

# T2Kビーム測定と 振動解析への応用

特定領域「フレーバー物理の新展開」研究会

2012.07.07 @ 奈良県吉野山

京都大学D2 鈴木研人

## *Contents:*

1. T2K実験
2. Muon monitorを用いたビーム測定
3. 振動解析への応用

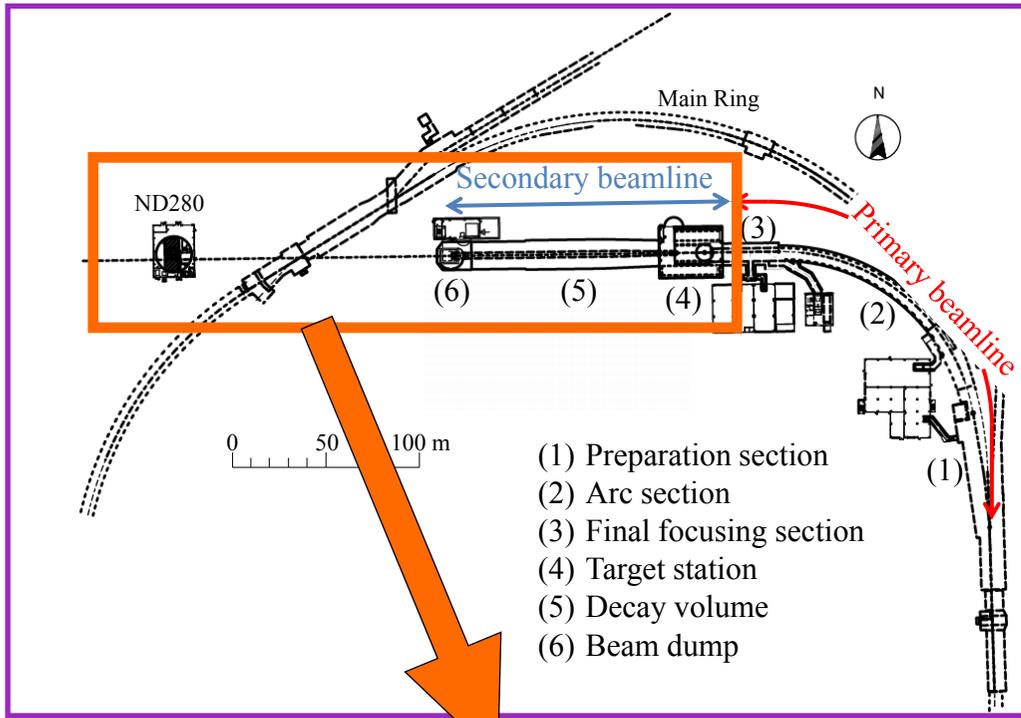
# T2K実験



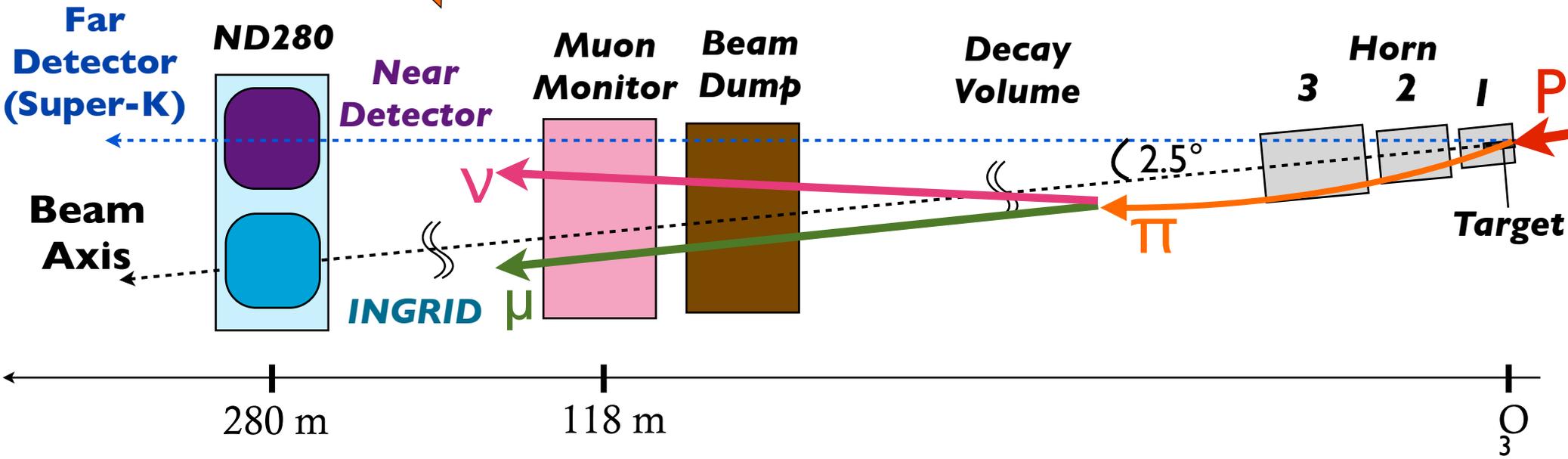
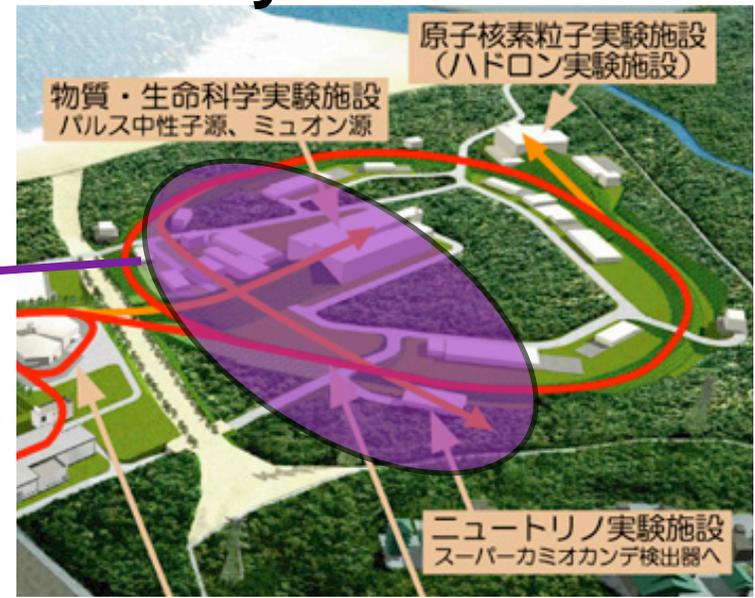
- 大強度ニュートリノビームを用いた長基線ニュートリノ振動実験
  - 電子ニュートリノ出現モード探索による $\theta_{13}$ 測定
  - ミューオンニュートリノ消失モードによる $\Delta m^2_{23}$ 、 $\theta_{23}$ の精密測定

# Beam-line

# T2K Beam-line

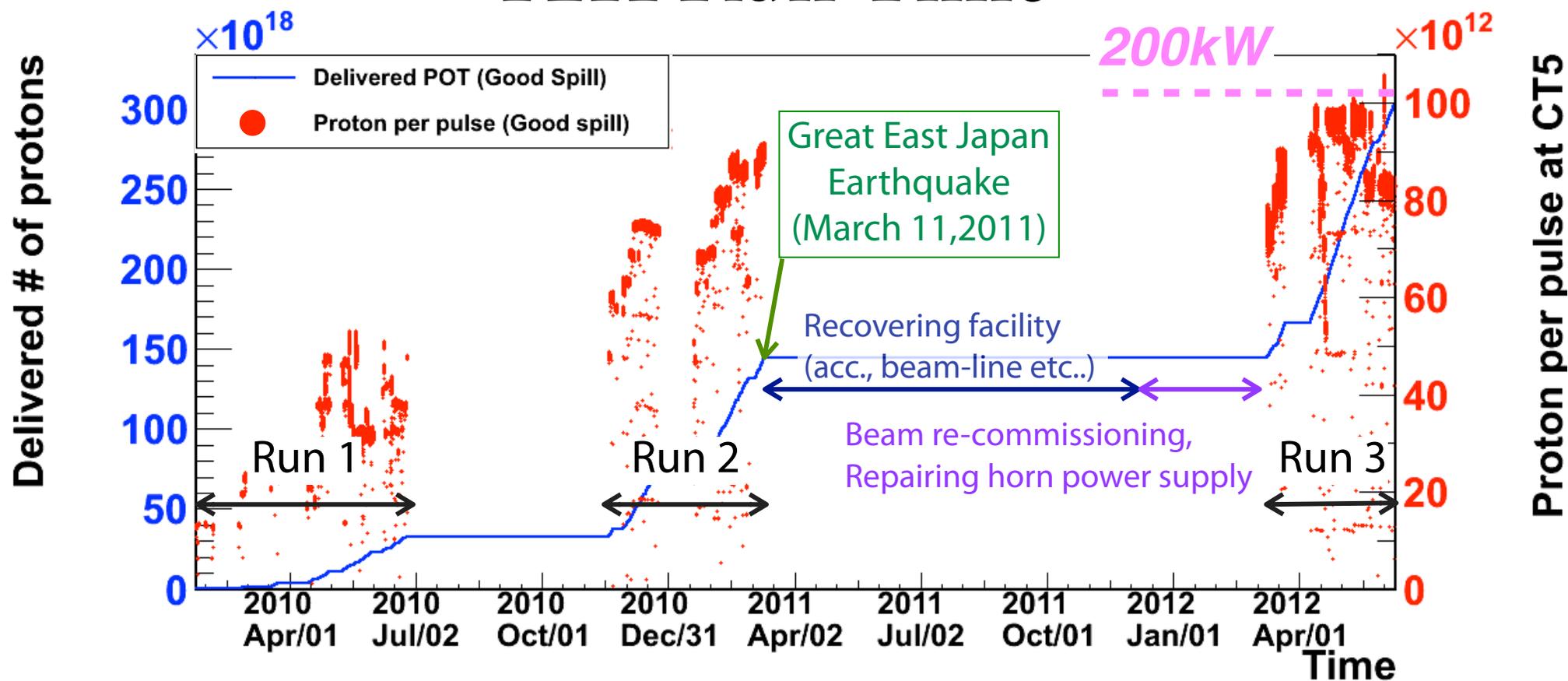


# J-PARC



# Muon monitor を用いた ビーム測定

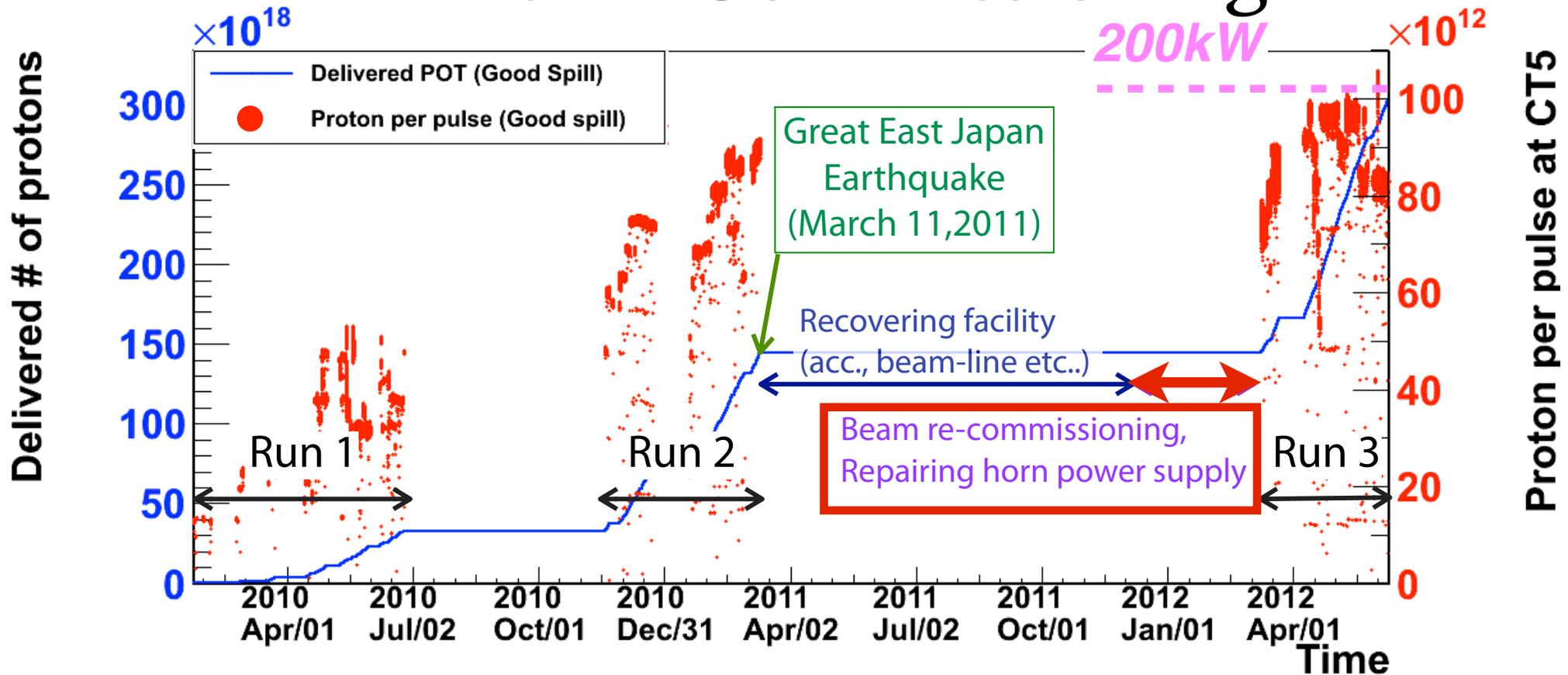
# T2K Run Time



	Run 1	Run 2	Run 3		<b>Total</b>
	2010/1 - 2010/6	2010/11 - 2011/3	2012/3	2012/4-2012/6	
Horn operation	250 kA	250 kA	205 kA	250 kA	-
POT (*)	$0.32 \times 10^{20}$	$1.11 \times 10^{20}$	$0.21 \times 10^{20}$	$1.37 \times 10^{20}$	<b><math>3.01 \times 10^{20}</math></b>

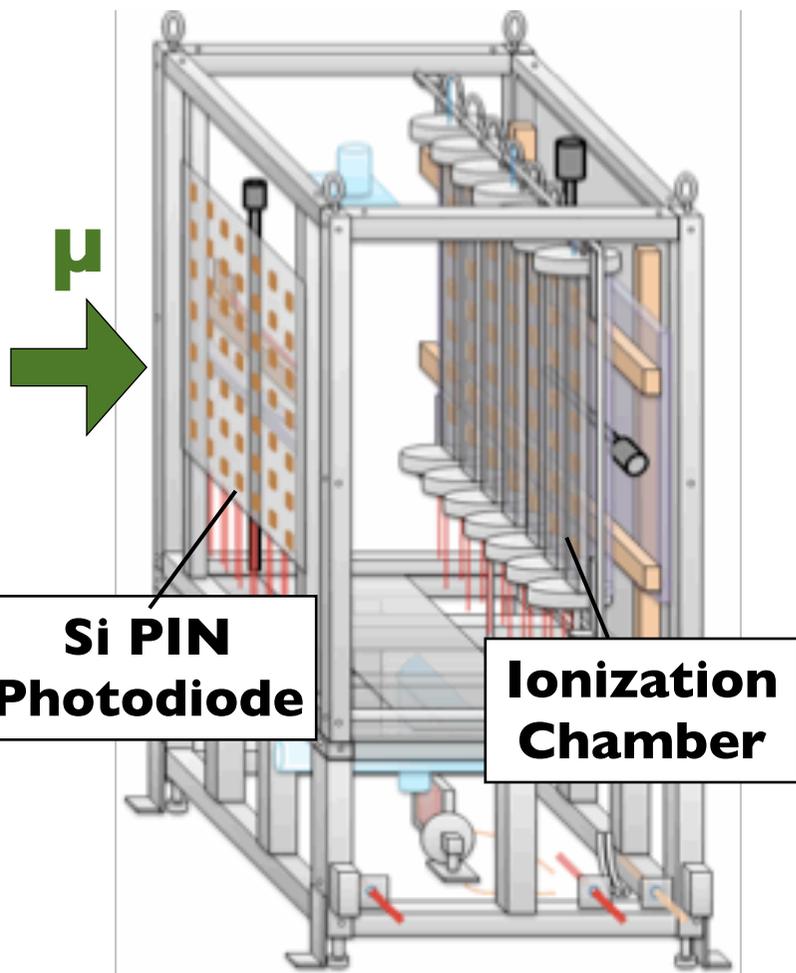
(\*) Proton on Target <sup>5</sup>

# T2K Beam Commissioning



- 地震後、Run 3のデータ取得前に、Commissioning Runを実施
  - 電磁ホーンは電源故障のため稼動せず
  - 地震前の再現性の確認
  - **Target / Baffle (コリメータ)の地震後の状況**

# Muon Monitor

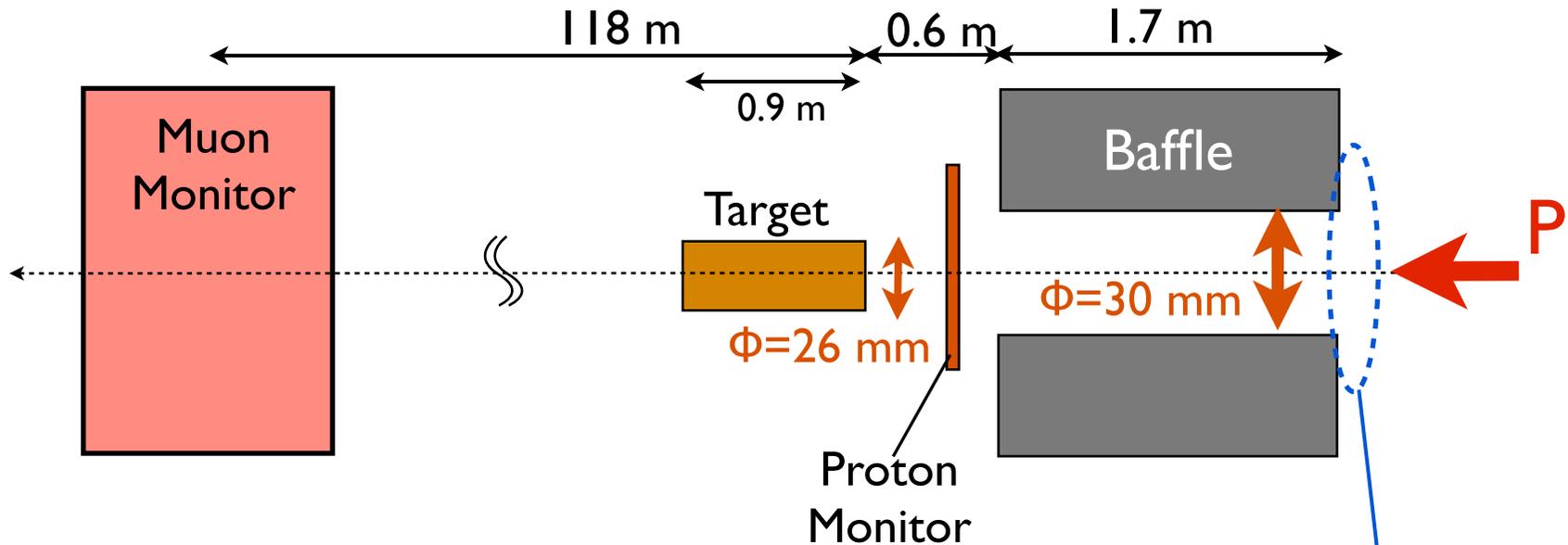


- Beam dump (ハドロン吸収体)の下流に位置
  - 5 GeV/c以上の運動量を持った $\mu$ を検出
- 2種類の独立な検出器によって構成
  - Si PIN Photodiode
  - Ionization Chamber (Ar + N<sub>2</sub>)
  - 共に7 x 7 = 49 ch分のセンサーを使用
    - 有効領域：150 cm x 150 cm

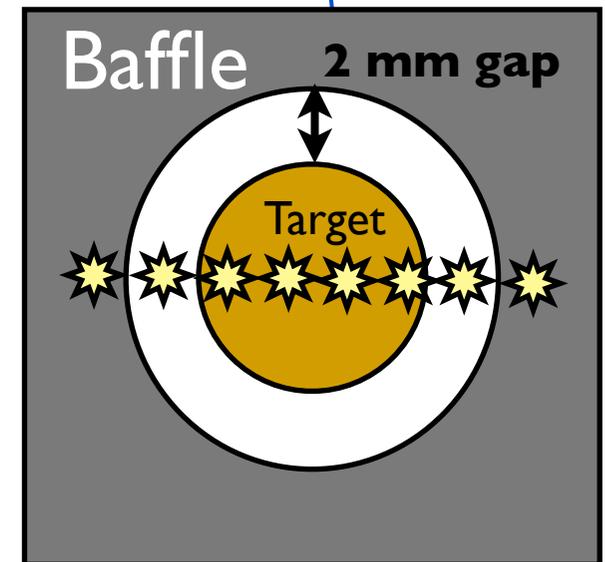
- $\pi$ の2体崩壊の際に、 $\nu\mu$ と共に生じる $\mu$ のビームプロファイルを二次元的に再構成する
  - $\mu$ ビームプロファイル中心 ( $\mu$ ビーム方向)
  - $\mu$ ビームプロファイル幅
- 全chで収集した電荷から、 $\mu$ ビームの強度を測定

これらの情報から、Target / Baffleのalignment情報を引き出せないか？

# Target/Baffle Alignment Check



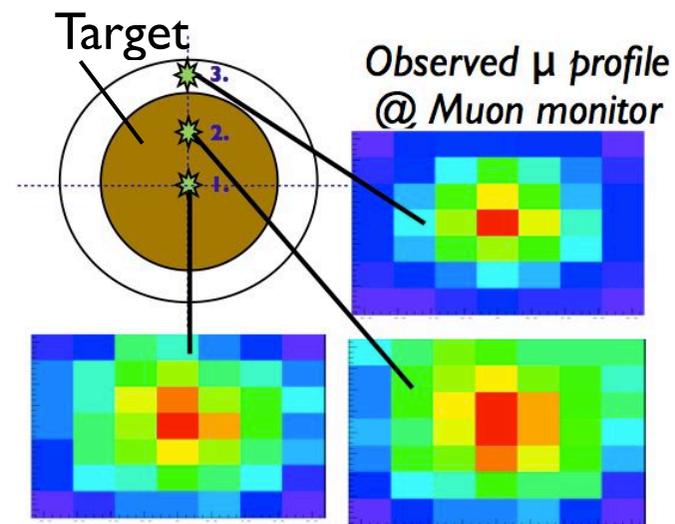
- Proton beam のTarget/Baffleにおける位置をScanしていく
  - 各位置における $\mu$ ビームをMuon Monitorで測定
  - $\mu$ ビームのプロファイル情報を解析し、Target/BaffleのAlignmentをチェック



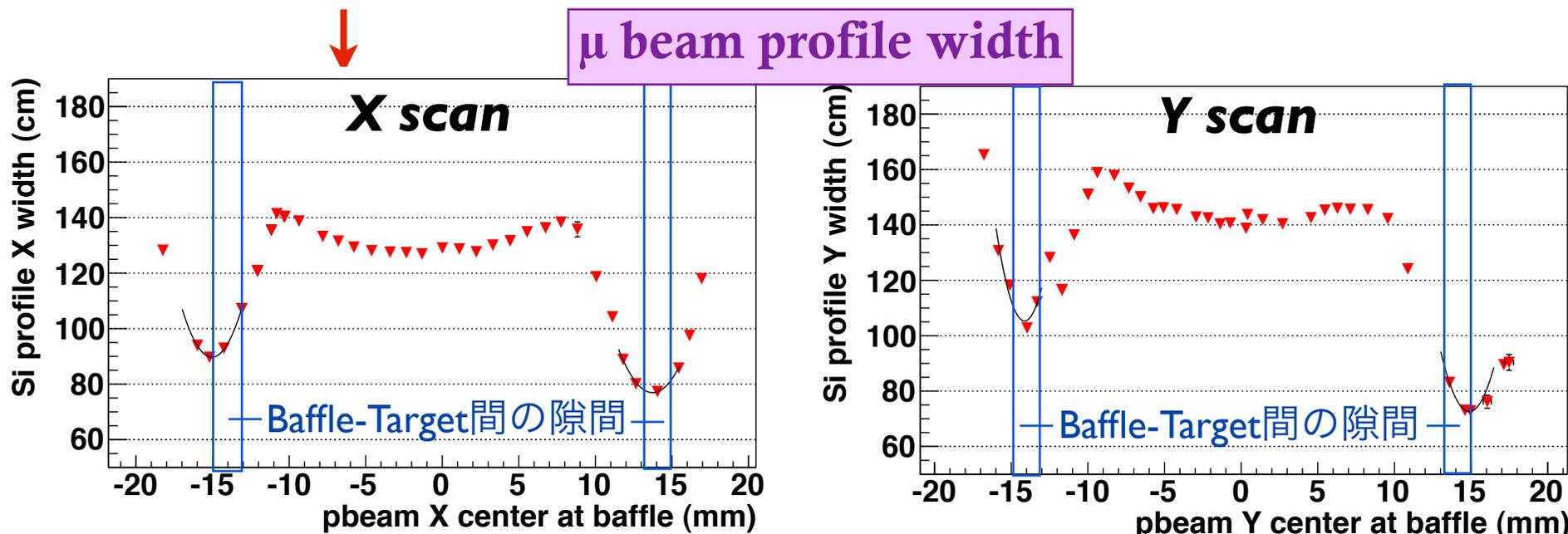
陽子ビームをスキャン

# Baffle Alignment -Result-

- Baffle ( $\Phi=30$  mm) と Target ( $\Phi=26$  mm) には2 mmの隙間がある
  - この隙間を陽子ビームが突き抜けると、2次粒子があまり生成されず、 $\mu$ ビームのプロファイル幅が小さくなる、と考えられる
  - 極小値をFit (2次関数) によって求め、隙間の位置を算出
    - Baffle-Target間のAlignmentが正しいかを確認できる

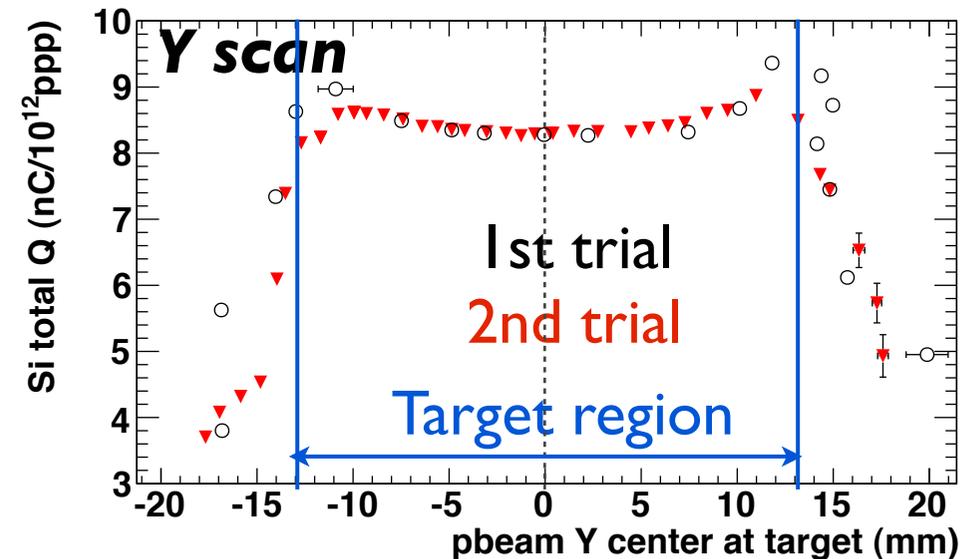
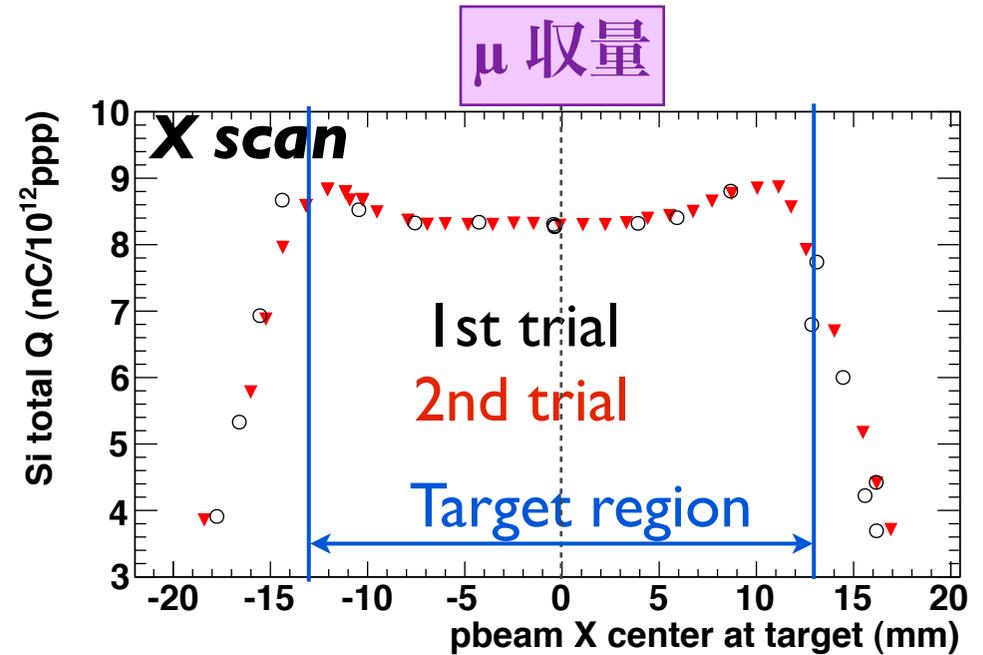
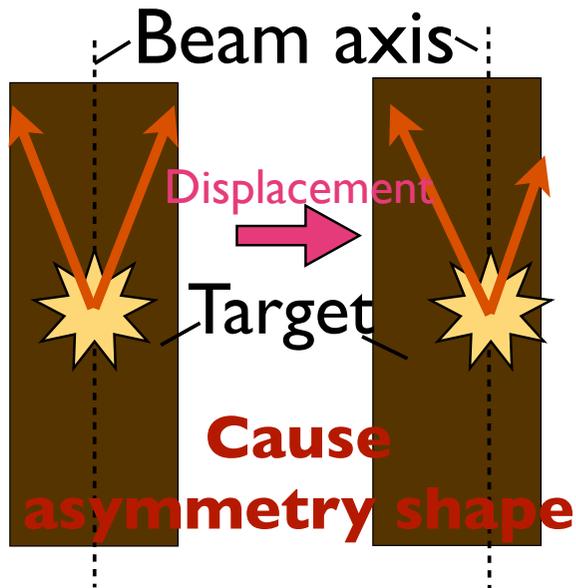


X方向でBaffle alignmentのずれている可能性がある事が分かった



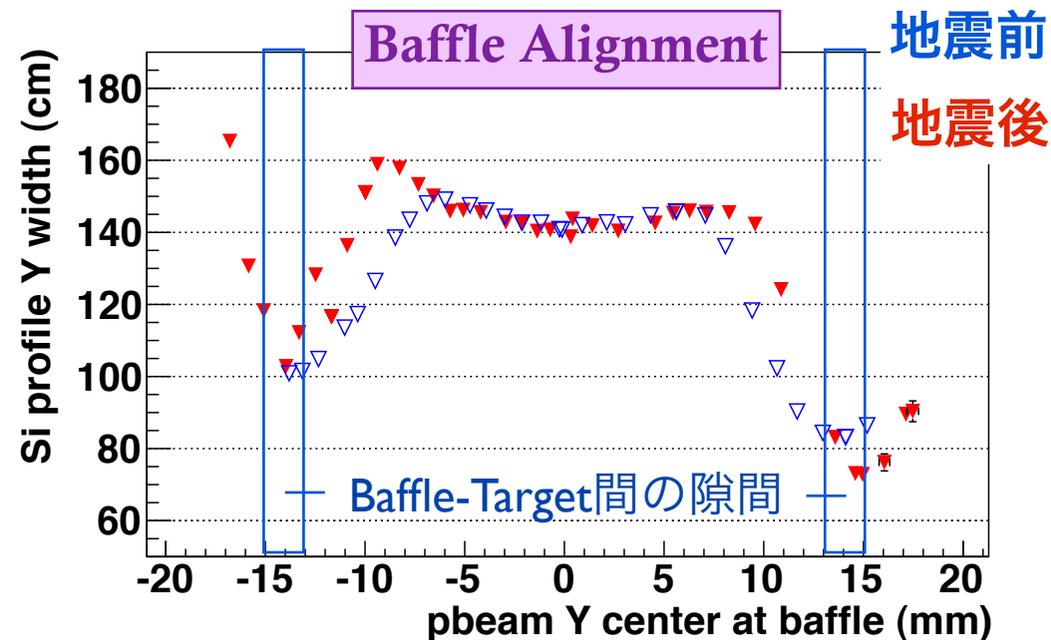
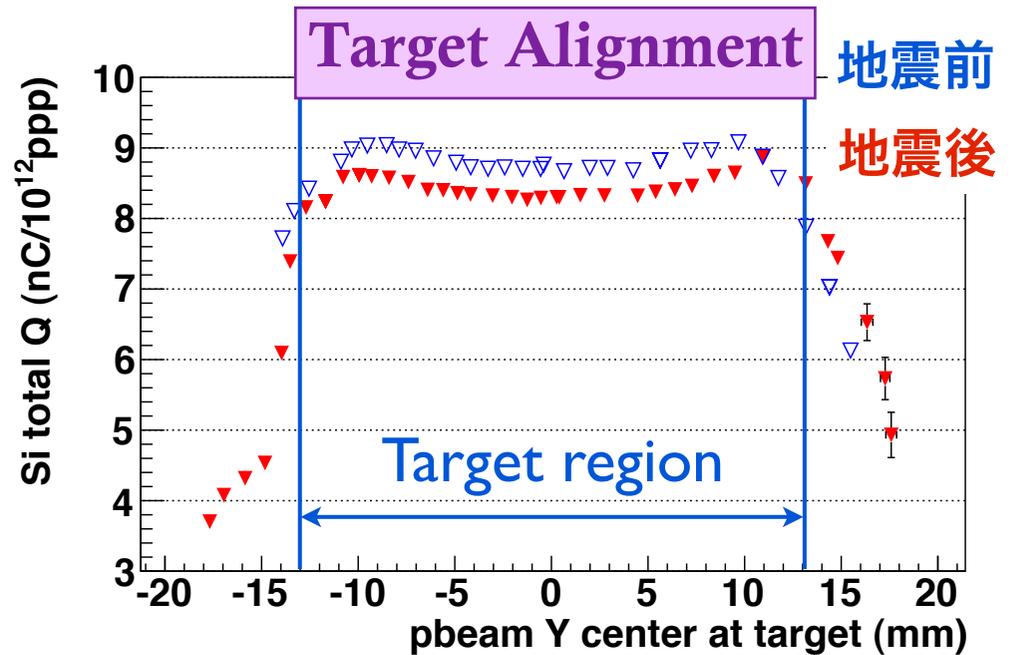
# Target Alignment -Result-

- Muon monitorで測定した $\mu$ ビーム強度を陽子数で規格化し、この値と各陽子ビームのTargetの位置との関係を調べた
- X方向に関して、 $X=0$ に対して分布が非対称
- ビーム軸に対して、Targetの位置がX方向で1mm程ずれている可能性がある事が分かった



# 地震前の状況との比較

- 地震前のデータはそもそも限りがある。陽子ビームをY方向にScanしたデータのみで比較。
- Target Alignment
  - $\mu$ 収量の陽子ビーム位置依存性に大きな違いは見られない。
- Baffle Alignment
  - 地震前と後で、 $\mu$ ビームプロファイル幅の陽子ビーム位置依存性に違いが見られる。
    - +Y方向で、Baffle-Target間の隙間に違いが見られる。
    - -Y方向で、地震前のデータ点がもう少し欲しいところ。
    - いずれにせよ、Baffle alignmentがずれてきている可能性は大きい。



# Summary so far

- T2K Commissioning runにおけるMuon monitorを用いた測定。
  - 地震前の再現性の確認。
  - X方向でBaffle及びTargetのAlignmentがずれている可能性がある事が分かった。
    - 地震によるものなのかは不明。
  - 物理ランにおいては、陽子ビームはTarget中心に合わせている。従って、現状ではデータ取得において問題は無い。
  - **しかしながら、ビームを用いたAlignmentの定期的なチェックは重要である。**

# 振動解析への応用

# 振動解析の戦略 -全体の流れ-

鈴木さんのTalk

$\nu$  Flux uncertainties

**Fit**

$\nu$  interaction cross section uncertainties

**Fit**

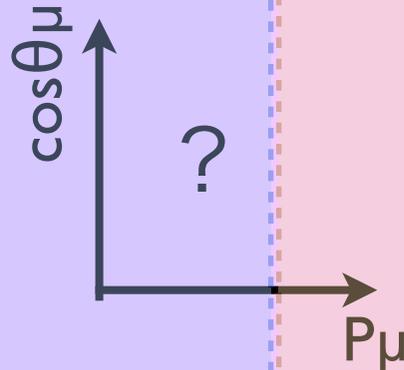
ND280 detector uncertainties

**Fit**

池田さんのTalk

昨日の中平さんのTalk

ND280  $\nu\mu$  measurement ( $P_\mu$ - $\cos\theta_\mu$  distribution)



Constrain flux, x-sec, and det. uncertainties

**Input of fitted parameters**

**Oscillation Analysis**

# 振動解析の戦略 - $\nu$ Flux-

Start from here

$\nu$  Flux  
uncertainties

**Fit**

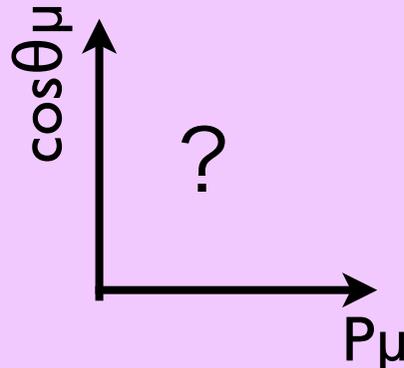
$\nu$  interaction  
cross section  
uncertainties

**Fit**

ND280  
detector  
uncertainties

**Fit**

ND280  $\nu_{\mu}$   
measurement  
( $P_{\mu}$ - $\cos\theta_{\mu}$   
distribution)

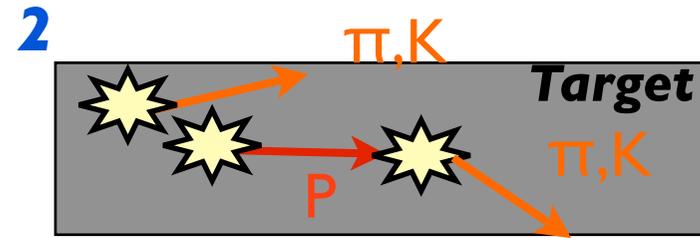


Constrain flux,  
x-sec, and  
det. uncertainties

**Input of  
fitted  
parameters**

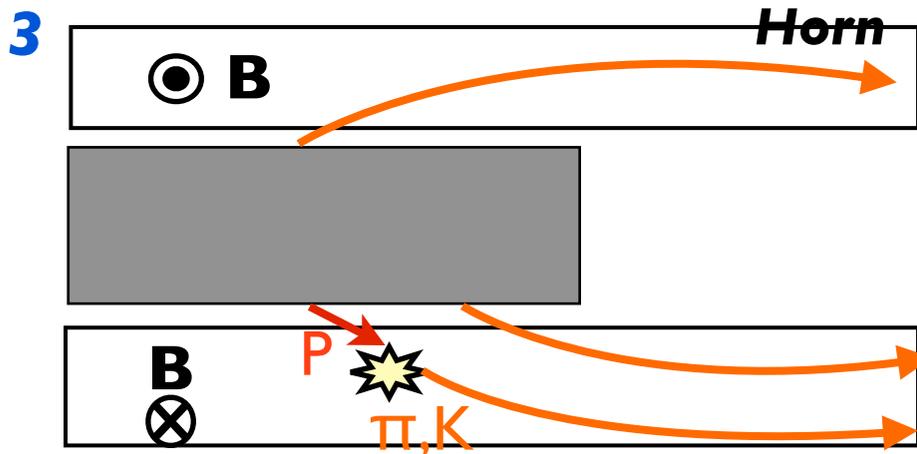
Oscillation  
Analysis

# $\nu$ Flux Prediction

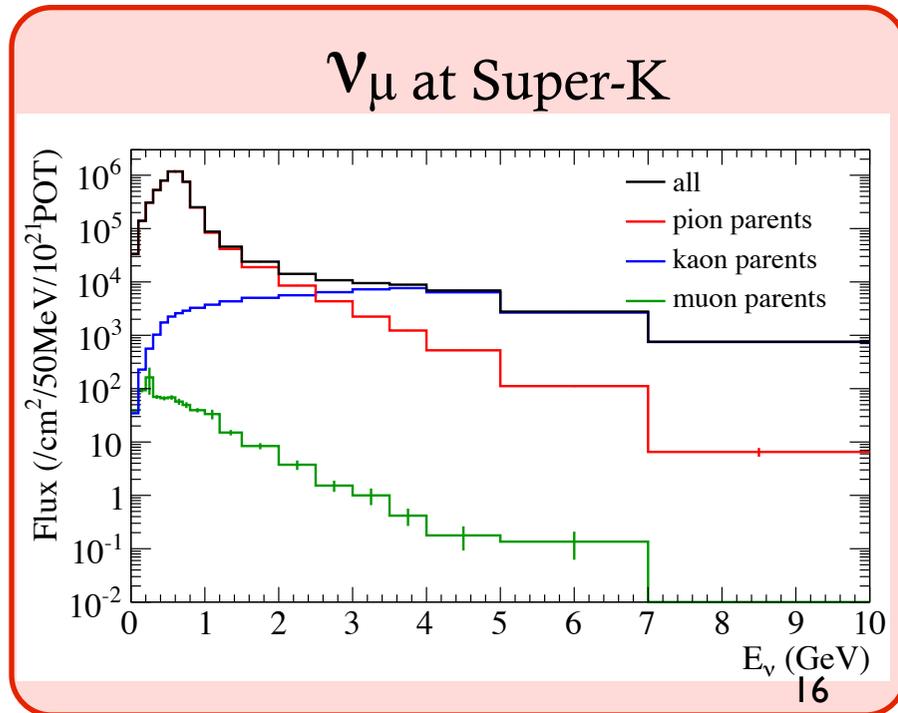


**1.** 実験で求めた陽子ビームのParameter (中心値、幅、角度等) を用い、SimulationによってTargetへ入射。

**2.** ハドロン生成モデルを用い、Primary (Secondary) Interactionによって生じた  $\pi$ 、K等のMultiplicityを計算。さらに外部データの結果を用い、調整も行う。

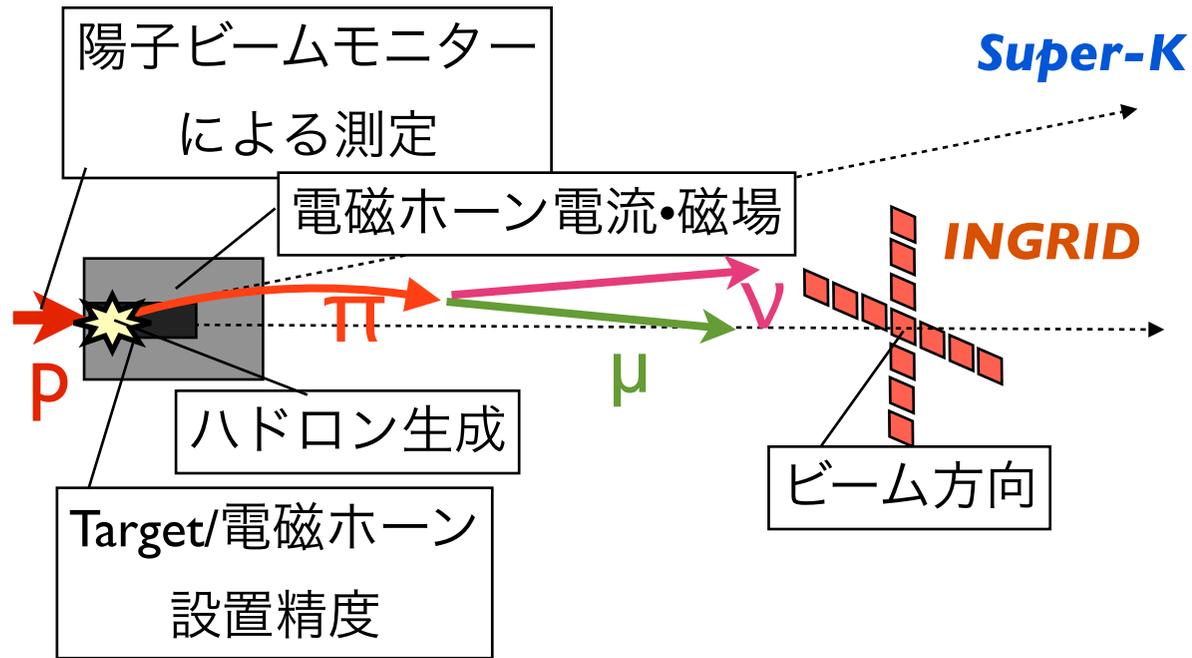


**3.** 2.で生じた粒子を電磁ホーンまで外挿し、磁場中の振る舞いによって再現。この際に電磁ホーンで衝突して生じた  $\pi$ 、K等のMultiplicityについても、外部データの結果を用いて調整している。その後、ニュートリノを生む反応を計算し、各検出器でのFluxをSimulateしている。

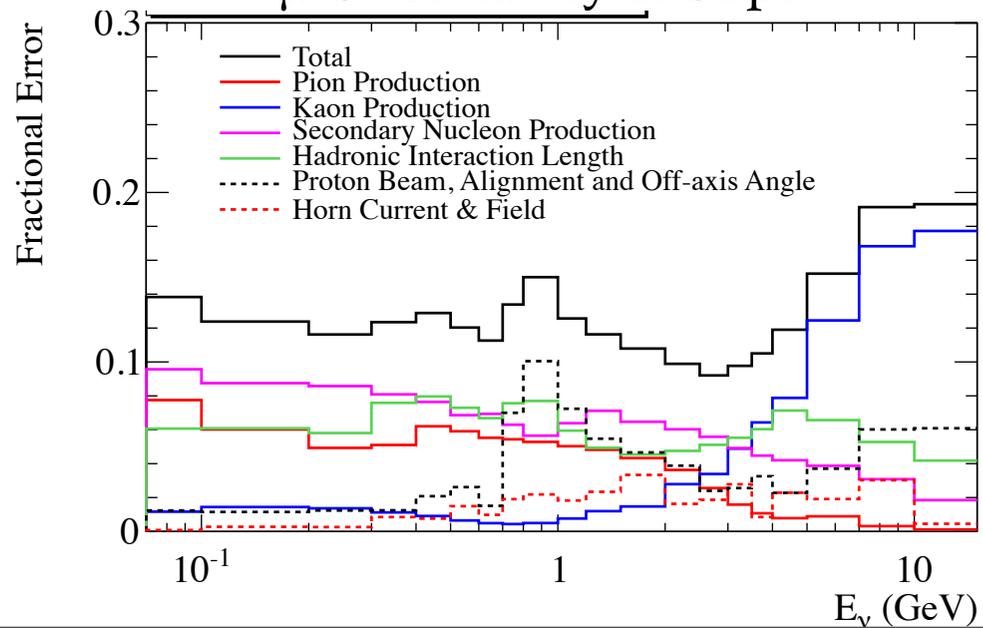


# Flux Uncertainty

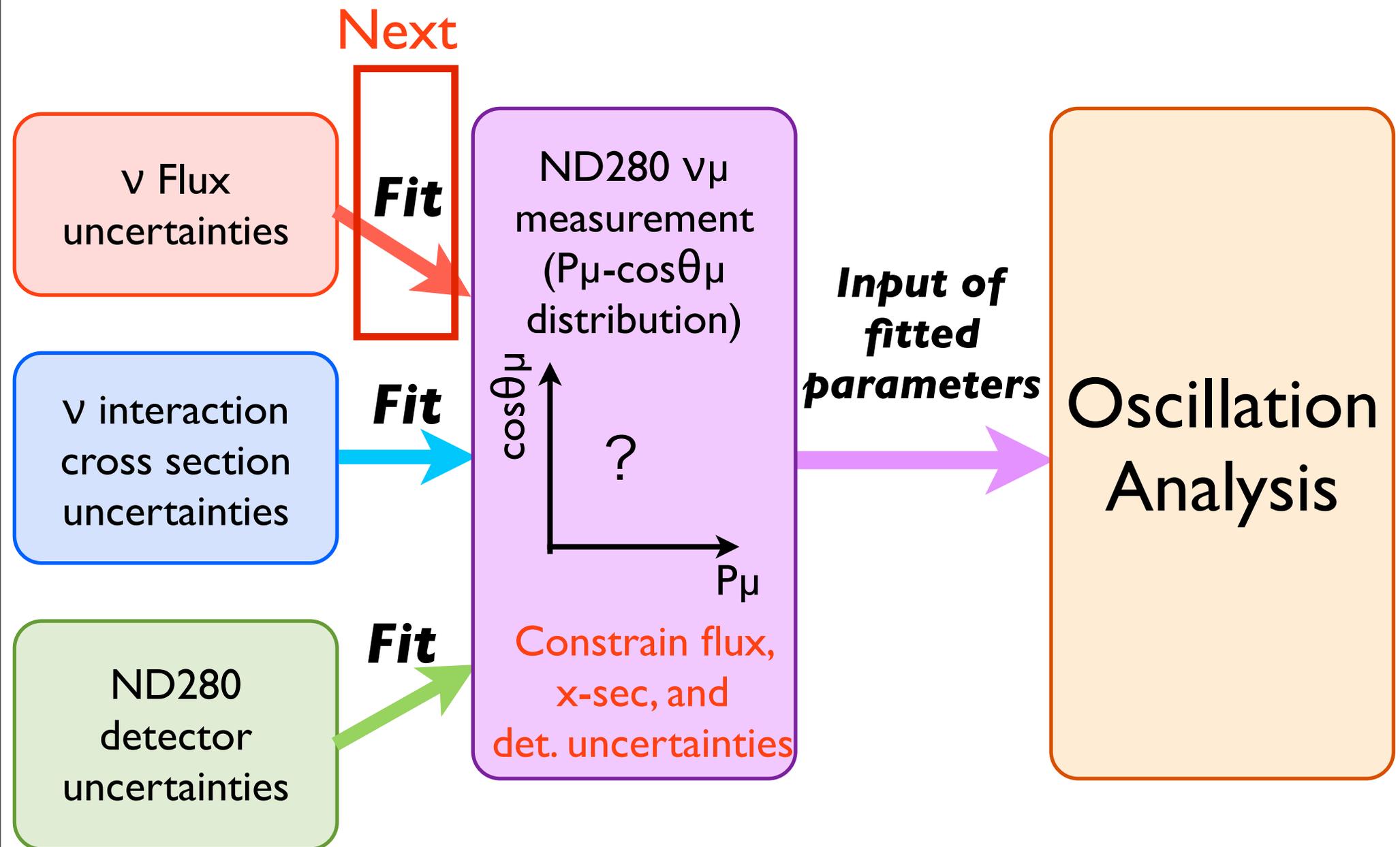
- **ハドロン生成の不定性**
  - 外部データの測定誤差等
- **陽子ビームモニターの測定誤差**
  - 陽子ビーム幅、角度、中心位置
- **Target/電磁ホーン設置精度**
- **電磁ホーン電流**
  - ホーン電流モニターの長時間安定性、絶対精度等
- **電磁ホーン磁場**
  - 磁場の非軸対称性
- **$\nu$ ビーム方向 (Off-axis角)**
  - INGRID の測定精度



$\nu_{\mu}$  Uncertainty at Super-K

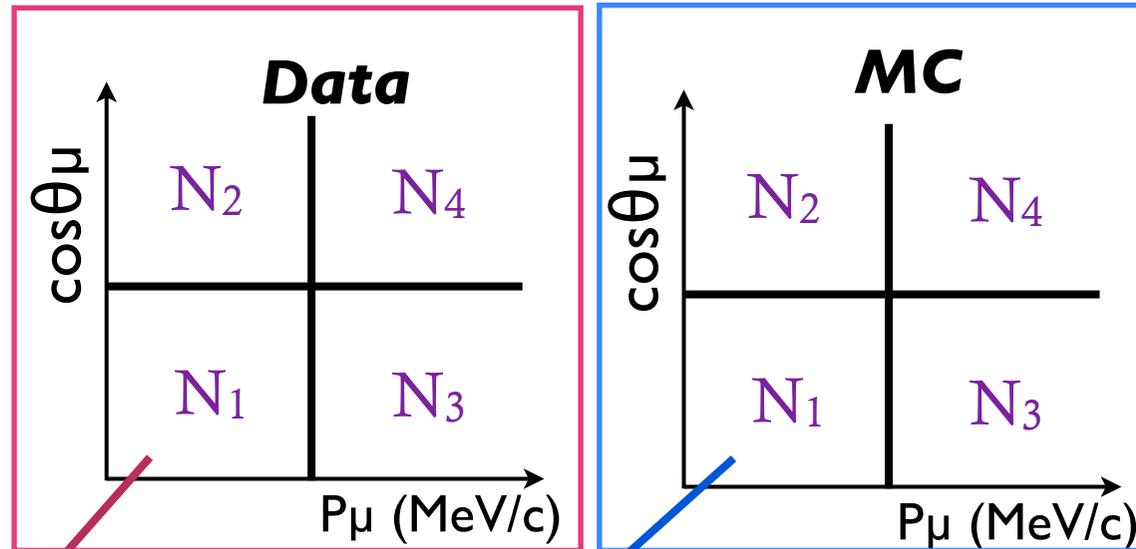
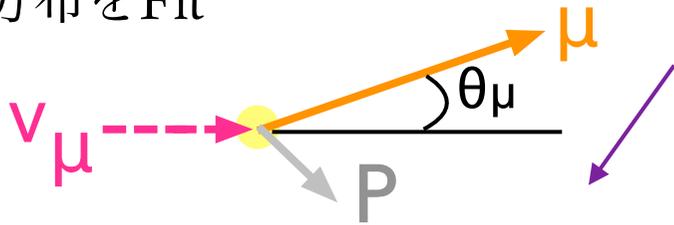


# 振動解析の戦略 -Fit for ND280 data-



# Fit for ND280 Data

ND280で測定された、荷電カレント反応で生じる $\mu$ の運動量 ( $P_\mu$ )と放出角 ( $\theta_\mu$ )の分布をFit



Fit に用いるLikelihood

$$L_{ND280} = \prod_i \text{Poisson}(N_i^{data}(p_\mu, \cos \theta_\mu); N_i^{pred}(p_\mu, \cos \theta_\mu))$$

$i^{\text{th}}$  bin in  $p_\mu\text{-}\cos\theta_\mu$

$\times$  syst. error terms (Flux, X-sec, & Detector)

$$\text{Flux syst. error} = \frac{1}{(2\pi)^{k/2} V_b} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta\vec{\phi} V_b^{-1} (\delta\vec{\phi})^T\right)$$

$\phi$  :  $\nu$  Flux,

$\delta\phi = \frac{\Delta\phi}{\phi}$  : Fractional error of  $\Phi$

$V_b$  : Covariance Matrix

$\delta\Phi$ をnuisanceなパラメータとして扱い、  
ND280データにFit  $\rightarrow$  Fitで得られた $\delta\Phi$ を新たなエラーとして使い、 $V_b$ を再計算する

**ND280データにFitするためには $V_b$ が必要となる**

# Covariance Matrix, $V_b$ の計算

Covariance Matrix,  $V_b$ はエネルギー、 $\nu$  flavor、Detector (ND280, SK)間の相関を考慮して計算される。各エラーソースに起因するCovariance Matrixを計算し、最終的に足し上げる。

$$V_b^{total} = \sum_s^{N_s} V_b^s$$

Ns: # of error source

$V_b$ の各成分(i,j) : Fluxの不定性の原因となる各エラーソースのパラメータが、

- 1変数のみ (ホーン電流、Off-axis角など)

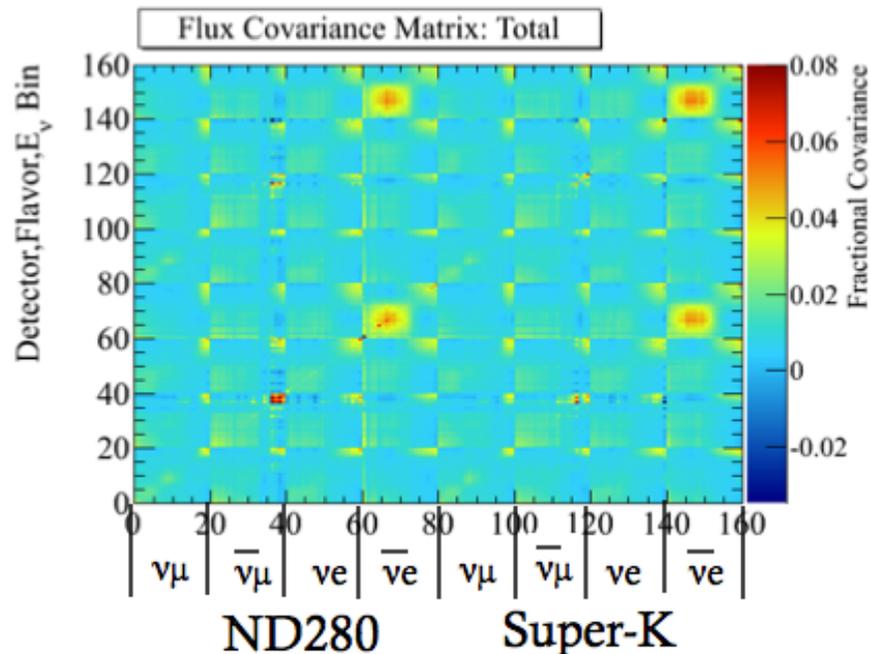
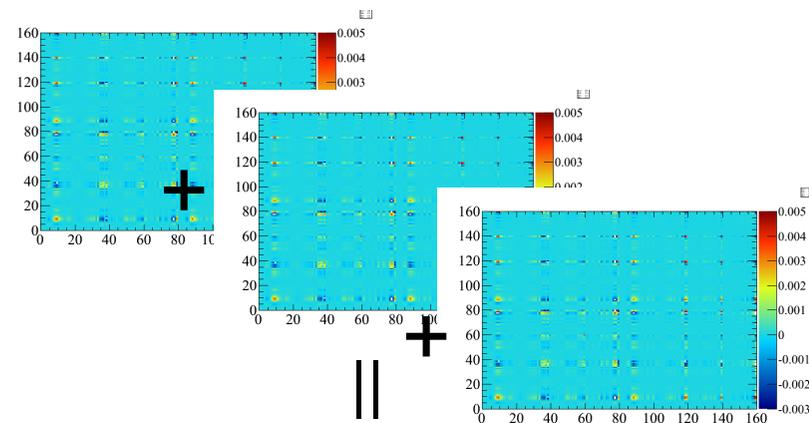
- パラメータを $\pm 1\sigma$ だけ動かしたときのFluxを見積もる ( $\Phi^+ = \Phi(p+\delta p)$ ,  $\Phi^- = \Phi(p-\delta p)$ )

$$V_{ij} = \frac{(\phi_i^+ - \phi_i)(\phi_j^+ - \phi_j) + (\phi_i^- - \phi_i)(\phi_j^- - \phi_j)}{2\phi_i\phi_j}$$

- 多変数 (陽子ビームのパラメータなど)

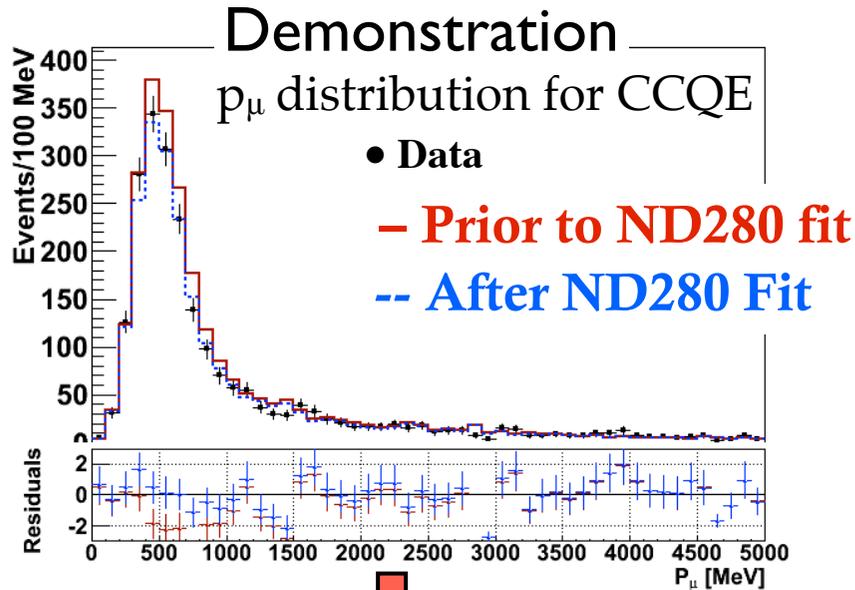
- 変数間の相関を考慮し、各エラーパラメータを  $p \rightarrow p + \mathcal{N}(0, \delta p)$  に従い変化させ ( $\mathcal{N}$  : 正規分布)、その時のFlux ( $\Phi^k$ )から  $V_{ij}$ の成分を計算

$$V_{ij} = \frac{1}{N-1} \sum_k \frac{(\phi_i^k - \bar{\phi}_i)(\phi_j^k - \bar{\phi}_j)}{\bar{\phi}_i\bar{\phi}_j}$$

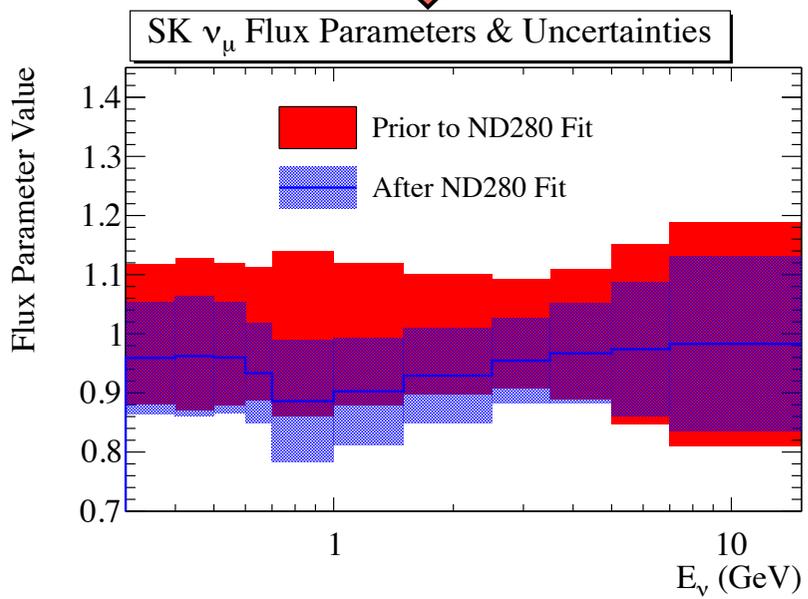


# Fit for ND280 data

## → 振動解析へのInput

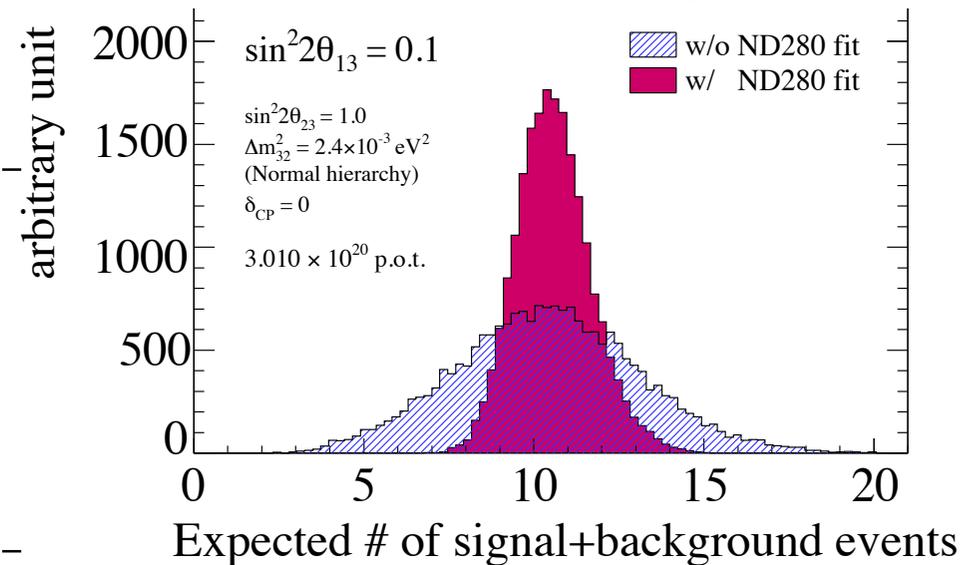


Fit前/後のsyst. parameter



- ( $P_\mu, \cos\theta_\mu$ )分布に対し、構築した $V_b$ を用いてFitを行う
- Fit結果により、新しいflux systematic parameterを会得、そして $V_b$ を再計算
- これらを使って、振動解析へのInput (Likelihoodのparameter)に用いる (昨日の中平さんのTalkより)

Predicted # of  $\nu_e$  (signal +bkg) events at SK

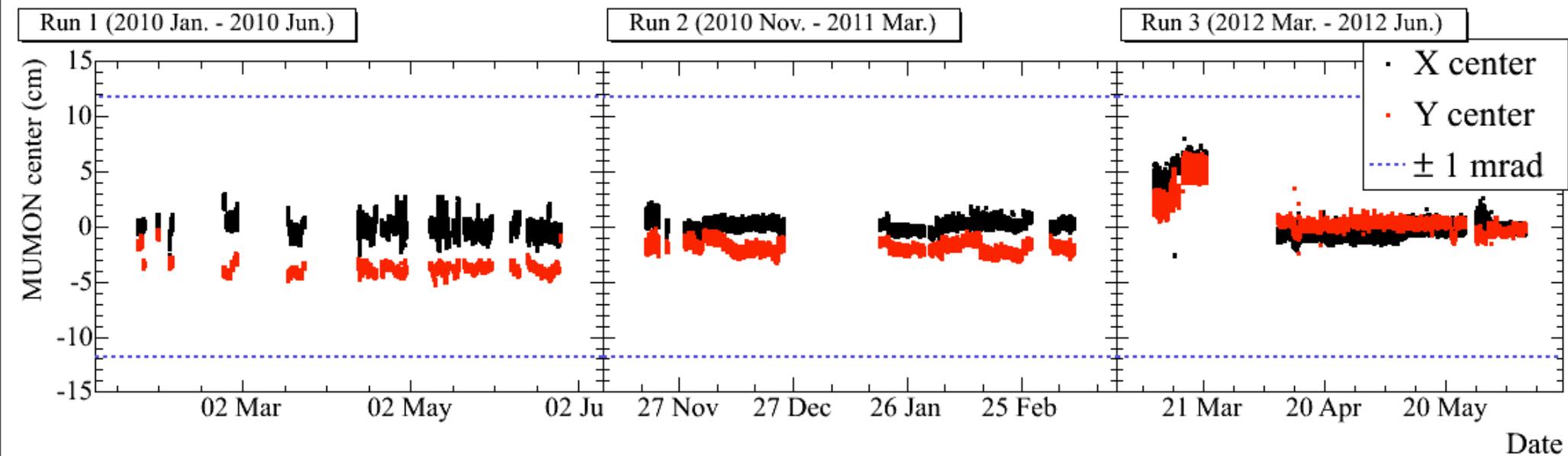


# Summary

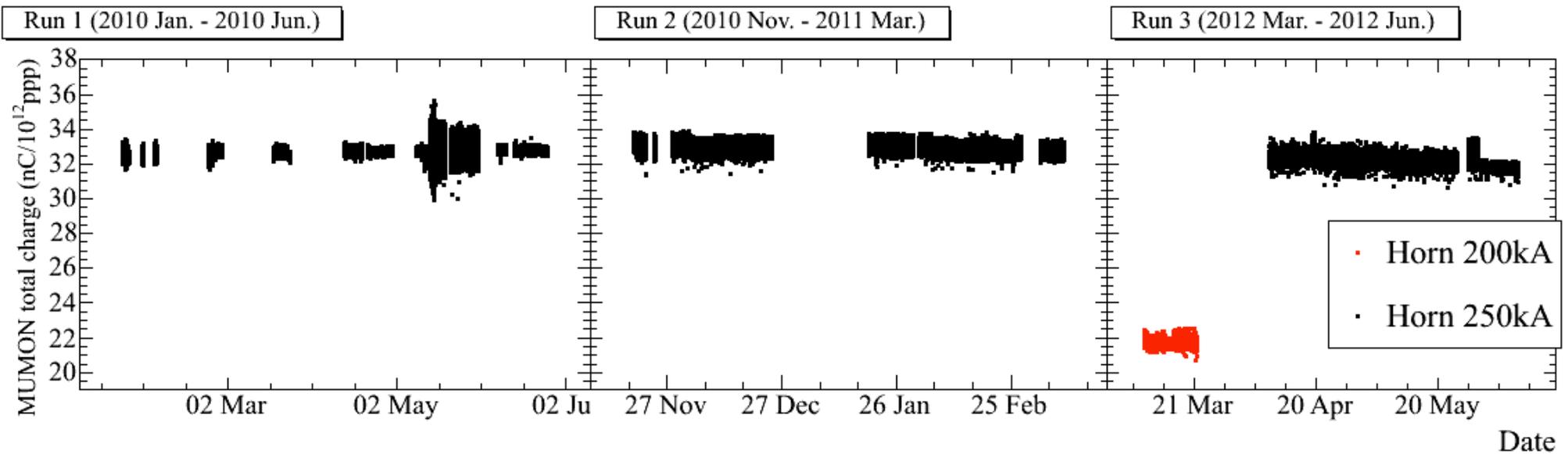
- $\nu$  flux prediction:
  - T2Kでは外部データも用いて、より精密な予測を行っている。
  - 考えられる全ての不定性の原因を考察し、最終的にCovariance Matrix ( $V_b$ )を構築し、ND280データのFitに用いる。
- 振動解析へのInput：
  - ND280のデータを用いてFitを行い、 $\nu$  flux,  $\nu$  cross sectionの不定性に対してあらかじめ抑制をかけている。
  - 新しく求めた各Parameterを用い、Likelihoodに導入して振動解析を行っている。

# Backup

# $\mu$ Profile Center Measured by Muon Monitor

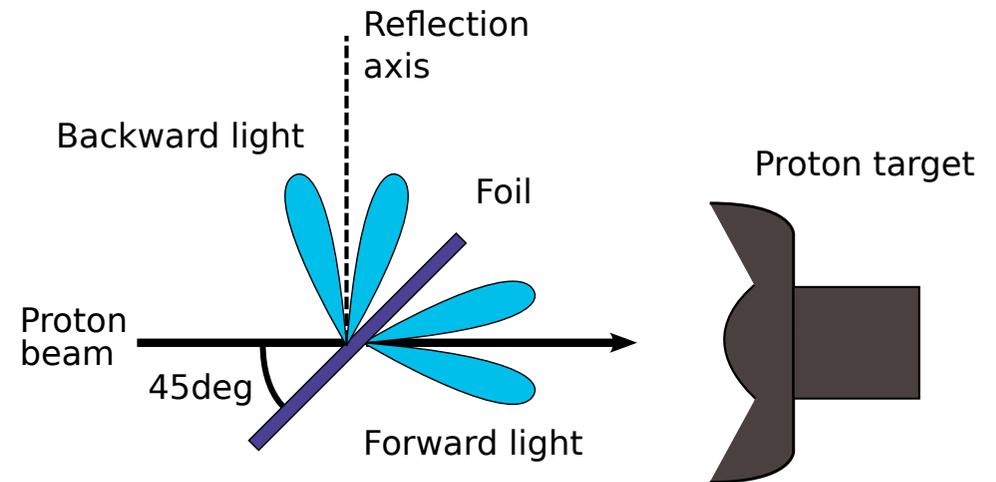
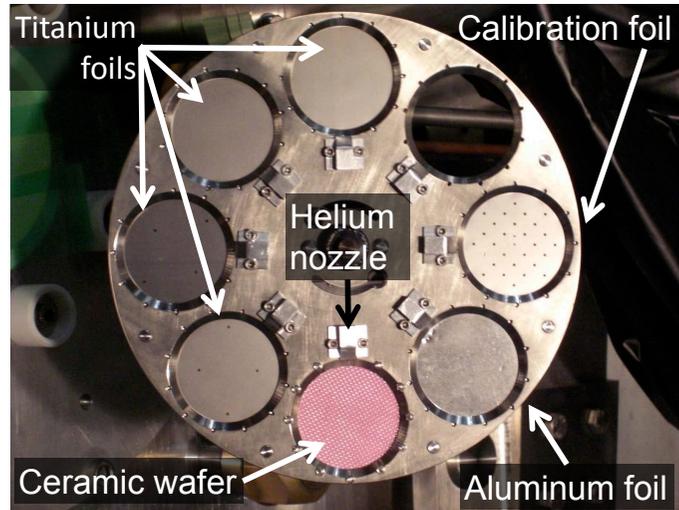


# $\mu$ Yields Measured by Muon Monitor

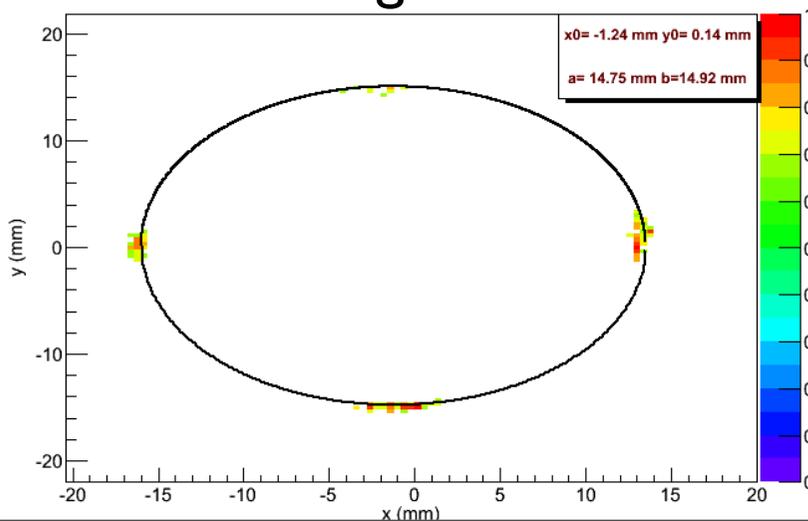


# Baffle Alignment Check by the other monitor

## Optical Transition Radiation Monitor (OTR)



## Baffle Alignment check



## OTR result

	X Scan		Y Scan	
	- direction	+ direction	- direction	+ direction
Fit Result (mm)	-15.99	+13.51	-14.78	15.06

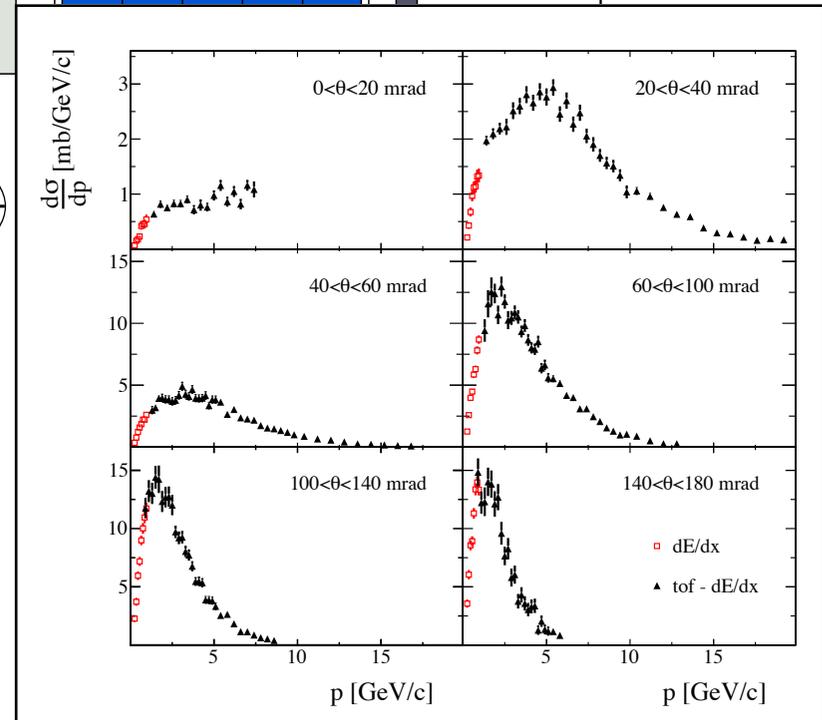
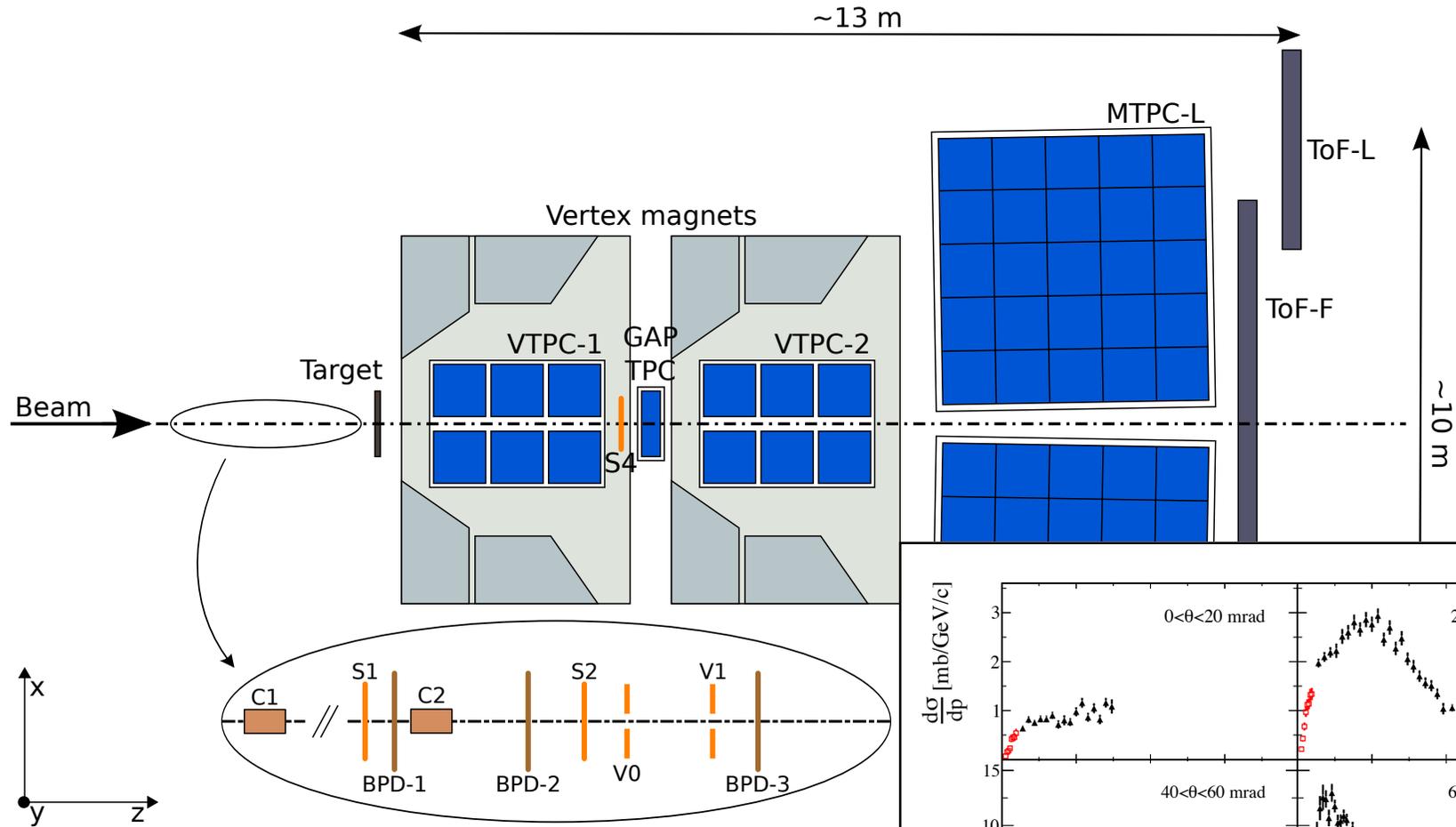
## Muon monitor result

Fit result (mm)	$-15.0 \pm 0.04$	$13.7 \pm 0.04$	$-14.1 \pm 0.03$	$14.9 \pm 0.11$
-----------------	------------------	-----------------	------------------	-----------------

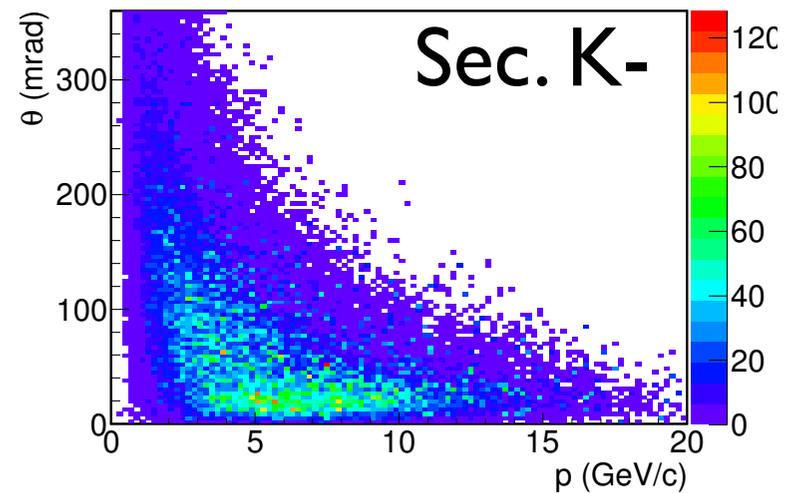
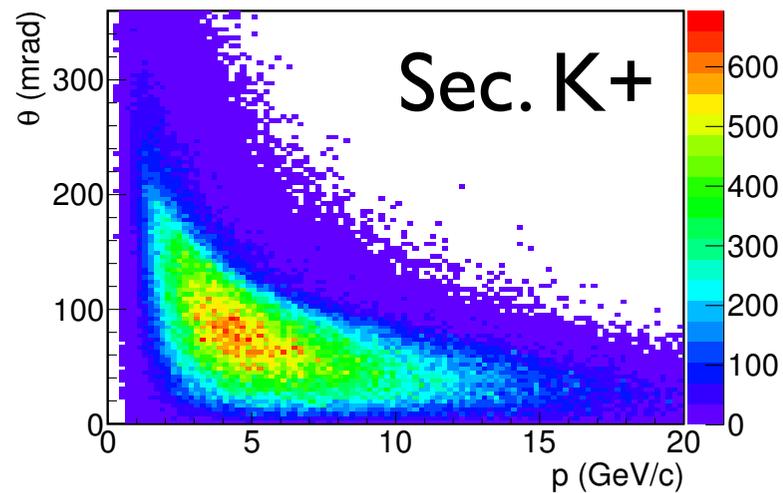
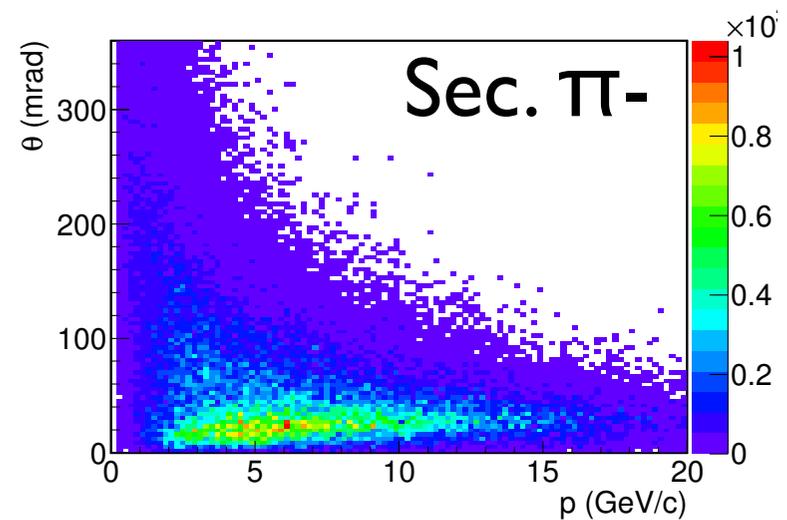
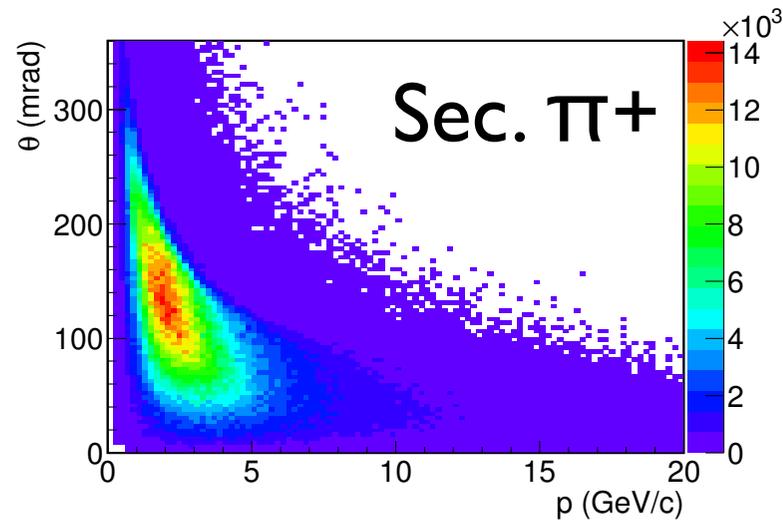
# Hadron Production Tuning

- What are we tuning ?
  - Production x-sec (A1) :  $\sigma_{\text{prod}} = \sigma_{\text{inel.}} - \sigma_{\text{qe}}$ 
    - $\sigma_{\text{inel}}$  : inelastic interaction x-sec
    - $\sigma_{\text{qe}}$  : quasi-elastic interaction x-sec
  - Multiplicity :  $d^2n/dpd\theta = 1/\sigma_{\text{prod}} \cdot d^2\sigma/dpd\theta$ 
    - Pion production
    - Kaon production
    - These multiplicities are tuned by using experimental data
      - ✓ NA61, etc..

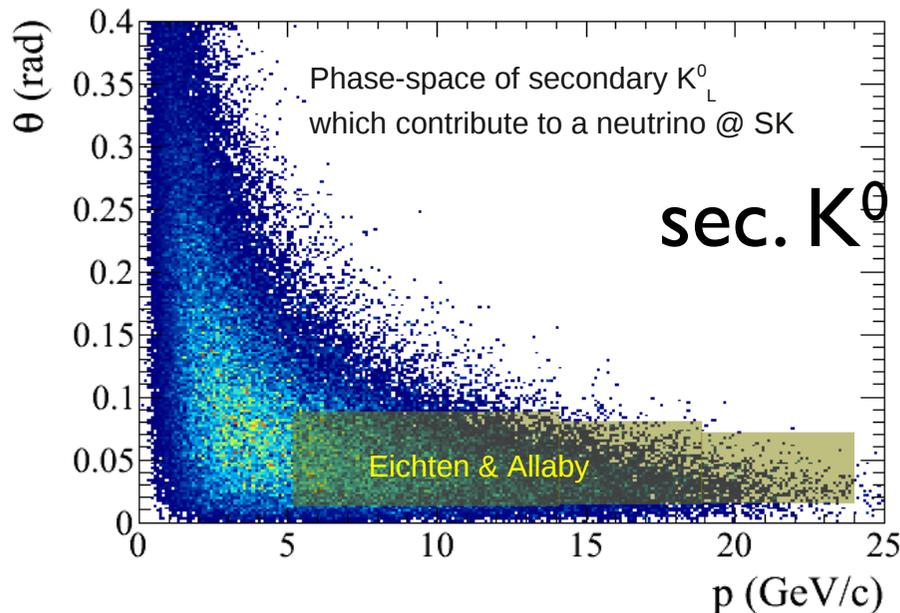
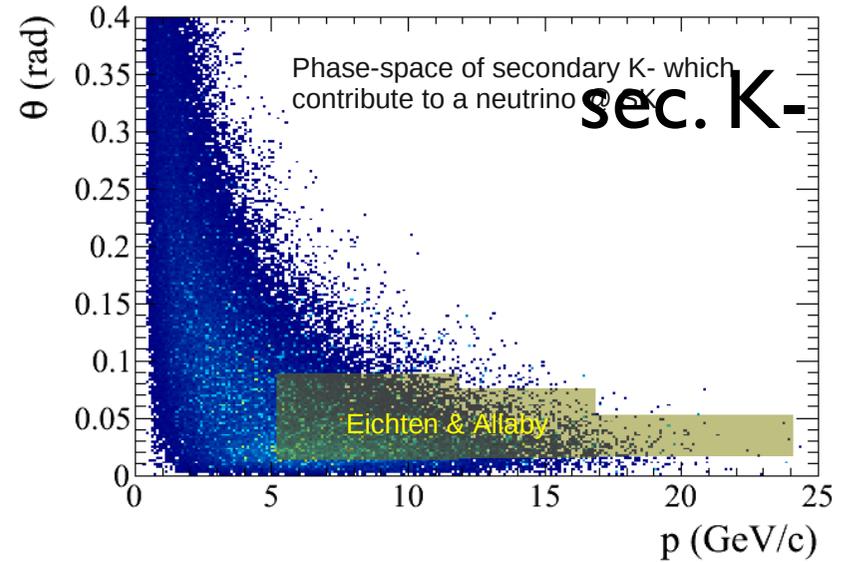
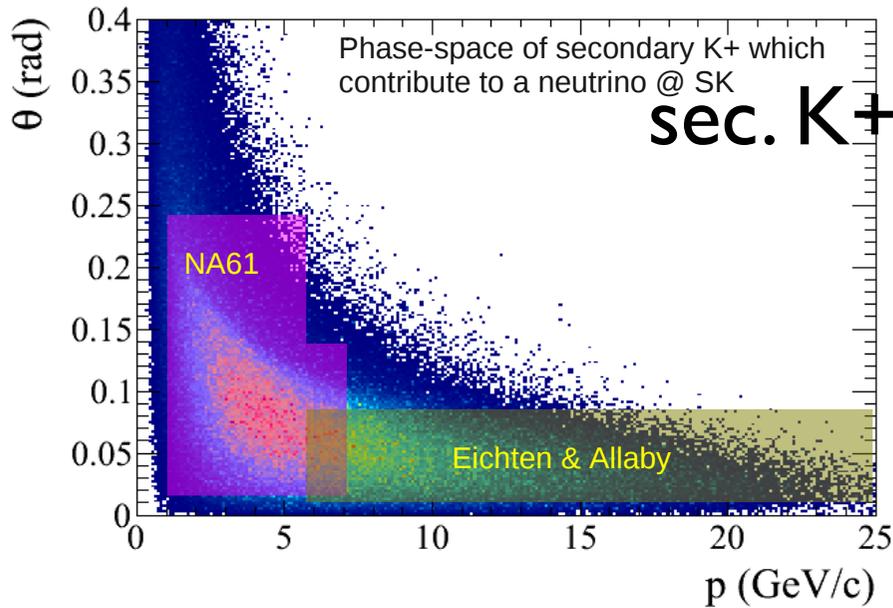
# CERN NA61



# p- $\theta$ distribution of parent particles whose daughters go to Super-K



# Available p- $\theta$ coverage of data for Kaon tuning

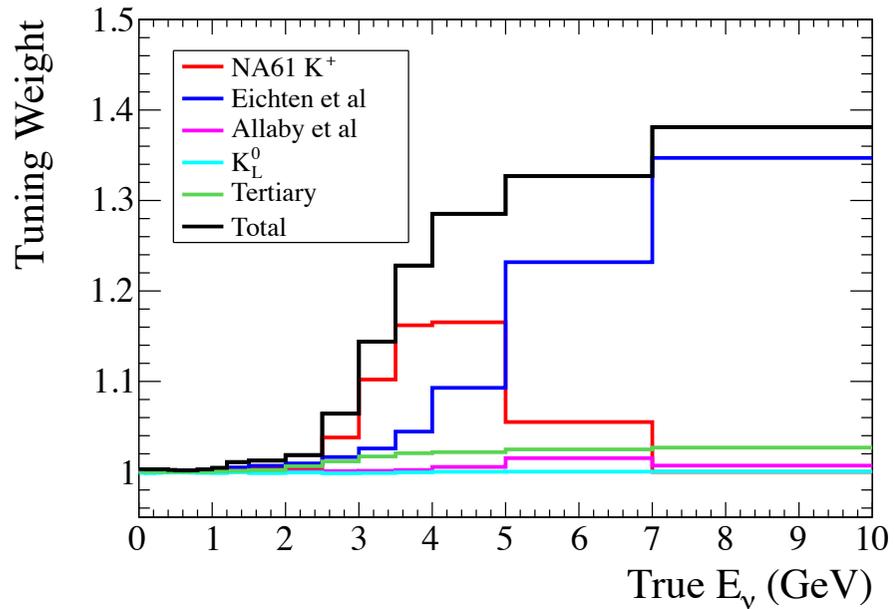


QPM (Quark Parton Model)

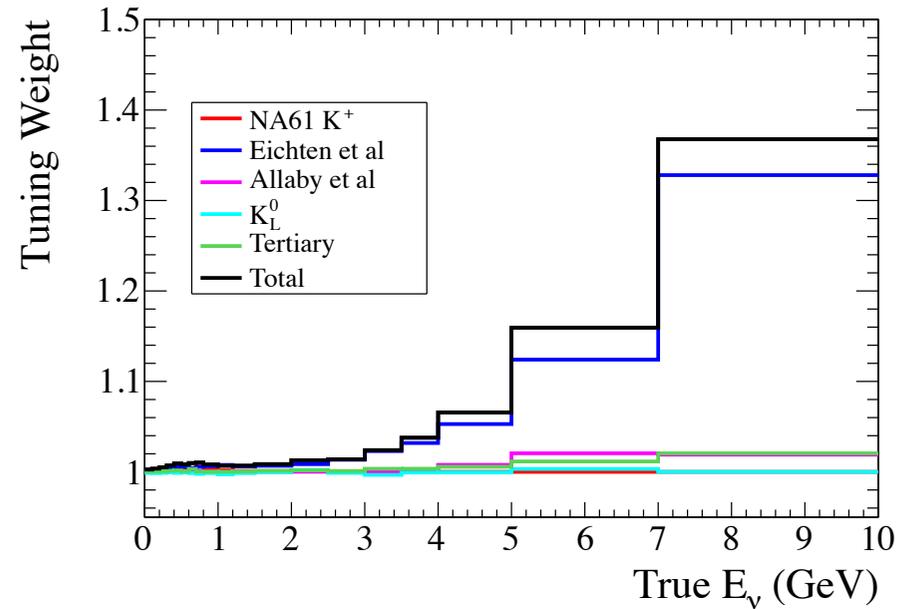
$$K_L^0 = \frac{1}{4}(K^+ + 3K^-)$$

Experiment	Beam (GeV/c)	Target	Target Length (cm)	Particles
Allaby <i>et al.</i> [6]	19.2	Be	$\sim 0.5$	$K^\pm$
Eichten <i>et al.</i> [7]	24	Be	?	$K^\pm$
NA61 [8]	31	C	2.0	$K^+$

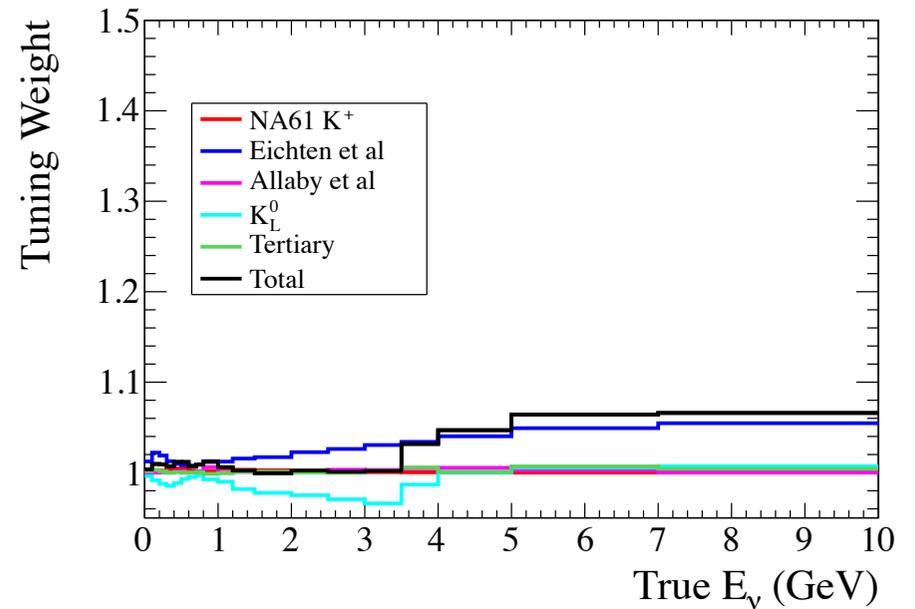
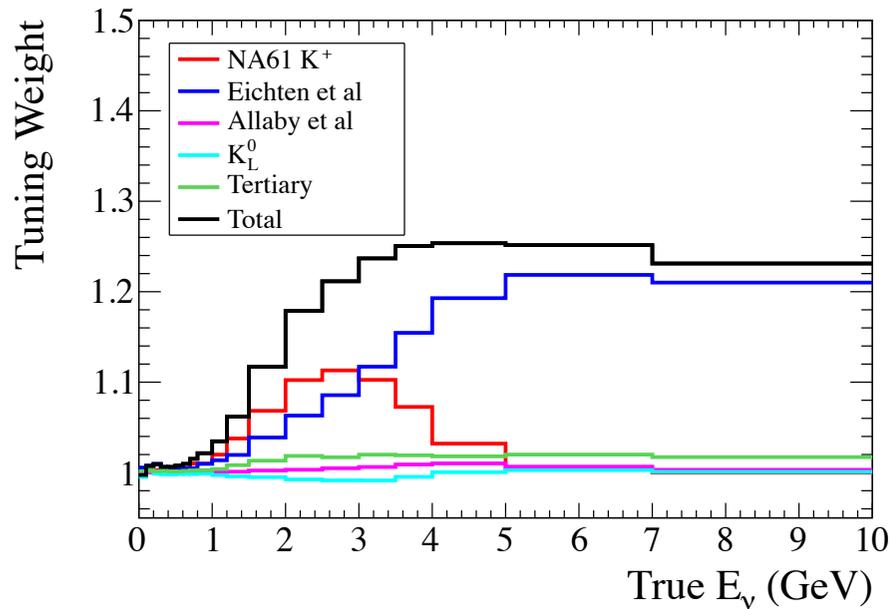
# Kaon tuning result



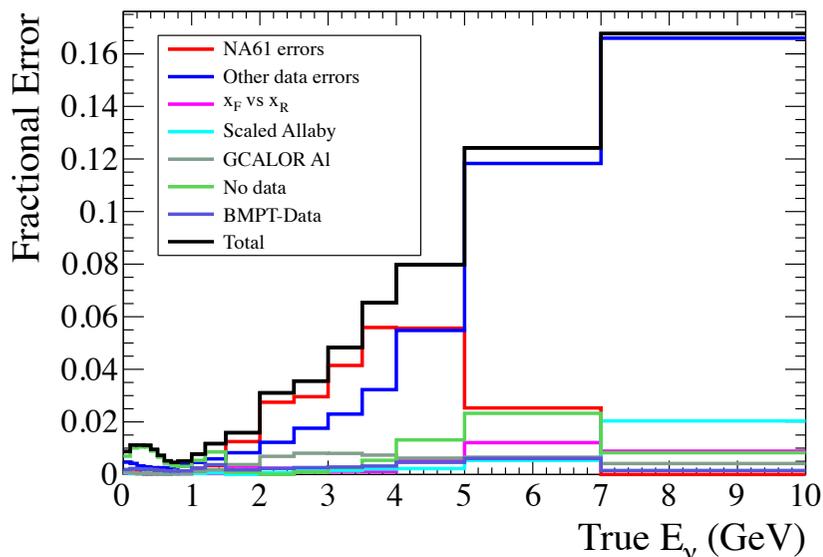
(a) Tuning weights for  $\nu_\mu$



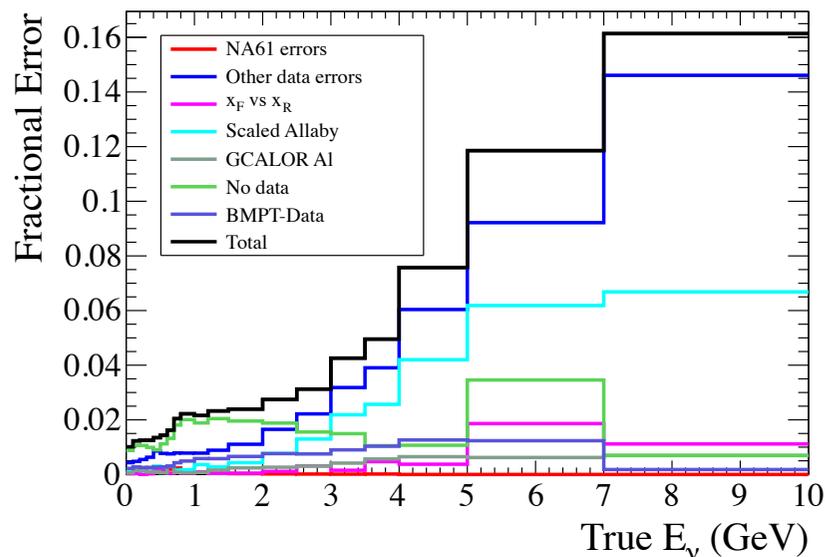
(b) Tuning weights for  $\bar{\nu}_\mu$



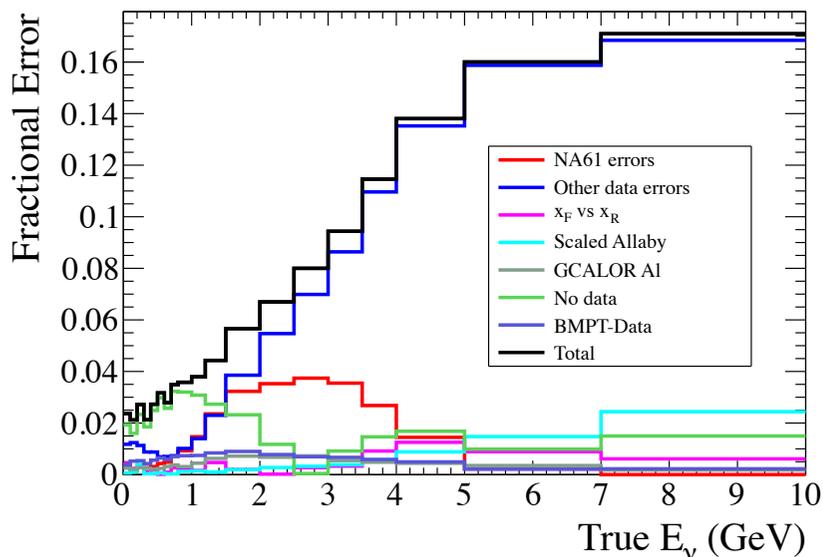
# Kaon tuning uncertainty



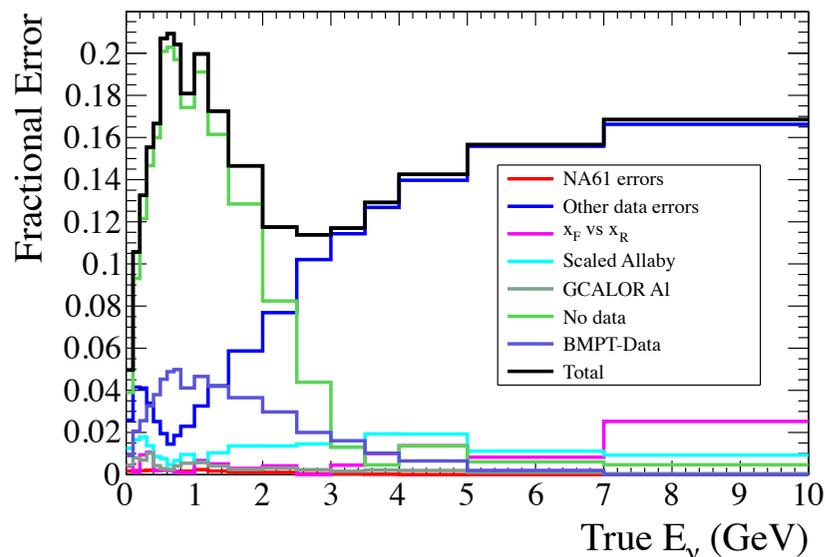
(a) Uncertainty on  $\nu_\mu$



(b) Uncertainty on  $\bar{\nu}_\mu$

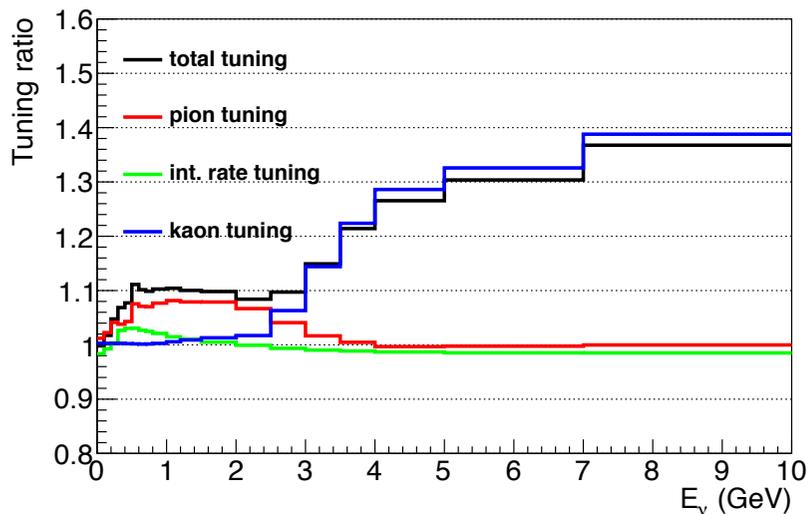


(c) Uncertainty on  $\nu_e$

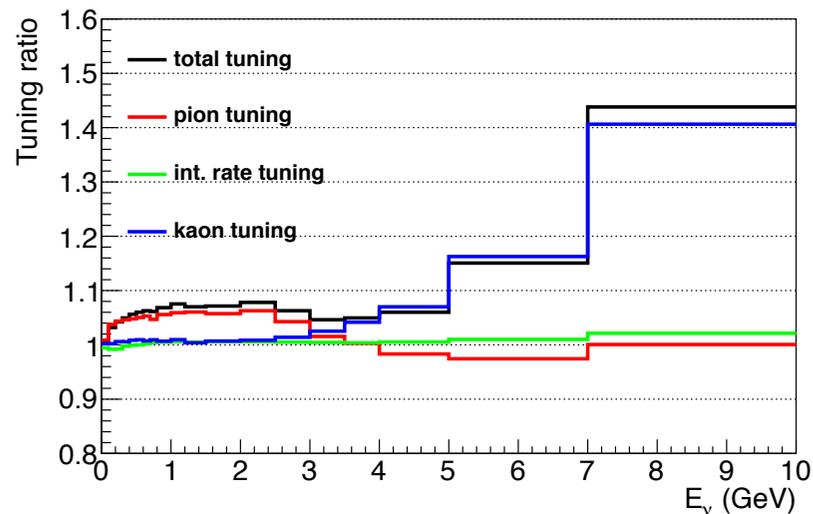


(d) Uncertainty on  $\bar{\nu}_e$

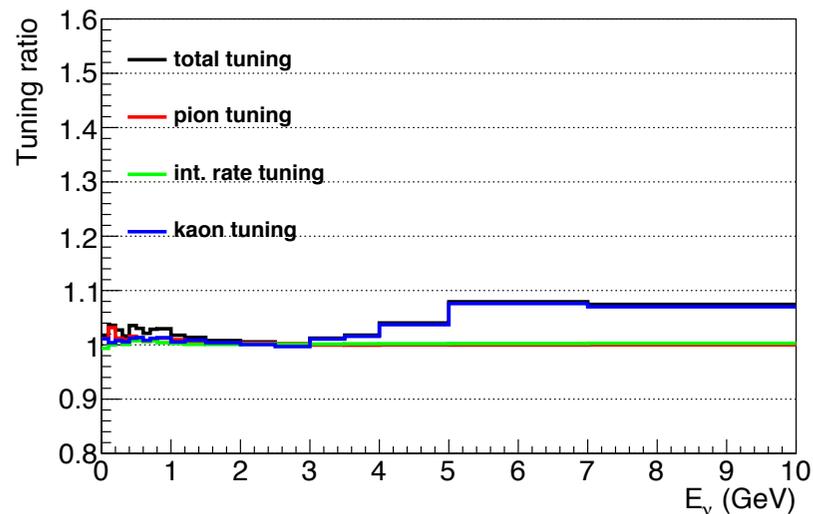
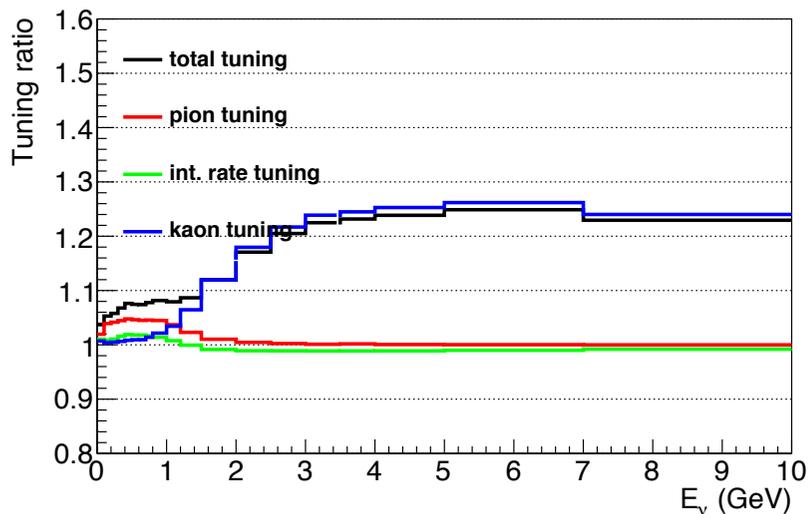
# Total tuning result



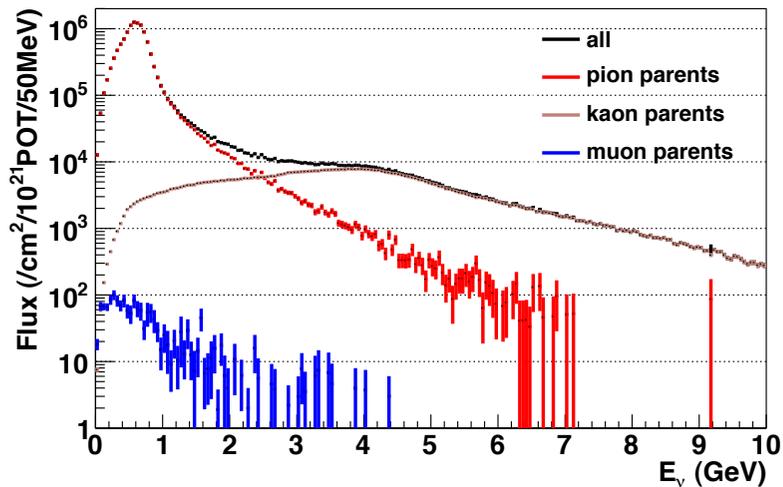
(a)  $\nu_\mu$  flux



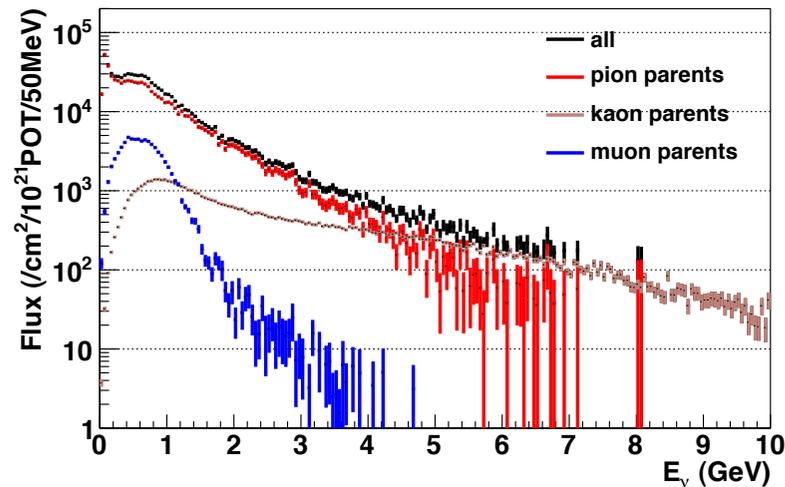
(b)  $\bar{\nu}_\mu$  flux



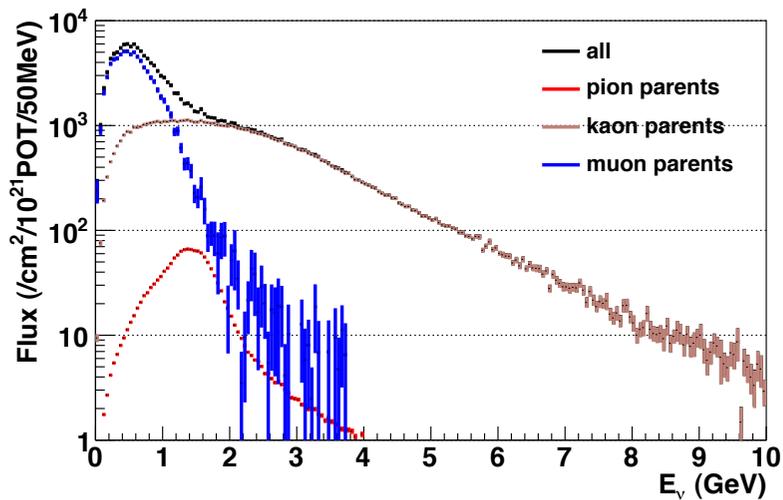
# Tuned $\nu$ Flux at Super-K



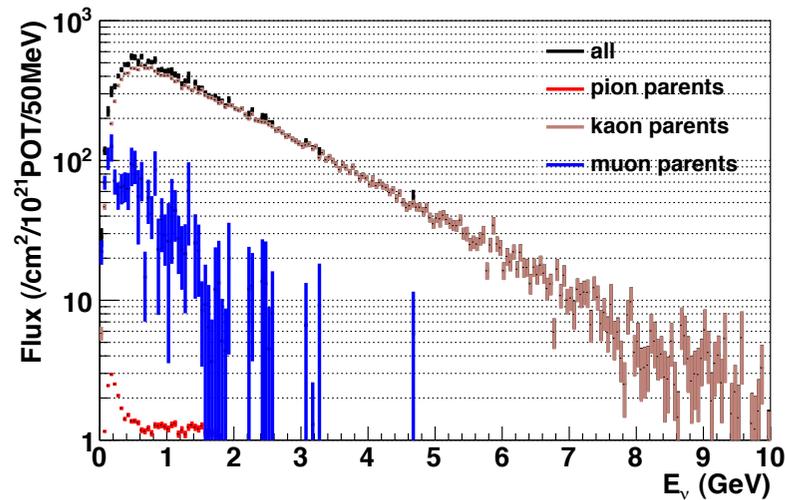
(a)  $\nu_\mu$  flux



(b)  $\bar{\nu}_\mu$  flux

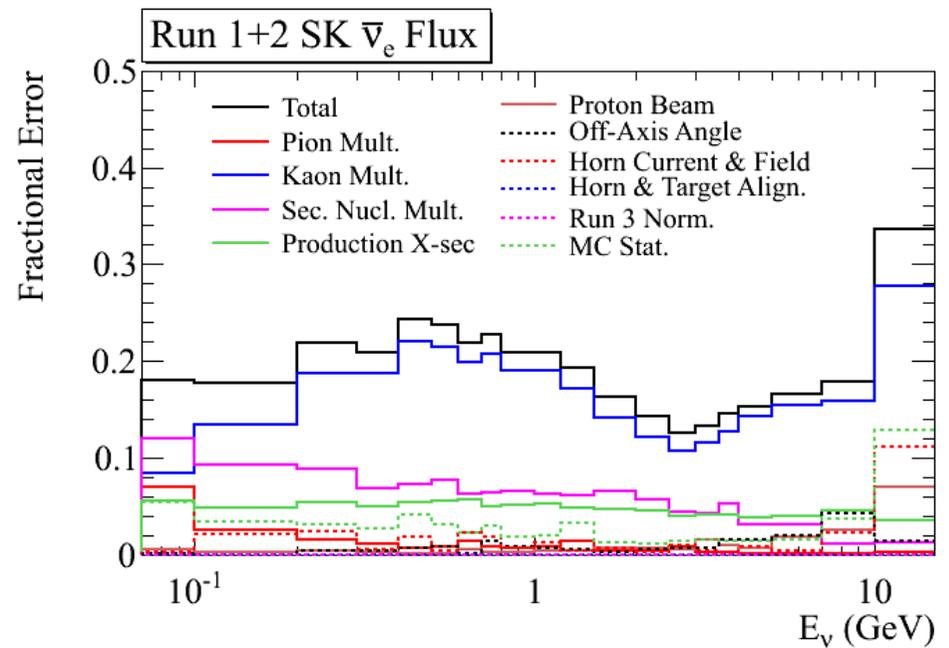
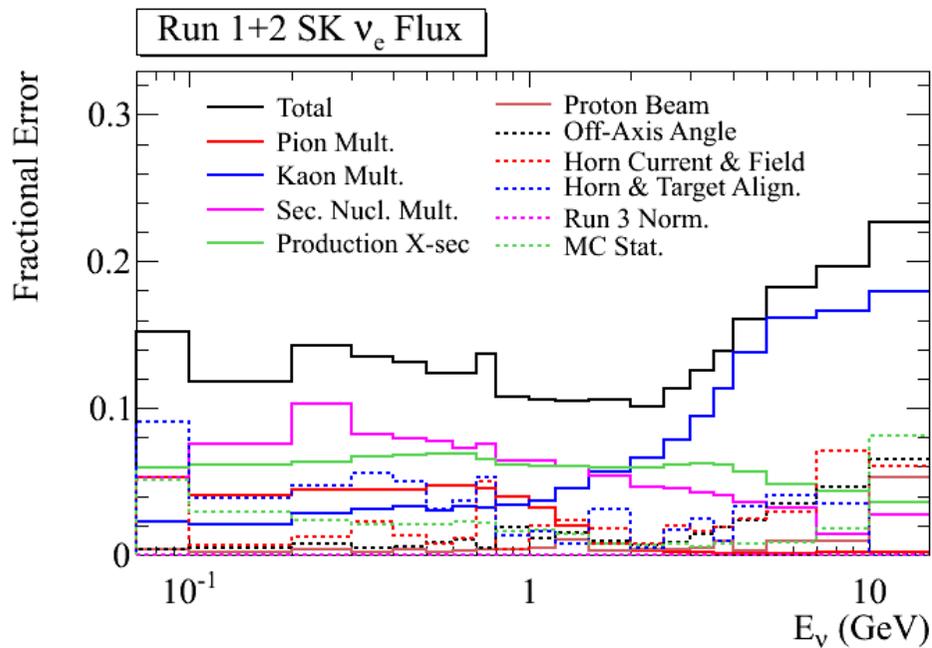
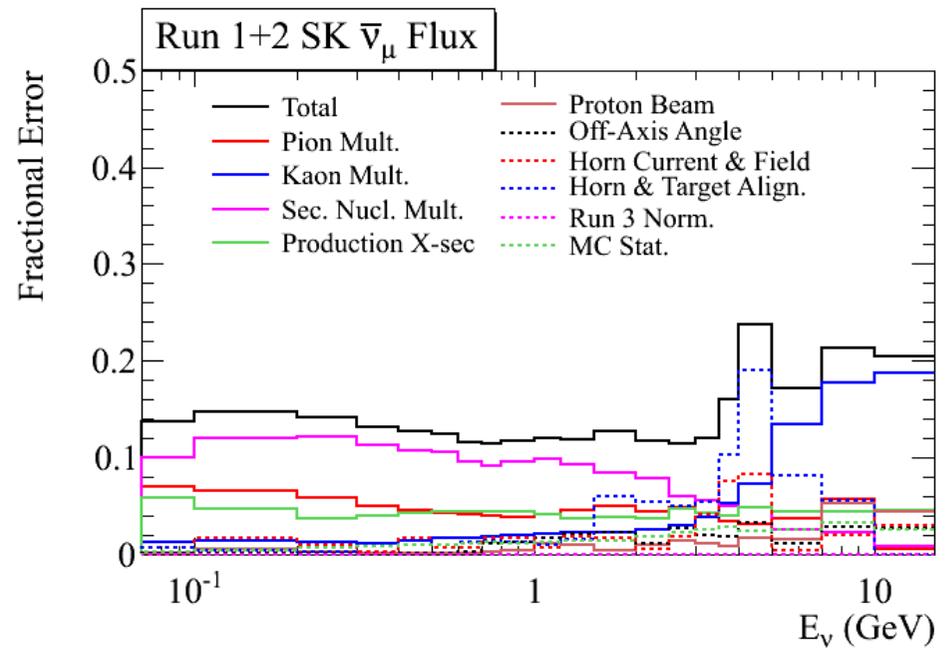
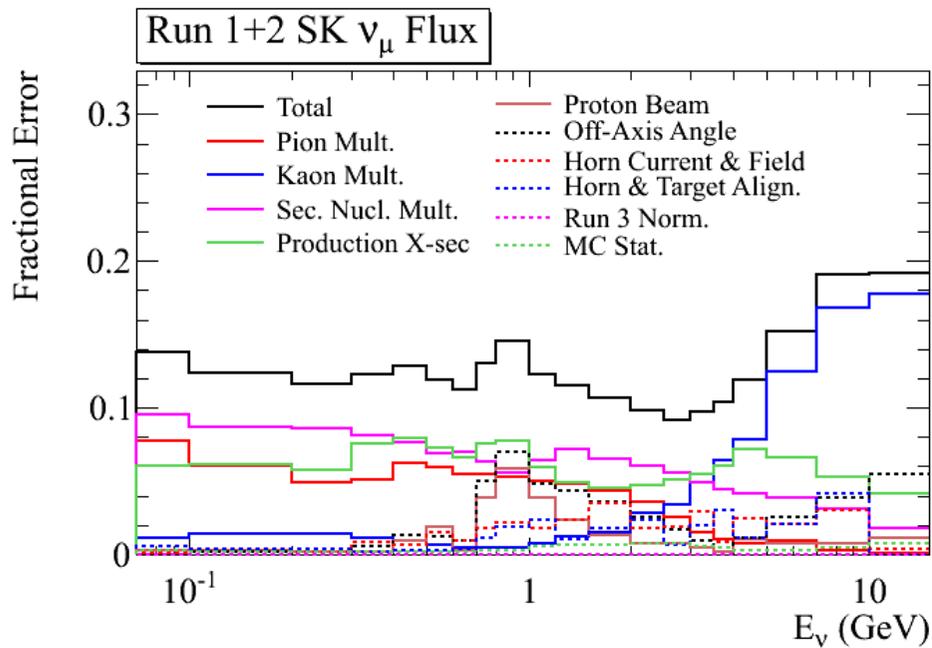


(c)  $\nu_e$  flux

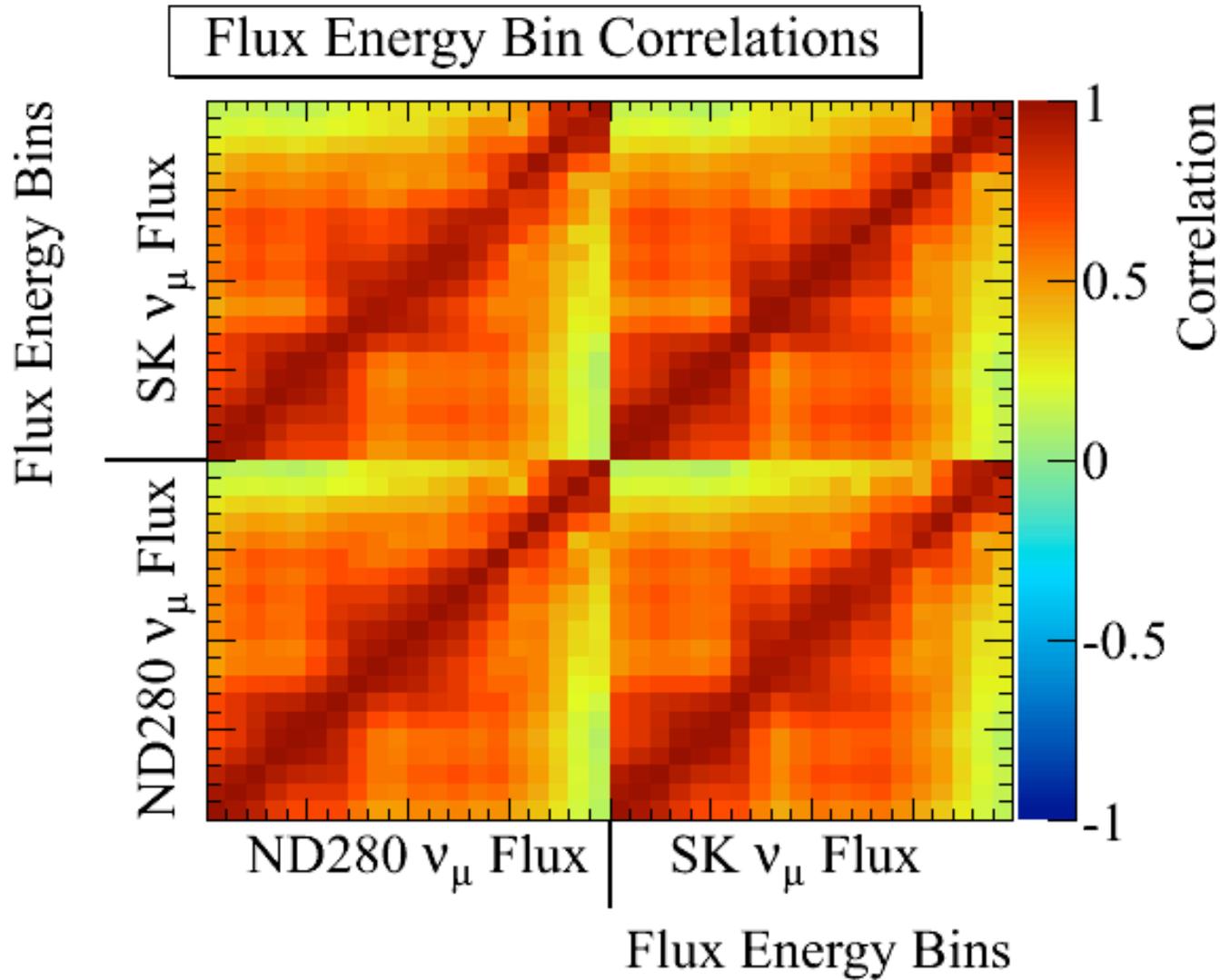


(d)  $\bar{\nu}_e$  flux

# $\nu$ Flux uncertainties



# SK - ND280 $\nu_\mu$ Flux 相関



# Correlation matrix after ND280 fitting

