

T2Kニュートリノ振動実験における
ニュートリノビームの測定と
ビーム形状に起因する系統誤差の評価

高エネルギー物理学研究室

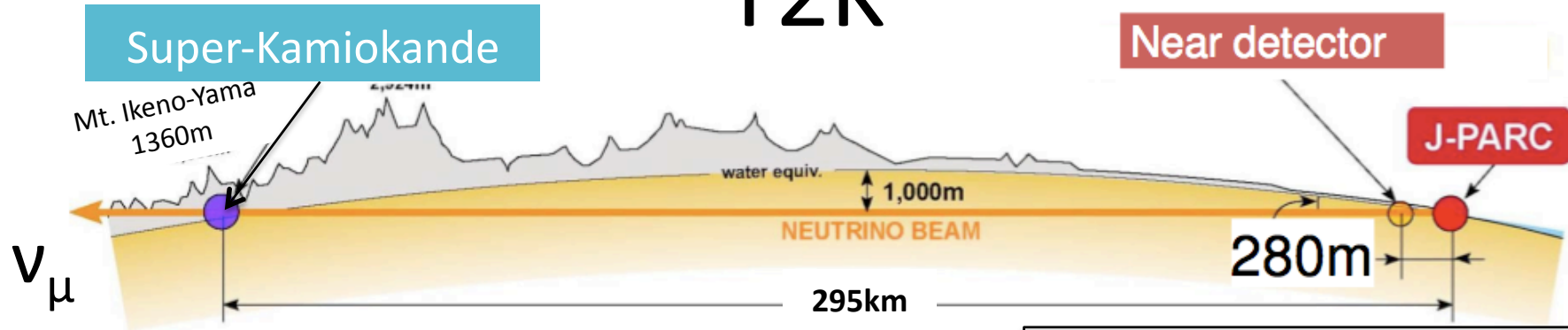
鈴木 研人

Contents

- Introduction
- ミューオンモニターを用いたビーム評価
- ビーム形状からくるSKの ν フラックスの系統誤差の評価
- 前置検出器におけるニュートリノプロファイルの測定
- まとめ

Introduction

T2K



- ミューオンニュートリノ (ν_μ) を用いた長基線ニュートリノ振動実験
 - 大強度ニュートリノビームをJ-PARCで生成
($p+C(\text{Target}) \rightarrow \pi \rightarrow \nu+\mu$)
- 1. 電子ニュートリノ出現事象の探索による θ_{13} の測定
- 2. ミューオンニュートリノ消失現象による Δm^2_{23} 、 θ_{23} の精密測定
- Off-Axis法
 - ビーム軸をSKの方向から 2.5° ずらす
 - SKで振動確率が最大となる ν エネルギーにピークを持たせる。
 - ν エネルギースペクトルがビーム軸方向に依存

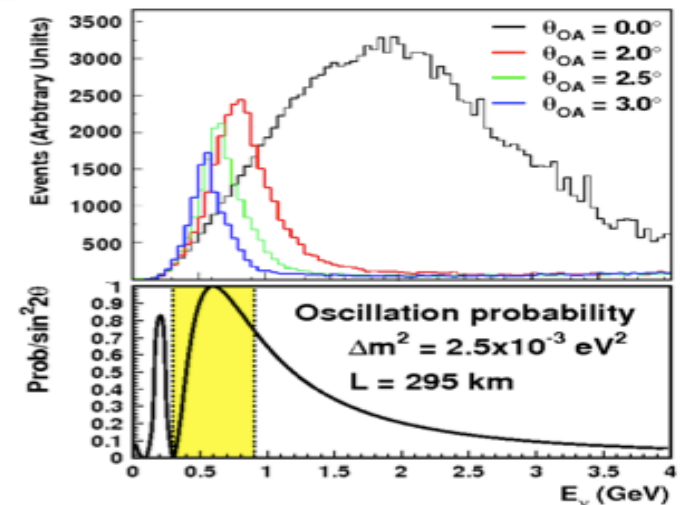
ν_μ の振動確率

ν_e appearance

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \frac{1}{2} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2_{23} L}{E} \right)$$

ν_μ disappearance

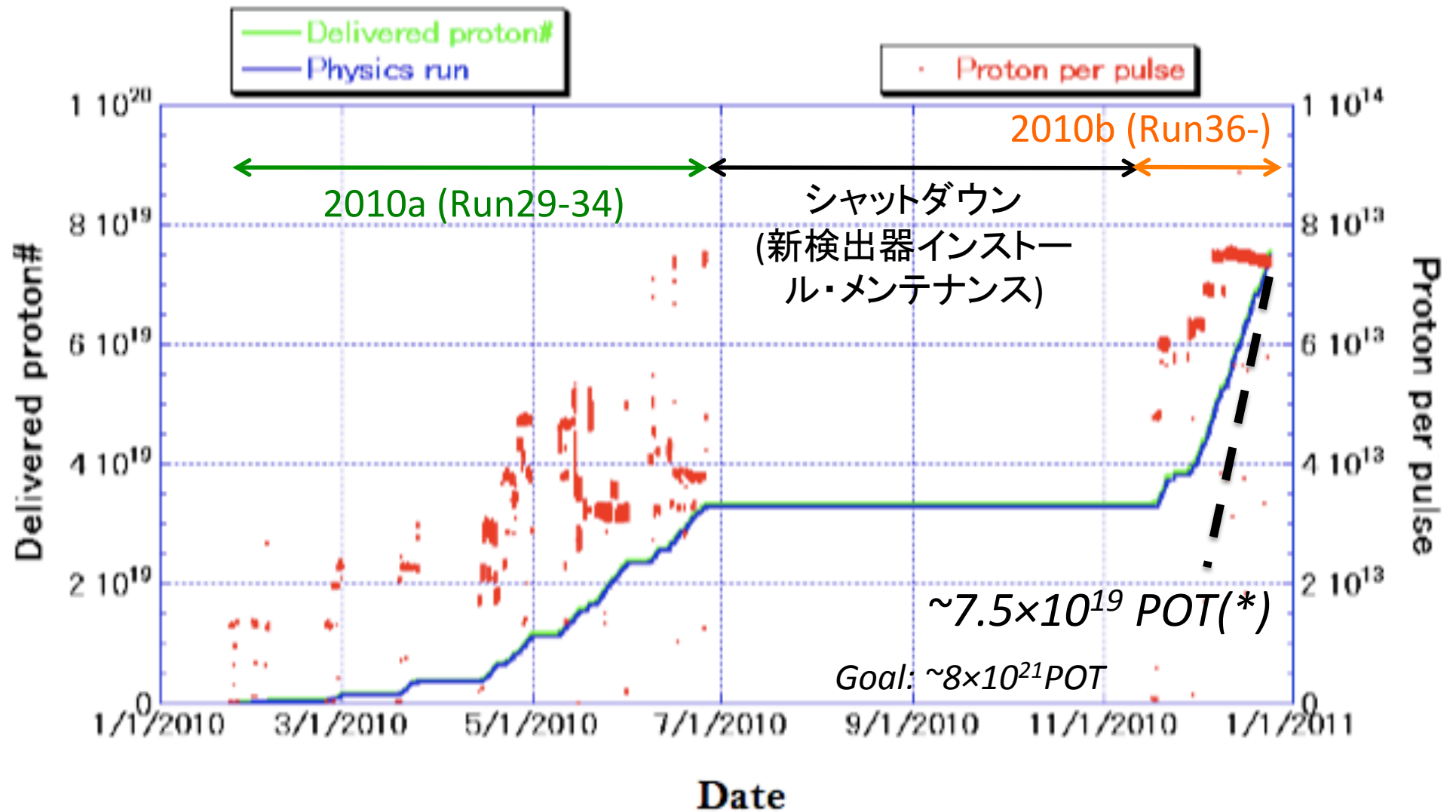
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2_{23} L}{E} \right)$$



ビーム軸方向の決定:

物理要請: **1mrad以内**、目標: **0.3mrad以内**

T2K実験の遂行状況

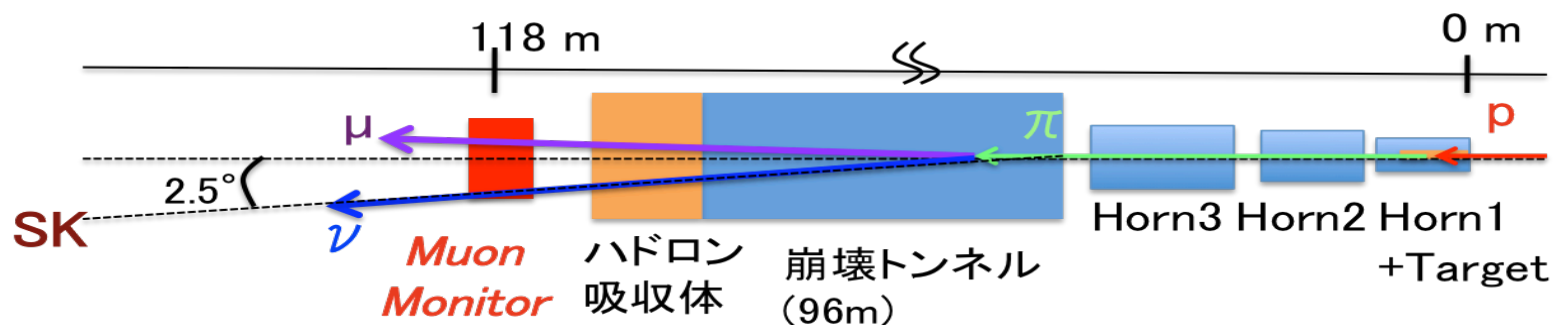
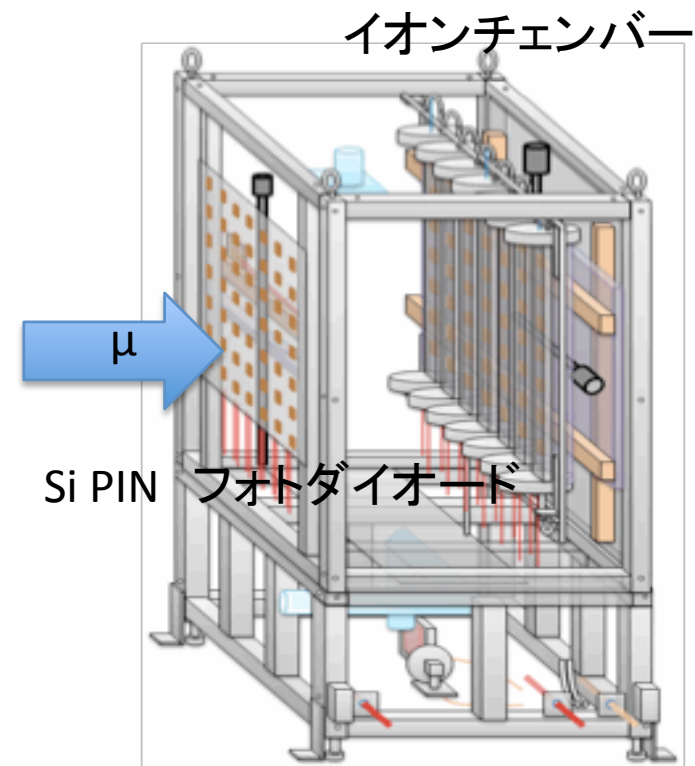


(*)POT: Proton on Target
(ターゲットへの陽子照射数)

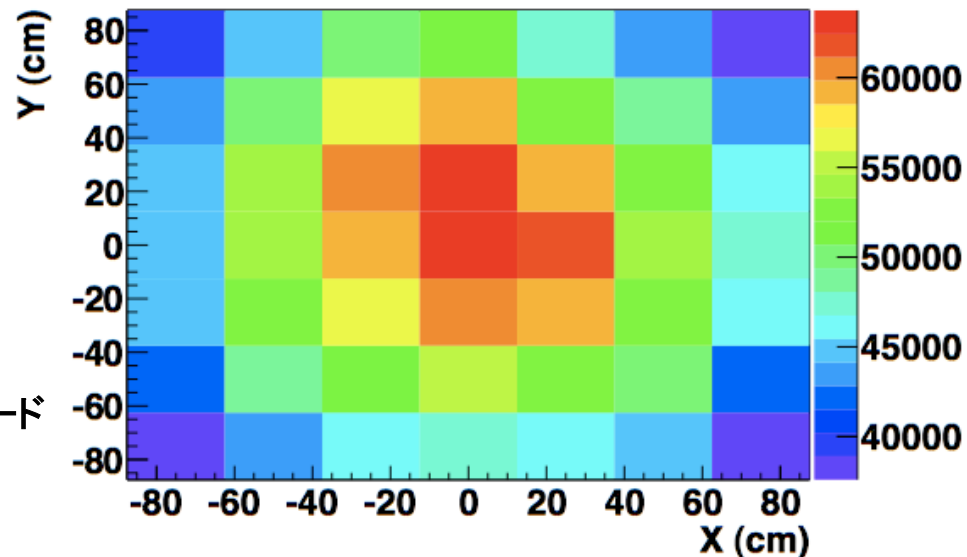
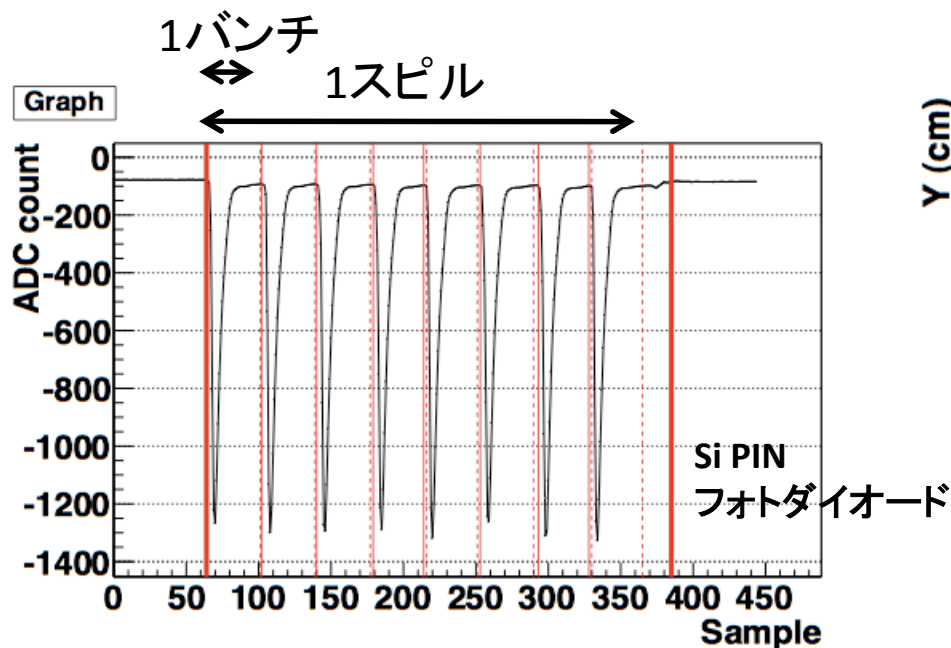
ミューオンモニターを用いた ビーム評価

ミュオンモニター

- π の2体崩壊で生じた、ニュートリノビームと共に生成されるミュオンビームのプロファイル中心と強度を測定
 - **ビーム方向の測定**
 - **Muon yieldの測定**
 - 陽子当たりのmuonの生成量 (\propto ニュートリノ生成量) が安定しているか常に確認
- ターゲットから下流118mの、ハドロン吸収体の直下流に位置する
 - ビームの0.3mradのずれ=3.5cmのずれ
 - 運動量5GeV/c以上のミュオンビームを検出
- 2つの独立な検出器によって構成。
 - Si PIN フォトダイオード、イオンチェンバー (IC)
 - 共に7×7=49ch、25cm間隔で格子状に配列
 - 検出有効領域: 150cm × 150cm



解析方法と重要なパラメータ



- 65MHz FADCで取得
- バンチごとに波形積分
– 1スピル当たりの収集電荷量 (nC)

単位陽子当たりのmuonの収量
総収集電荷量を陽子数で割った値
(nC/ppp*)

(*) ppp: protons per pulse(spill)

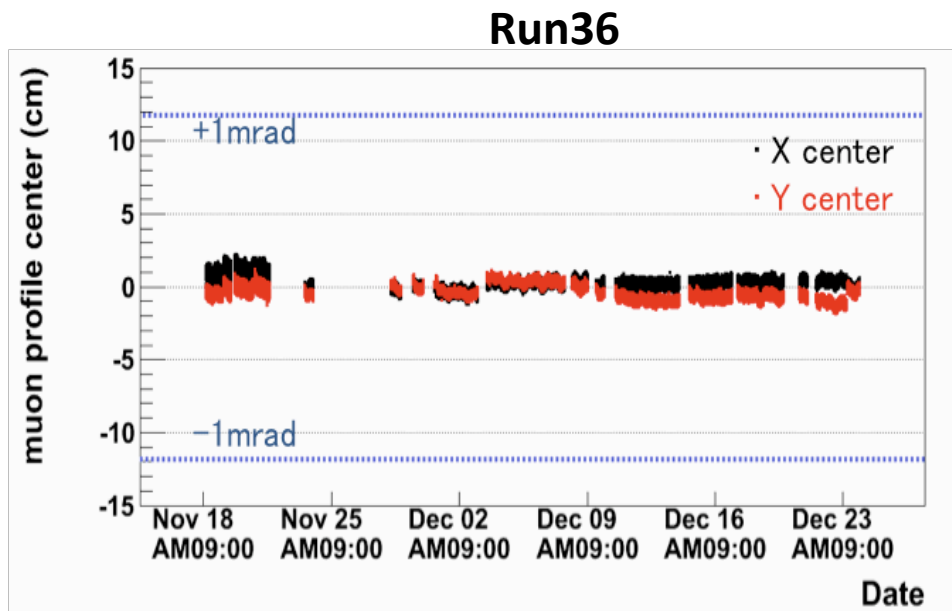
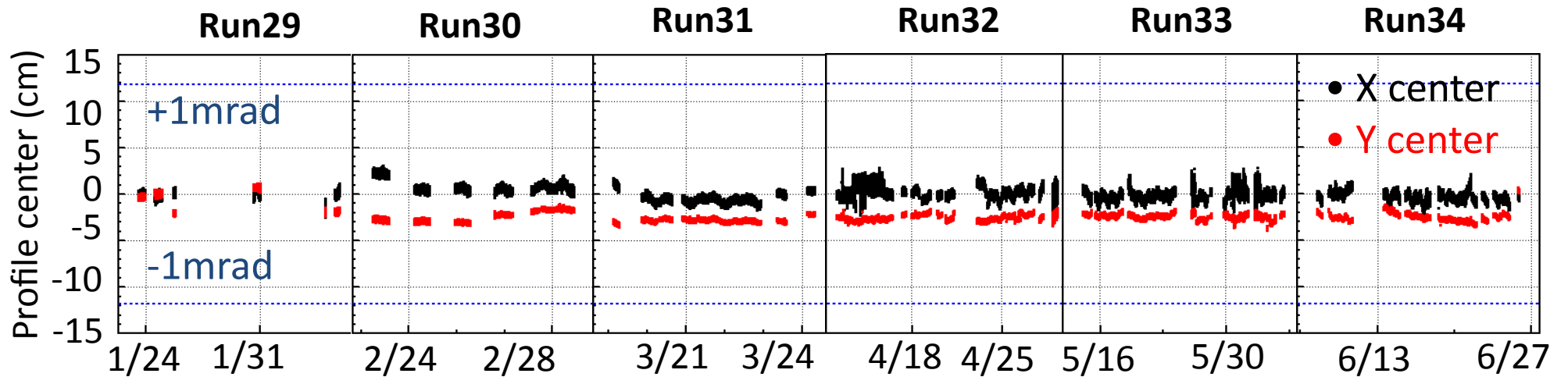
プロフィール中心

ビームプロフィールを2次元ガウシアンでフィット

$$A \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right]$$

プロフィール中心: ミューオンビームの方向
Muon yield: 陽子当たりのmuonの生成量

ビーム方向



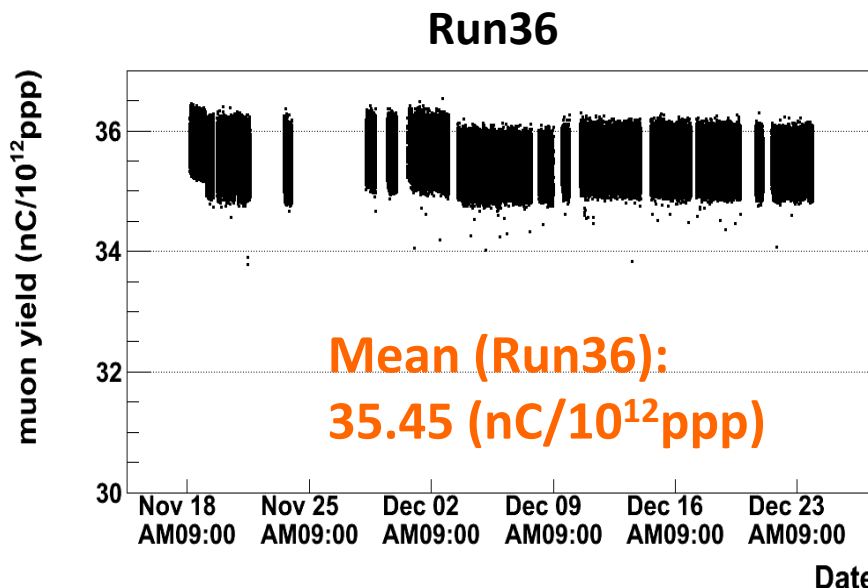
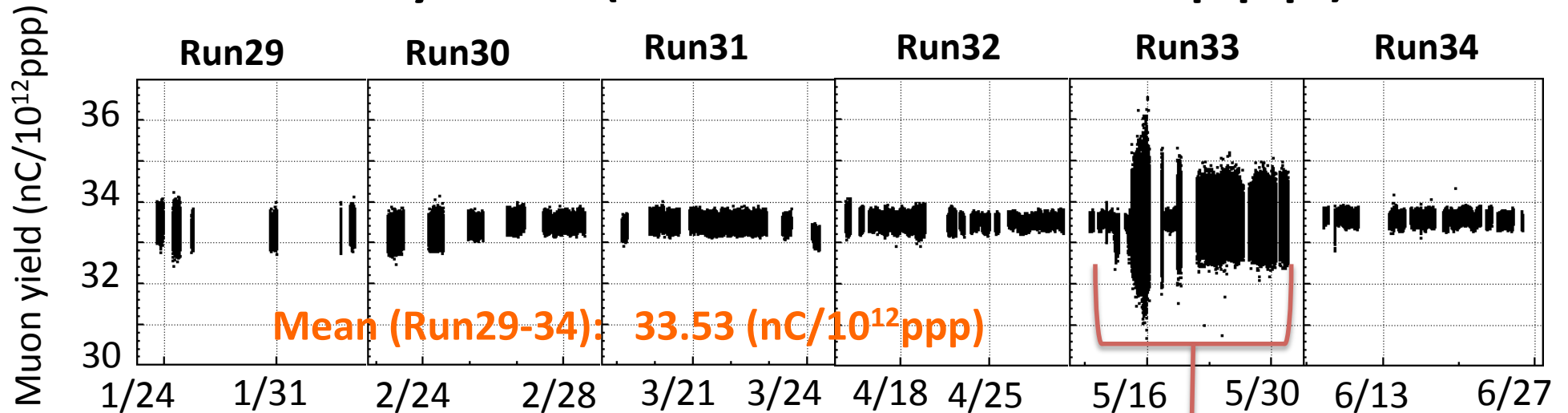
Run29-36
Mean±RMS

$$\left\{ \begin{array}{l} x: 0.05\text{cm} \pm 0.60\text{cm} \\ y: -1.70\text{cm} \pm 1.13\text{cm} \end{array} \right.$$

物理要請1mrad(=11.8cm)以内を十分に満たしている

単位陽子当たりのmuonの収量

Muon yield (総収集電荷量/ppp)



陽子数計測モニター(CT)
の測定のばらつきが大きくなった影響

- Run36で測定値が+5.7%増加:
シャットダウン期間に行われた読み出し回路系の変更によることを突き止めた
(実際のmuon yieldは変化していなかった)

Run29-34 RMS/Mean 0.68%

Run36 RMS/Mean 0.77%

安定してミュオン(=ニュートリノ)が生成されている

測定器の性能

- 分解能 (ビーム強度:51kW)
 - ビーム方向: 0.19cm (X), 0.17cm (Y)
 - 要請: <3.5cm
 - ビーム強度: 0.07%
 - 要請: <3%
 - 要請より1桁以上良い
- これまでの物理ラン(Run29-36)を通して、
 - 物理ランに割り当てられたスピル数=1613538
 - ハードウェアのトラブルにより失ったスピル数= 65
 - Live time ~ 99.996%
- ほとんどロスタイムもなく、ミュオンモニターを稼動でき、ビームの品質を維持 → 多くの物理ランのデータが振動解析の物理データとして用いられる事を保証した

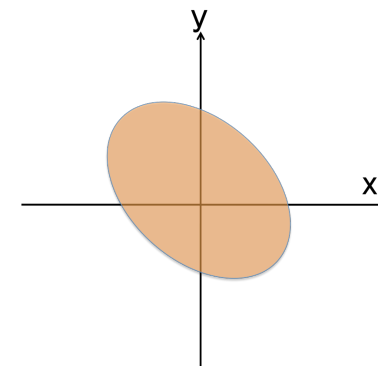
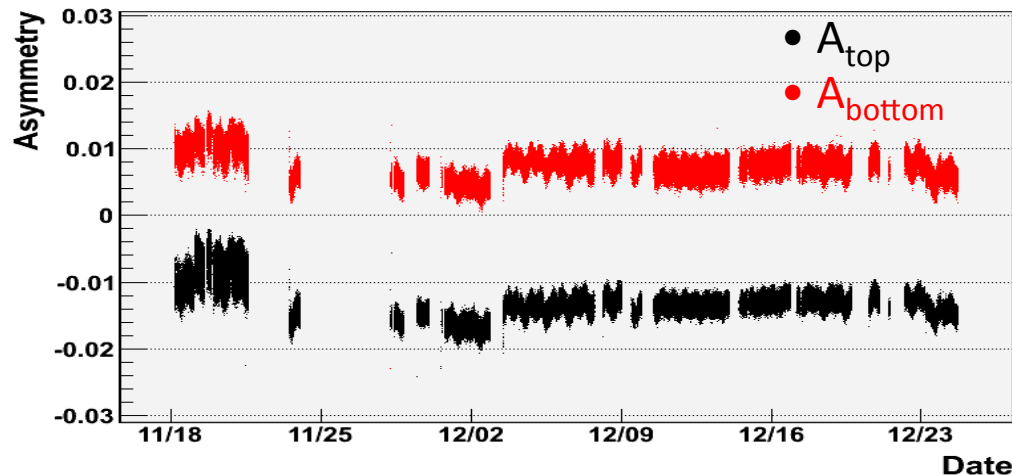
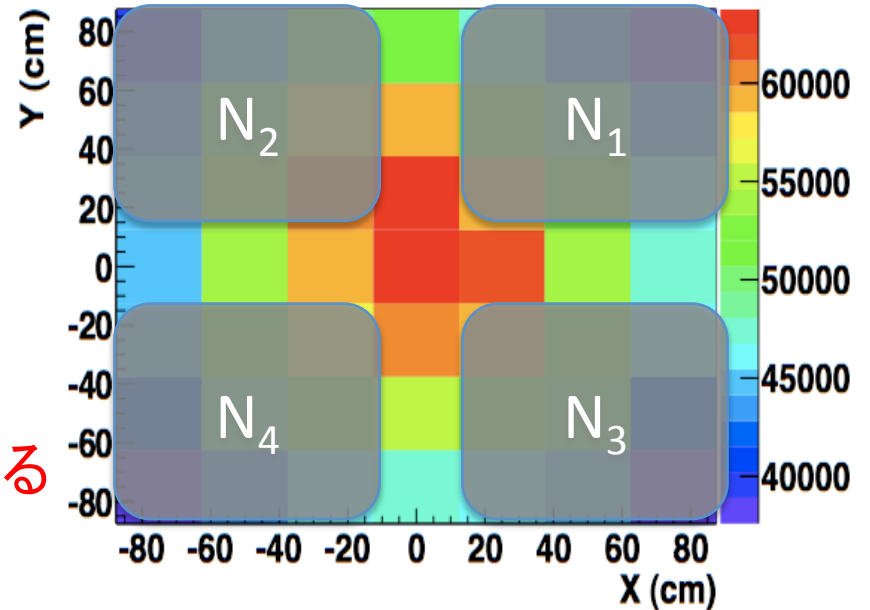
ビーム形状からくる
SKの ν フラックスの系統誤差

ミューオンビームの形状

- ミューオンビーム形状: **軸対称でない**
- 以下の非対称度 A_{top} 、 A_{bottom} を定義

$$A_{top} = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \quad A_{bottom} = \frac{N_3 - N_4}{N_3 + N_4}$$

- Run36で A_{top} と A_{bottom} の経緯を評価
 - $A_{top} < 0$ 、 $A_{bottom} > 0$ と符号が反対
 - **ニュートリノビーム形状が非軸対称である可能性**



予想されるビーム形状

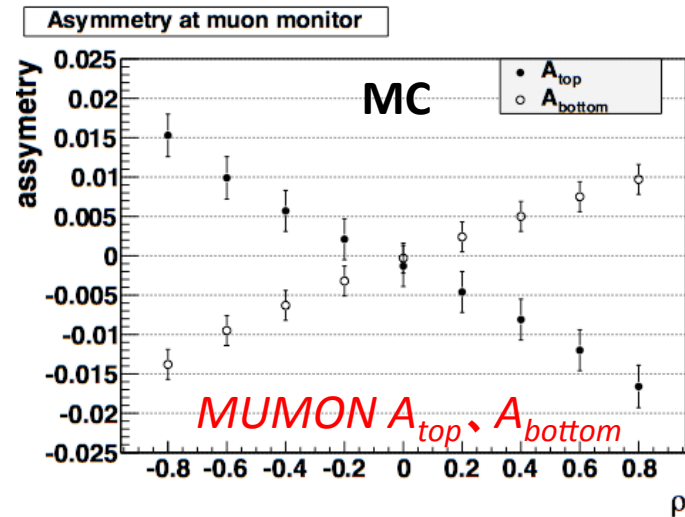
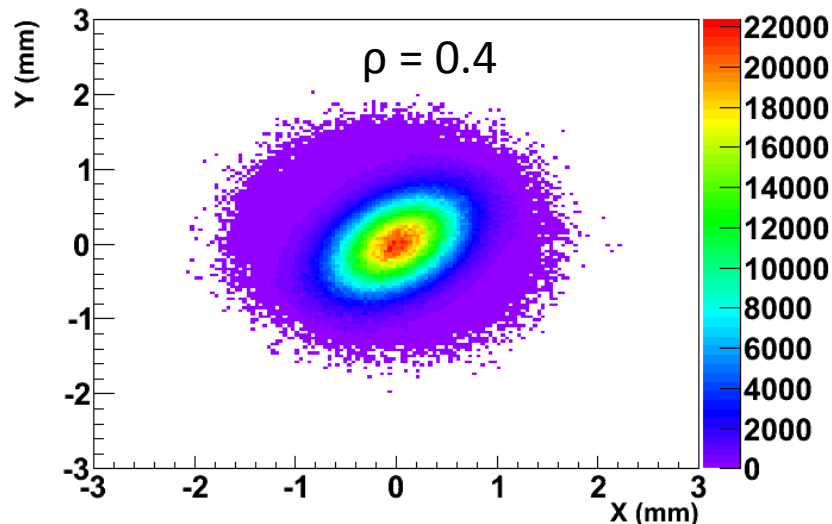
ビーム非軸対称の再現

- 考えられる非軸対称の要因
 - 陽子ビーム形状
 - 電磁ホーンの磁場
 - ターゲットのアライメント
- シミュレーションを用いた非軸対称なビーム形状の再現
 - 陽子ビームを非軸対称な形にする

Re-weighting

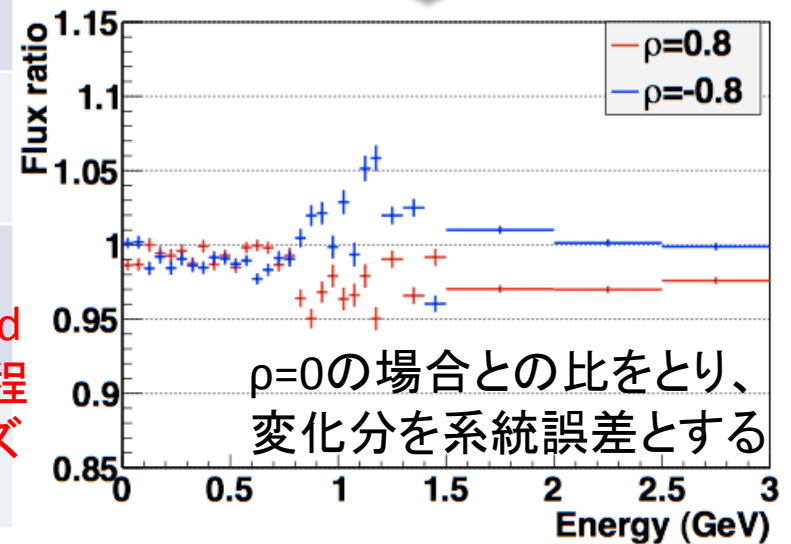
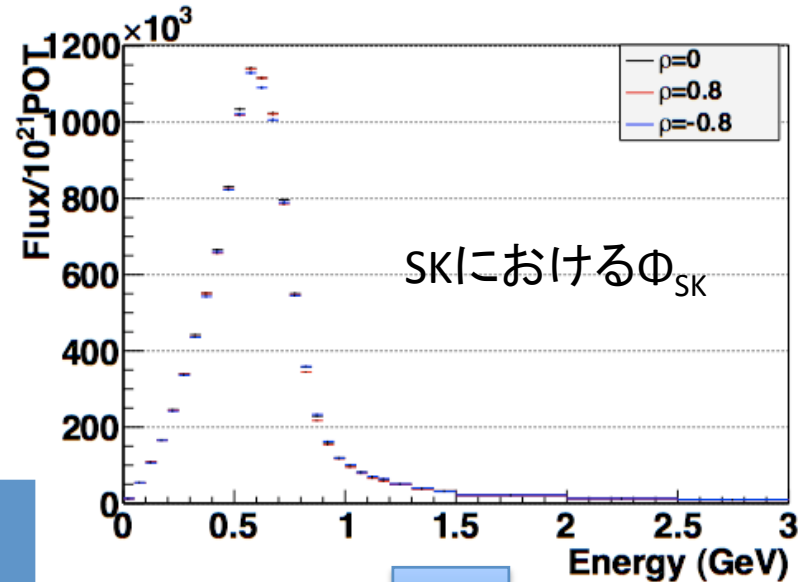
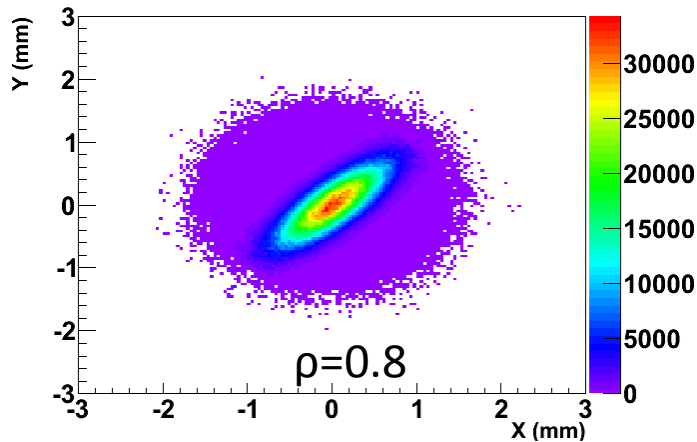
$$\frac{1}{N_1} \exp\left(-\frac{(x-X_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-Y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \rightarrow \frac{1}{N_2} \exp\left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\frac{(x-X_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{\rho(x-X_0)(y-Y_0)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-Y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right]\right)$$

N_1, N_2 : 規格化因子
 ρ : 相関パラメータ $\text{cov}(x,y)/\sigma_x\sigma_y$ ($-1 < \rho < 1$)



SKの ν フラックス Φ_{SK} の系統誤差

陽子ビームを非軸対称にしたときのSKの ν フラックス変化



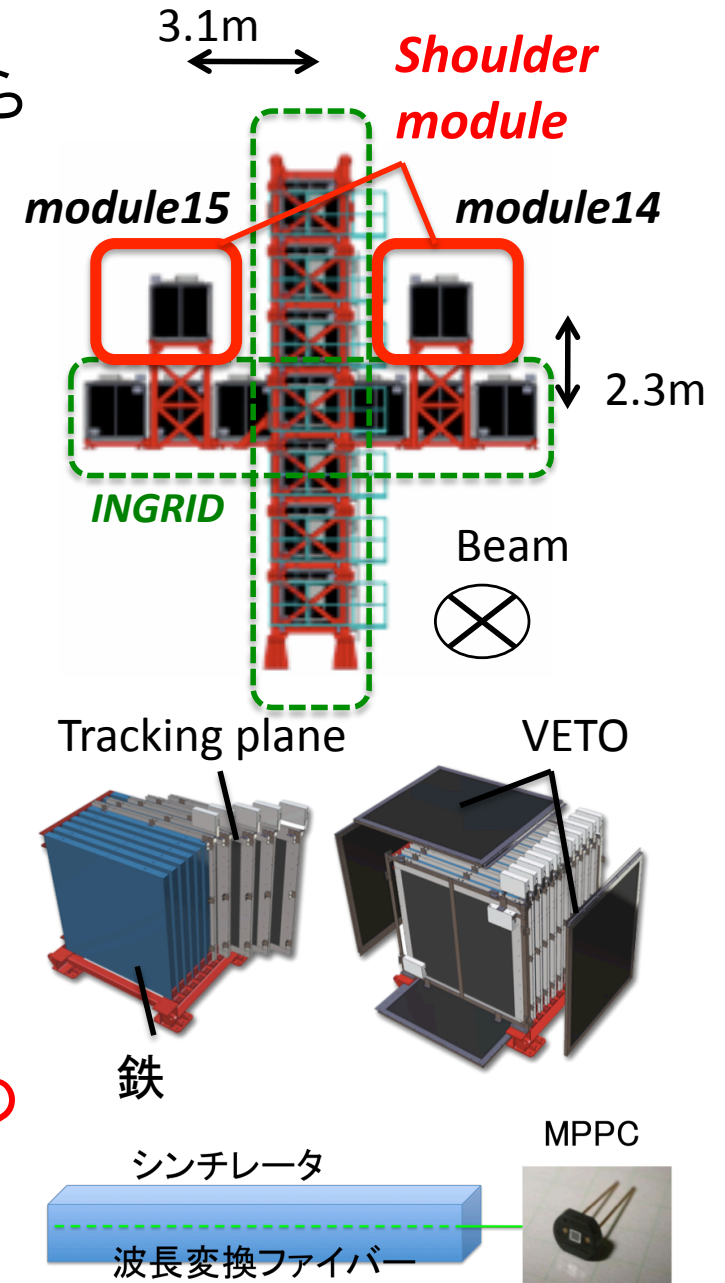
ρ	Change @ peak (0.5-0.7GeV) (振動確率が最大となるエネルギー領域)
0.2	0.2%
-0.2	0.3%
0.4	0.4%
-0.4	0.8%
0.6	1.0%
-0.6	1.4%
0.9	1.9%
-0.9	2.8%

ビーム方向1mrad
間違えた時と同程度
のエラーサイズ

前置検出器における ニュートリノプロファイルの測定

shoulder module

- シャットダウン期間に組み立て・導入、Run36から稼動
- 炭素標的からビーム軸方向下流280mに位置
- ビーム軸方向より、鉛直方向+2.3m、水平方向±3.1mに位置（計2台）
- モジュール構成
 - 鉄9層+トラッキングプレーン(シンチレータ)11層
 - 上下左右をVETOプレーン計4枚で覆う
 - シンチレーション光をファイバーで伝達
 - 光子検出器MPPCで読み出し
- ニュートリノと鉄との反応数を測定
 - module14、15におけるニュートリノ反応数の違いを見る事で、ビームの軸対称性を評価する



非対称度Aの導入

- 形状評価のため、次の非対称度Aを定義

$$A = \frac{N_{14} - N_{15}}{N_{14} + N_{15}} = \left(\frac{1 - \frac{N_{15}}{N_{14}}}{1 + \frac{N_{15}}{N_{14}}} \right)$$

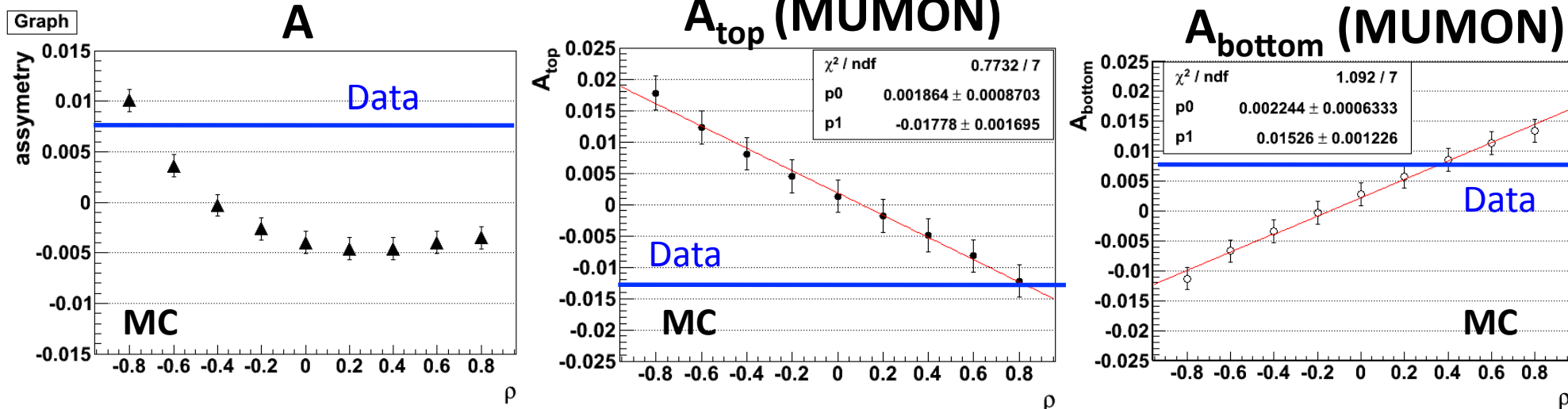
N_{14} : module14でのニュートリノ反応数

N_{15} : module15でのニュートリノ反応数

- 比較のため、ミュオンモニターで定義した A_{top} 、 A_{bottom} も導入
- シミュレーションにより陽子ビームの相関パラメータ ρ と上の3つの非対称度Aとの関係をそれぞれ求める
- Run36で得たデータ結果と比較

これまで行ったシミュレーションがデータを再現しているか
確かめる

シミュレーションとデータの比較



- Shoulder module: $\rho > 0$ でAは変化しない ← 予想と違う傾向
- ミューオンモニター: ρ とAは線形な相関
- Run36の結果
 - $A = 0.0080 \pm 0.0037$ (stat.) ± 0.0219 (sys.)
 - $A_{top} = -0.0133 \pm 0.0002$ (sys.)
 - $A_{bottom} = 0.0075 \pm 0.0002$ (sys.)

Shoulder module (A) : $\rho = -0.74 \pm 0.17$ (stat.) ± 0.57 (sys.)

Muon monitor (A_{top}) : $\rho = 0.85 \pm 0.10$ (sys.)

(A_{bottom}) : $\rho = 0.34 \pm 0.05$ (sys.)

どの ρ も有意に異なる
現状のシミュレーション方法
ではデータを再現していない

今後の展望

- 非対称度の測定結果 $A=0.0080\pm 0.0037(\text{stat.})\pm 0.0219(\text{sys.})$
 - 系統誤差(ニュートリノ反応数の比 N_{15}/N_{14})
 - 鉄質量の違い: 0.87%
 - MPPCノイズヒット: 2.06%
 - イベントセレクション効率: 3.77%
 - 鉄質量の測定精度: 0.14%
 - 感度を上げるため、系統誤差を小さくしていく
- ρ とAの相関
 - シミュレーションの結果の理解
- ビーム形状の非軸対称の理解
 - 陽子ビーム以外の要因を調べる

まとめ

- ミューオンモニターを用いたビーム評価
 - ビーム方向 (Mean±RMS):
 - X : 0.05cm ± 0.60cm , Y : -1.70cm ± 1.13cm
 - Muon yield (RMS/Mean):
 - Run29-34: 0.68%, Run36: 0.77%
 - 物理データとしての品質を保証
- ビーム形状からくるSKの ν フラックスの系統誤差
 - 相関パラメータ $\rho=-0.8$ で、2.3%の不定性
- 前置検出器におけるニュートリノプロファイルの測定
 - $A=0.0080\pm 0.0037(\text{stat.})\pm 0.0219(\text{sys.})$
 - 今後の展望
 - Aの系統誤差を小さく抑える
 - シミュレーションの結果の理解
 - ビーム形状の非軸対称の理解

Back up

ニュートリノ

- 現在の素粒子標準模型では
 - 質量ゼロ、Spin1/2
 - 電荷を持たず弱い相互作用しか働かない
 - 荷電カレント(CC)反応: W exchange
 - 中性カレント(NC)反応: Z exchange
 - 3世代ある(ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ)
- Super-Kamiokandeにおける大気ニュートリノの天頂角分布測定 (1998)によって、ニュートリノ振動を通して質量がゼロでない事が証明された。

ニュートリノ振動

- ニュートリノが質量を持つ事でフレーバー(ν_α : $\alpha=e,\mu,\tau$)が飛行中に変化する現象
- フレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ は質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i=1,2,3$)の重ね合わせで記述される

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle$$

- U: MNS行列

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{-i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

($s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ 、 $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$ 、 δ : CP violation term)

- $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ となる振動確率をPとすると

$$P = \left| \langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle \right|^2 = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i < j} \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{E} \right) \pm 2 \sum_{i < j} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}) \sin^2 \left(2.54 \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{E} \right)$$

Amplitude Frequency

CP violation (if $\delta \neq 0$)

$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$

$\left(\begin{array}{l} + : \nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \\ - : \bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta \end{array} \right)$

($\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ (eV²) , L: ν_α が飛行した距離 (km)、E: ν_α のエネルギー (GeV))

ビーム構造

- Spill cycle:

 - 3.52s interval (~Run34)

 - 3.2s interval (Run36~)

- # of Bunch:

 - 6 (~Run34)

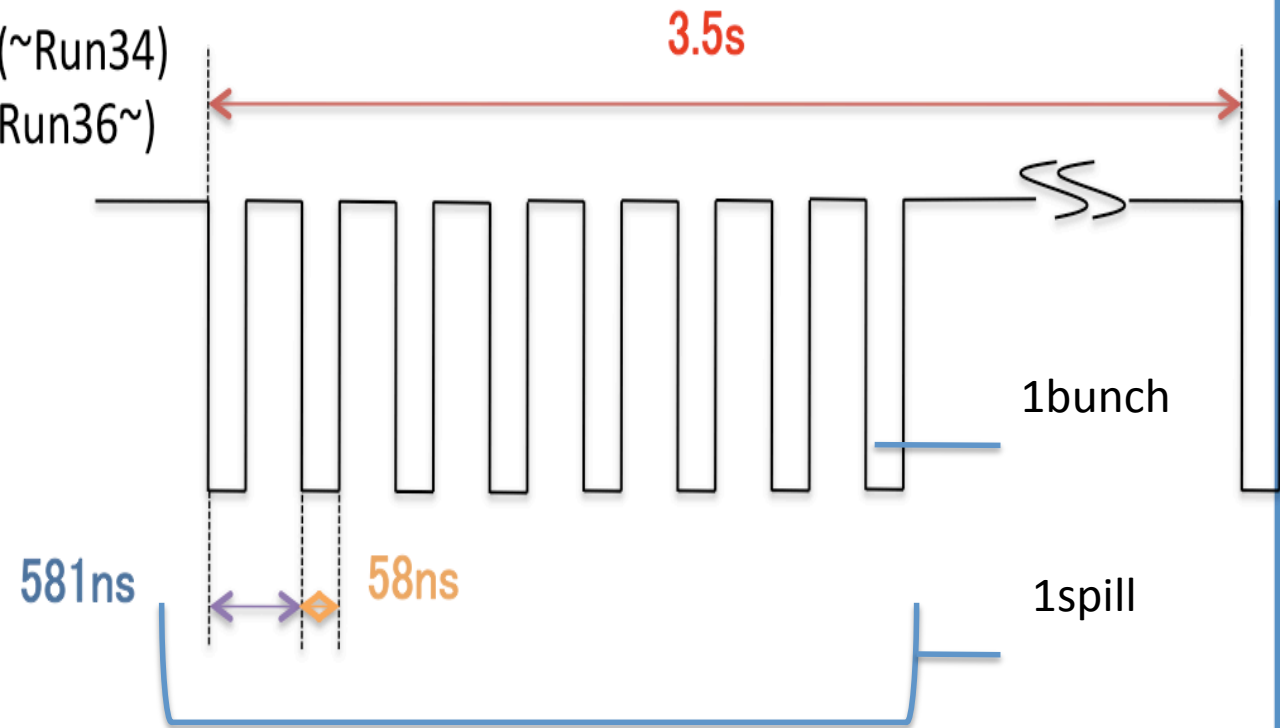
 - 8 (Run36~)

- Bunch interval:

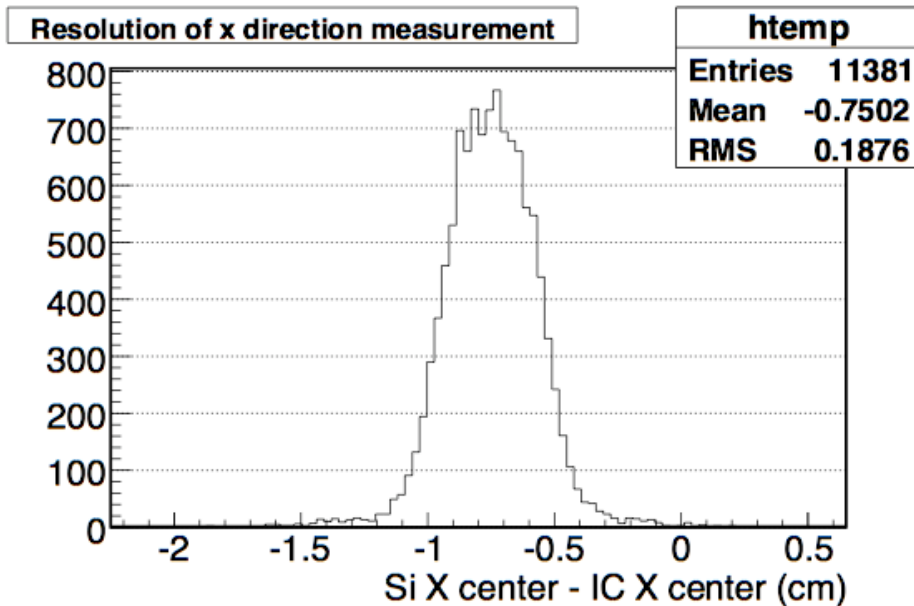
 - 581ns

- Bunch width :

 - 58ns



測定分解能 プロファイル中心



シリコンPINフォトダイオードとICの2つの独立な検出器を用いる事で、ミュオンモニターの測定分解能を評価。実際のビームを使って評価する。

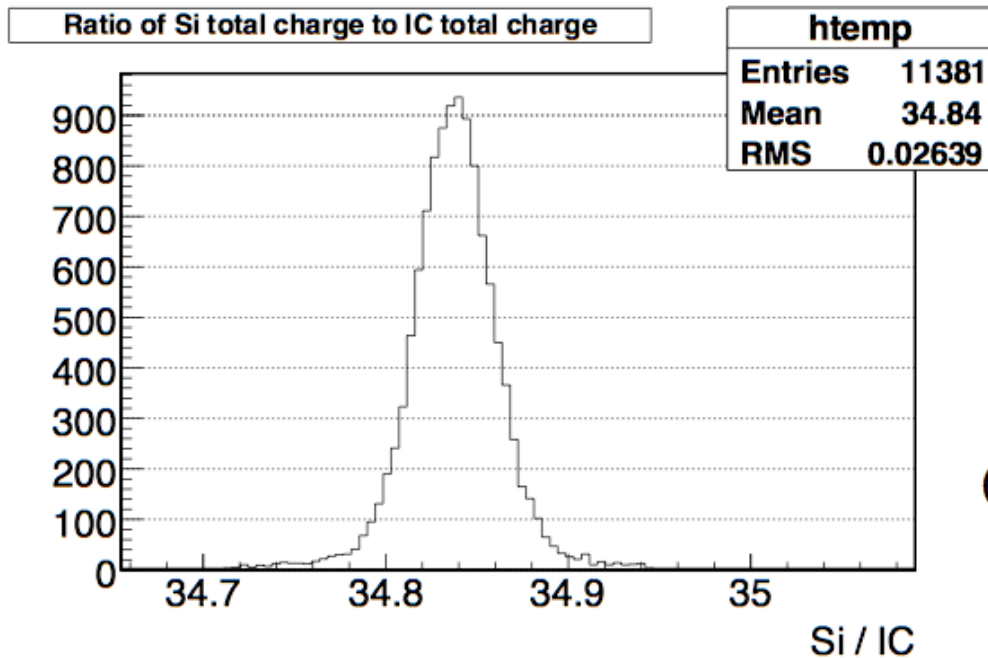
両検出器のプロファイル中心の差分をとって、ビーム方向のばらつきをキャンセル
→プロファイル中心の測定分解能(上限値)を評価

$$(RMS)_{Si-IC} = \sqrt{\delta x_{Si}^2 + \delta x_{IC}^2}$$

Beam poewr (kW)	18.7	27.0	31.0	39.5	43.0	51.7
X (cm)	0.58	0.30	0.27	0.26	0.24	0.19
Y (cm)	0.46	0.35	0.24	0.19	0.18	0.17

目標値 0.3mrad (~3.54cm)を大きく上回る分解能

測定分解能 ビーム強度



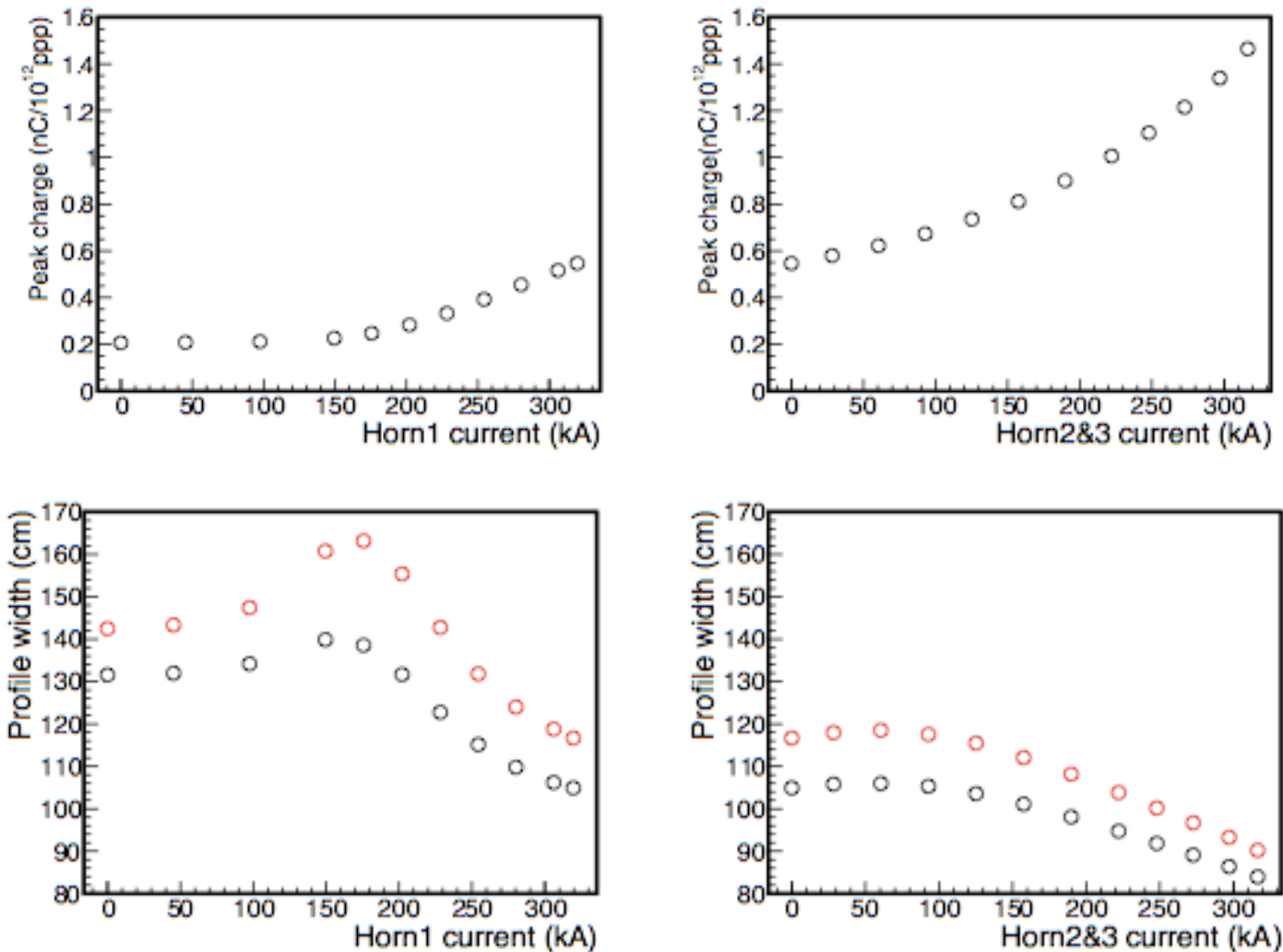
両検出器のビーム強度の比をとって、
ビーム強度のばらつきをキャンセル
→ビーム強度の測定分解能(上限値)を
評価

$$(RMS / Mean)_{Si/IC} = \sqrt{\delta Q_{Si}^2 + \delta Q_{IC}^2}$$

Beam poewr (kW)	18.7	27.0	31.0	39.5	43.0	51.7
(%)	0.20	0.16	0.12	0.10	0.07	0.07

目標値 3% を大きく上回る分解能

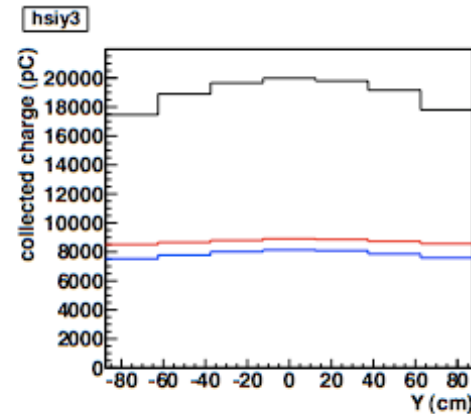
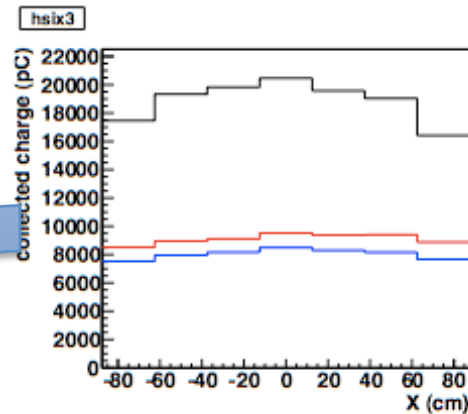
Horn current dependence study



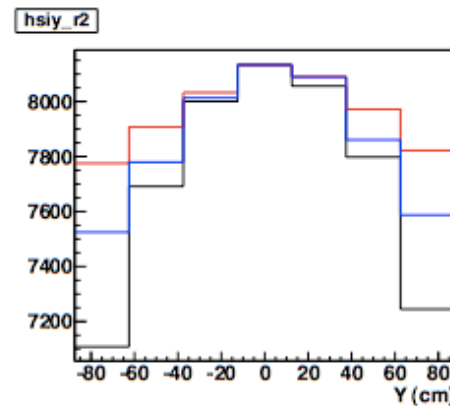
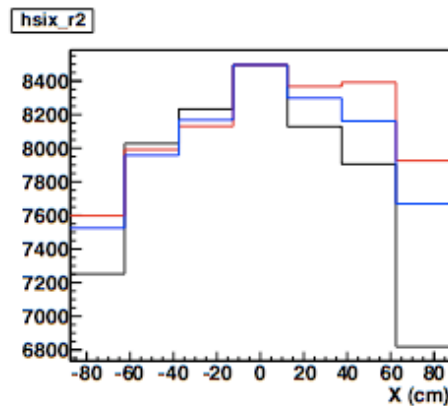
- ホーン電流値を0kAから増やしていったときのピーク電荷、プロフィール幅
- ホーン電流増加に伴い、幅の狭いビーム及び増加したフラックスを得る
→ホーン磁場によるニュートリノビームの収束を確認

Horn1~150kAあたりで プロフィール幅が広がる原因

(X,Y)=(0,0)の
電荷量が
Horn1 0kA
の時と合う
ようスケール

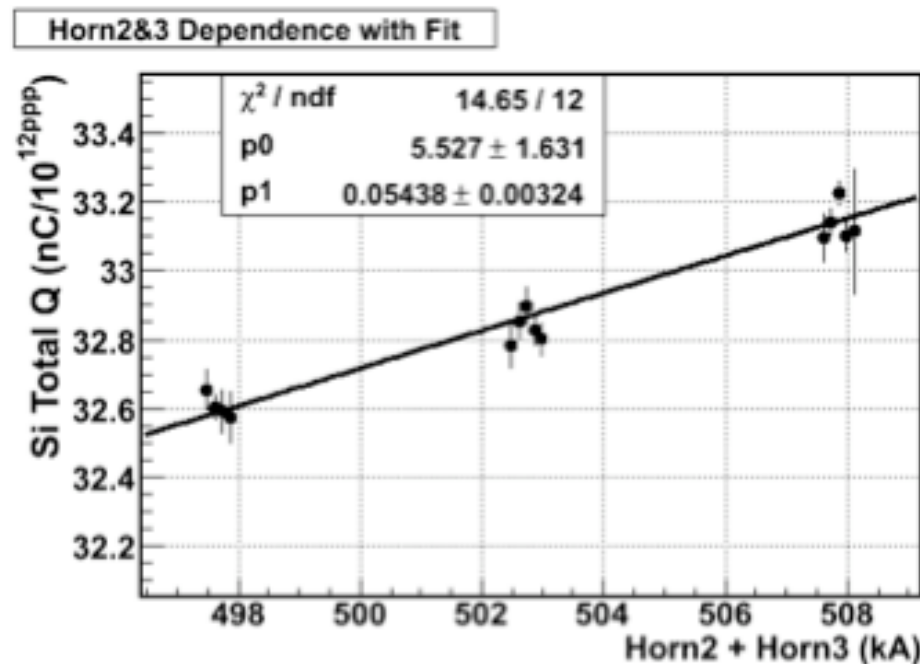
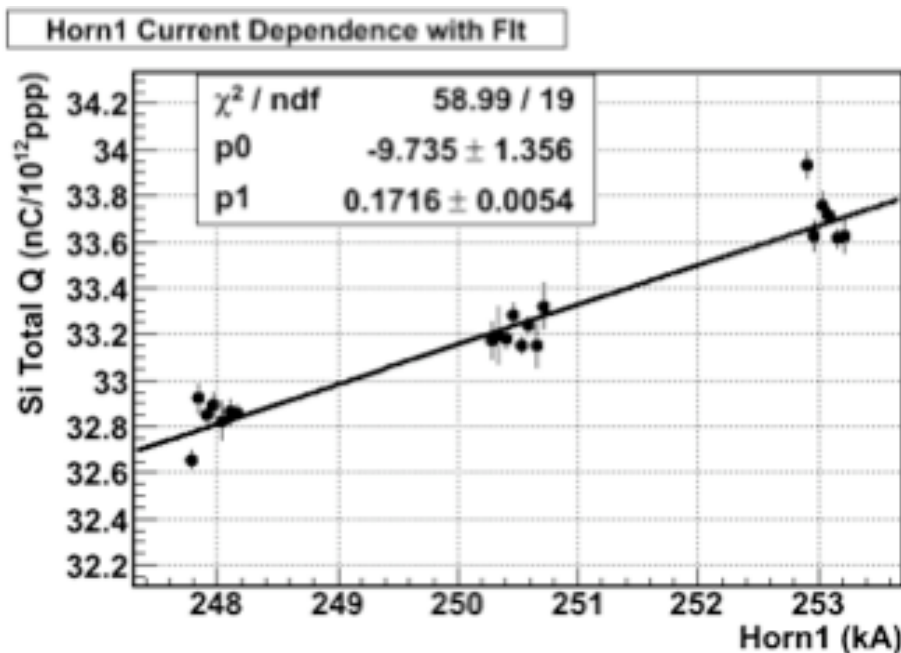


-horn1 0kA
-horn1 150kA
-horn1 320kA



- 収束の効果が弱く、検出領域全体に渡ってミュオンフラックスが増えているため、結果として幅が広がっている

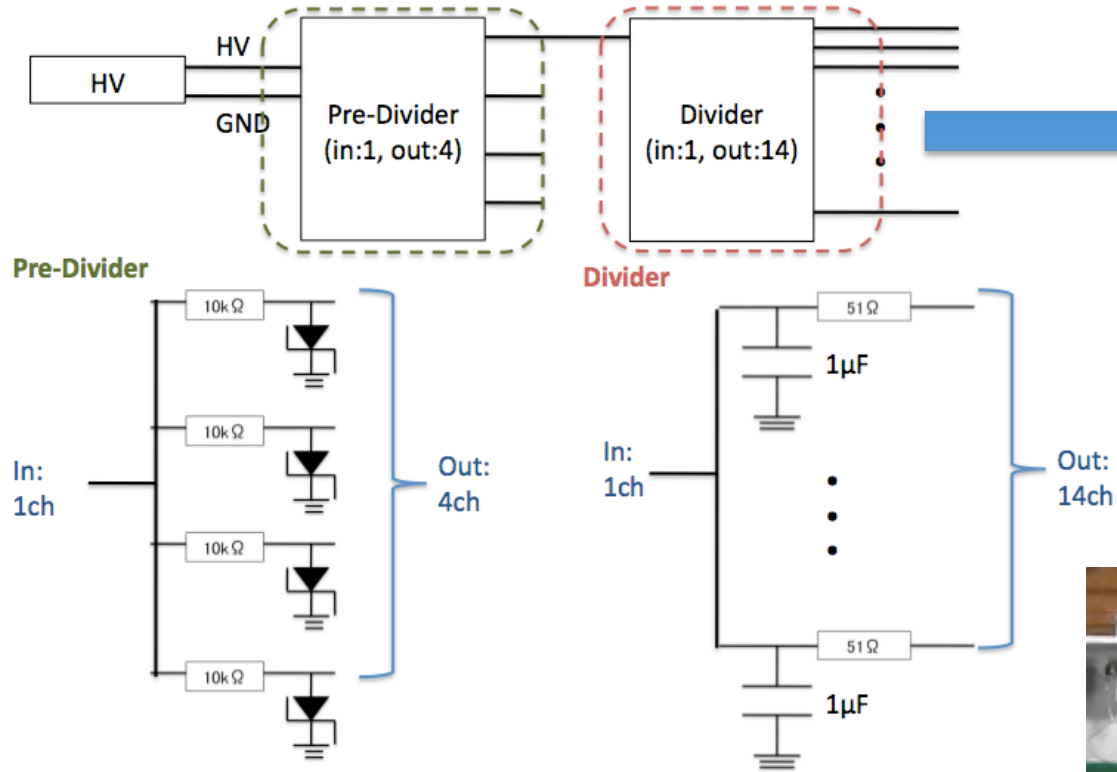
Horn current dependence study



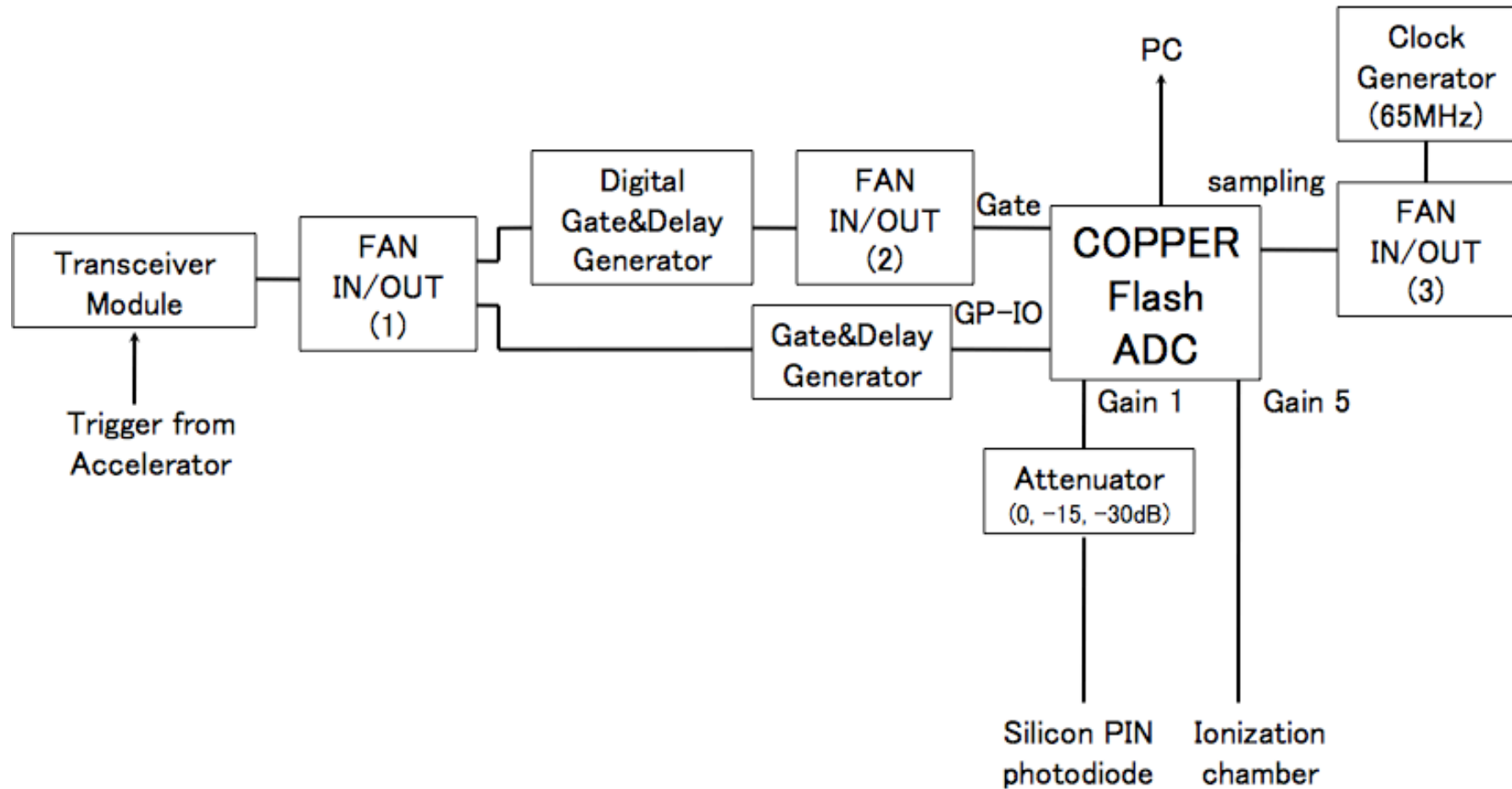
- ホーン電流値1%の変化に対する感受性
 - Muon yield の変化を確認

Horn1	Horn2&3	muon yield
250 kA \pm 1%	250 kA	\pm 1.0%
250 kA	249 kA \pm 1%	\pm 0.8%
321 kA $^{-1\%}$ $^{-2\%}$	317 kA	-1.5% -3.0%
321 kA	317 $^{-1\%}$ $^{-2\%}$ kA	-0.8% -1.6%

電圧印加回路 シャットダウン期間中にアップグレード



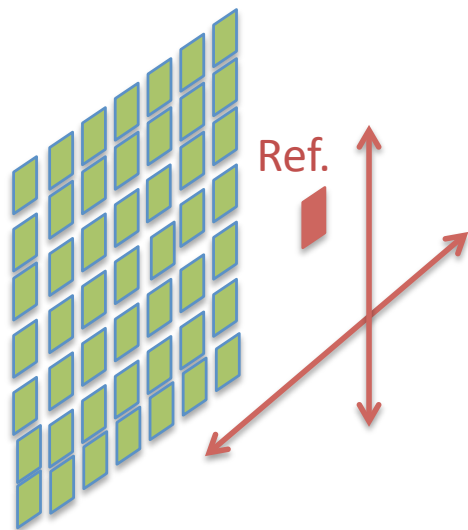
読み出し回路 ミュオンモニター



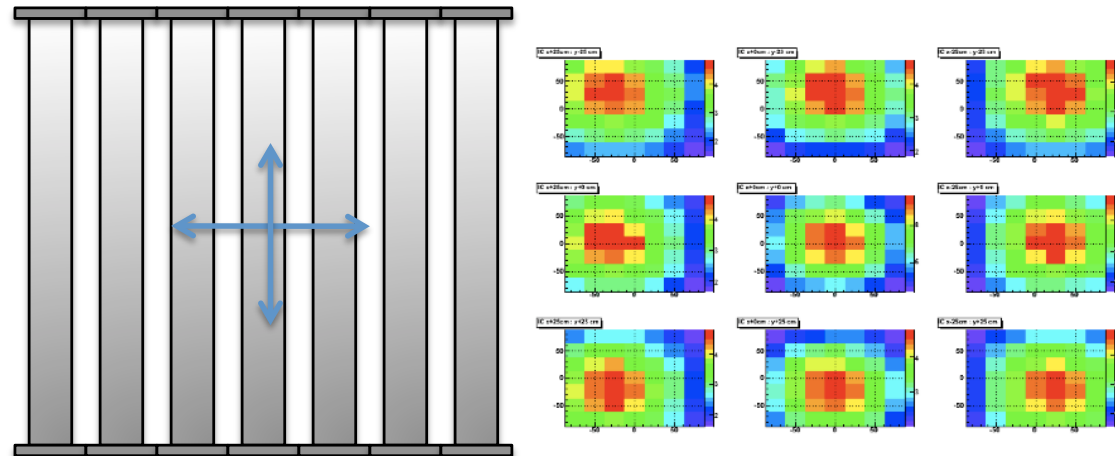
Calibration System

- MUMON has two movable stand for calibration
- Si PIN Photodiode
 - There is a reference detector which can be moved w/ moving stand behind the silicon arrays.
 - All channels (49ch) can be calibrated by using this ref. detector
- Ionization Chamber
 - Can be moved by $\pm 25\text{cm}$ w/ moving stand attached to IC itself.
 - Measure at 9 positions and get relative gain of each channel.
- Can relatively calibrate with precision of **0.1%** for Si and **0.1%** for IC.

Si PIN Photodiode

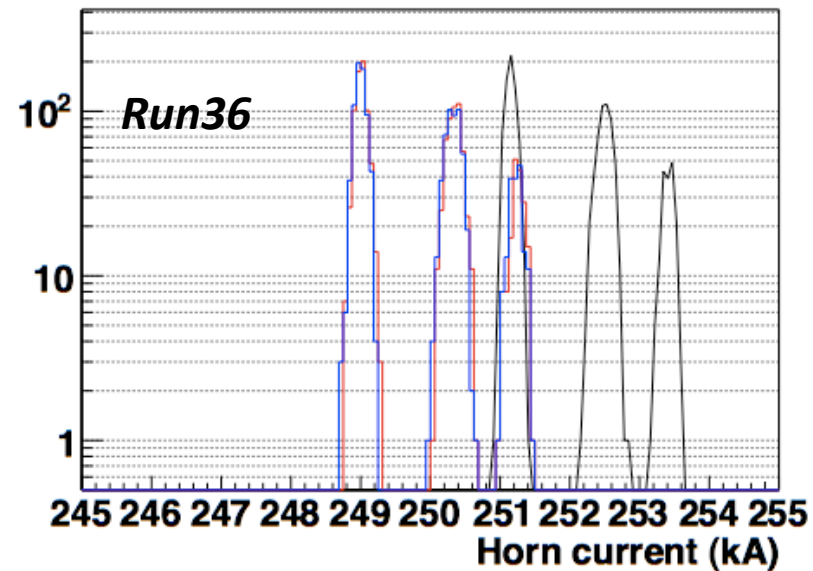
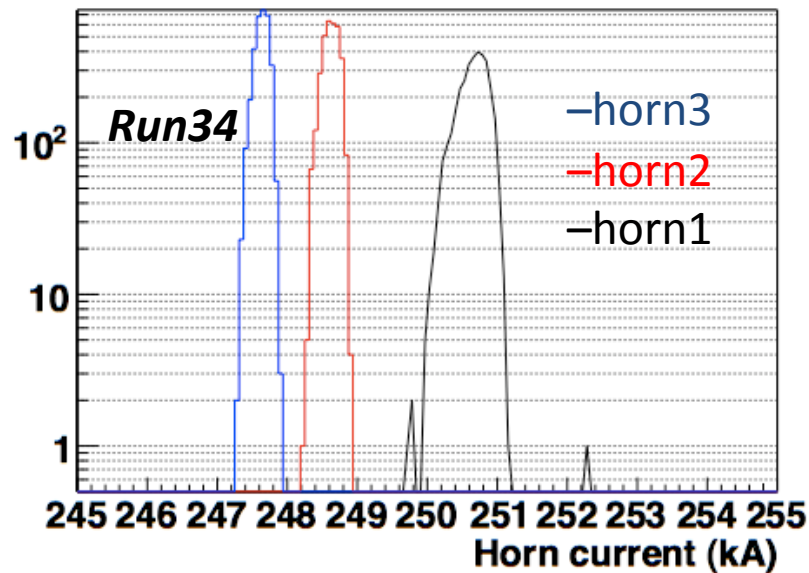


Ionization Chamber



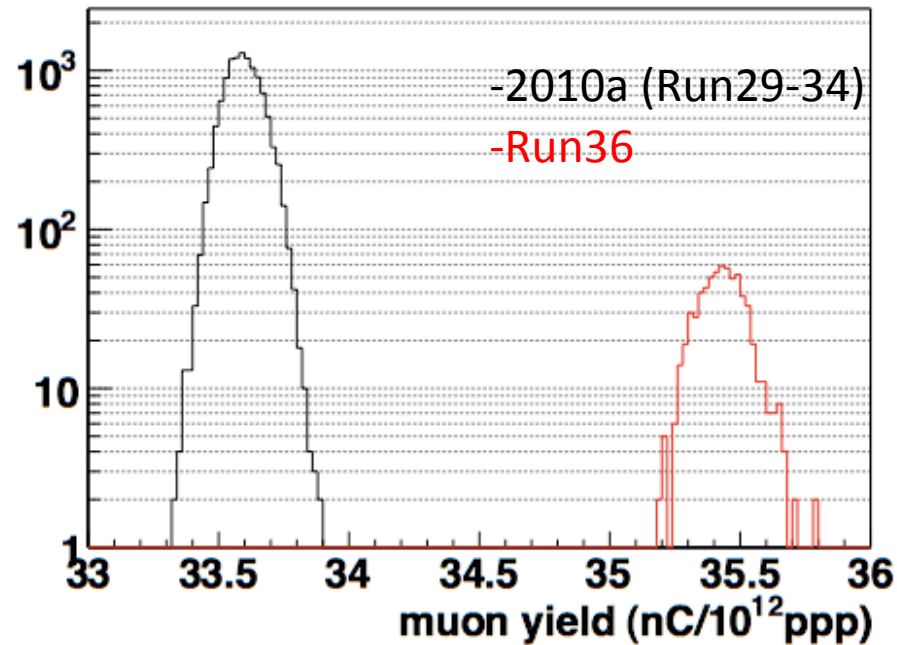
2010bから

- ホーン電流値の問題



- Run36からホーン電流値が3段階に変化する現象がみられるようになった
- シャットダウン期間中に取り替えた新電源の影響と考えている

Muon yield増加



- Run34の時と比べ、Muon yieldが+5.4%(Si)、+3.1%(IC)増加していた

Muon yield増加の原因

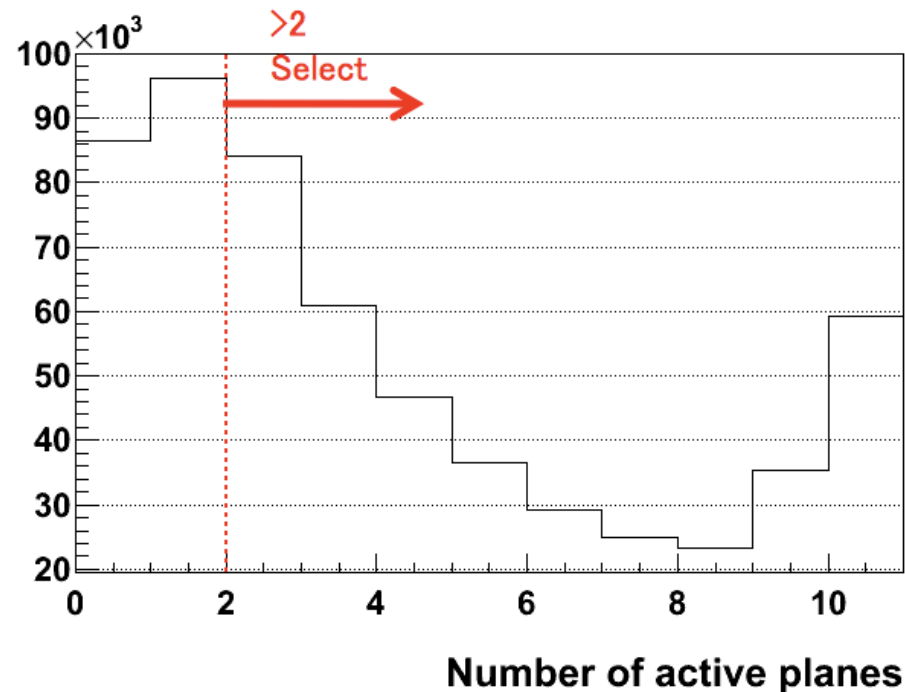
- ハードウェアの変更(反射波対策): **+1.3%**
- ADCカウント→電荷への較正值の増加: **+3.2%**
- 6バンチ(~Run34)→8バンチ(Run36~)と変化した事に伴うペDESTALの変化: **+0.2%**
- ホーン電流値の違い: **0.9%±1.8%**

ニュートリノイベントセレクション1

- Time clustering
 - INGRID の全トラッキングプレーンのシンチレータ内で 100 ns 以内に 3 つのヒットがあり、かつこれら時間平均からの残差が 50 ns 以内であるイベントを選択する。これにより、アクシデンタルなノイズヒット以降、アクシデンタルヒットというを除去する。

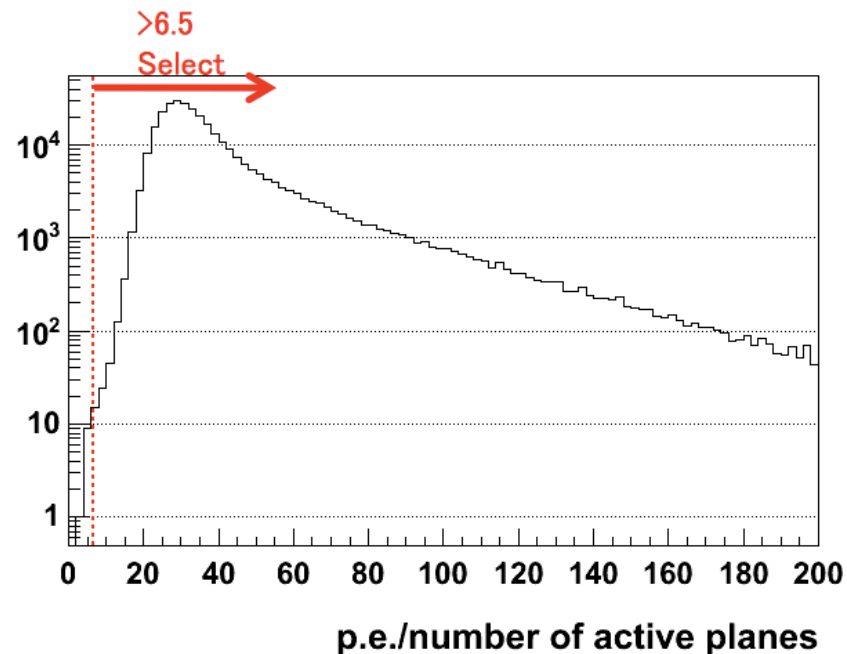
ニュートリノイベントセレクション2

- # of active planes selections
 - あるトラッキングプレーンの X 方向のシンチレータ層と Y 方向のシンチレータ層からヒットがあった場合、そのプレーンをアクティブプレーンと定義する。アクシデンタルヒットの寄与を除去するため、アクティブプレーン数が 2 枚より多い事を要求する。



ニュートリノイベントセレクション3

- P.E./(# of active planes) selections
 - Number of active planes selection を満たしたアクティブプレーンの 1 レイヤー当たりの光量をチェックする。シミュレーションの結果より、これが 6.5 p.e より多ければアクシデンタルヒットが起因のイベントはニュートリノイベントに対して数%程度に抑えられる事が分かっている。したがって、6.5 p.e. より多ければ次の Tracking に移る。



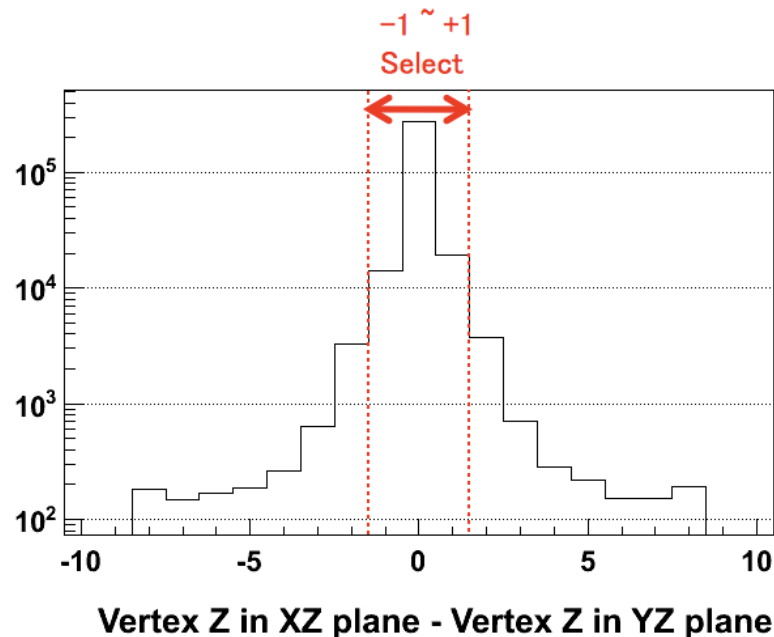
ニュートリノイベントセレクション4

- Tracking

- 上記のセレクションで生き残ったヒットイベントに対し、Tracking を行う。トラックの再構成は X-Z 平面、Y-Z 平面に対してそれぞれ独立に行う。ヒットがあったプレーンの内、最下流のプレーンにあるヒットポイントをトラックの終端とする。続いて上流のプレーンにヒットがあるかどうか順々と探していき、最後に最小 2 乗法によりこれらヒットチャンネルに対してフィットをする。最下流プレーンにヒットチャンネルが 2 つ以上ある場合、それぞれの組み合わせについて、上記のアルゴリズムを用いてトラックを再構成する。

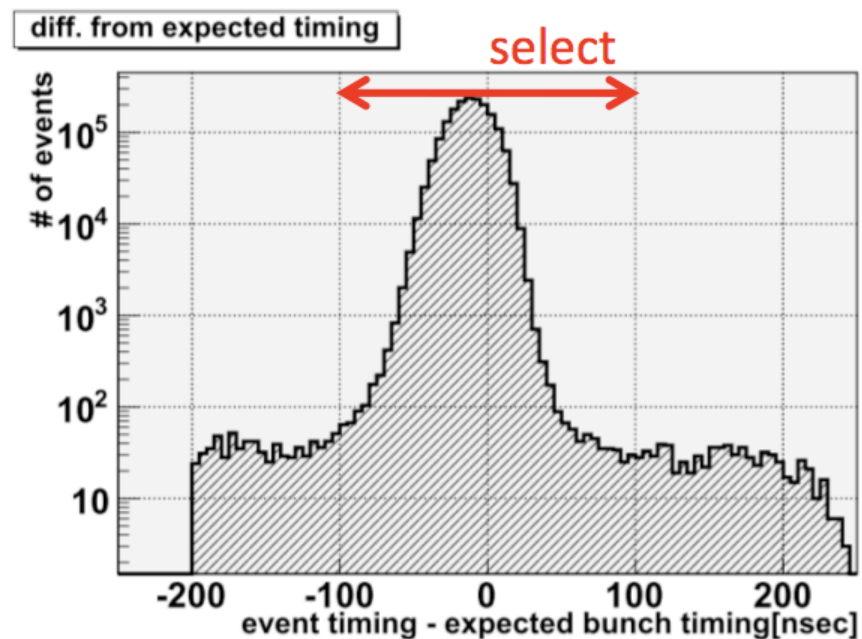
ニュートリノイベントセレクション5

- Track matching
 - Tracking を行った後、X-Z 平面と Y-Z 平面の両方の結果がコンシステントなものかどうかを確認するため、Track matching selection を行う。X-Z 平面、Y-Z 平面のトラックの始端 (最上流にあるプレーンにあるヒット: 以下 vertex と呼ぶ) の Z 方向の位置の差が 2 プレーン以下であるか確認し、そうでなければこのイベントを除去する。



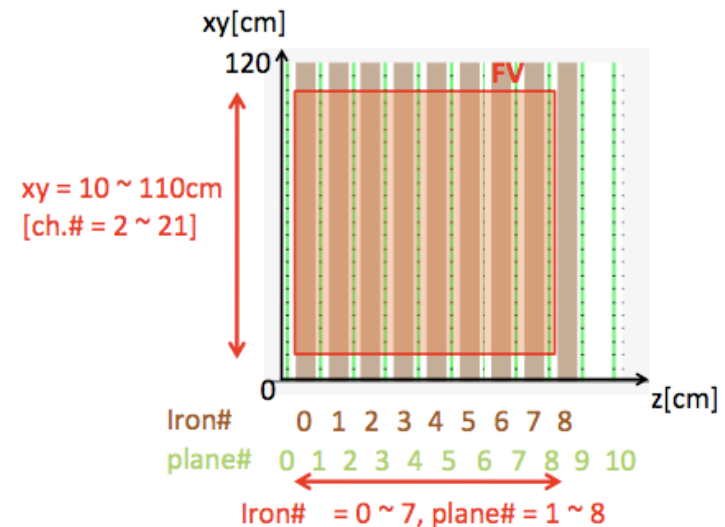
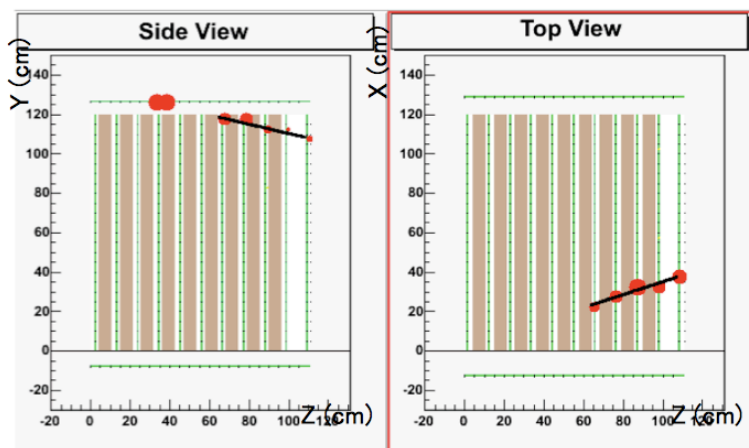
ニュートリノイベントセレクション6

- Beam timing cut
 - Track matching が終わったら、そのイベントがビームタイミングと合っているかどうかを確かめる。ニュートリノがくるタイミングを各バンチごとに計算し、その予測値からの実際のニュートリノイベントのタイミングのずれが 100 ns 以内であることを要求する。

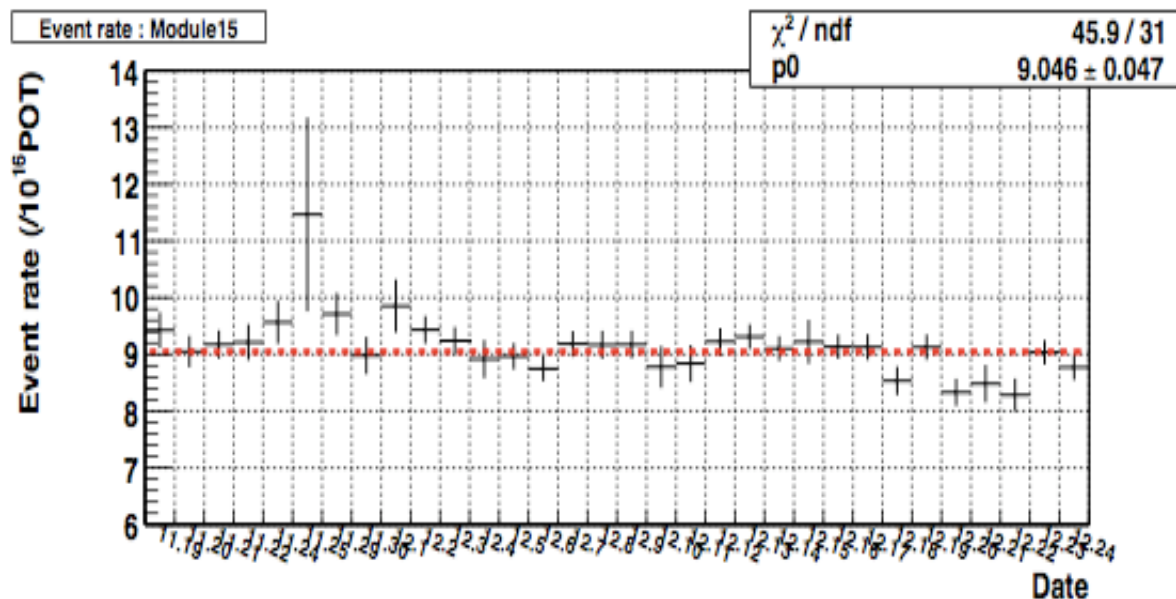
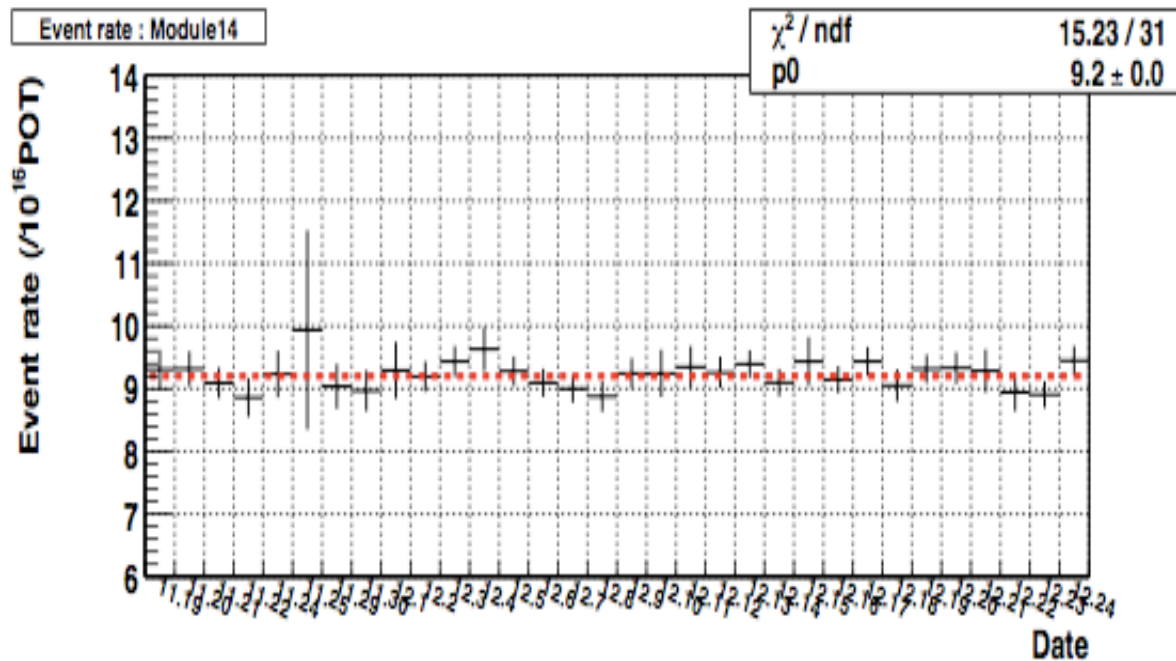


ニュートリノイベントセレクション7

- Upstream VETO cut & Fiducial volume cut
 - 再構成したトラックを周りの VETO プレーンまで外挿させる。そして、上流の VETO にヒットがあった場合、VETO カットとして除去する。
 - これにより、たまたま Beam timing に合った宇宙線、隣のモジュールでニュートリノが反応して出てきた μ 粒子、そして前置検出器ホールの壁でニュートリノが反応することで生じる外からの μ 粒子 (Sand muon) によるバックグラウンドな粒子を除去する。
 - VETO の不感効率 (Inefficiency) によるものや VETO プレーンの隙間からくるバックグラウンドな粒子、そしてビーム軸方向に真っすぐに飛んでくるような Sand muon により、Upstream VETO cut で除去できないイベントがある。
 - Fiducial volume を定義し、vertex が中にある事を要求する事で、Upstream VETO cut で除去できない様なバックグラウンドなイベントも除去する。尚、Fiducial volume は 2 番目から 8 番目のトラッキングプレーンで、モジュール中心から ± 50 cm の直方体としている。



ニュートリノイベントレートの安定性

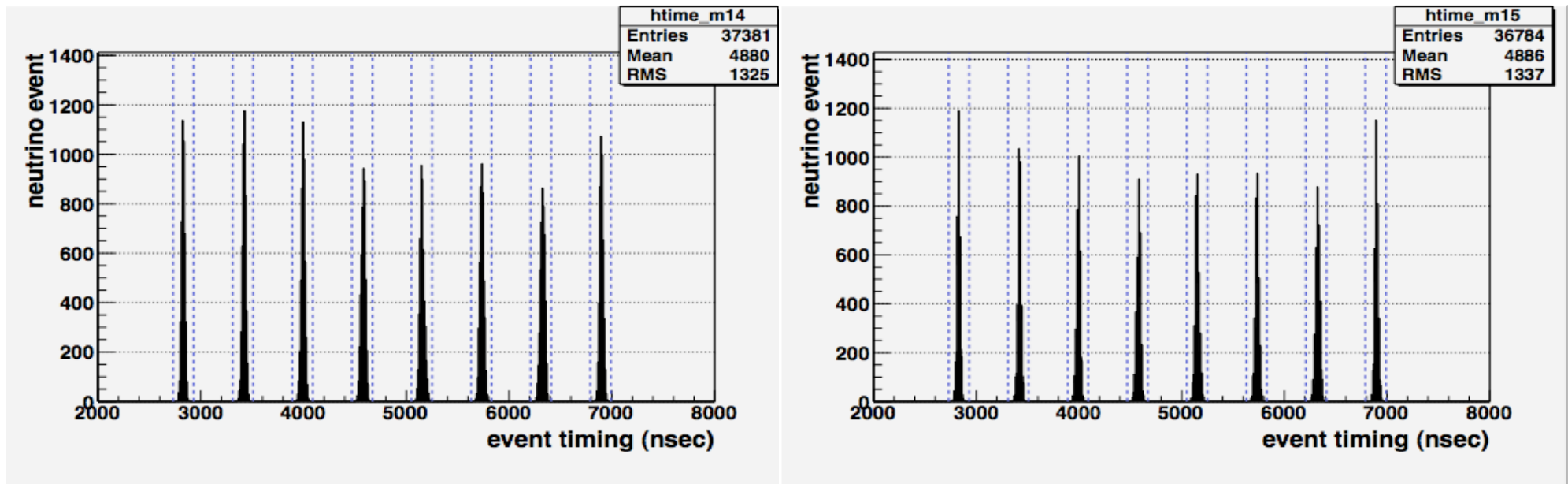


- 1日ごとのニュートリノイベントのレートを各モジュールごとにはかり、安定してニュートリノを検出しているか確かめた。

Module	Event rate (/10 ¹⁶ POT)	Reduced chi-square
14	9.20±0.05(stat.)	15.23/31
15	9.05±0.05(stat.)	45.9/31

- 両モジュールとも安定してニュートリノを検出できている。

ニュートリノイベントタイミングの安定性

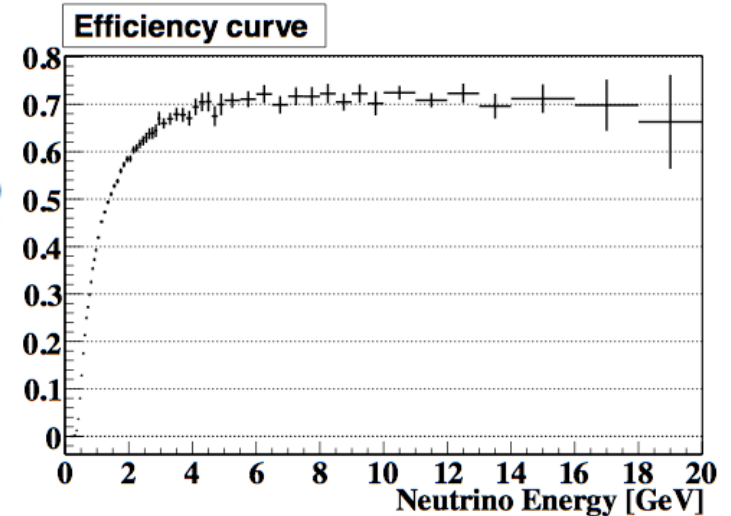


Bunch	1	2	3	4	5	6	7	8	
module 14	8.96	9.33	9.22	9.20	9.34	9.18	9.16	9.23	±2.6%
module 15	9.19	8.98	9.03	8.51	9.29	8.85	9.22	9.31	±5.9%

シミュレーションによる ニュートリノイベント数の算出

- ニュートリノフラックス: JNUBEAM
- ニュートリノ反応のシミュレーション: NEUT
- 検出器シミュレーション: GEANT4
 - シミュレーションで見積もられたEfficiency curveを用いた

$$\begin{aligned}\text{ニュートリノイベント数} &= \int (\text{ニュートリノフラックス}) \times (\text{反応断面積}) \times (\text{検出効率}) dE \\ &= \int N_{flux}(E) \times \sigma(E) \times \epsilon(E) dE\end{aligned}$$



Φ_{SK} の系統誤差

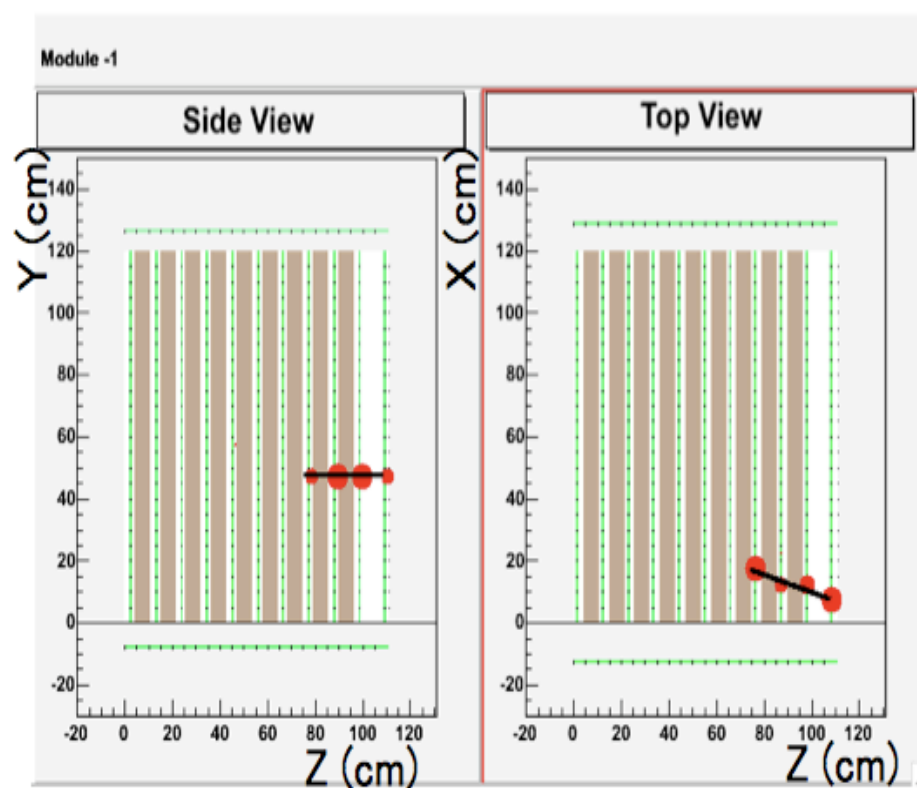
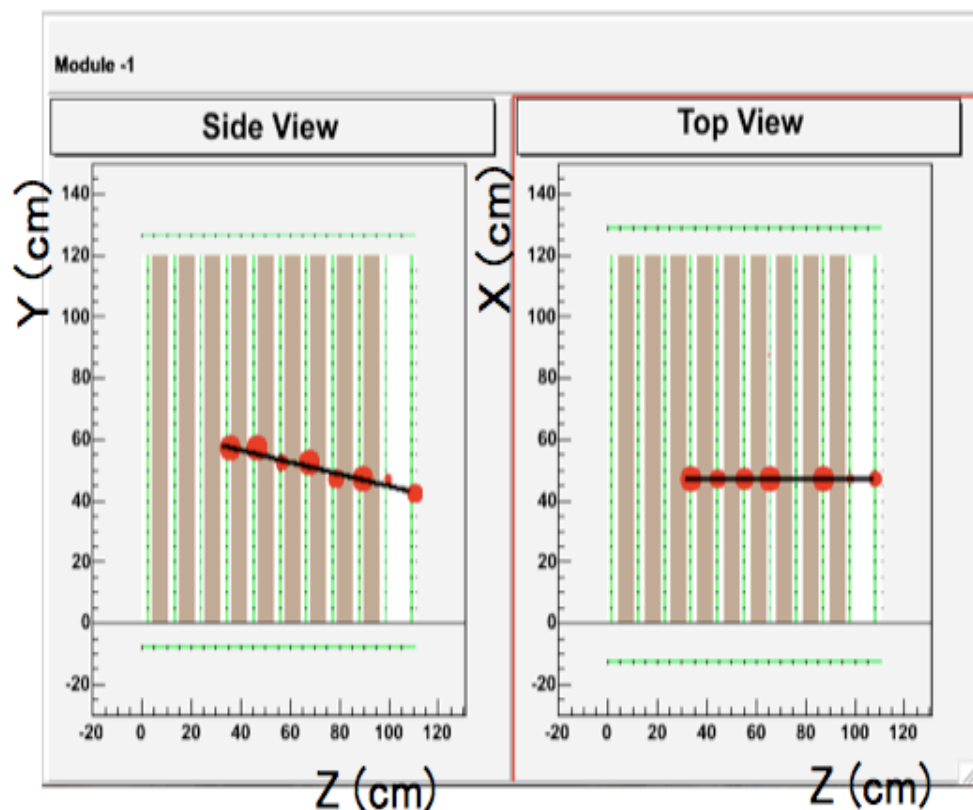
ρ	Change at Peak (0.5-0.7 GeV)	Maximum Change (<3 GeV)
+0.1	0.1%	0.5%
-0.1	0.1%	0.5%
+0.2	0.2%	1.0%
-0.2	0.3%	1.0%
+0.3	0.2%	1.6%
-0.3	0.6%	1.5%
+0.4	0.4%	2.2%
-0.4	0.8%	2.0%
+0.5	0.7%	2.9%
-0.5	1.1%	2.6%
+0.6	1.0%	3.6%
-0.6	1.4%	3.2%
+0.7	1.2%	4.2%
-0.7	1.8%	4.2%
+0.8	1.5%	5.0%
-0.8	2.3%	5.8%

- 振動確率が最大となるニュートリノエネルギー領域(0.5-0.7 GeV)で Φ_{SK} 2.3%の不定性($\rho=-0.8$)
 - ビーム方向を1mrad間違えた時の不定性とほぼ同程度←T2Kの許容値を超えている
- Shoulder moduleによって、ビームの非軸対称度を正しく測定している事が必要
 - そのためにも系統誤差を小さく抑えていく事が必要

shoulder moduleにおける ニュートリノイベント

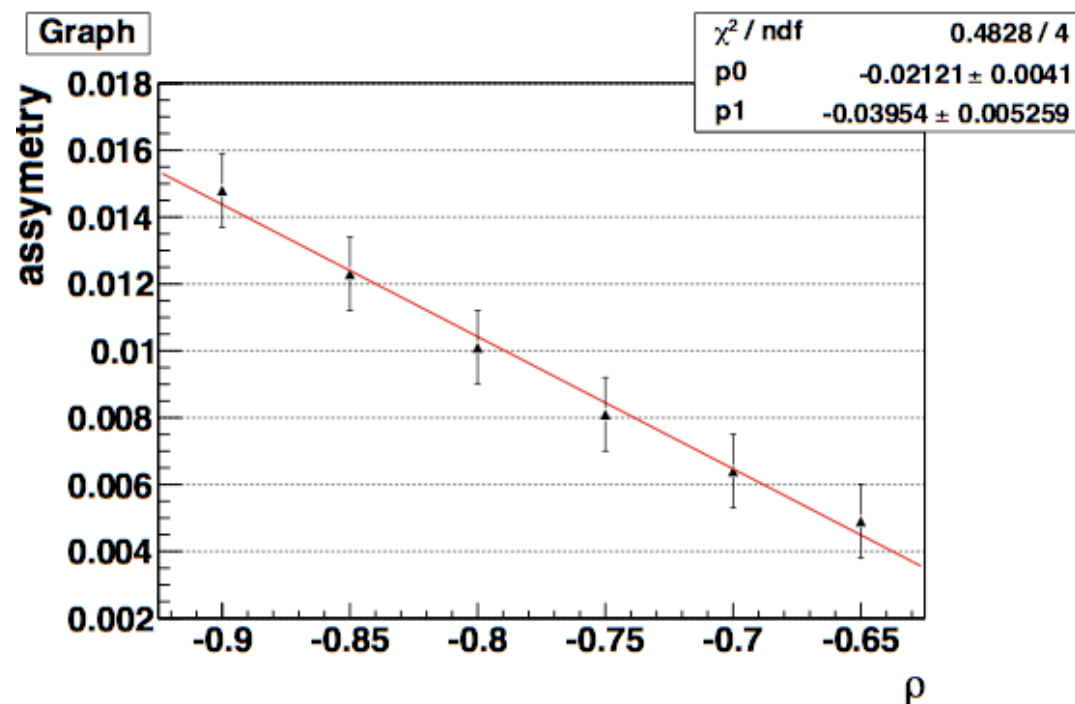
module 14

module 15



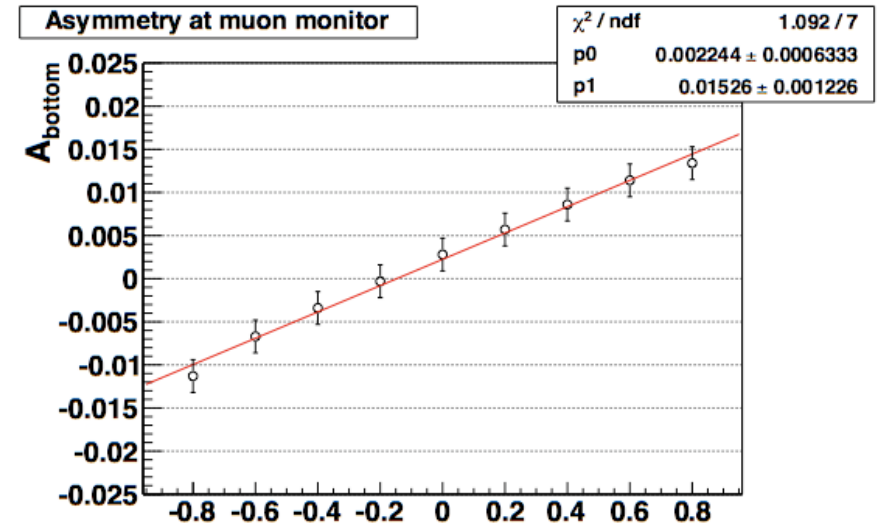
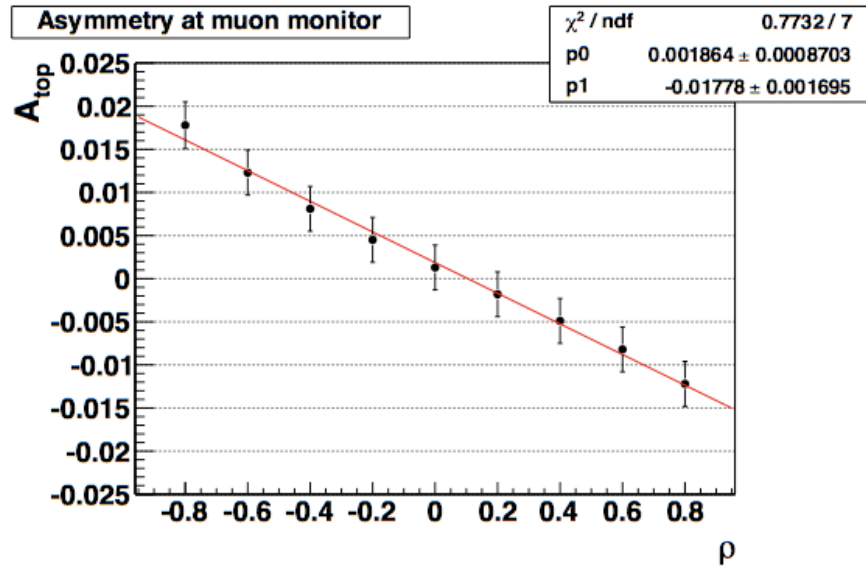
ニュートリノの検出を確認
(荷電カレント準弾性散乱(CCQE): $\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$ と見られる)

シミュレーションを用いた ρ の算出



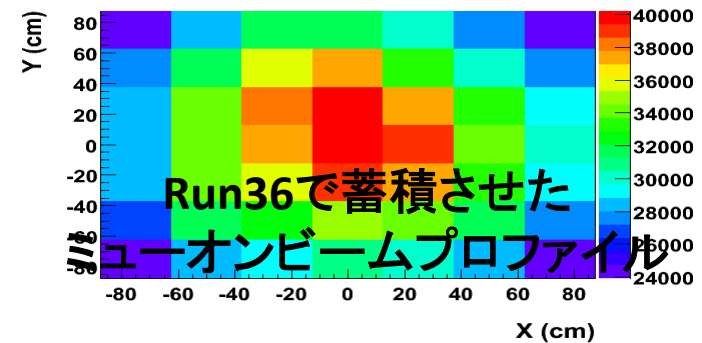
- Run36で得られた非対称度($A=0.0080$)付近で、1次直線でフィット
- フィットパラメータより、 ρ を逆算
 - 測定値: $A = 0.0080 \pm 0.0037$ (stat.) ± 0.0219 (sys.)を用いる
- $\rho = -0.74 \pm 0.17$ (stat.) ± 0.57 (sys.)

シミュレーションを用いた非対称度及び ρ の算出 ミュオンモニター



- ρ を変化させミュオンモニターにおける非対称度 (A_{top} 、 A_{bottom})を求める。
- A_{top} 、 A_{bottom} それぞれ独立に1次直線でフィットし、フィットパラメータを求める。
- Run36中で得られたミュオンビームプロファイルを蓄積させて得られた A_{top} 、 A_{bottom} を用いて ρ を逆算
 - $A_{top} = -0.0133 \pm 0.0002$ (sys.)
 - $A_{bottom} = 0.0075 \pm 0.0002$ (sys.)
- A_{top} : $\rho = 0.85 \pm 0.10$ (sys.)
- A_{bottom} : $\rho = 0.34 \pm 0.05$ (sys.)

系統誤差：
センサーの個体差0.1%



$$A_{top} = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}$$

$$A_{bottom} = \frac{N_3 - N_4}{N_3 + N_4}$$

ビーム形状評価の結果 (Run36)

- Run36におけるニュートリノ反応数
 - module14: 37381 ± 186 (stat.)
 - module15: 36784 ± 184 (stat.)
- 非対称度を導入する事で、ビーム形状を評価する
 - 両モジュールで測定したニュートリノ反応数を用いて、非対称度Aを定義

$$A = \frac{N_{14} - N_{15}}{N_{14} + N_{15}} = \left(\frac{1 - N_{15}/N_{14}}{1 + N_{15}/N_{14}} \right)$$

- Run36における非対称度 $A = 0.0080 \pm 0.0037$ (stat.) ± 0.0219 (sys.)
 - ニュートリノ反応数の比(N_{15}/N_{14})に与える系統誤差
 - 鉄質量の違い: 0.87%
 - MPPCのノイズヒット: 2.06%
 - ニュートリノイベントセレクション効率: 3.77%
 - 鉄質量の測定精度: 0.14%
 - 系統誤差が大きく、現状では非対称度は測定できない。今後は系統誤差を小さくしていくスタディが必要。

shoulder module

- シャットダウン期間に組み立て・導入、Run36から稼動
- モジュールの構成はINGRIDと同じ
- ビーム軸方向より、鉛直方向+2.3m、水平方向±3.1mに位置する
- 目的:ニュートリノビームのプロファイルの軸対称性を評価する
 - moduel14、15におけるニュートリノ反応数の違いを見る事で、ビームの軸対称性を評価する

