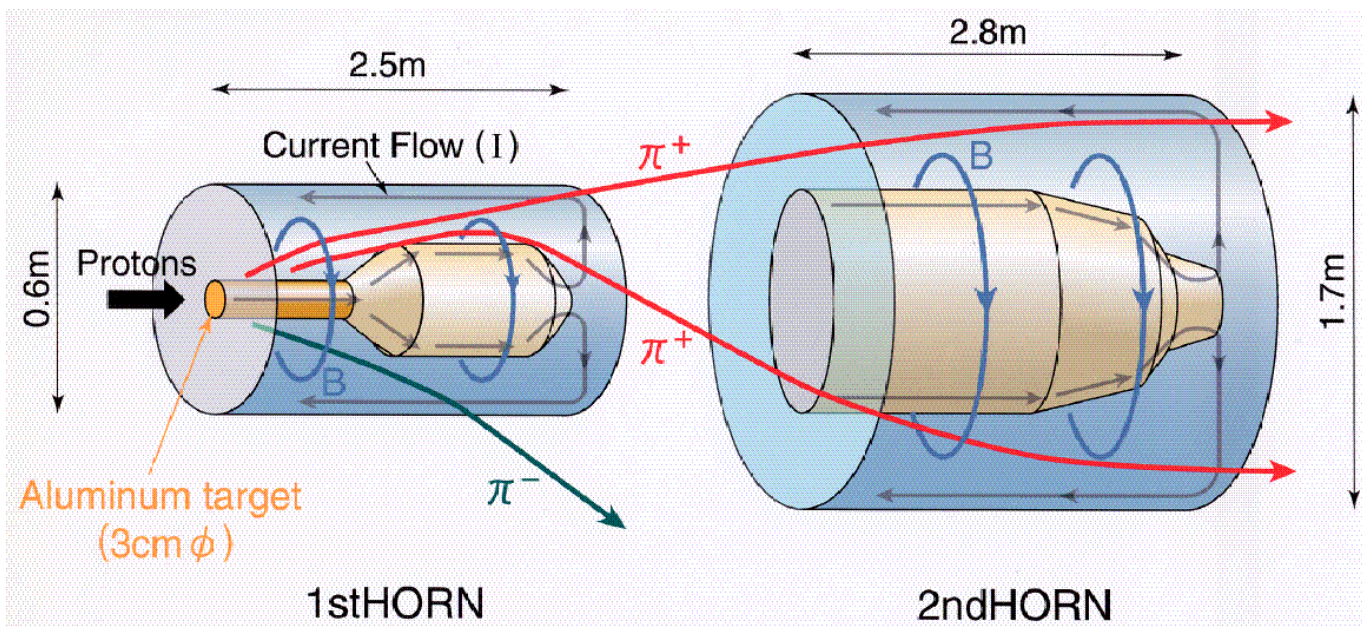
Φ30mm、長さ66cmのAl rod

- ホーン電磁石

稼動電流250kAのトロイダル型電磁石
速い取り出しに合わせ 2. 2秒に1回
パルス(2msec)電流

π^+ を前方に収束

(v_μ フラックス@SK約20倍)



50kGauss@R=1cm

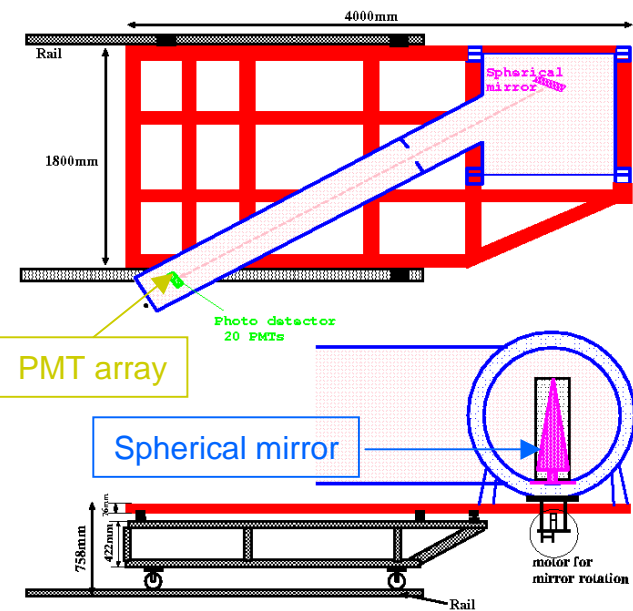
パイオンモニター

- 第2ホーンの直後で π の角度と運動量分布をガスチェレンコフ検出器で測定

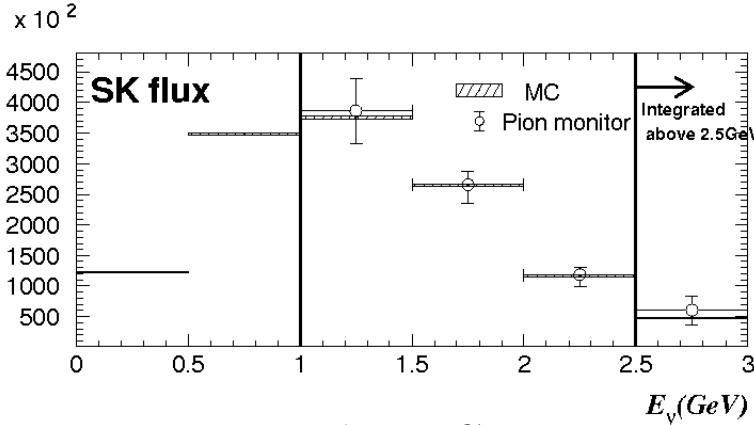
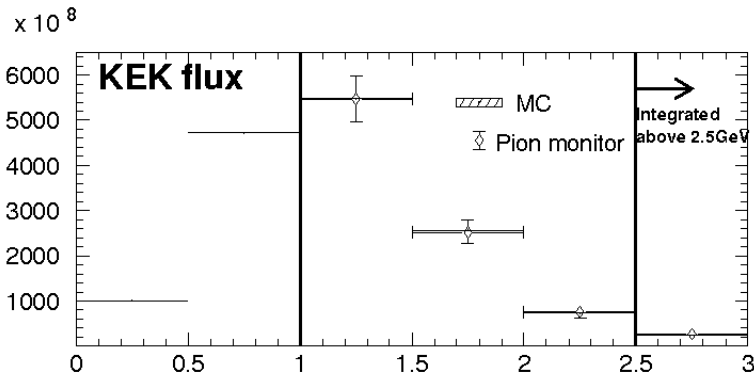
- SKでのフラックス予測

Near/Far ratio R

Rエラー +5.4% -8.7% 実現



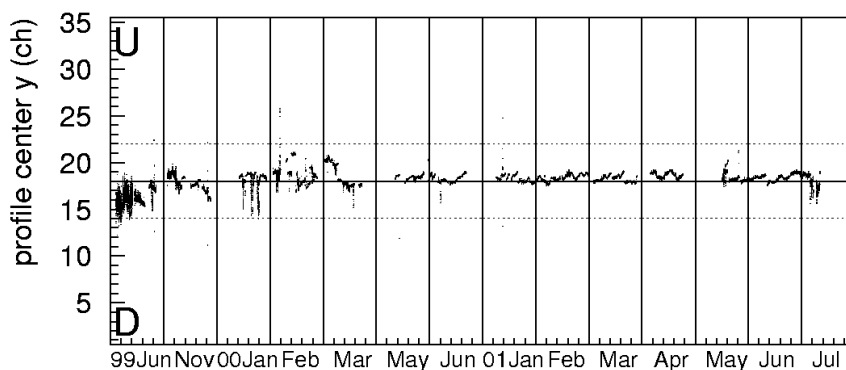
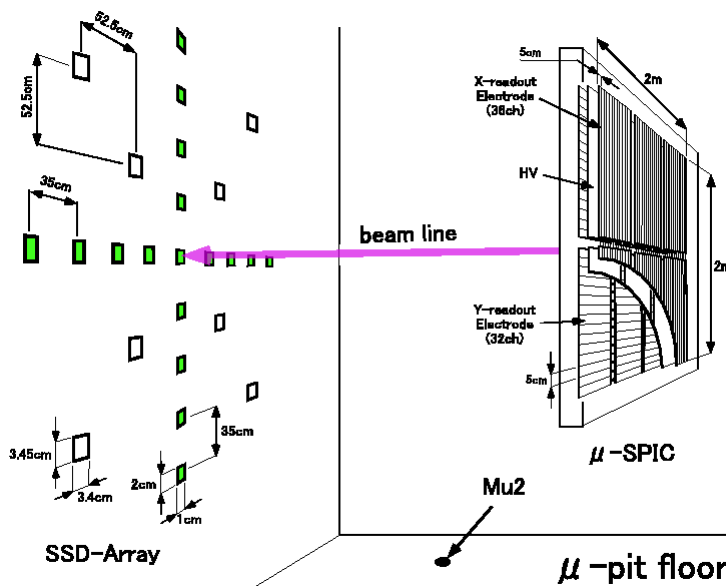
ガス屈折率
 $N=1.00024 \sim 1.0024$
 (圧力で可変)



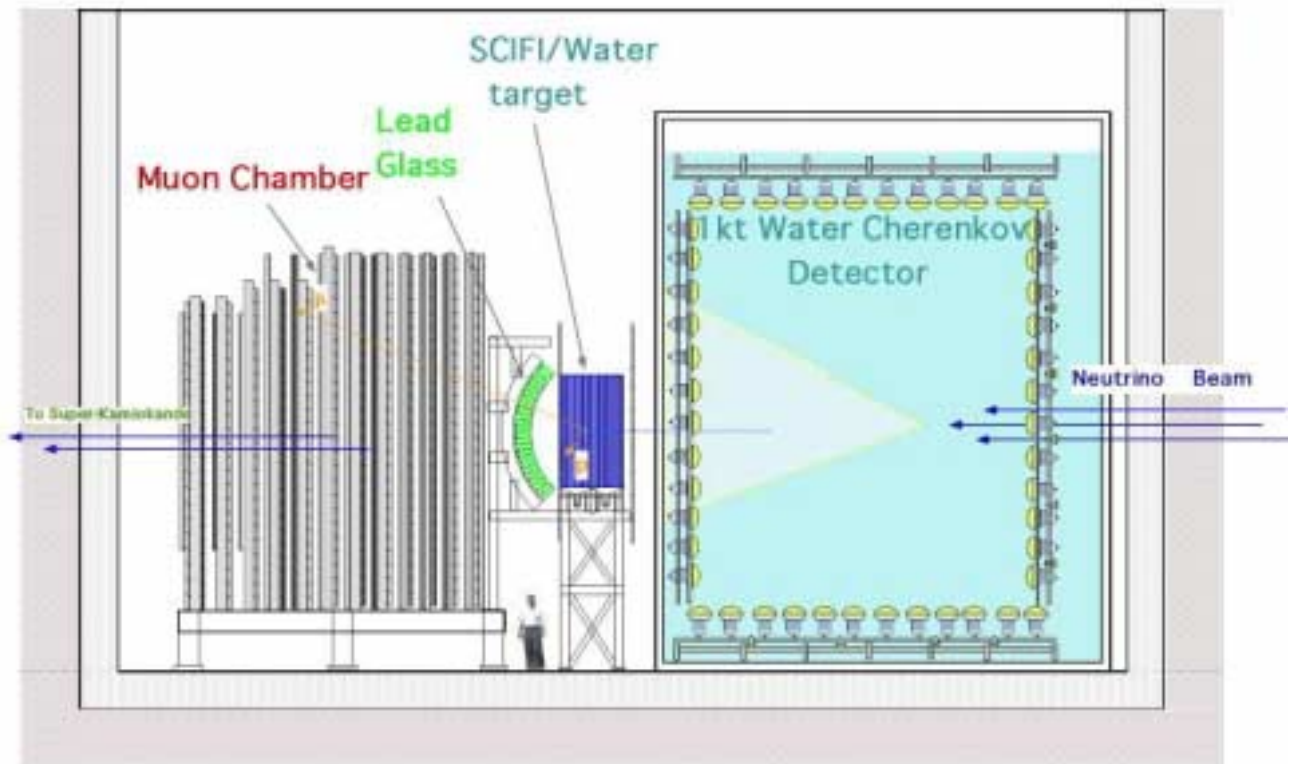
Near/Far flux

ミュオンモニター

- 崩壊領域の下流
- シリコンディテクターで μ の強度
 - Spill by spill の強度 $\pm 2\%$
- Ionization chamberで μ の方向
 - Neutrino Profile center $\pm 1\text{mrad}$



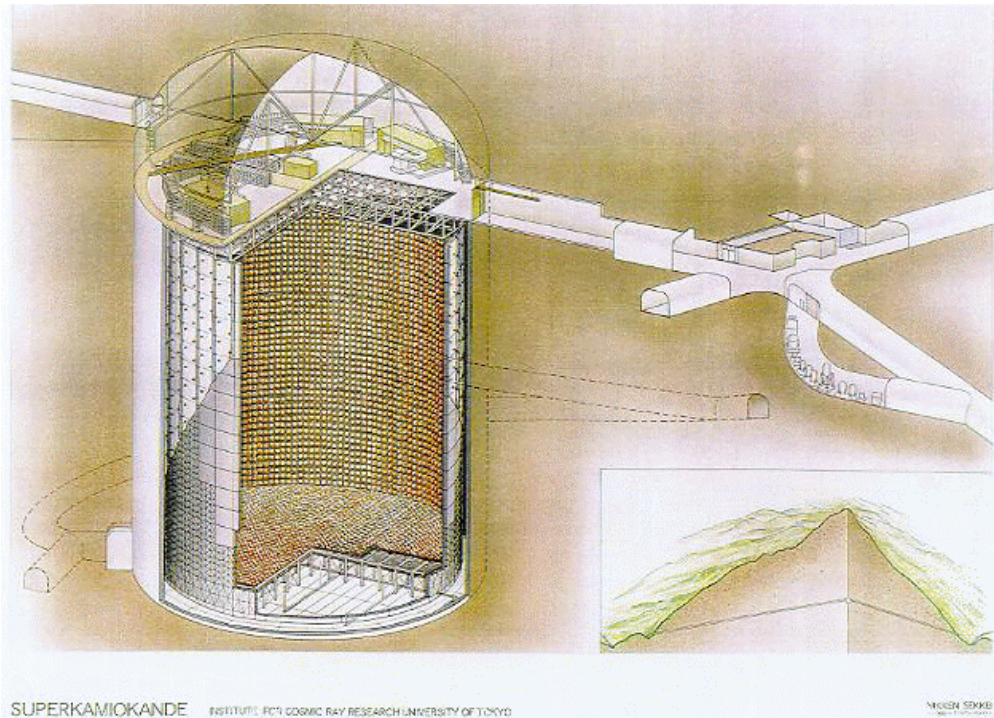
前置検出器



- i) 1kt 水チェレンコフ検出器(25t)
 - SKと同じタイプ→系統誤差少→直接比較
- ii) SciFi 飛跡検出器(5.9t)
 - ニュートリノ反応の詳細
- iii) 鉛ガラスカロリメータ
 - 電子ニュートリノの混入率はかる
 - MC と consistent
- iv) ミューオン飛程検出器(329t)
 - 最大の有効体積 → 1event/20spill
 - イベントレート、反応点分布の安定性をモニター
±1mrad で安定

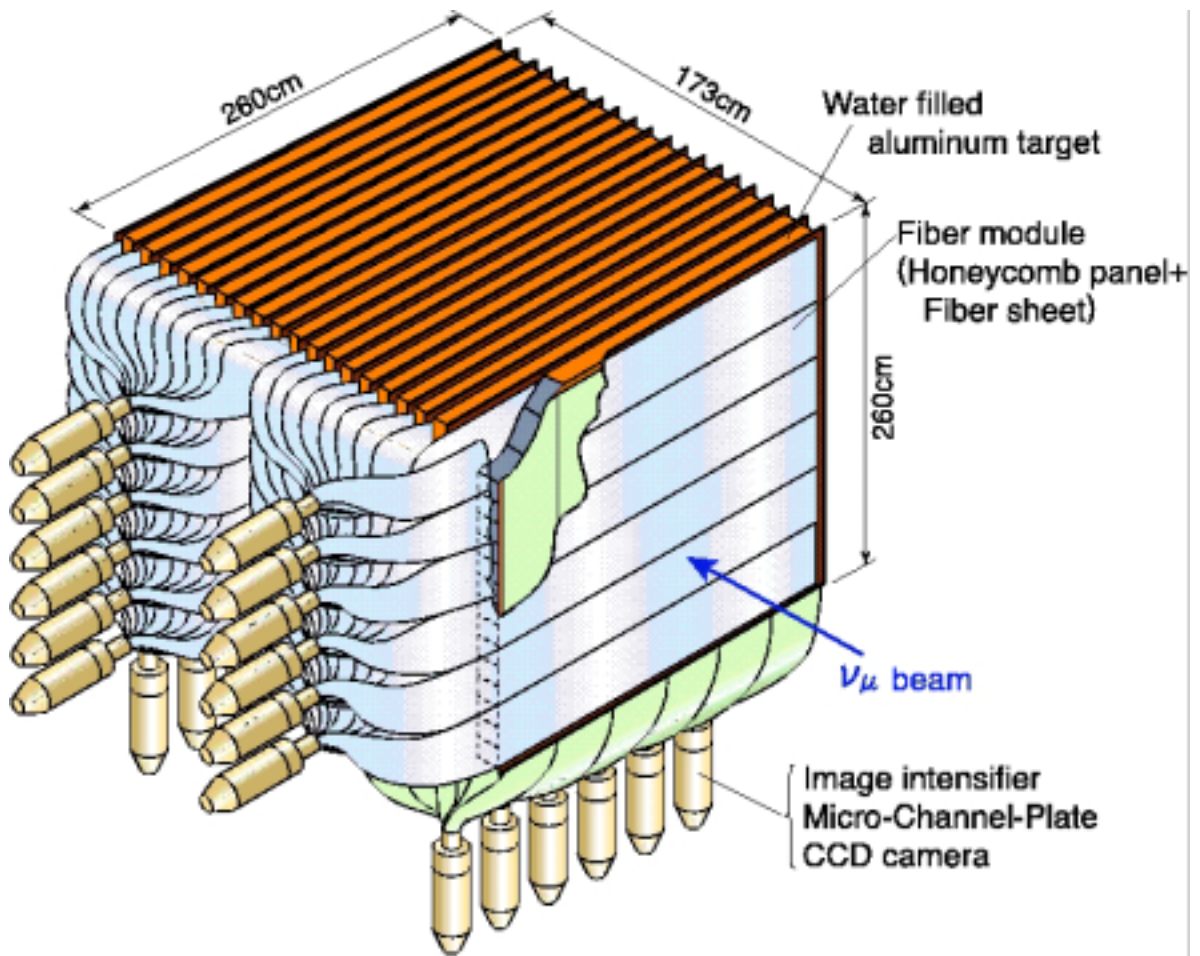
後置検出器

(250km下流、岐阜県神岡)



- スーパーカミオカンデ水チェレンコフ検出器 (50kt、有効体積22.5kt)
- 地下1000mにあり宇宙線BG少
- 10^{20} P.O.T. で約200event期待
- GPSによりビームと同期(精度300nsec)
- 2001年11月12日にPMT6割を破損する事故があり現在復旧作業中
(2002年秋観測再開予定)

2.SciFi飛跡検出器



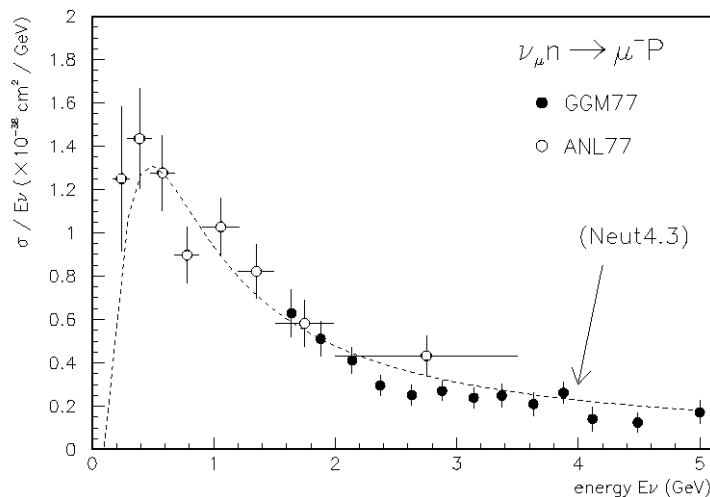
- SciFi シート20層
- 水タンク19層(6cm) } サンドイッチ
- 24本のイメージインテンシファイア (IIT) + CCD カメラで読み出す

（ 水ターゲット 核内効果による系統誤差なくす
0.7mm 径 SciFi 反応点付近の詳細な情報

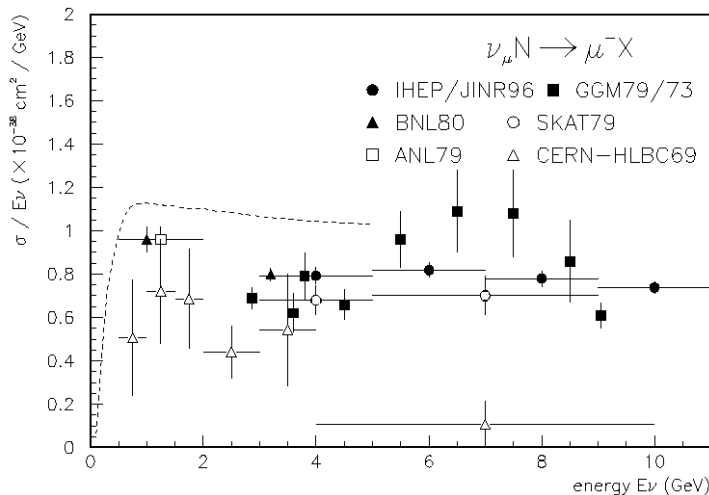
SciFi 検出器の目的

- ニュートリノイベント数およびエネルギー再構成
→ 振動解析
- ニュートリノ反応の研究
 - 特にCCnQEは大きな不定性がある(下図)
 - **K2K前置検出器でのニュートリノ反応の詳細を見ることが重要**

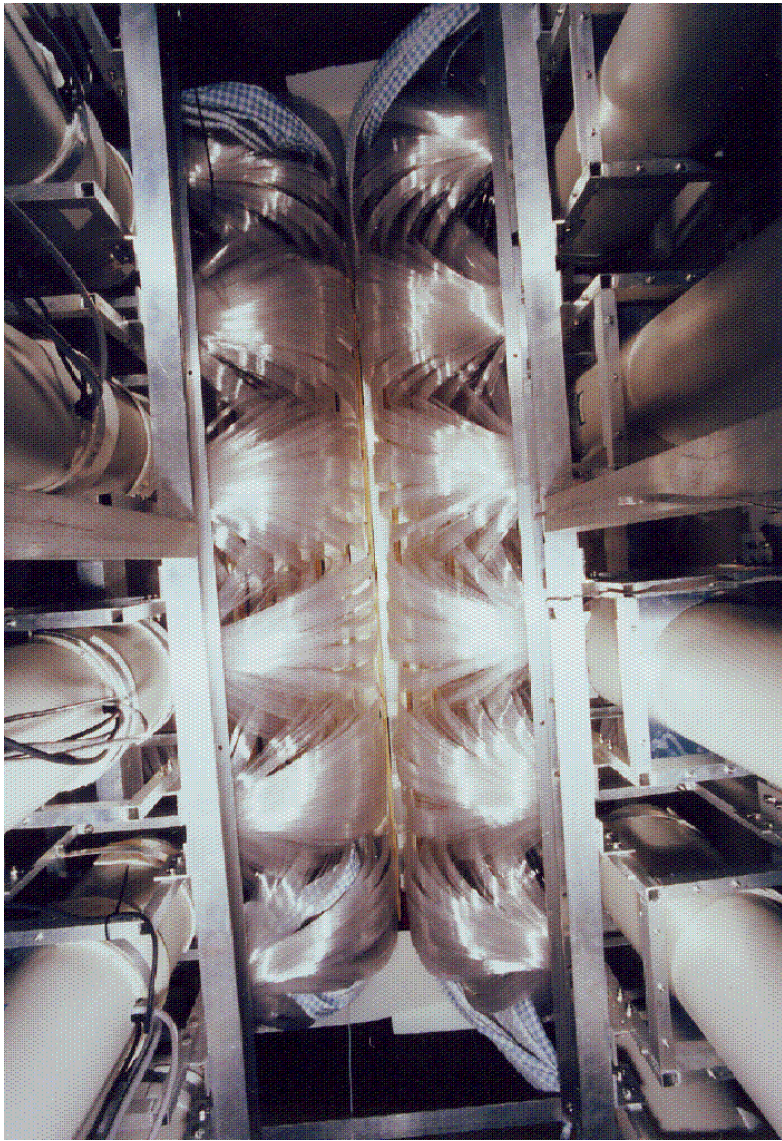
過去の実験データに見るニュートリノ反応断面積



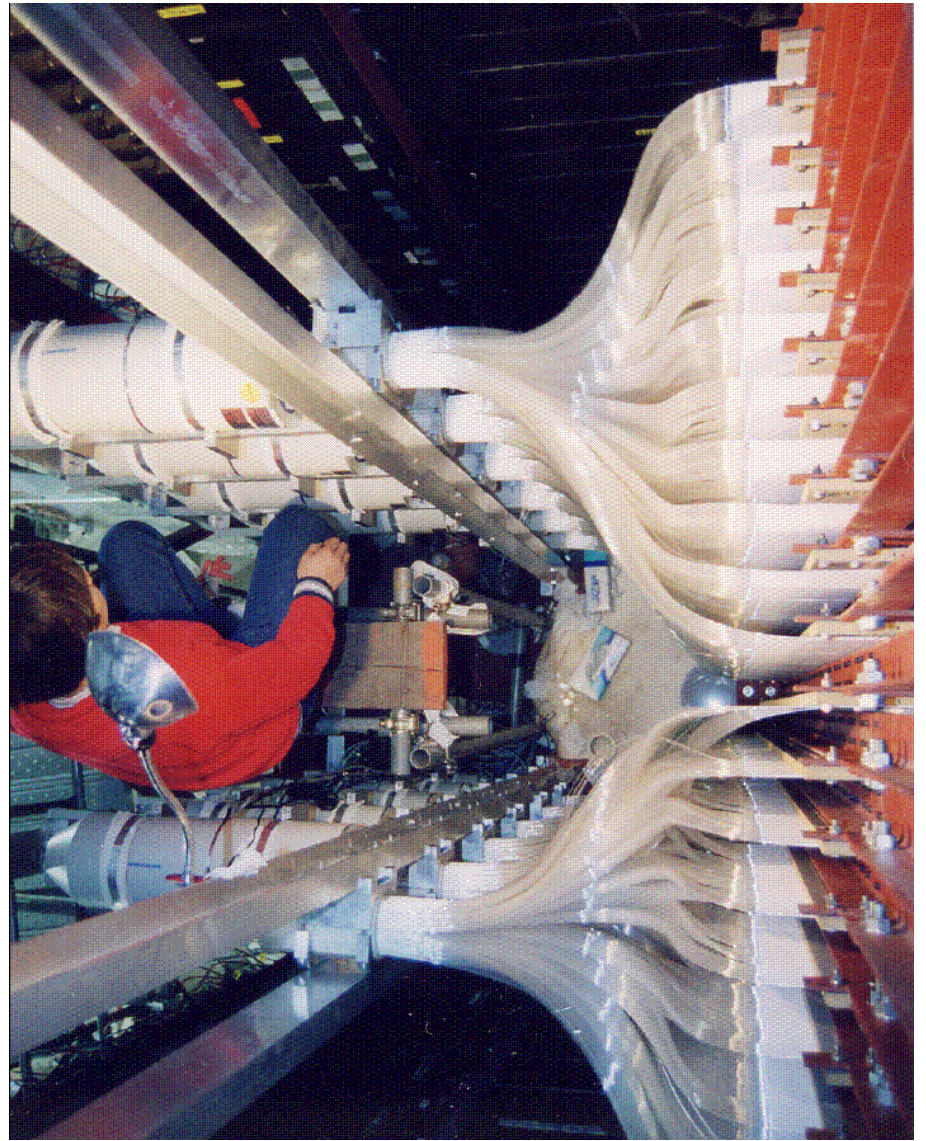
CCQE



CCall

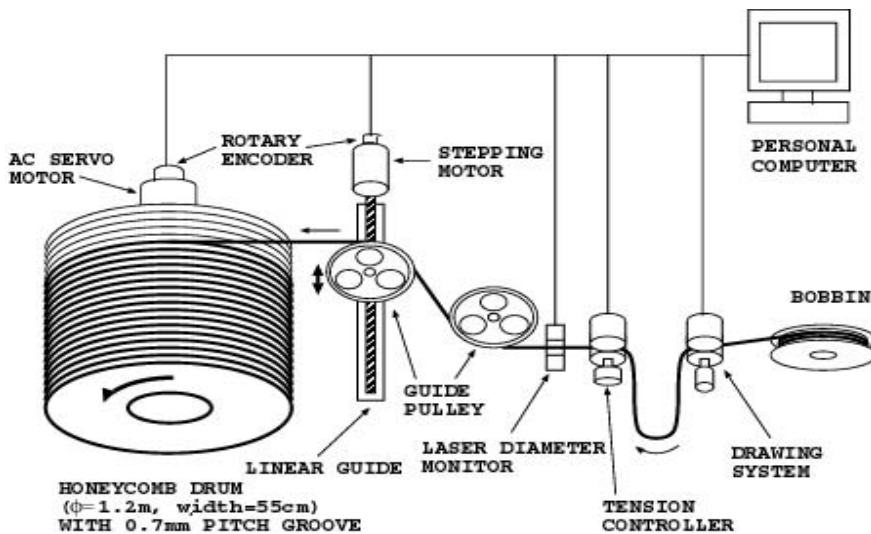
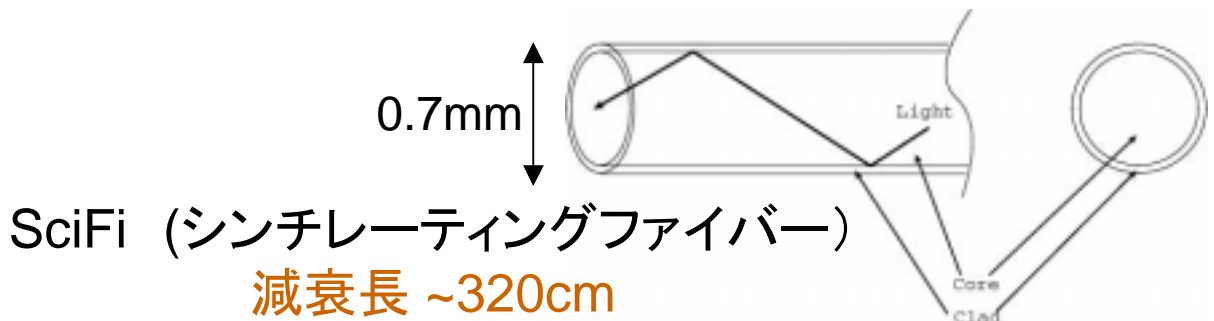


X direction

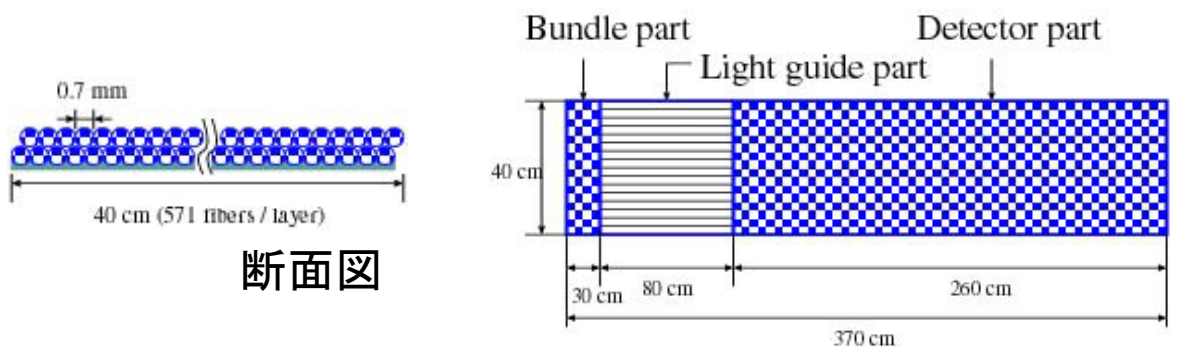


Y direction

SciFiシートの製作



スプーリング・・・約一年かけて240枚のシート生産
@神戸大、1997. 7~1998. 6



シートはシリコンペイントで固められている

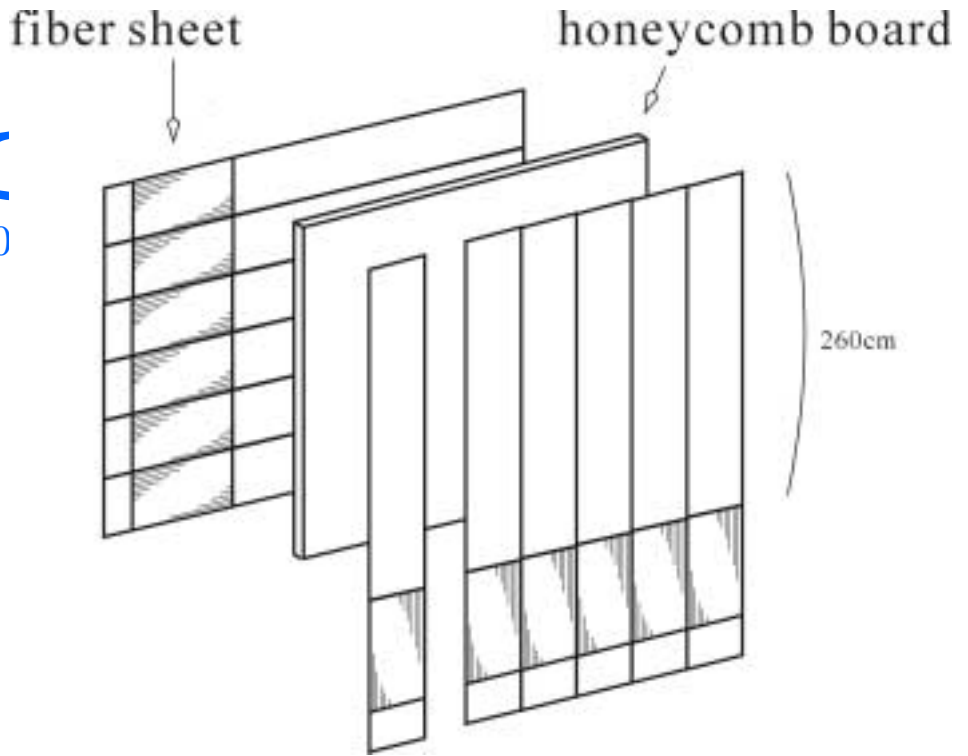
上面図

最遠点をMIP通過時8p.e.相当の光量

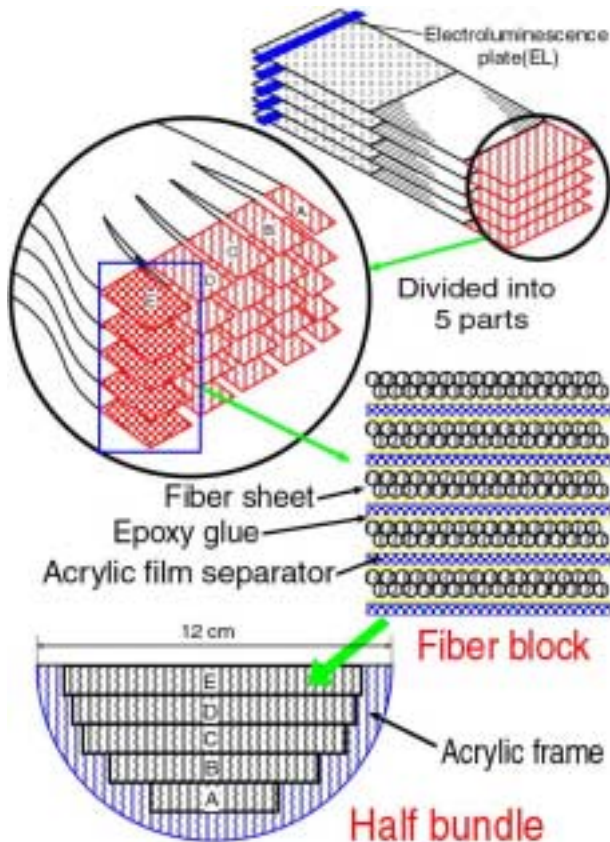
組み立て

@KEK、~1998.10

ハニカム板の
表裏に
貼り付ける
シートの4端点は
精度1mmで測定



読み出し面の加工



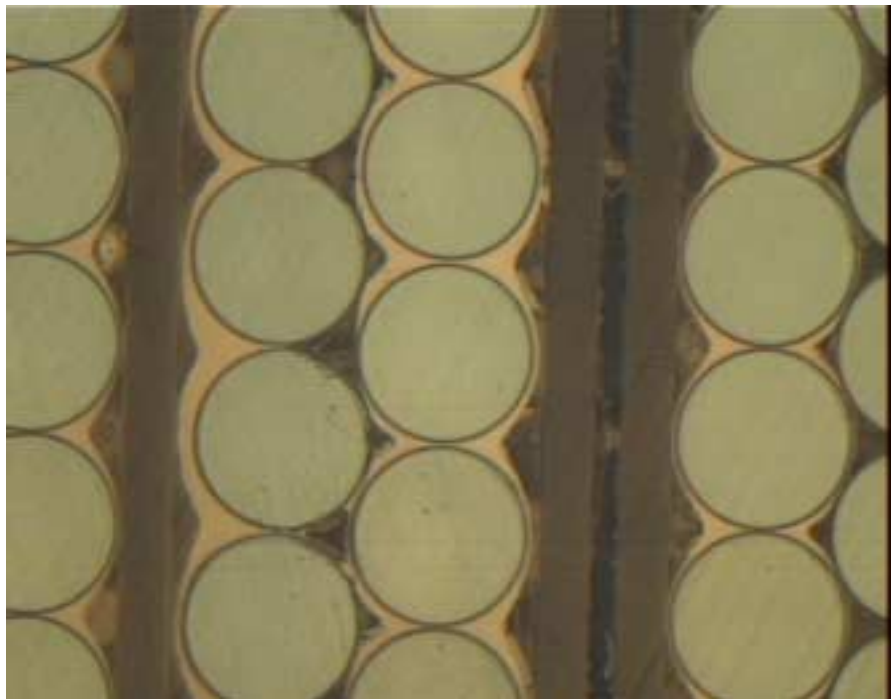
分割して
ブロック状に

型にはめて
固める

円形の光電面を
有効に利用

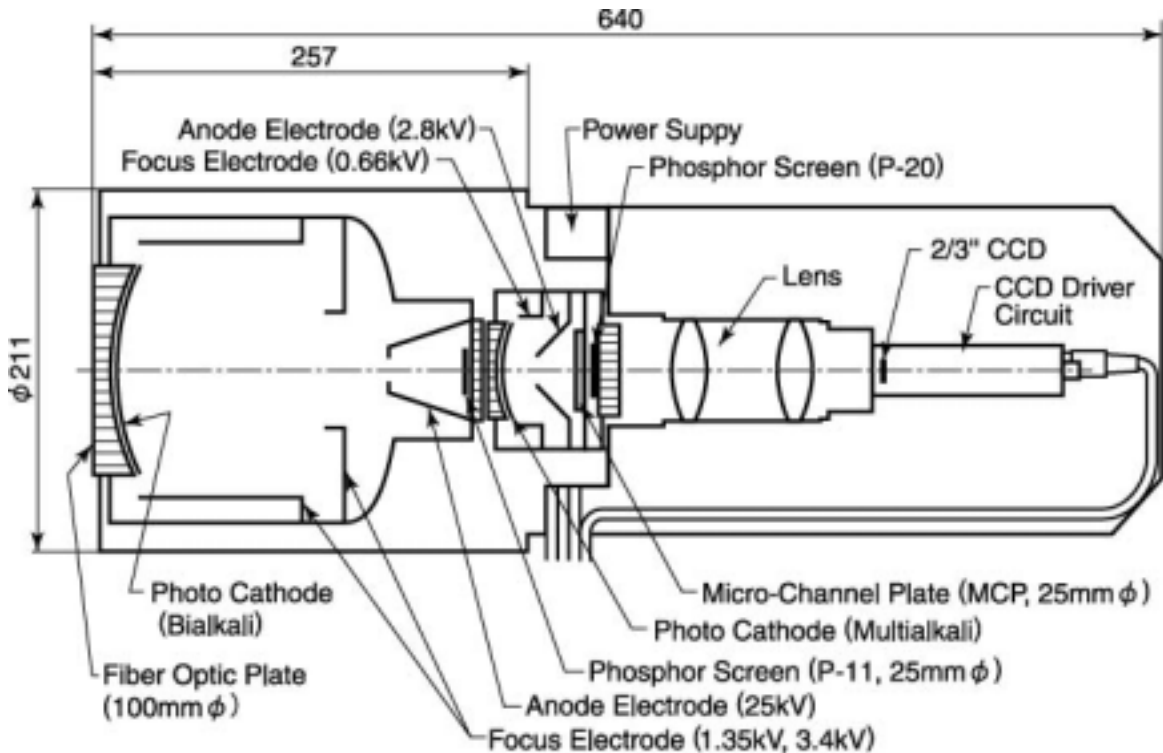


組み立てが終了したところ



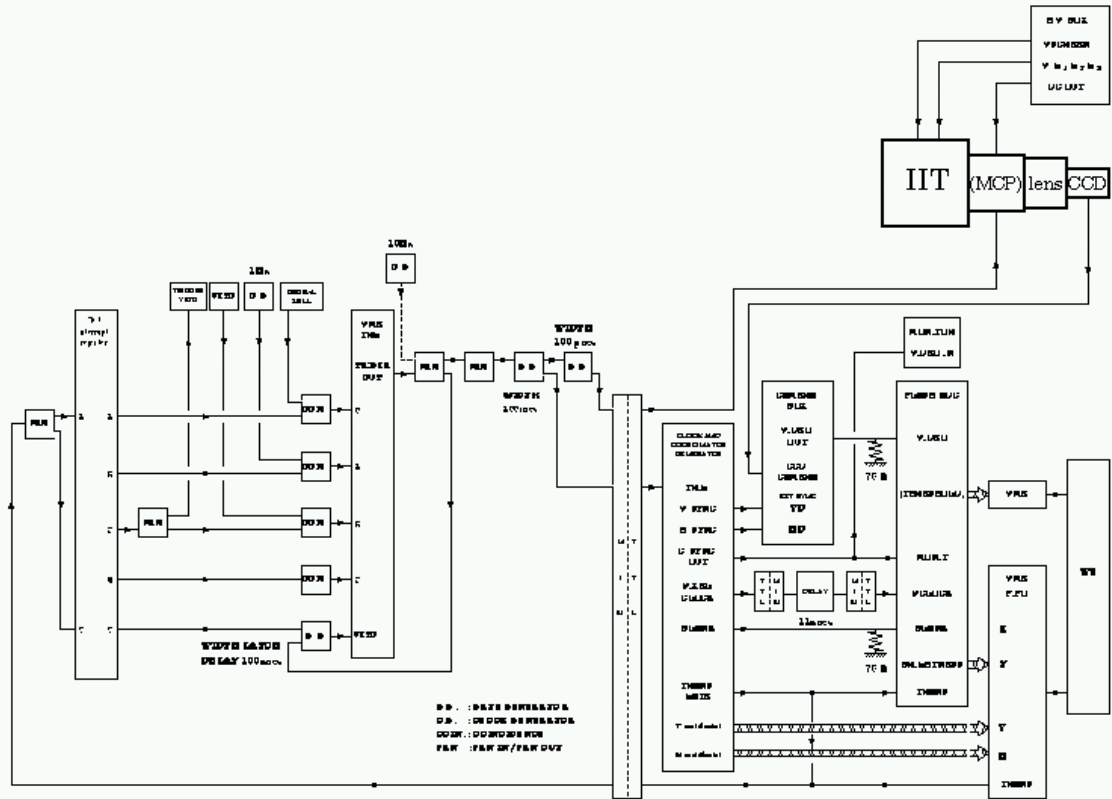
研磨された読み出し面の拡大図

IIT-CCDチェーン



- IIT(イメージインテンシファイア)
 - 位置情報をもったまま光を増幅
 - 前段IITと後段IIT(MCP型)の組み合わせ
 - 後段はゲーティング可能
 - ビームタイミングに合わせ100 μ sec. open
- CCD カメラ
 - 増幅された画像を読み出す

データ取得のセットアップ



CCDカメラ画像



輝度 & 位置情報(画素単位)

Flash
ADC

Clock & Coordinate
Generator

0 suppress →

FIFOメモリー

ワークステーション

典型的データサイズ 2.5k byte/Event

3. SciFi検出器の解析 及び性能評価

解析の流れ

i) SciFi ヒット検出

ヒットピクセル検出

クラスタリング

フィルタリング

ヒットファイバー検出

(EL を用いた位置キャリブレーション)

ii) SciFi 飛跡検出

iii) バーテックス検出

iv) 下流検出器とのマッチング

v) エネルギー測定

ヒットピクセル検出

- クラスタリング

ヒットはピクセルの集合として見える

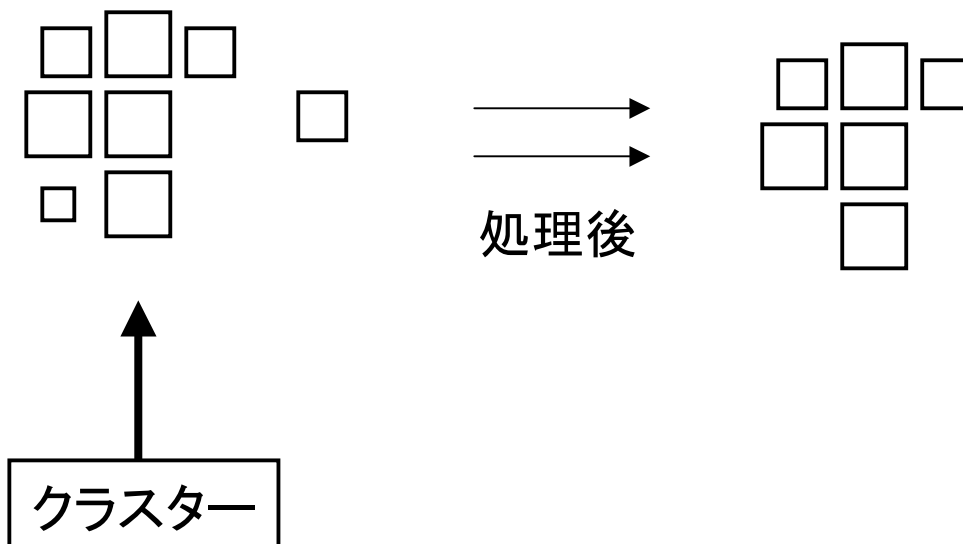


連続したピクセルの集団(クラスター)を探す

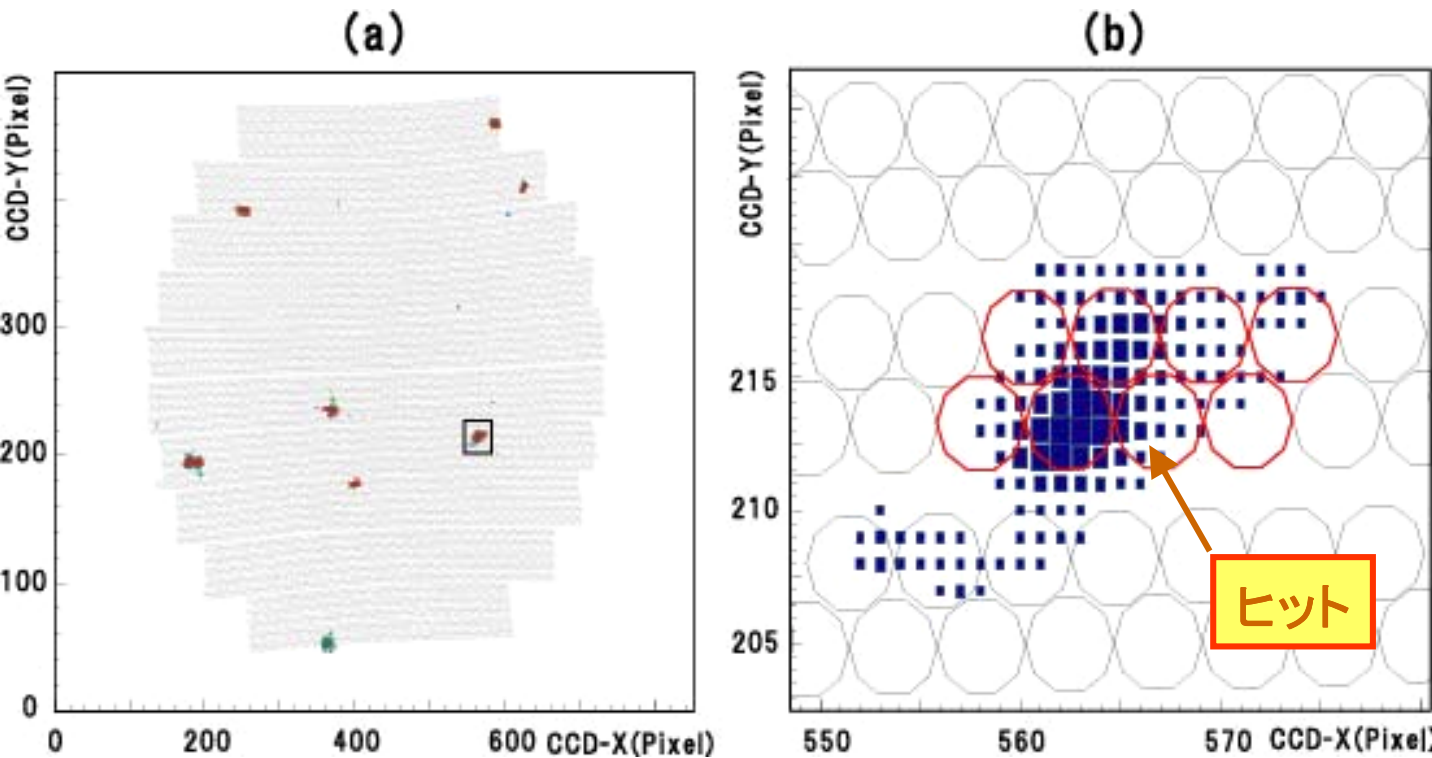
- フィルタリング

輝度(ADC値)によるカット

クラスターサイズ(ピクセル数)によるカット



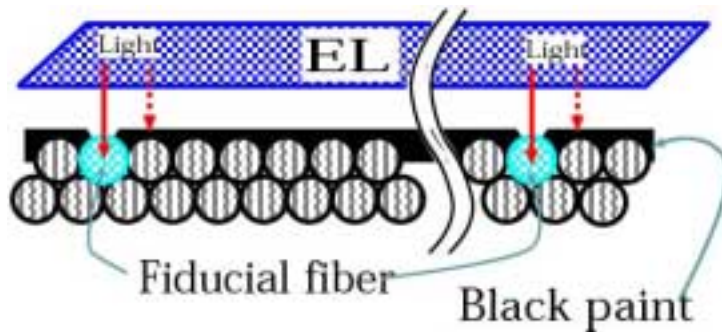
ヒットファイバー検出



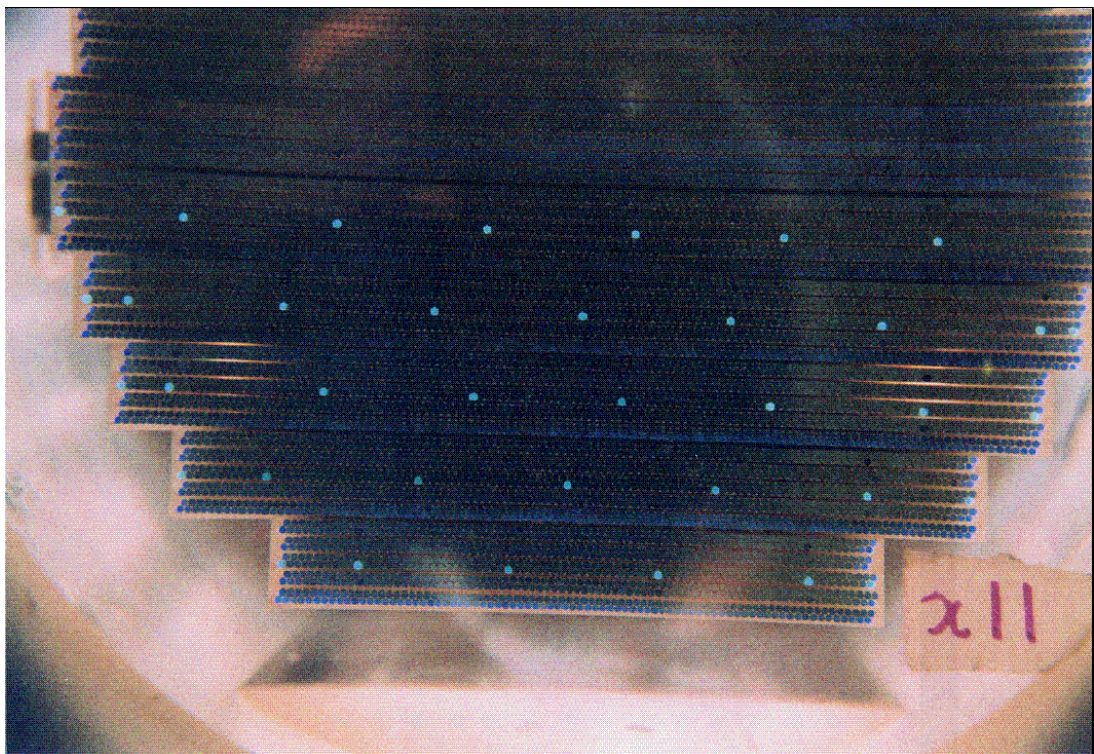
ファイバーとCCD座標の対応(全図・左、拡大・右)

- ファイバー位置とピクセル位置が重なっていればヒットファイバーとする
- ヒットファイバーの集合を1つのヒットとする
- SciFi シート上下層のファイバーのコインシデンスをとる (ノイズ除去)

EL(Electro Luminescent)プレートを用いた位置キャリブレーション

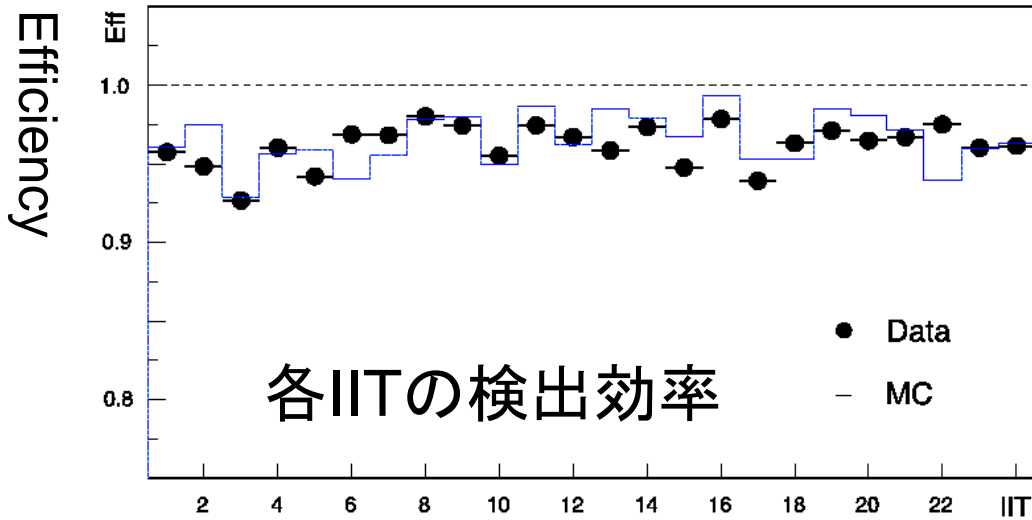


- 20～40本おきにファイバーを光らせてデータをとる
- ファイバー \longleftrightarrow CCD画像の対応マップ(前頁)を作る
- $\sigma \sim 100 \mu\text{m}$ 以下

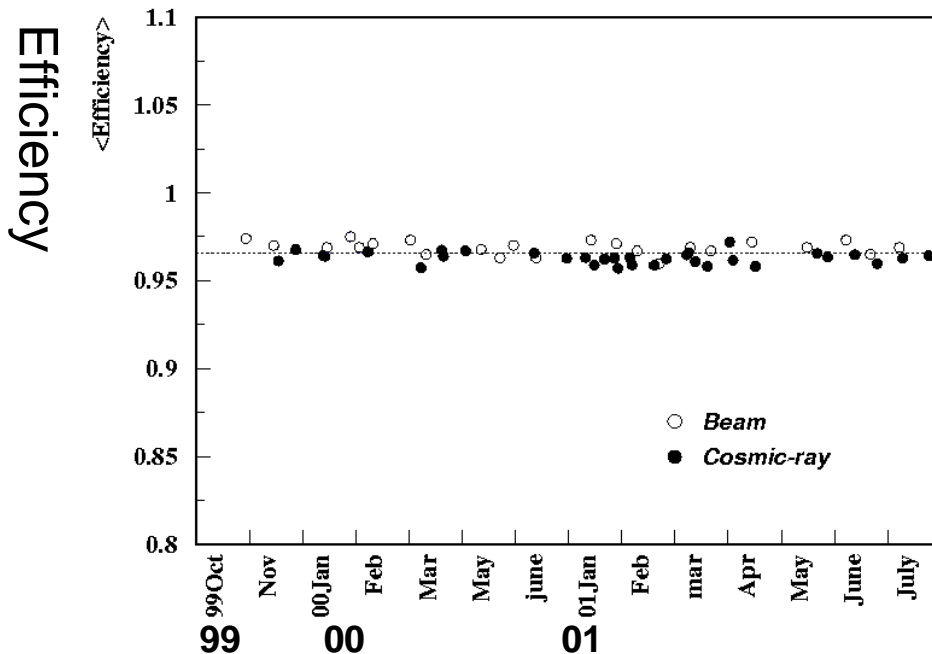


ヒット検出効率

- 宇宙線データより • DATA 96.1%
- MC 97.0%



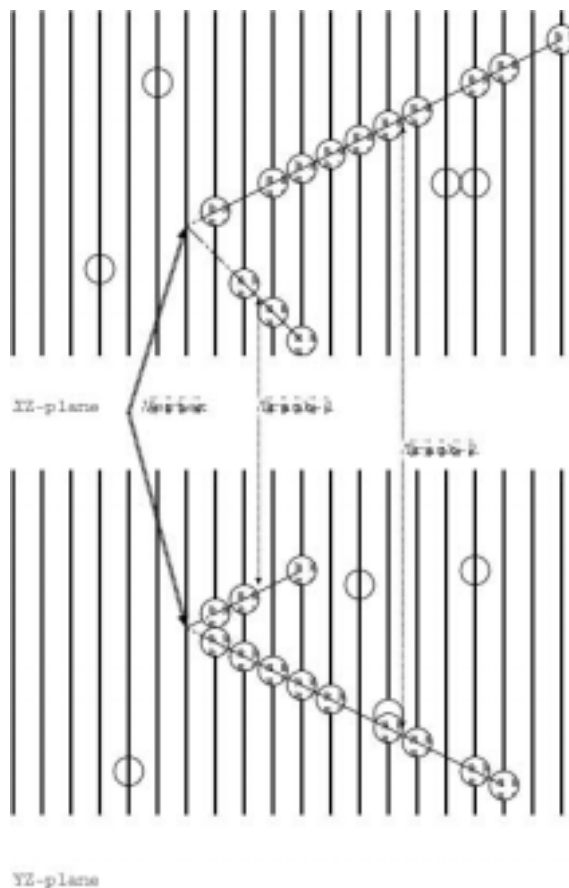
ヒット検出効率の安定性



飛跡検出

X-Z平面

Y-Z平面

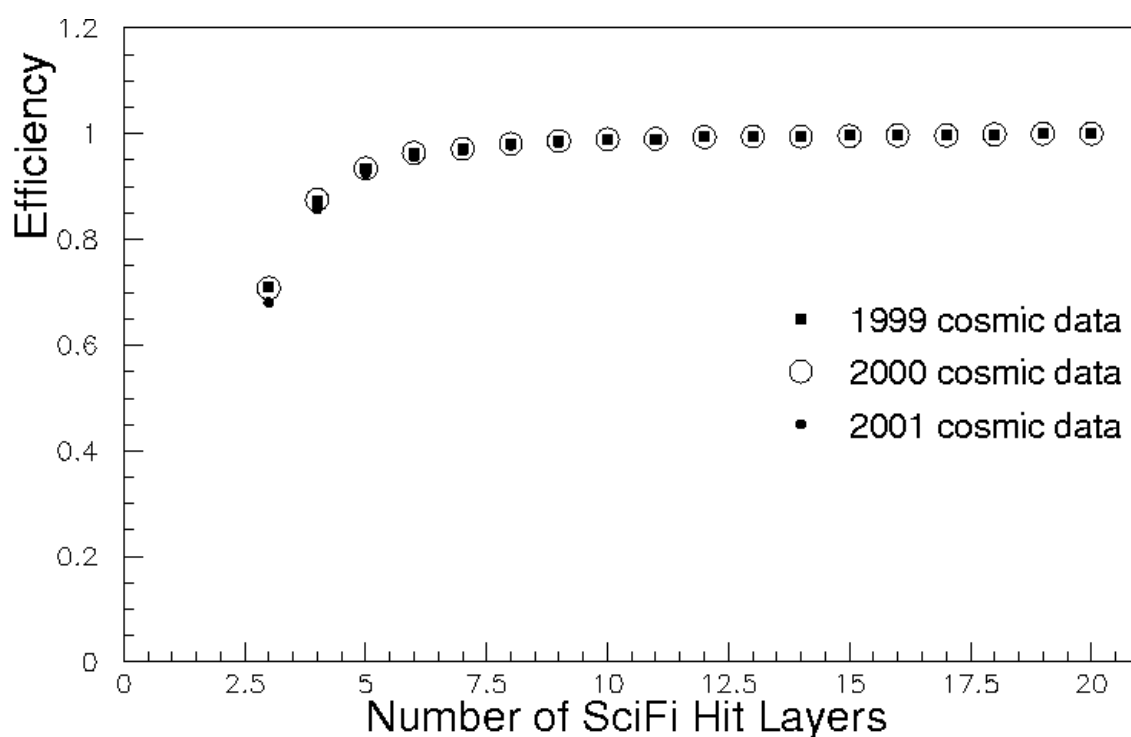


○: SciFi ヒット

- 3層以上連続したヒットを連結
- X-Z、Y-Z 間に対応する組み合わせを探す
- 3次元的な飛跡を再構成

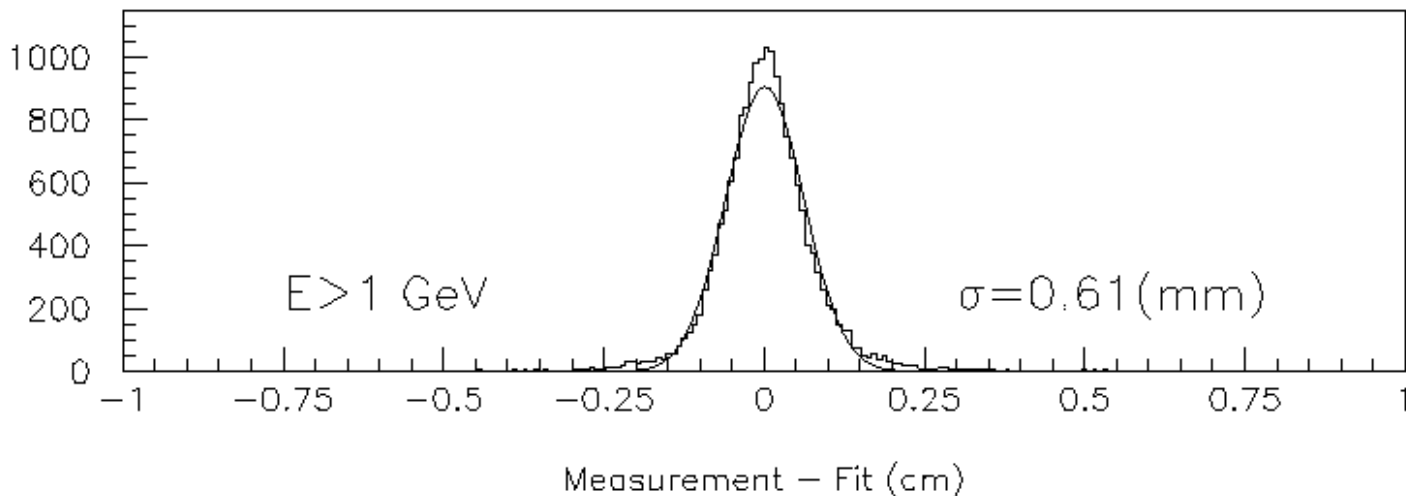
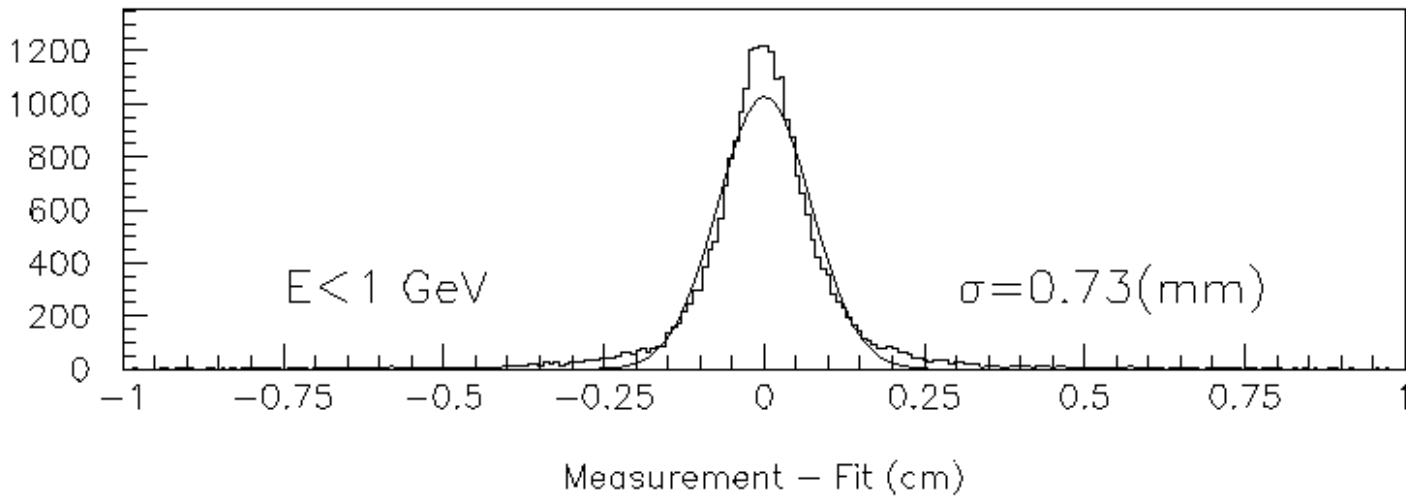
飛跡検出効率

- 宇宙線データで、上下流のシンチレータのヒット要求

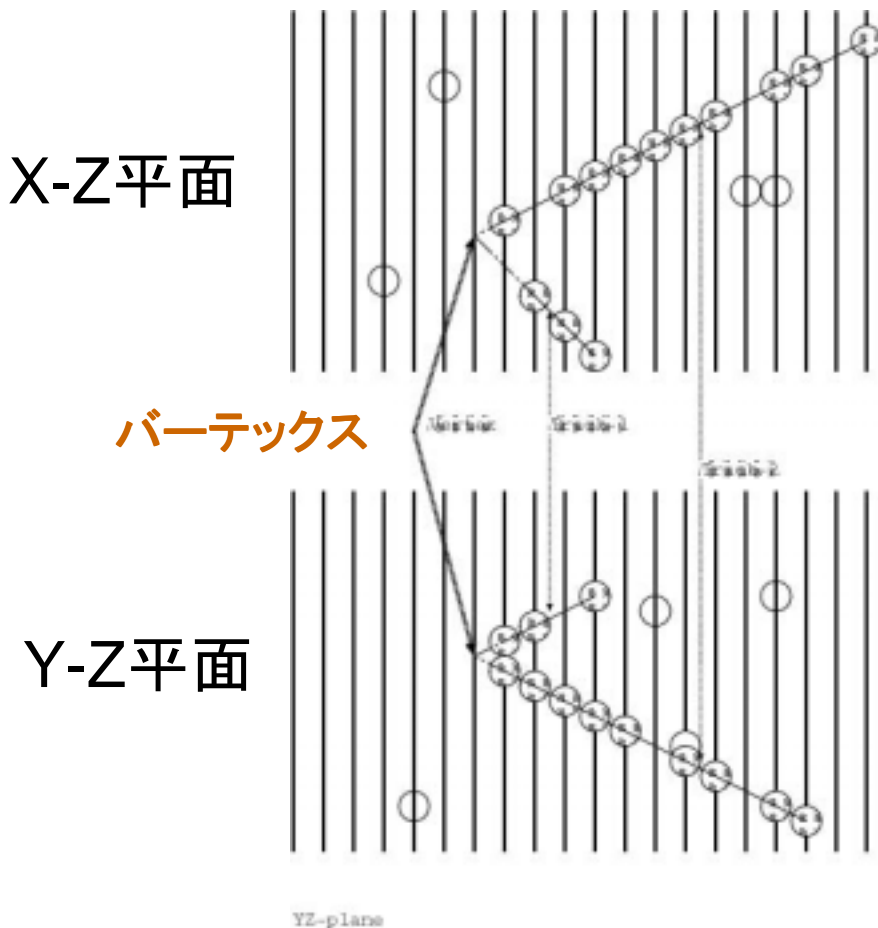


位置分解能(ヒット)

- 直線フィットとヒット位置の差
 - $\sigma \sim 0.73\text{mm}$ ($E_\mu < 1\text{GeV}$)
 - $\sigma \sim 0.61\text{mm}$ ($E_\mu > 1\text{GeV}$)

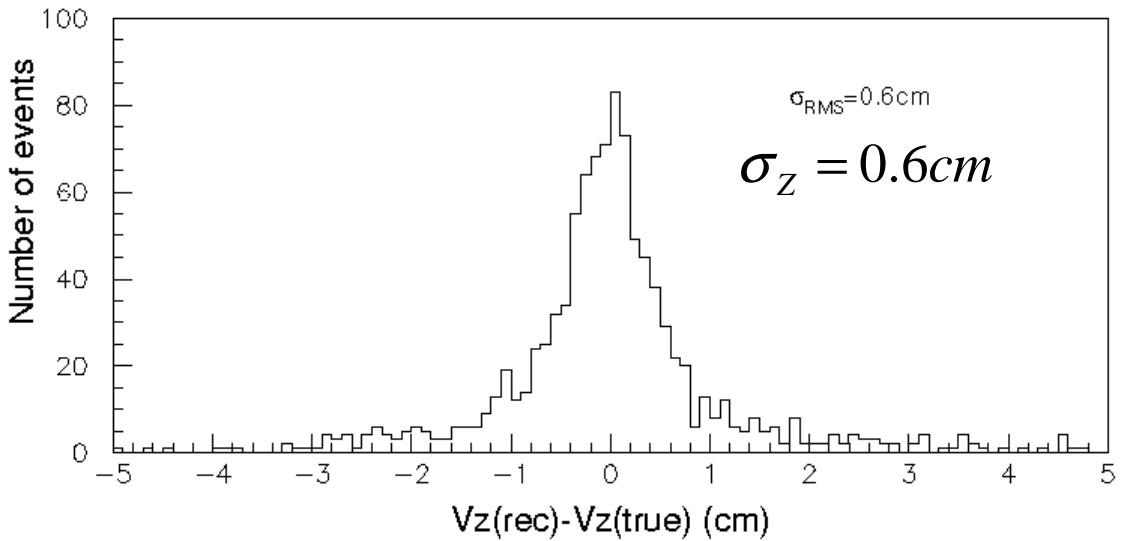
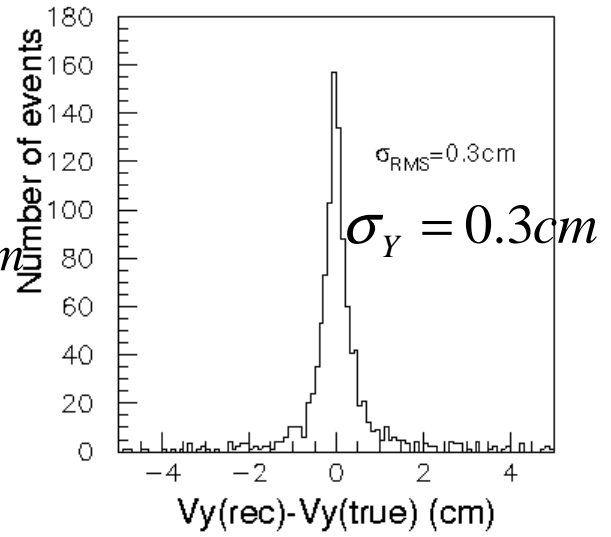
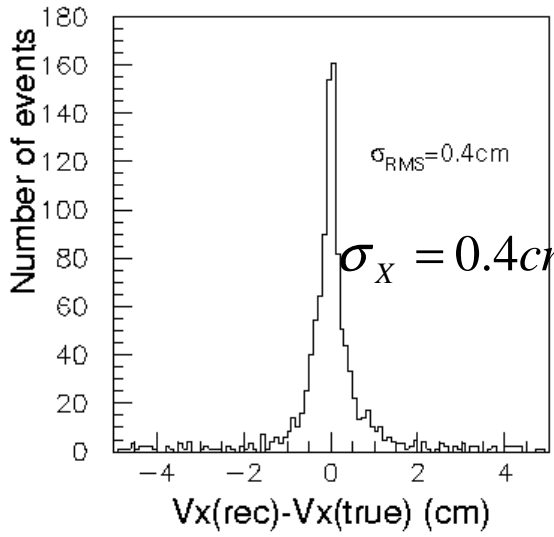


バーテックス検出



- 最長トラック(μ と仮定)から出発
- そのトラックの始点付近から始まる別のトラックを2ndトラックとする
- トラックの交点をバーテックスとする

位置分解能(バーテックス)



下流検出器とのマッチング & イベント分類

- エネルギーレンジによる分類

鉛ガラスにヒット、ミュオン検出器に反応なし

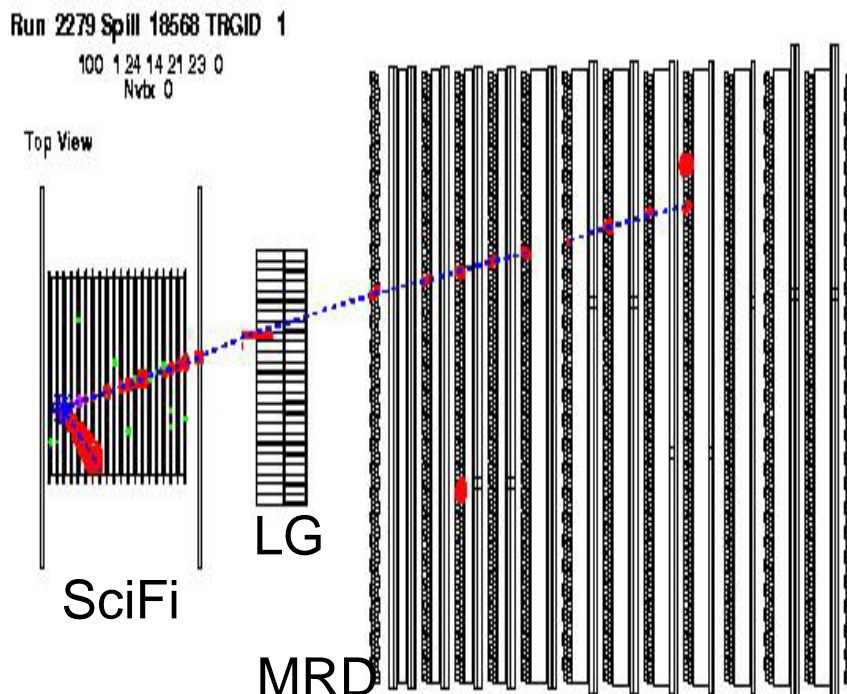
→ 鉛ガラスストップイベント (LGstopping)

鉛ガラスにヒット、ミュオン検出器にトラック

→ ミュオンイベント (MRD)

- トラック多重度による分類

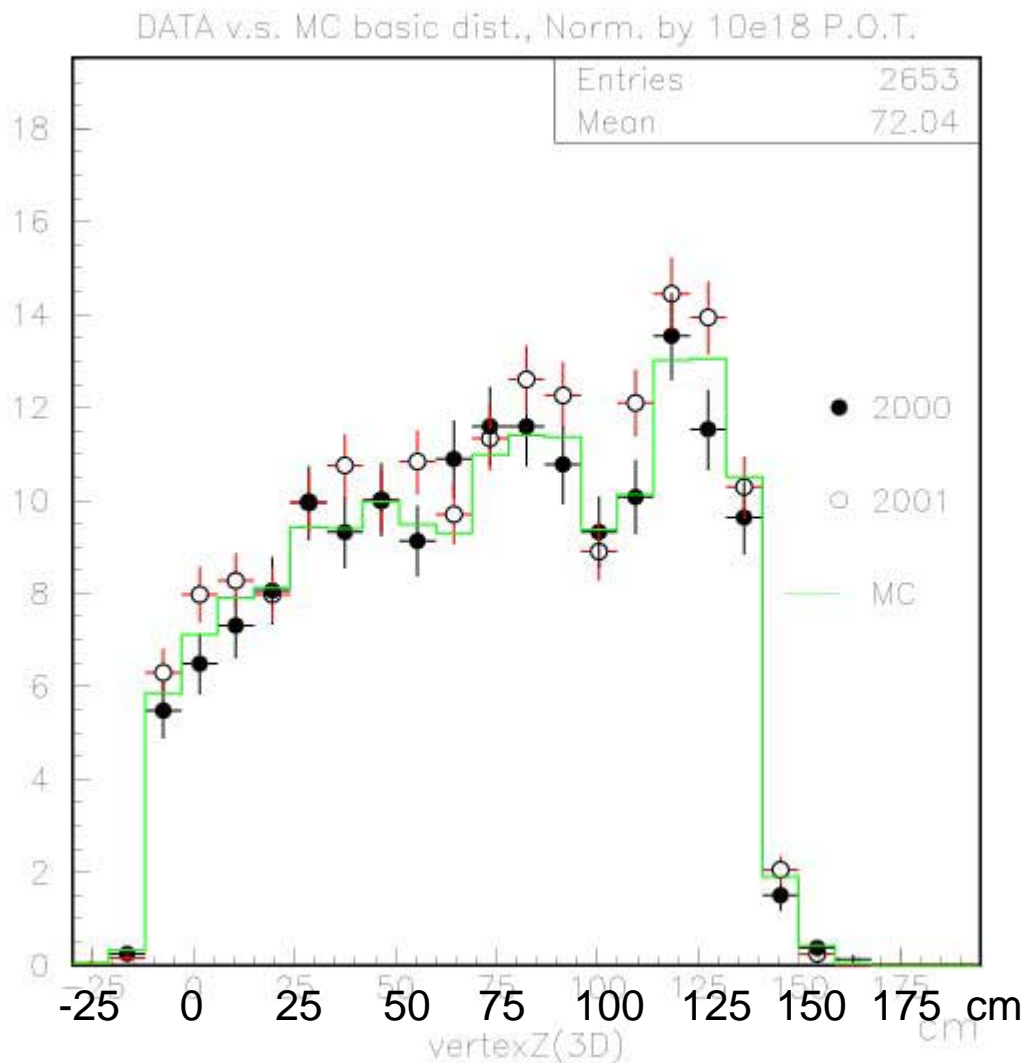
1つのバーテックスから出ているトラックを数える



ミュオン2トラックイベントの例

バーテックス分布

- ミューオンイベントのバーテックス分布
 - 下流のアクセプタンス大



エネルギー測定

- 粒子のエネルギー (μ と仮定)

各検出器の deposit energy を合計

$$= \text{SciFi} + \text{TRG} + \text{LG} + \text{MRD} + m_{\mu}$$

- 現在 dE/dX を精度3%でおさえるためのビームテストを終え、データ解析中

各検出器の dE/dX

SciFi : 13MeV/6cm

LG : 265MeV/34cm

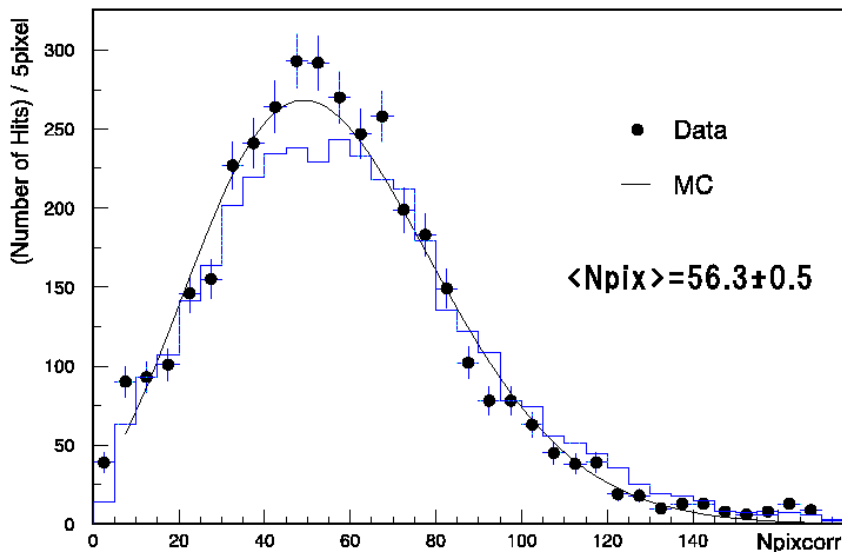
MRD : 120MeV/10cm

SciFi検出器のシミュレーション

- GEANT3でファイバーへの dE/dX を計算 200keV/MIP
- 線源、宇宙線テストからファイバー発光量を求める
- ファイバー内を伝達する間の減衰を計算
- IIT-CCD の反応をシミュレーション(ピクセルシミュレーション)

ピクセルシミュレーション

- キャリブレーションされたLED光を入れてIIT-CCDの反応
(クラスタのピクセル数、輝度分布)のデータを得る
- パラメータ化して各光量におけるIIT-CCDの反応を再現

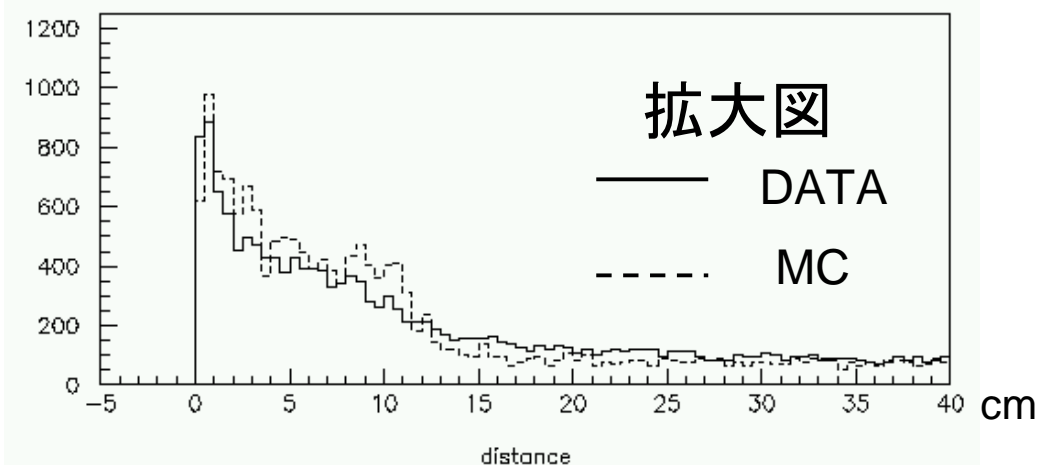
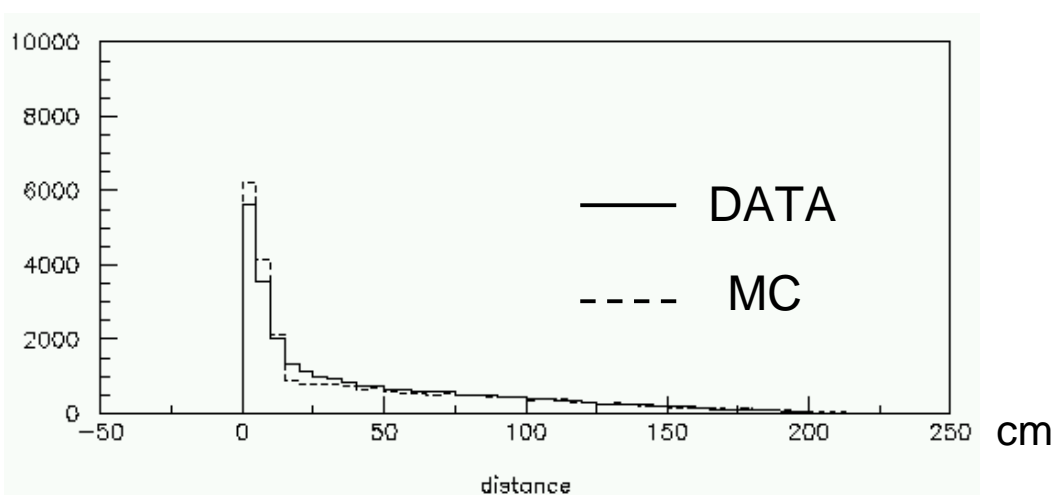


シミュレーションで再現されたクラスタサイズ

ノイズヒットの評価

- 平均ノイズレート 69hit/Event
- ピクセルシミュレーションでノイズも再現

宇宙線データから:トラックとノイズヒットの距離分布



5. 現在までの成果

1. 後置検出器での期待イベント数
2. 様々な分布
 - P_μ θ_μ q^2 分布(inclusive)
 - 核内効果
 - トラック数
 - 2nd Track Length
 - 2トラックQE/nQEの分布
3. SciFiでのニュートリノスペクトル再構成

各段階のカットのまとめ

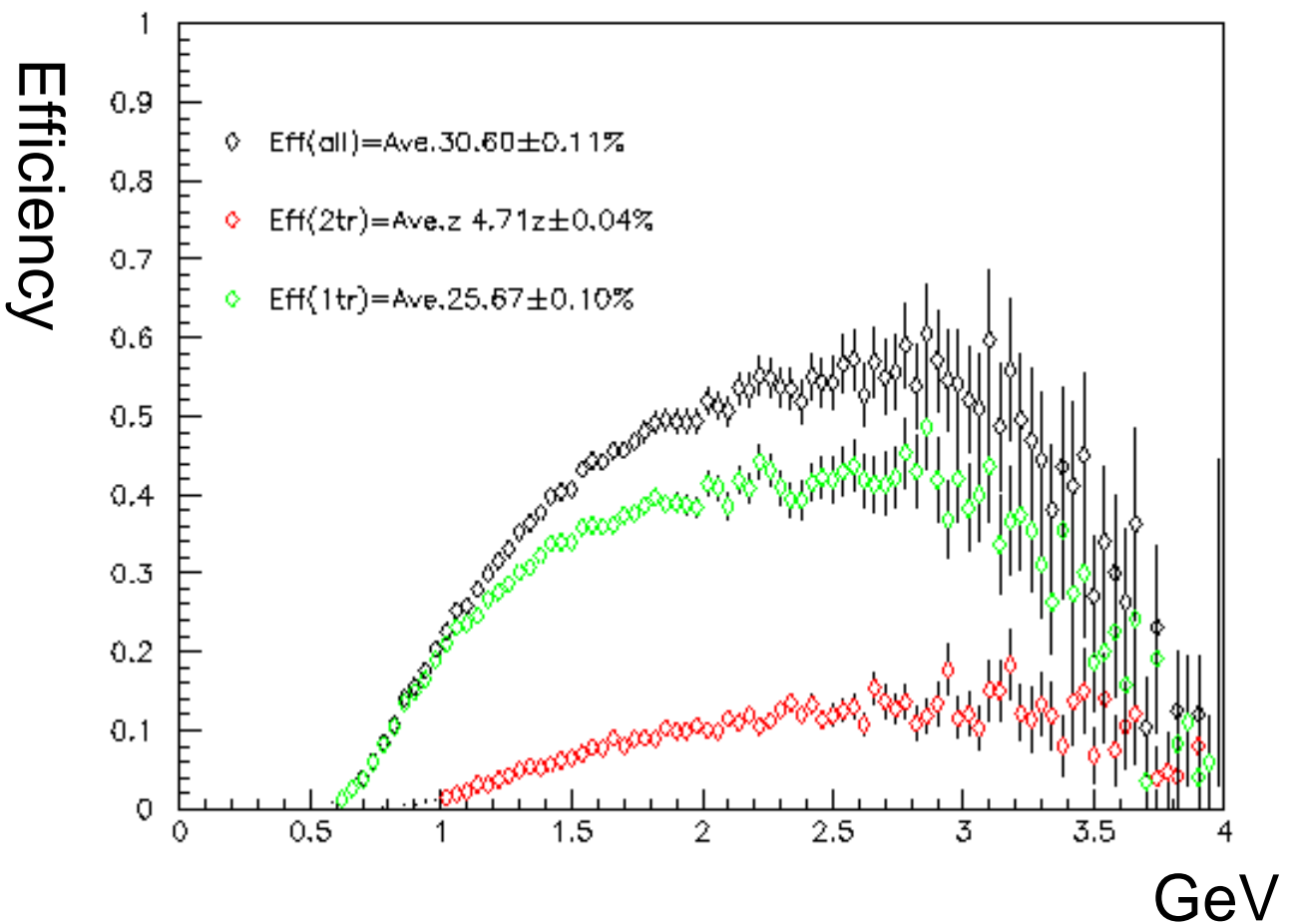
• reprocessed	2926288
• SciFi飛跡	257400
• TRGカウンタマッチ	23775
<hr/>	
• ミューオンイベント	8735
(LG stopping イベント	3949)
<hr/>	
• ミューオン1トラック	4521
• ミューオン2トラック	2218

検出効率 (volume 5.9t/8.6t)

ALL : 17.6%

CCQE : 30.6%

(1track 25.7% 2track 4.7%)



SKで期待されるイベント数

$$\text{期待イベント数 } N_{SK} = N_{FD} \cdot R \cdot \frac{\varepsilon_{SK}}{\varepsilon_{FD}} \cdot \frac{L_{SK}}{L_{FD}}$$

ε : 検出効率

R : Far/Near比

L : Live time

Nsk@

SciFi : $87.5^{+10.6}_{-11.9}$

Observe 56 events

無振動解を2 σ レベルでdisfavor

- 1kt: $80.6^{+7.3}_{-8.0}$ 他のFGDも
- MRD: $87.4^{+12.7}_{-13.9}$ エラーの範囲内で一致

n.b. Officialの値としては1ktが用いられている

Officialの値としては1ktが用いられている

of observed events and expected events
1999/06-2001/07

	Obs.	No Ocsi.	$\Delta m^2 (\times 10^{-3} eV^2)$		
			3	5	7
FC 22.5kt	56	80.6 $^{+7.3}_{-8.0}$	52.4	34.6	29.2
1-ring	32	48.4 \pm 6.7	28.1	17.8	16.6
μ -like	30	44.0 \pm 6.8	24.4	14.6	13.5
e-like	2	4.4 \pm 1.7	3.7	3.2	3.0
multi ring	24	32.2 \pm 5.3	24.3	16.8	12.6

主要な系統誤差

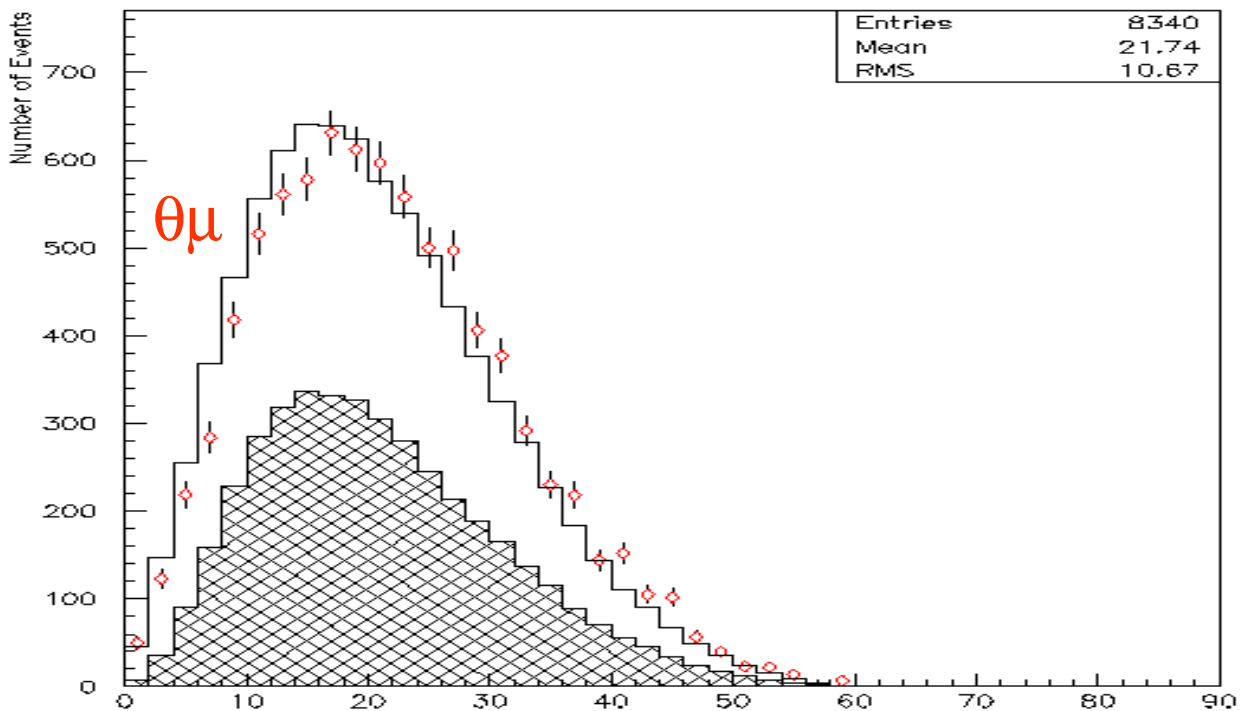
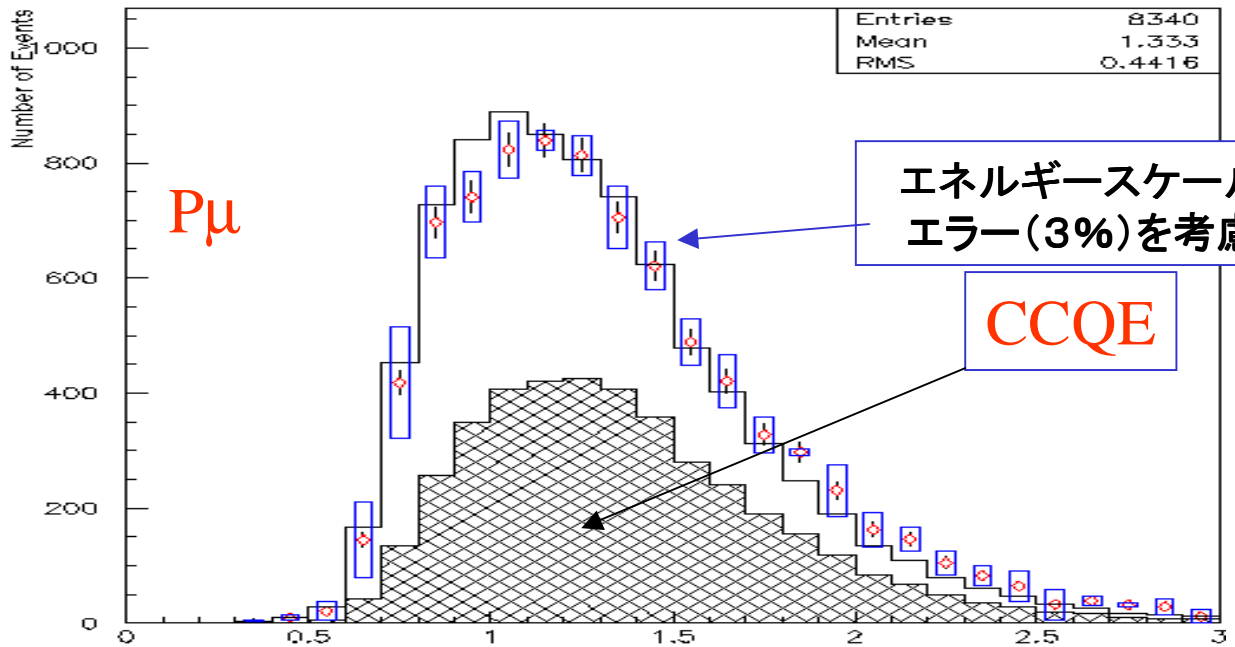
- SciFi固有
 - Al 断面積 +3% -3%
 - スペクトル +6% -6%
 - Inelastic/Elastic比 +5% -7%

- Extrapolation & SK
 - Far/Near 比 +6% -7%
 - SK検出効率 +3% -3%

- 計 +11% -12%

P_μ, θ_μ 分布 (CC Inclusive)

“All” #Track ミューオンイベント

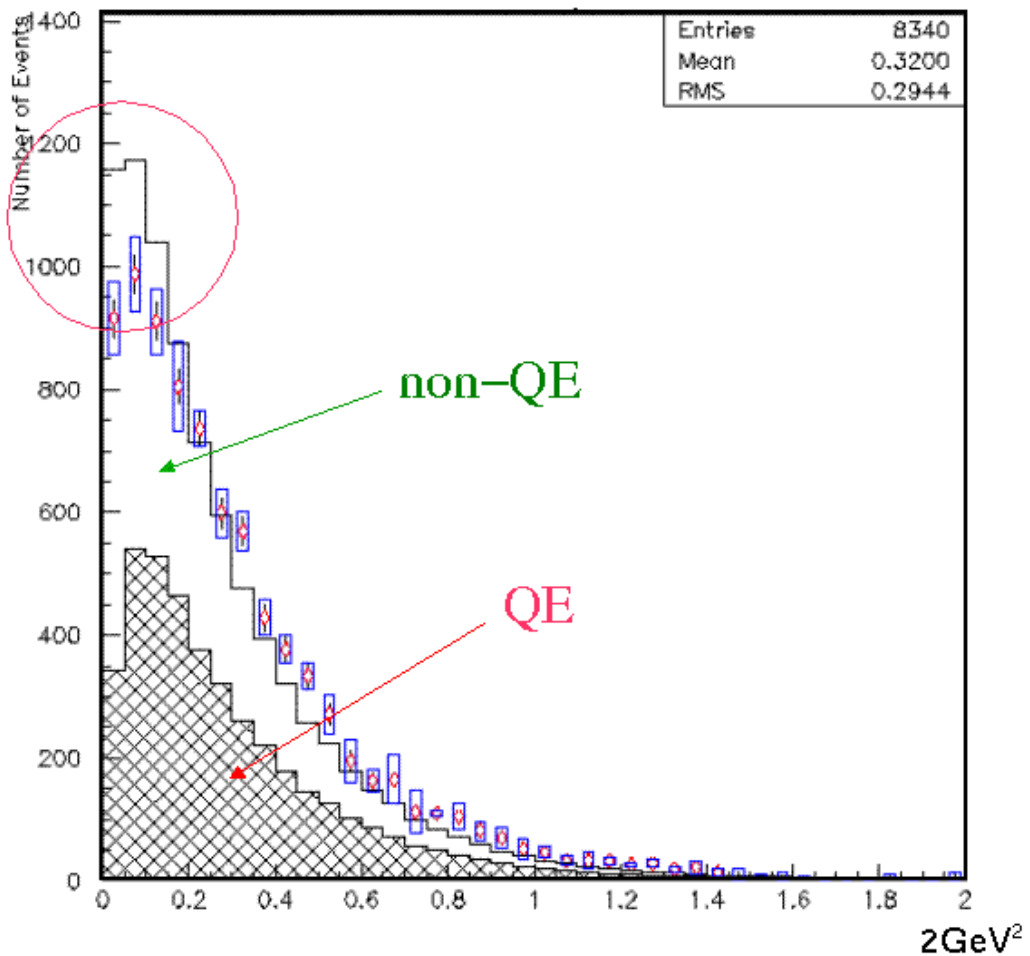


低角度領域で不一致

Q^2 分布

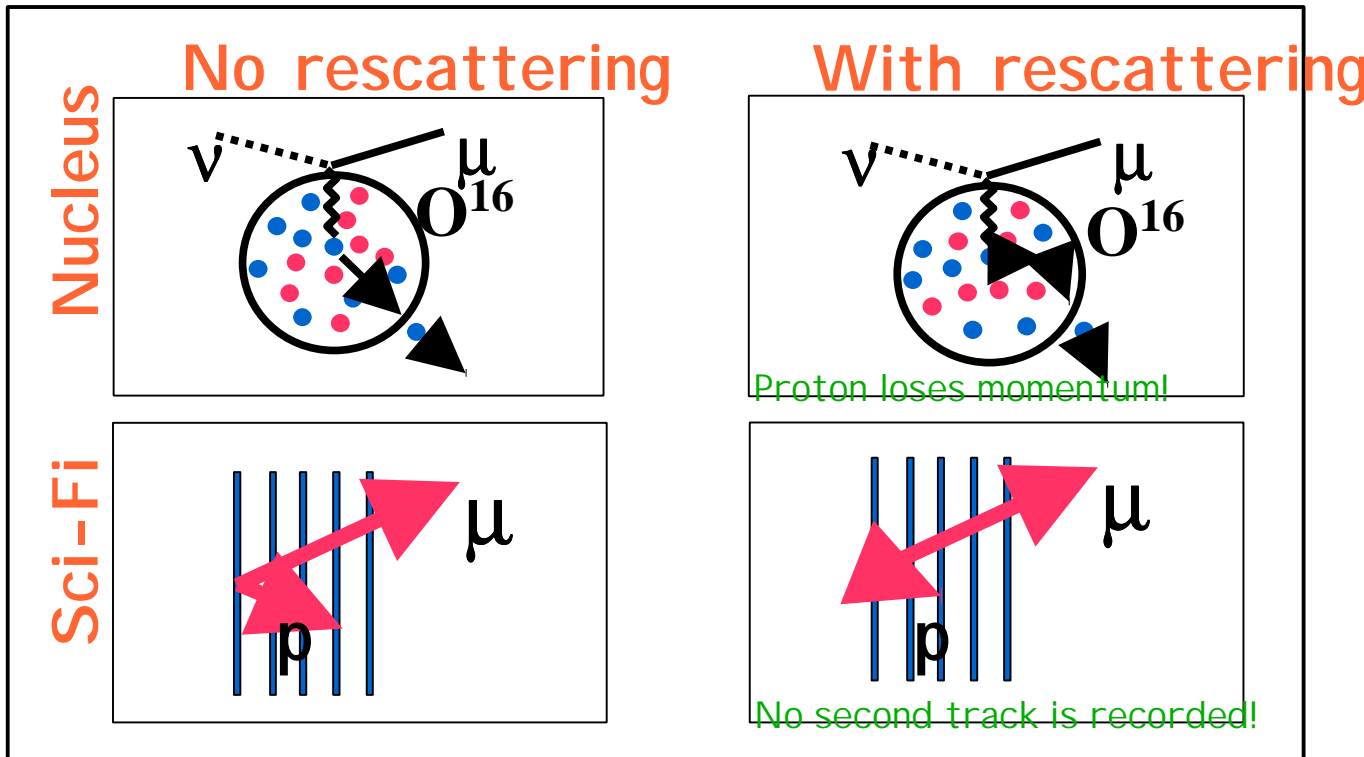
CCQE仮定し P_μ θ_μ から Q^2 計算

$$-Q^2 = -2 \cdot E_\nu (E_\mu - P_\mu \cos \Theta) + m_\mu^2$$



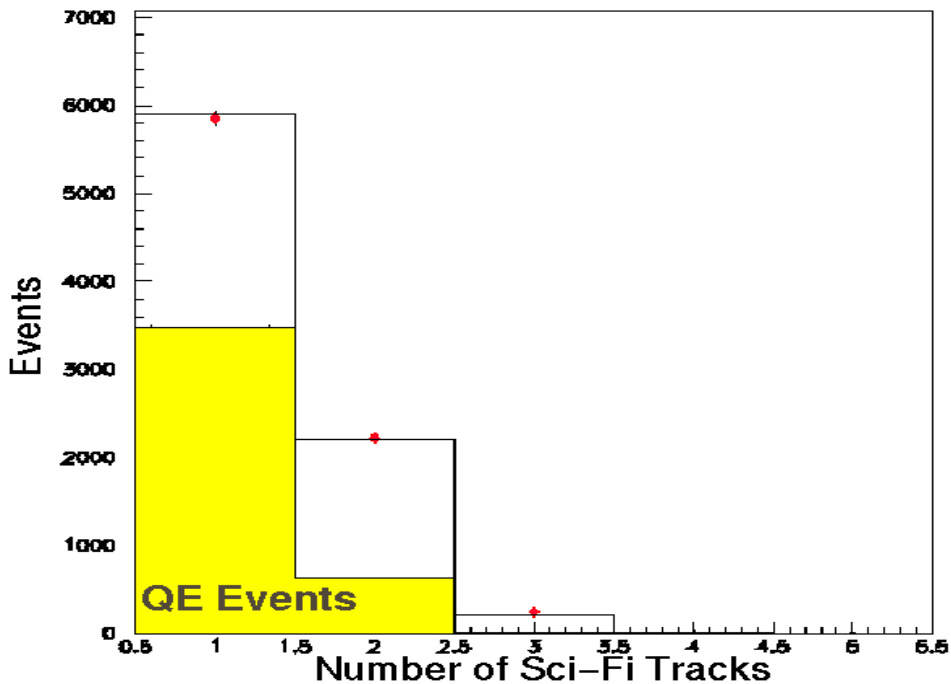
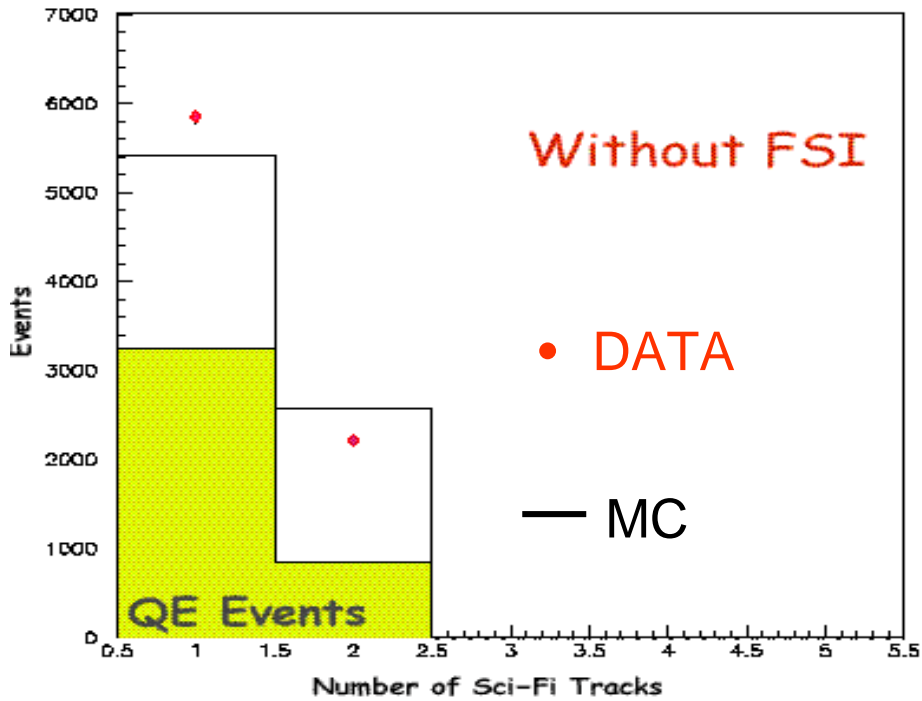
低 Q^2 領域で不一致

核内効果



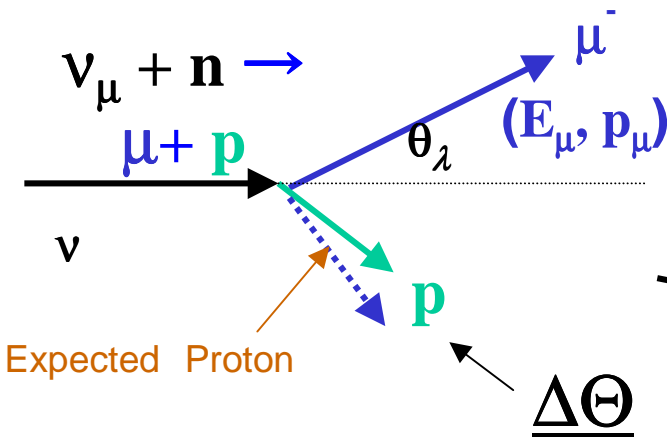
- 水ターゲットの酸素原子内部の陽子運動量を考慮したMC
- $P_p > 400 \text{ MeV}$ で約40%が反応する
- ($\Delta P_p = -90 \text{ MeV}$ シフトに相当)
- 電子-陽子散乱実験のデータでValidate

トラック数分布

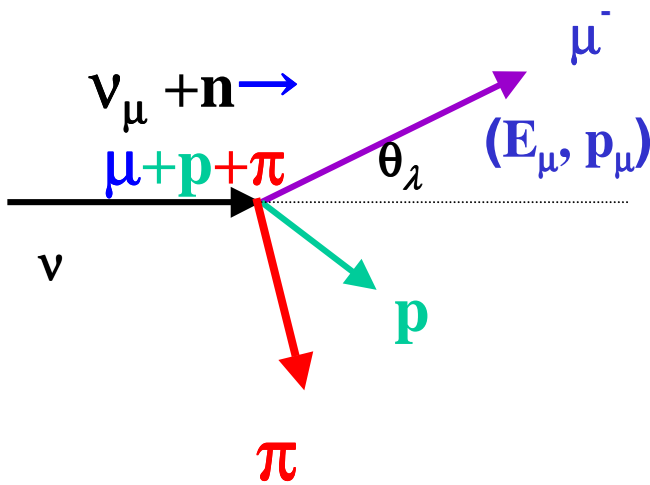


- 核内効果を考慮したMCとDATAはよくあっている

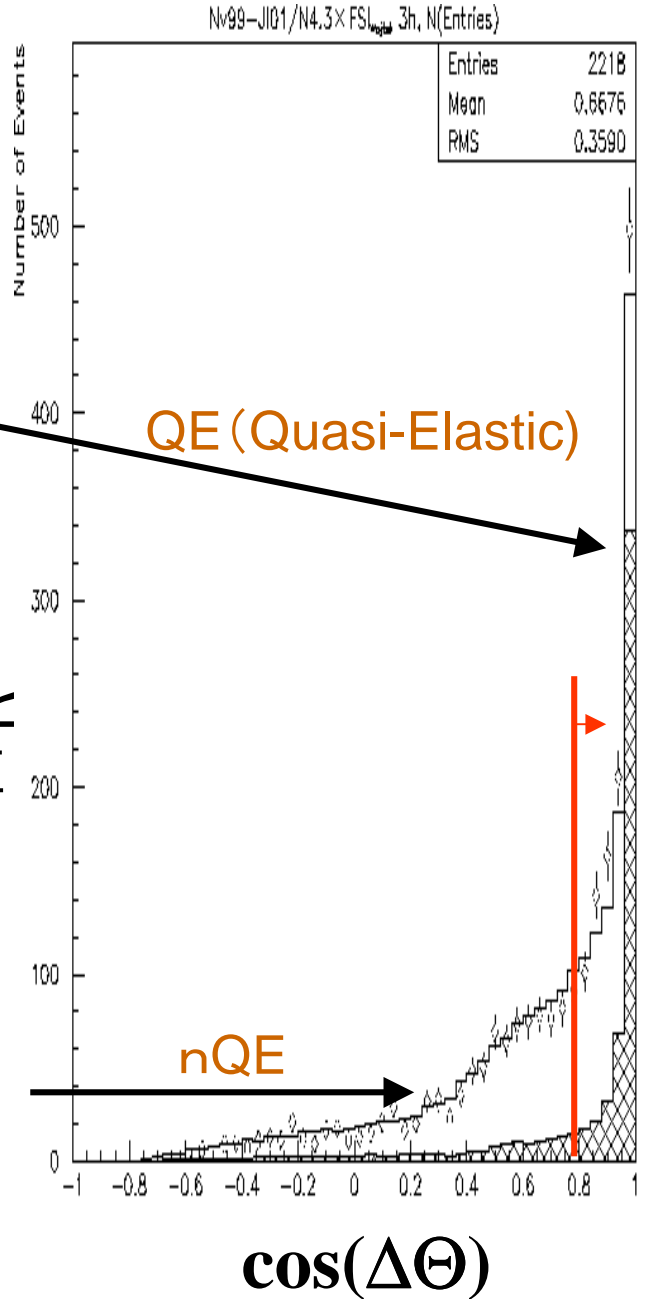
QE/nQEの選択



QEを仮定
 予測される陽子の角度と
 観測の差角 $\Delta\Theta$ を計算



nQEの例



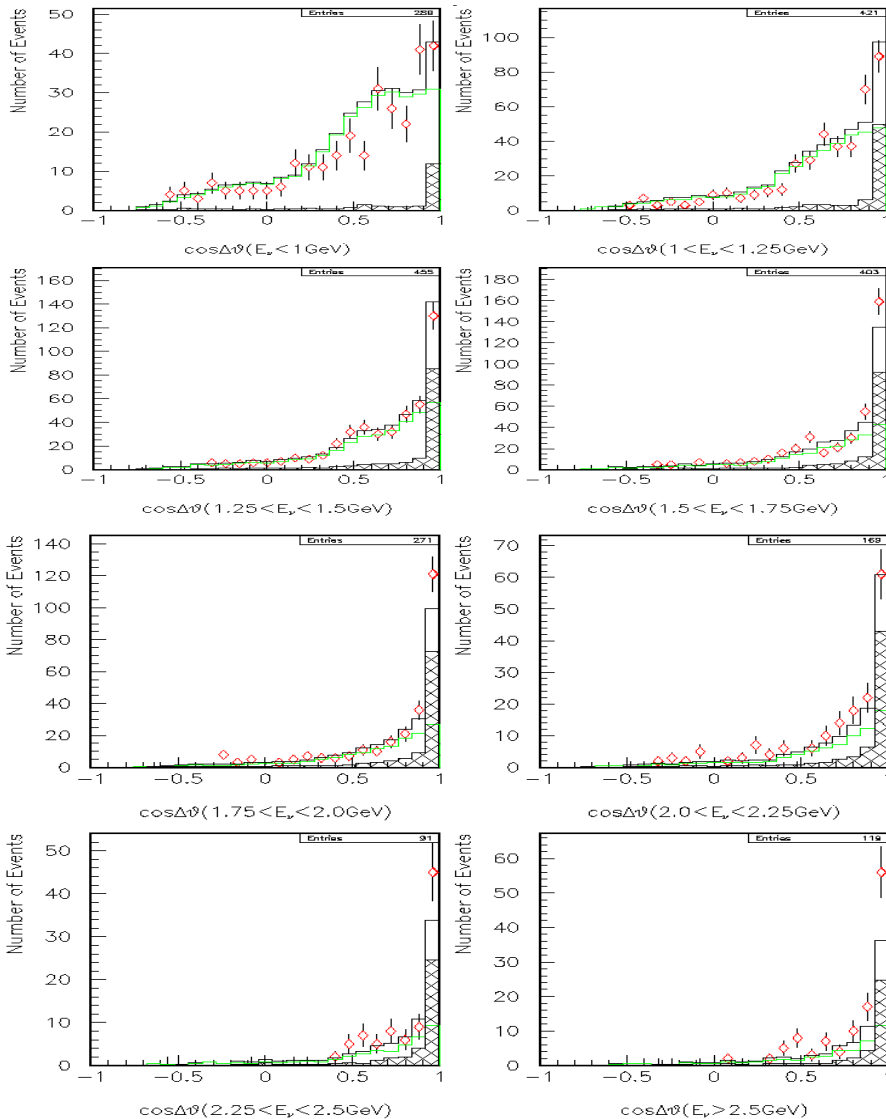
$\Delta\Theta < 25^{\circ}$ QE enriched sample

$\Delta\Theta < 30^{\circ}$ nQE enriched sample

各エネルギーにおける

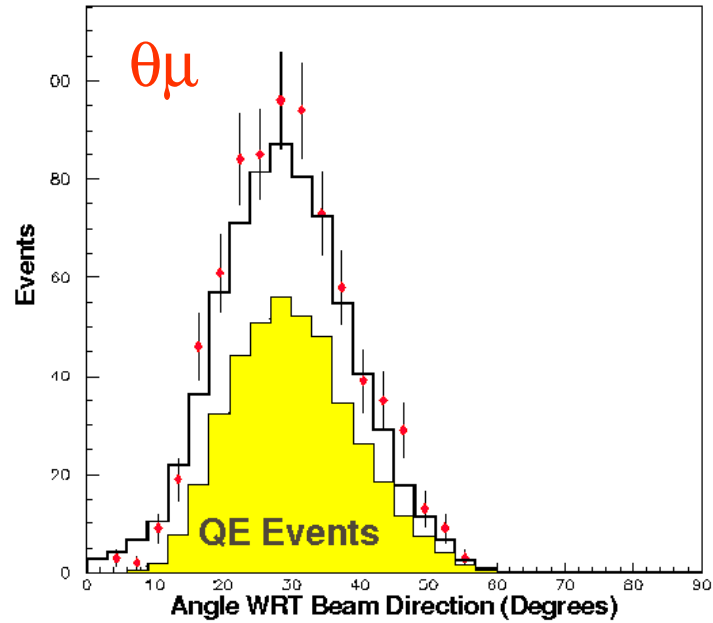
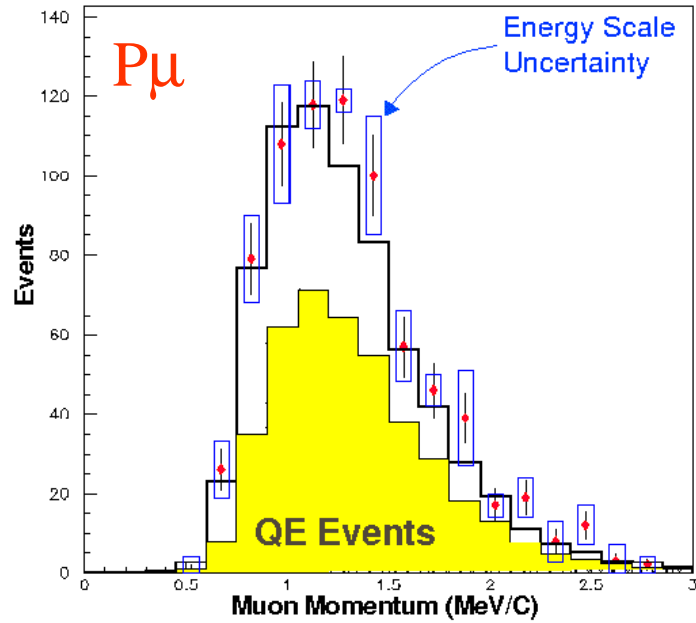
$\cos \Delta\Theta$ 分布

規格化は共通

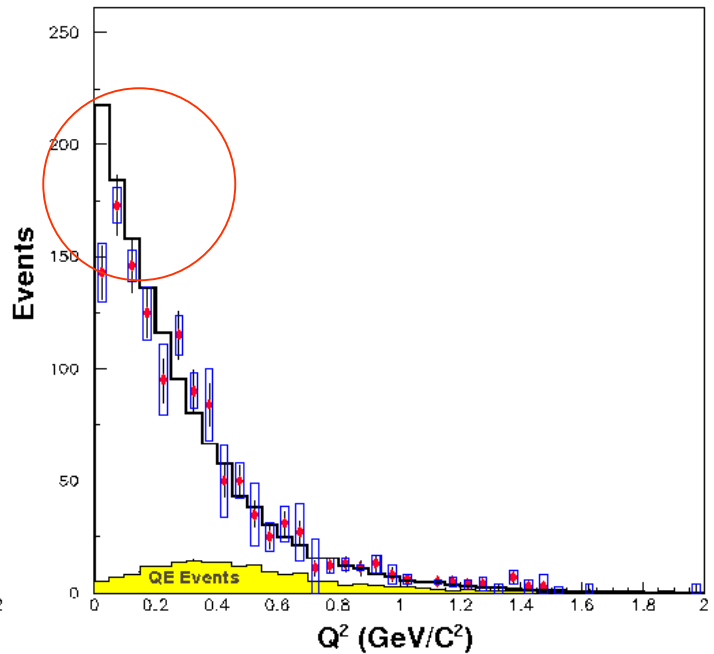
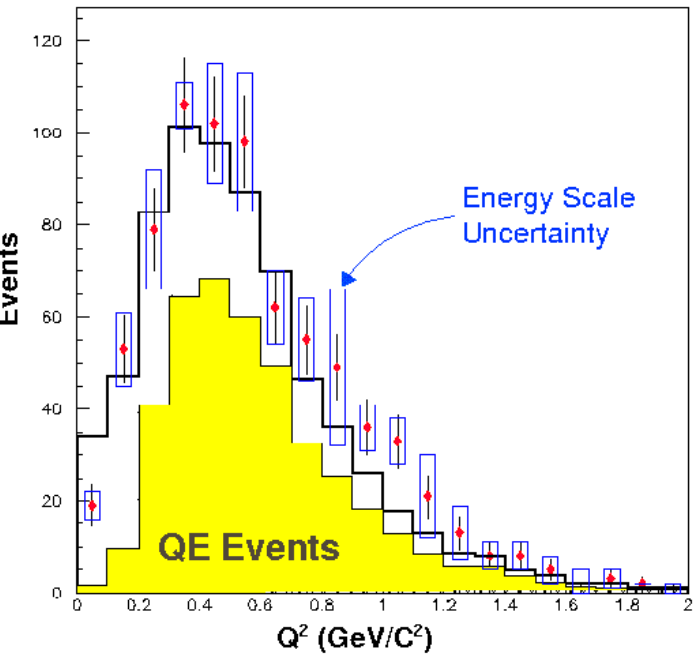


- nQE 領域はよくあっている
- データはQE 領域が多い
 - エネルギースケールのエラー？

2トラックQE領域



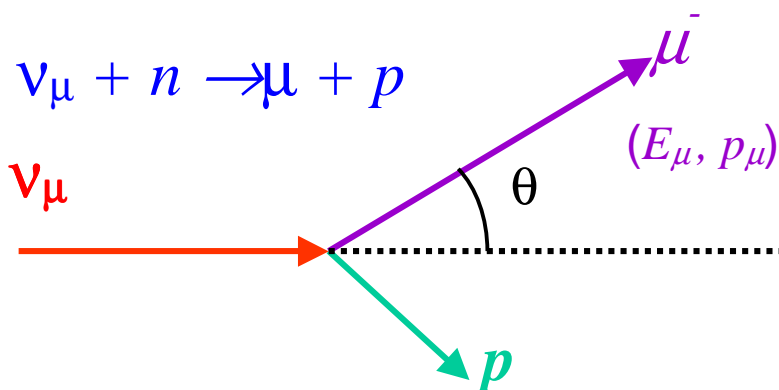
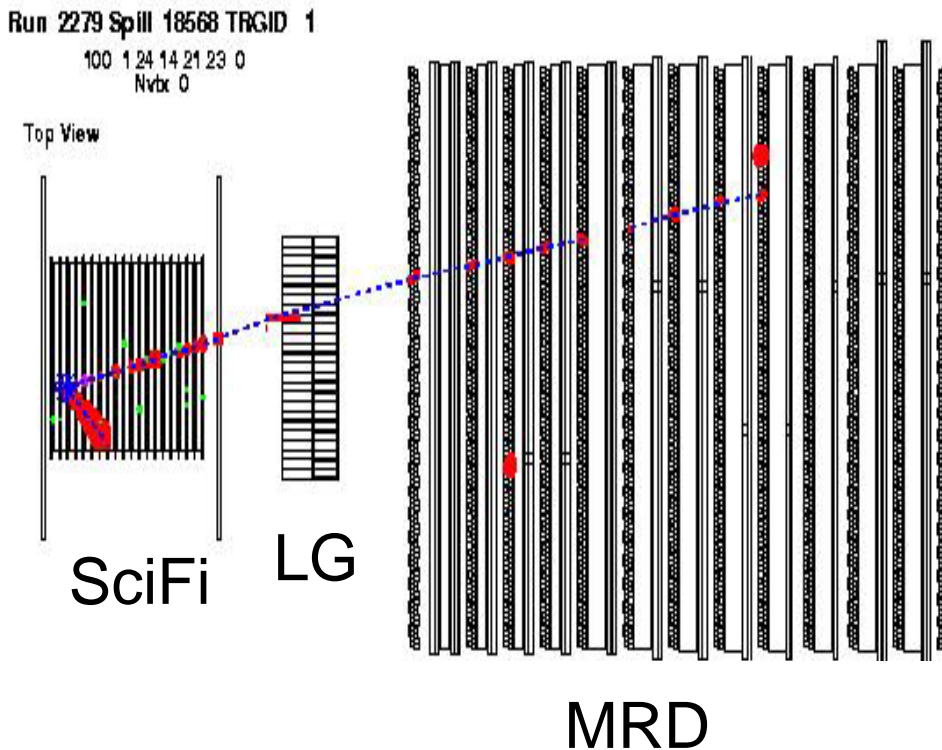
2トラックQE/nQE領域の Q^2 分布



QE $\equiv \Delta\Theta < 25$ deg

NonQE $\equiv \Delta\Theta > 30$ deg

SciFiによる エネルギー再構成の方法

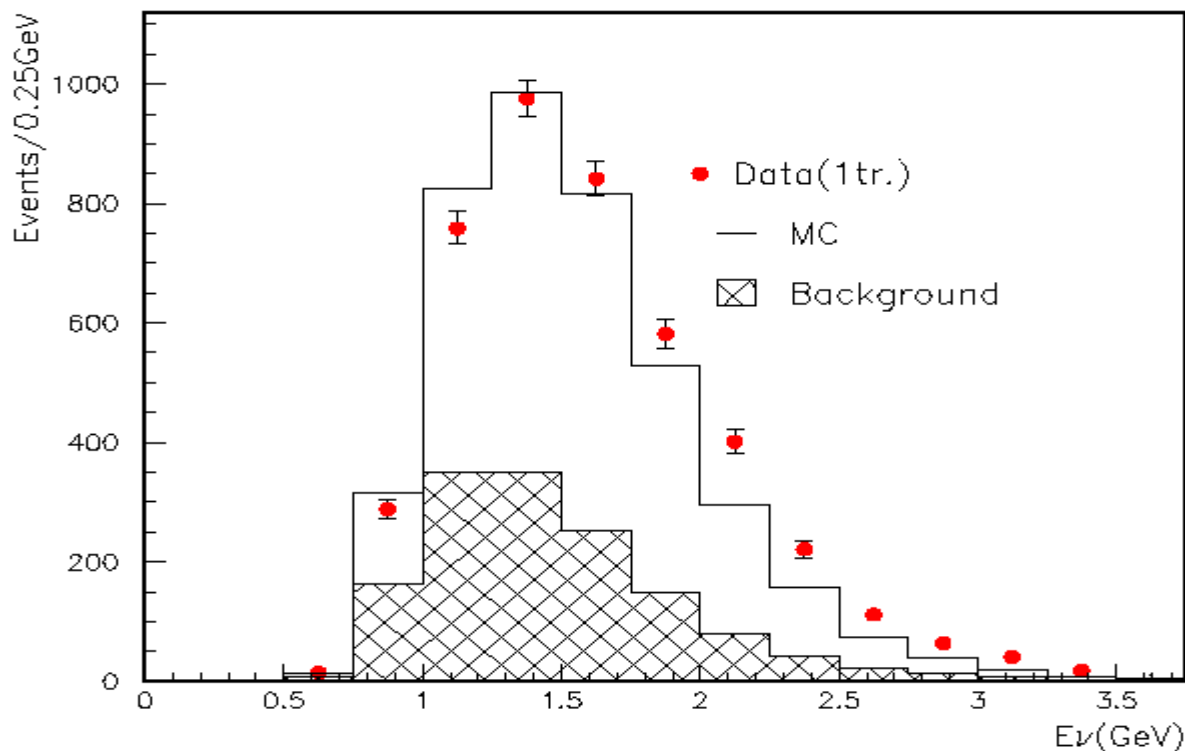
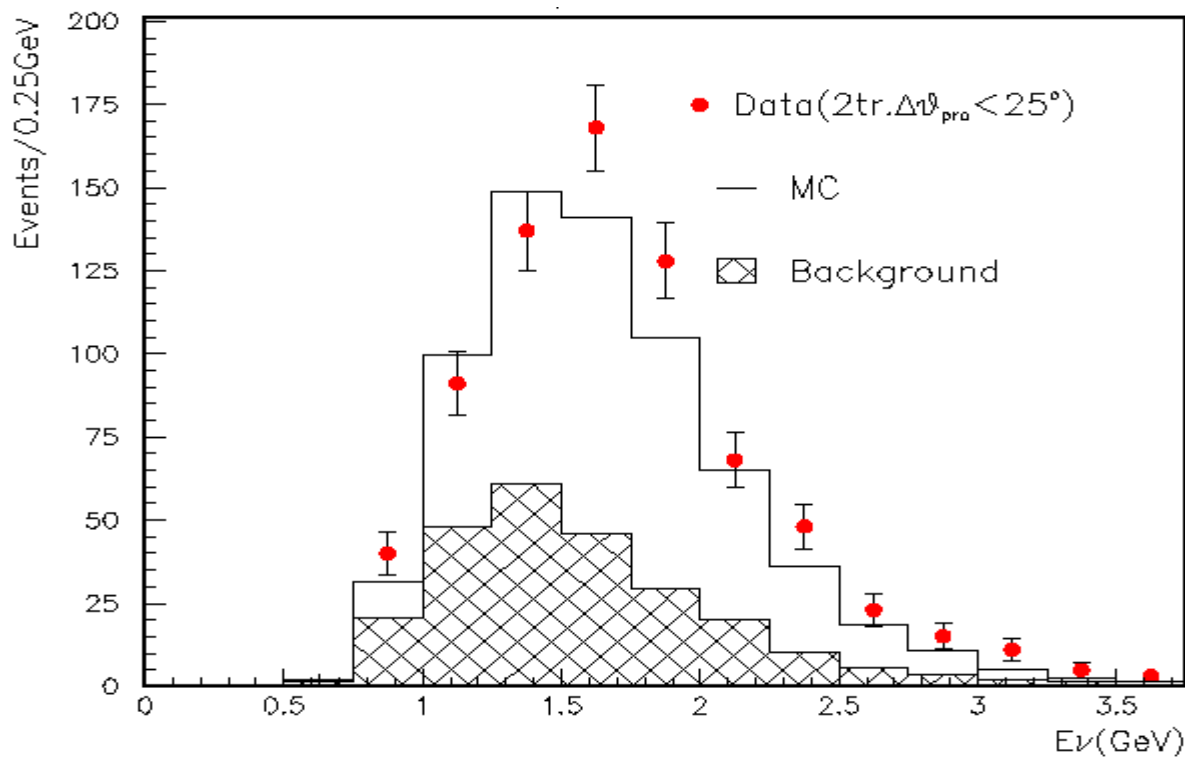


準弾性
散乱反応選択

↓
 E_{ν} 再構成

$$E_{\nu} = \frac{m_N E_{\mu} - m_{\mu}^2 / 2}{m_N - E_{\mu} + p_{\mu} \cos \theta_{\mu}}$$

ニュートリノスペクトル



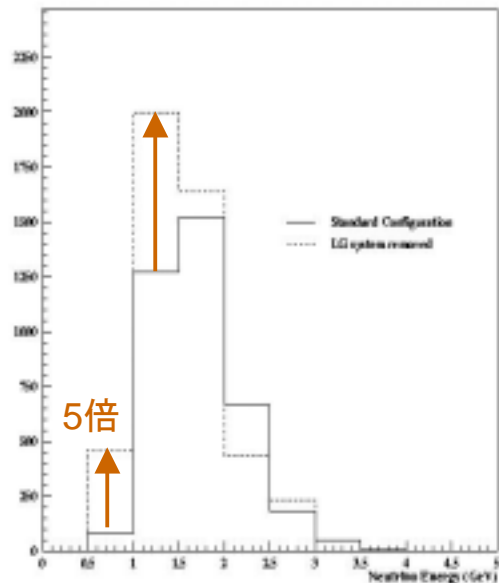
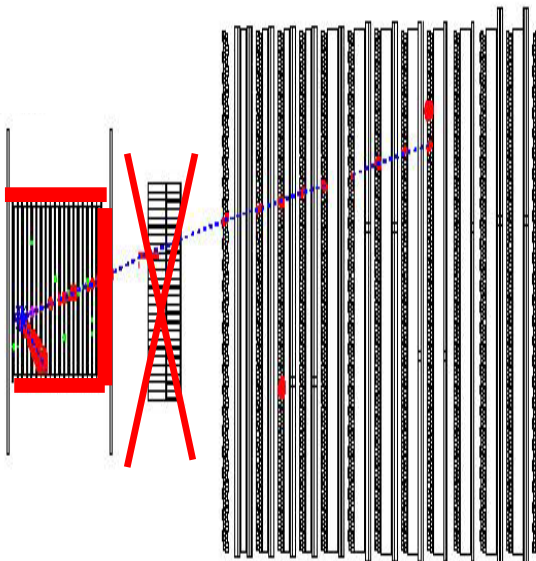
6. まとめ

- K2K実験の前置検出器として SciFi を用いた飛跡検出器を製作した。
- SciFi 検出器は期待された基本性能を示している。
- SciFiの予測するSKイベント数は 2σ レベルで ν_{μ} disappearance を示している。
- ニュートリノスペクトルのエラーは 1GeV以下で20%程度、1GeV以上で10%程度である。
- エネルギー算出の誤差を小さくするためのビームテストを行った。
- 2003年初頭から再びデータ取得開始予定。

追記

- 2001年夏に前置検出器より鉛ガラス除去
- 1GeV以下のSciFiイベントを5倍に
- SK-SciFi間の統計誤差減らす

© 2004 Super-Kamiokande Collaboration



Neutrino Energy (GeV)