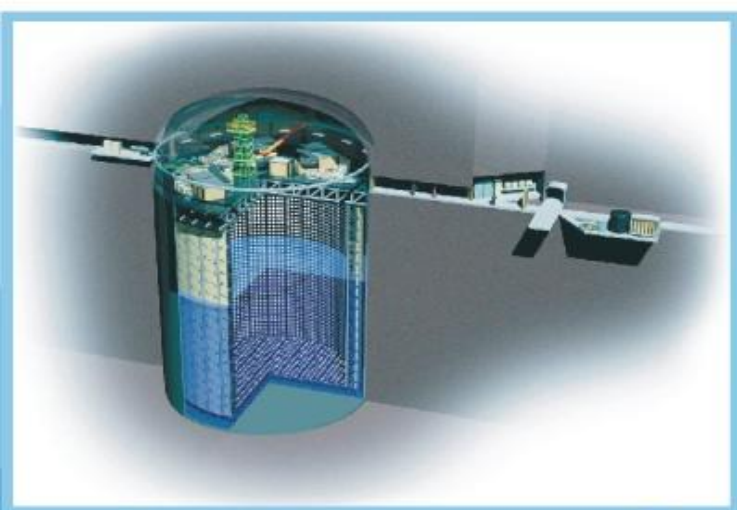


# 加速器ニュートリノ振動解析における 多地点間のフラックス相関の効率的な取り扱い

東北大学理学研究科

**石田健浩**, 市川温子, Lukas Berns  
and T2K Collaboration



Super-Kamiokande  
(ICRR, Univ. Tokyo)

Neutrino Facility  
at J-PARC  
(KEK-JAEA, Tokai)

295km

$\nu_\mu$

$\nu_e$

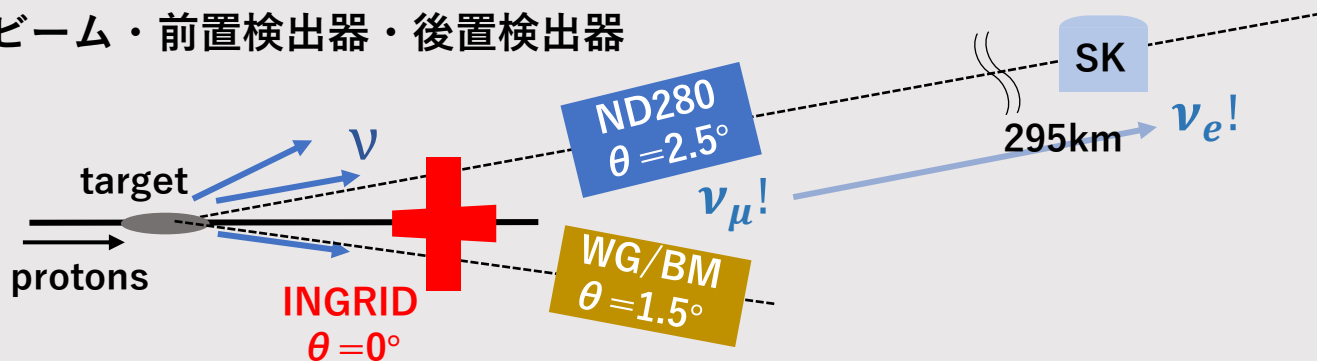
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$   
 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$   
ニュートリノ振動は  
CP 対称性を破るか？



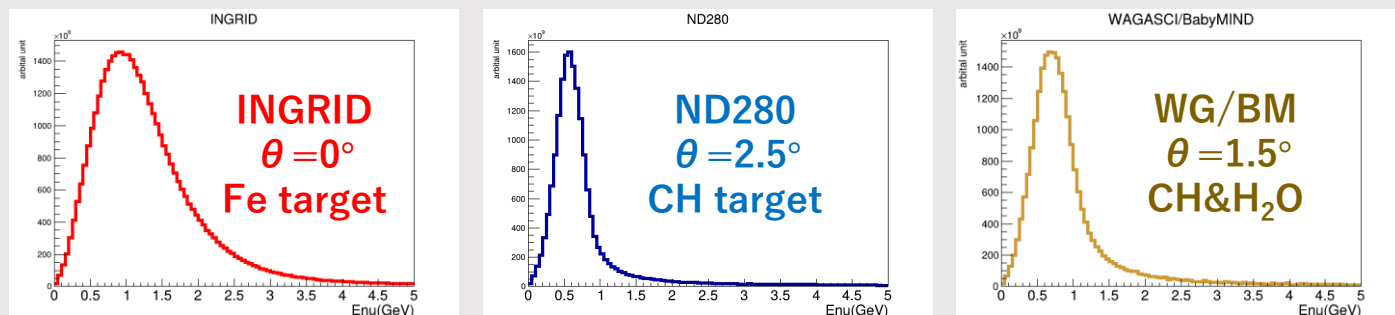
# T2K の特徴・構成要素

T2Kの主要要素

ビーム・前置検出器・後置検出器



ビームの中心軸からずれた位置に検出器を置き、都合のいいスペクトルのニュートリノを取り出す



高エネルギーのイベントはエネルギー測定が困難だが、ビーム軸に対する位置に応じてスペクトルの形が変わることをエネルギー測定精度の向上に利用できる

Phys. Rev. D 87, 012001

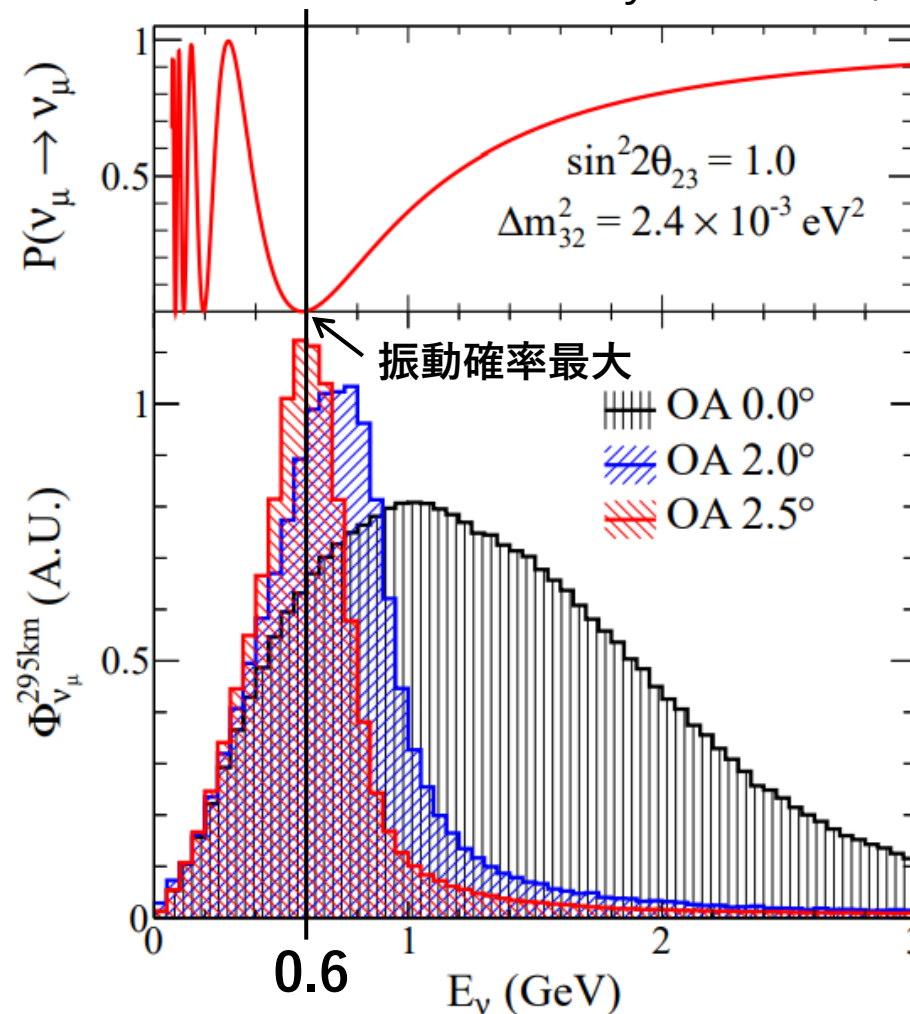
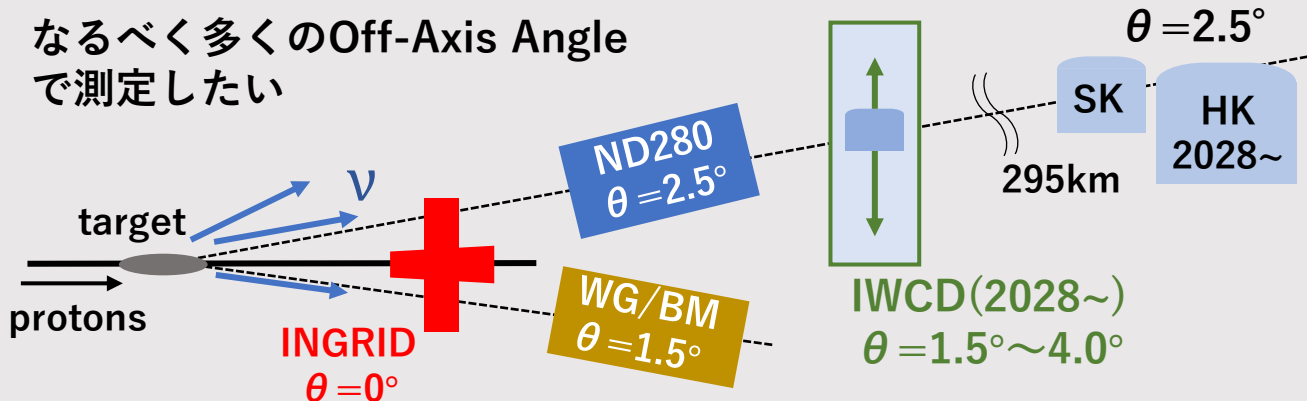


FIG. 1: Muon neutrino survival probability at 295 km and neutrino fluxes for different off-axis angles.

# Hyper-Kamiokande実験へのアップグレード

なるべく多くのOff-Axis Angle  
で測定したい

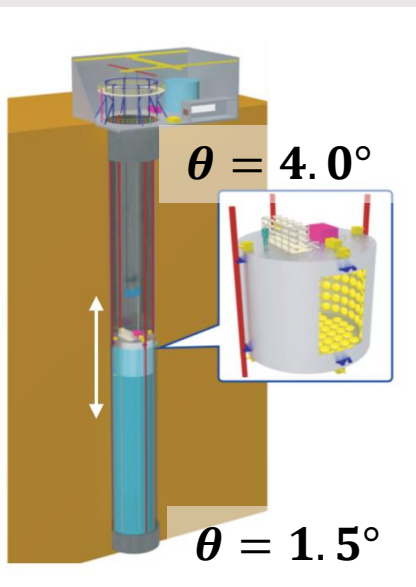


- Super-K  $\rightarrow$  Hyper-K (有効体積8倍)
- J-PARCニュートリノビームの増強
- ND280のアップグレード
- IWCDの建設

## IWCD (Intermediate Water Cherenkov Detector)

直径10m高さ8mの検出器で振動前のニュートリノを測定  
上下に動くことでOAAを自由に決められる( $1.5^\circ \sim 4.0^\circ$ )

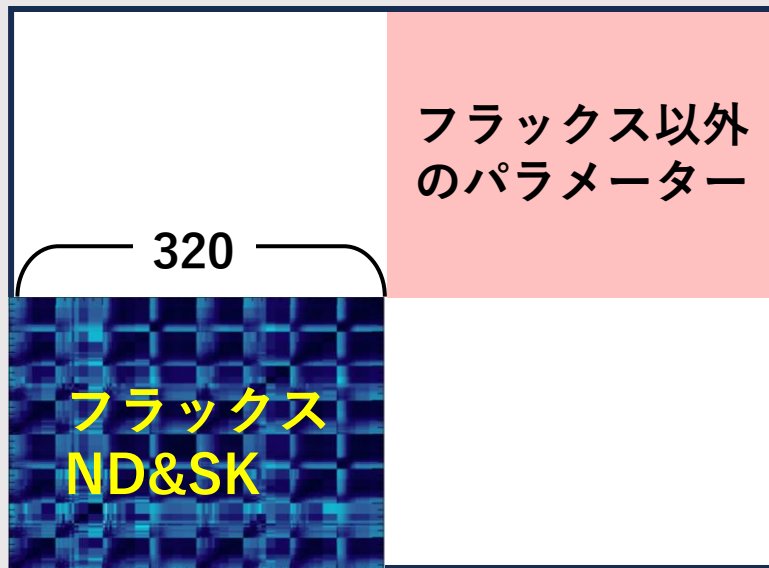
測定点が増えることでニュートリノのエネルギー測定精度が向上  
しかし解析に加える上で計算コストに課題  $\rightarrow$  本研究



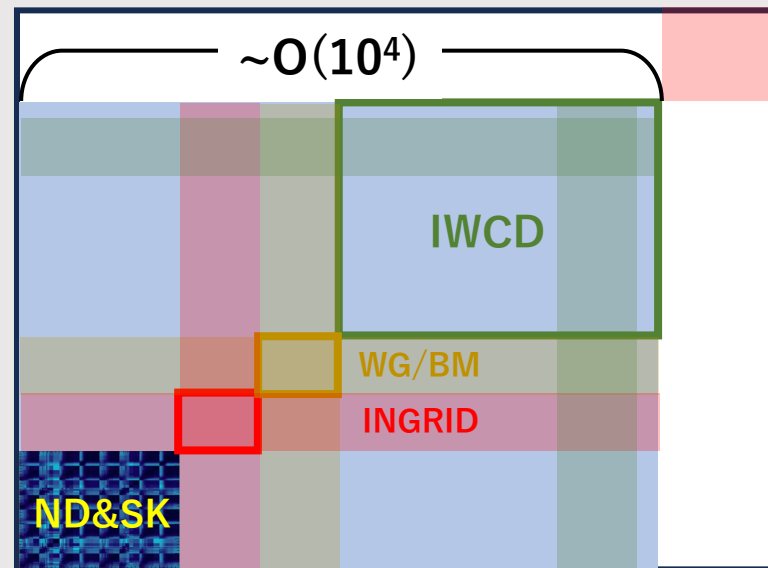
# HK実験で予測される深刻な計算コストの問題

測定点が増える=IWCDが動くたびに解析のパラメーターが増える  
特に誤差の情報の取り扱いについて、**相関を含む2次元情報が必要**

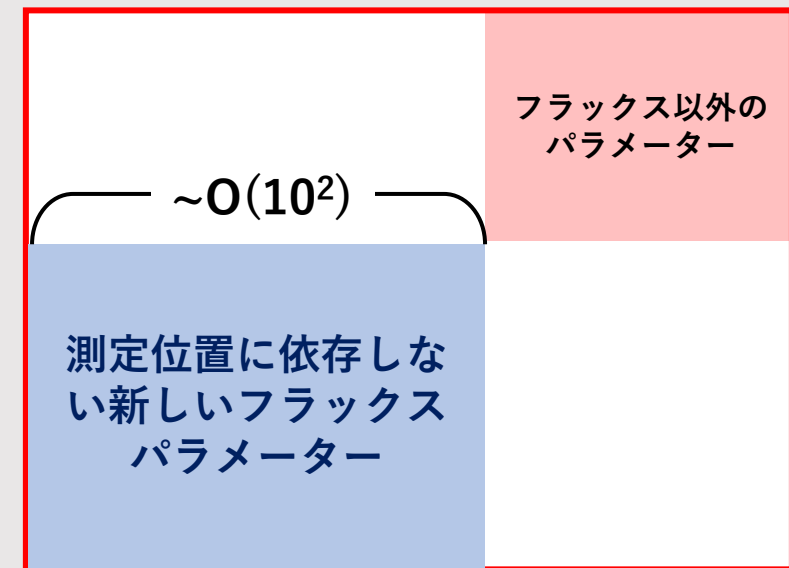
**測定位置に依存しないパラメーターを使うことで、測定点が増えた際の計算コストを抑える**



現在の共分散行列



HK時代に共分散行列が巨大化すると予想される



本研究で変数の数を減らすことを目指す

# 具体的な解決策とその検証

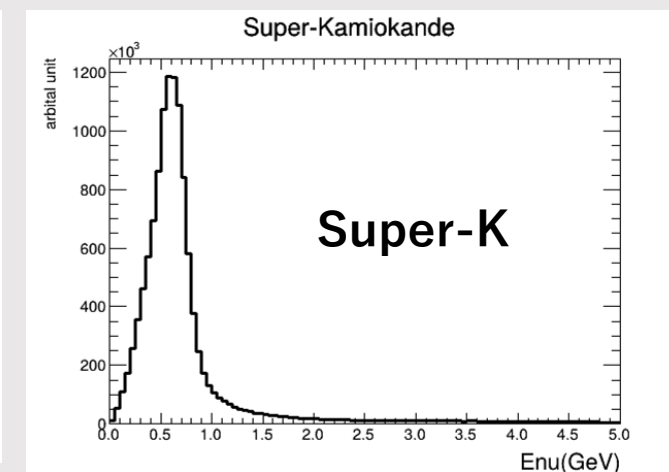
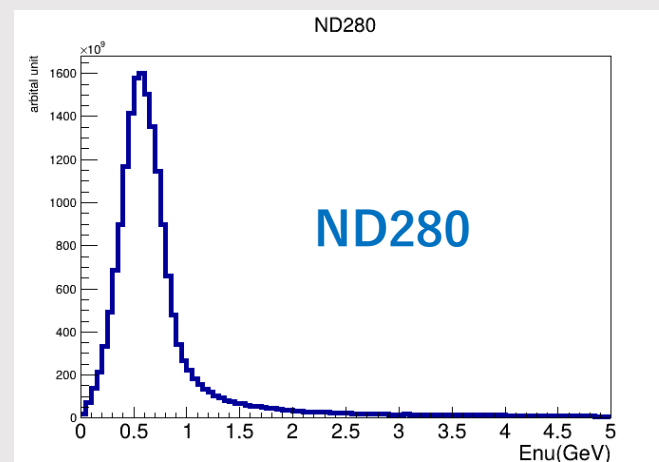
T2K実験の解析の流れに沿って解説

# T2K実験 解析の流れ

1. 各検出器におけるニュートリノフラックスの予測
2. 前置検出器によるフラックスと反応断面積の同時フィット
3. 後置検出器でのイベント分布予測
4. 振動パラメーターの決定

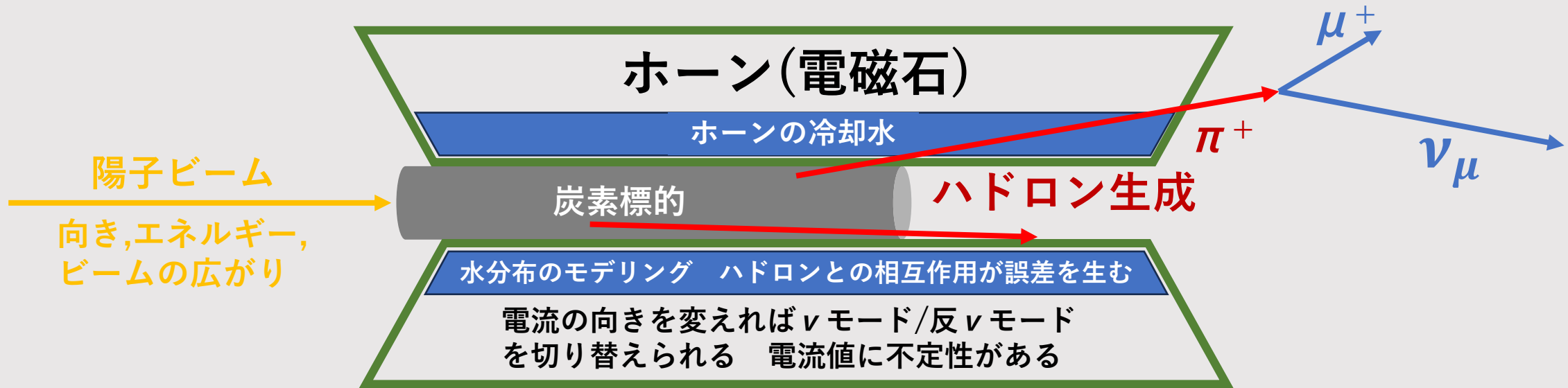
# T2K実験 解析の流れ

1. 各検出器におけるニュートリノフラックスの予測
2. 前置検出器によるフラックスと反応断面積の同時フィット
3. 後置検出器でのイベント分布予測
4. 振動パラメーターの決定



# 1. ニュートリノフラックスの予測 ニュートリノ生成系

T2Kでは炭素標的に陽子を照射し、パイオンなどのハドロンを生成、それらが崩壊しニュートリノを放出する



新しい解析では、フラックスに直す前のパラメーターを使う  
→これらの誤差・相関の情報量は検出器の位置に依存しない  
最も複雑な要素である**ハドロン生成反応**の取り扱いがポイント

# 1. フラックス予測 ハドロン生成反応の不定性

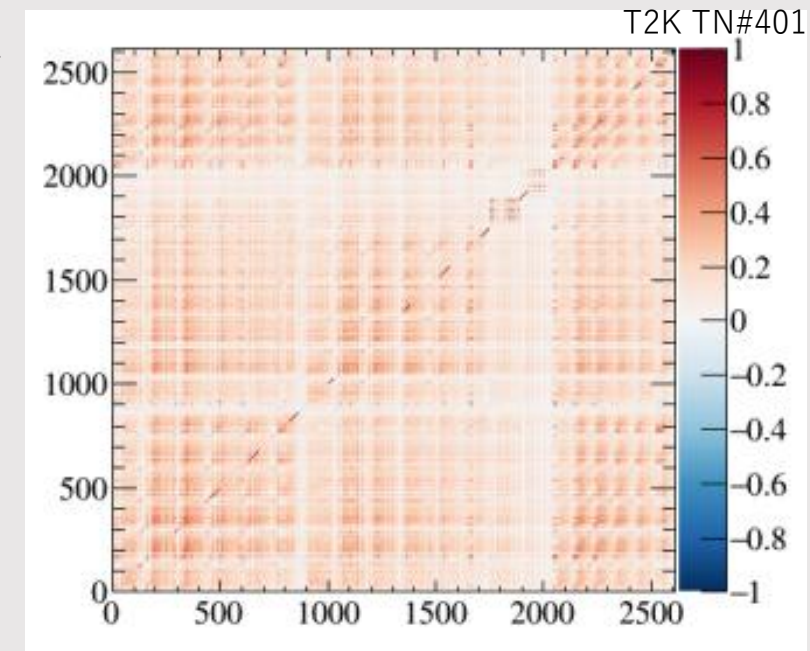
ハドロン生成反応は主要な系統誤差の一つだった

→T2Kの陽子ビームと炭素標的を再現した実験（NA61/SHINE）により、大きく制限された

しかしNA61/SHINEの結果を直接利用するため、  
新手法でも変数が非常に多い(2609個)

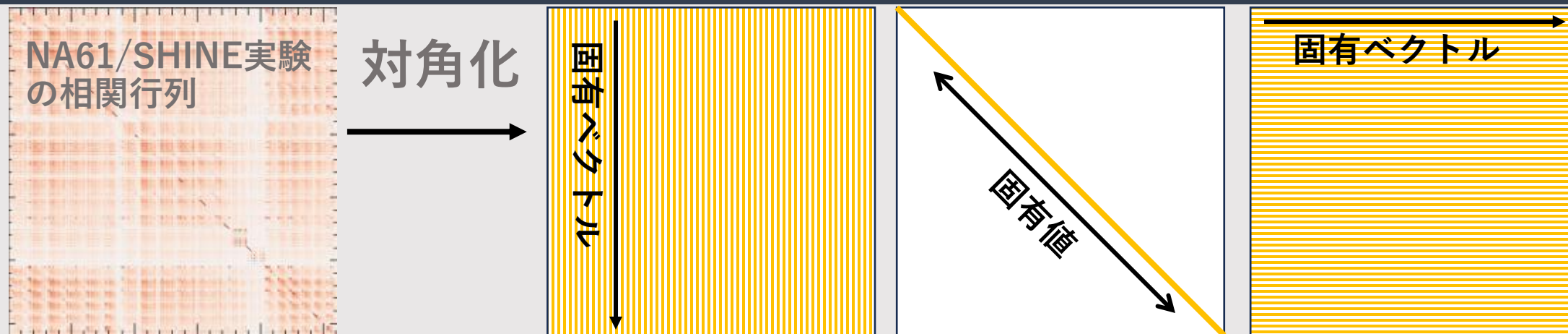
これにも相関をまとめた相関行列がある

→NA61/SHINEの誤差情報を減らせないか？



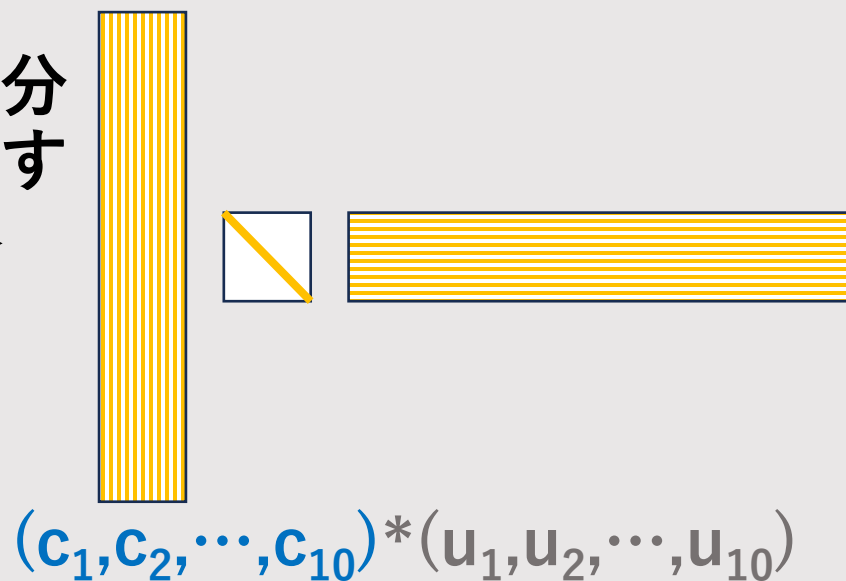
NA61/SHINE実験の相関行列

# NA61/SHINE実験の不定性 計算量を減らす方法



$$(x_1, x_2, \dots, x_{2609}) \longrightarrow (c_1, c_2, \dots, c_{2609}) * (u_1, u_2, \dots, u_{2609})$$

重要な部分  
だけを残す

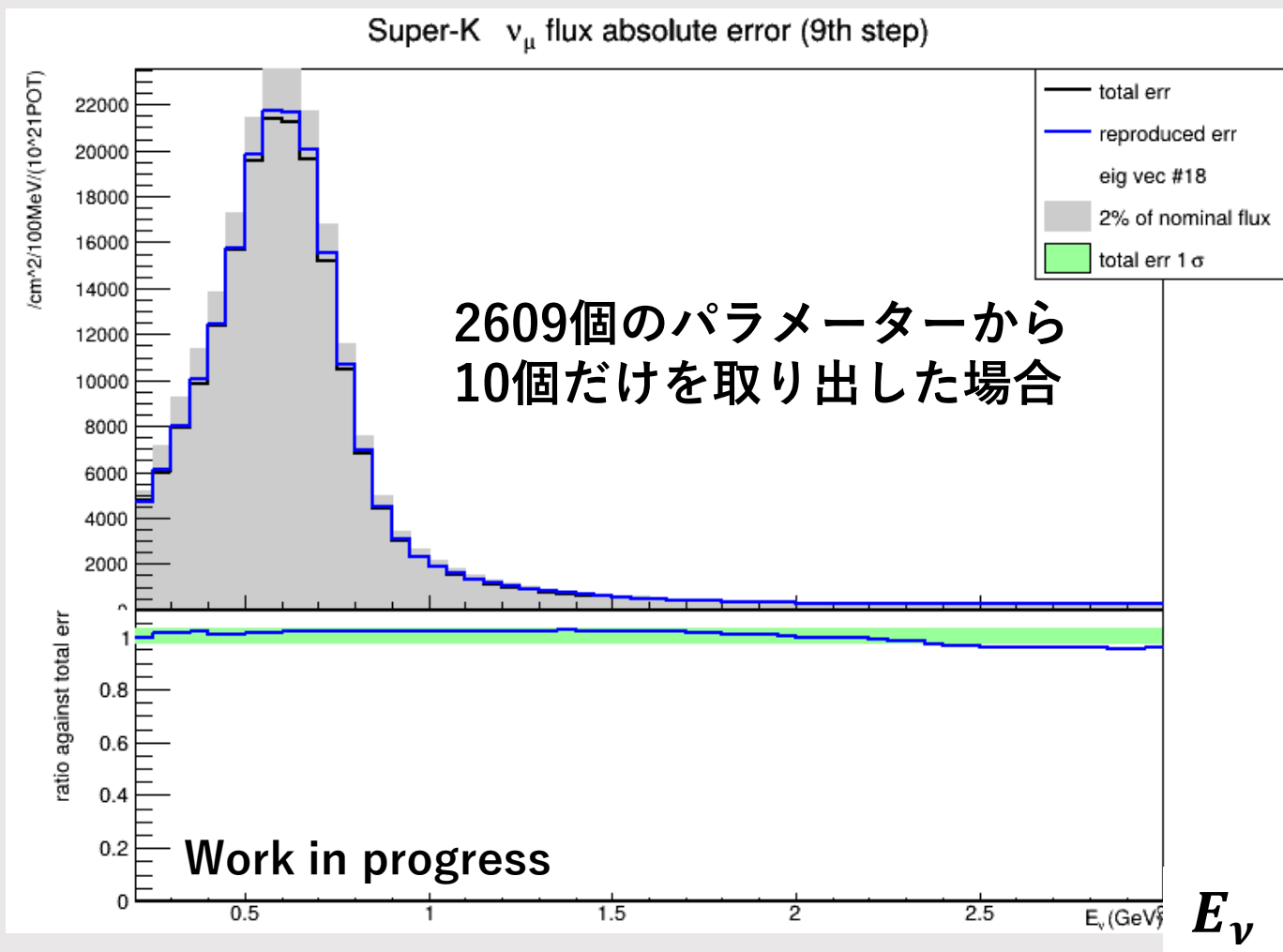


1.固有値展開で**無関係の新しい変数**を作る

2.影響が大きいものだけを  
取り出し、誤差の情報  
量を2609×2609から  
2609×10程度に減らす

# 1. ニュートリノフラックスの予測

新しいパラメーターでニュートリノフラックスを再現する  
特に誤差を再現できることを確認



黒: 再現すべき誤差 (total誤差)  
MC simulationにより算出

灰: 2%にスケールしたフラックス  
(誤差のスケールを見るため)

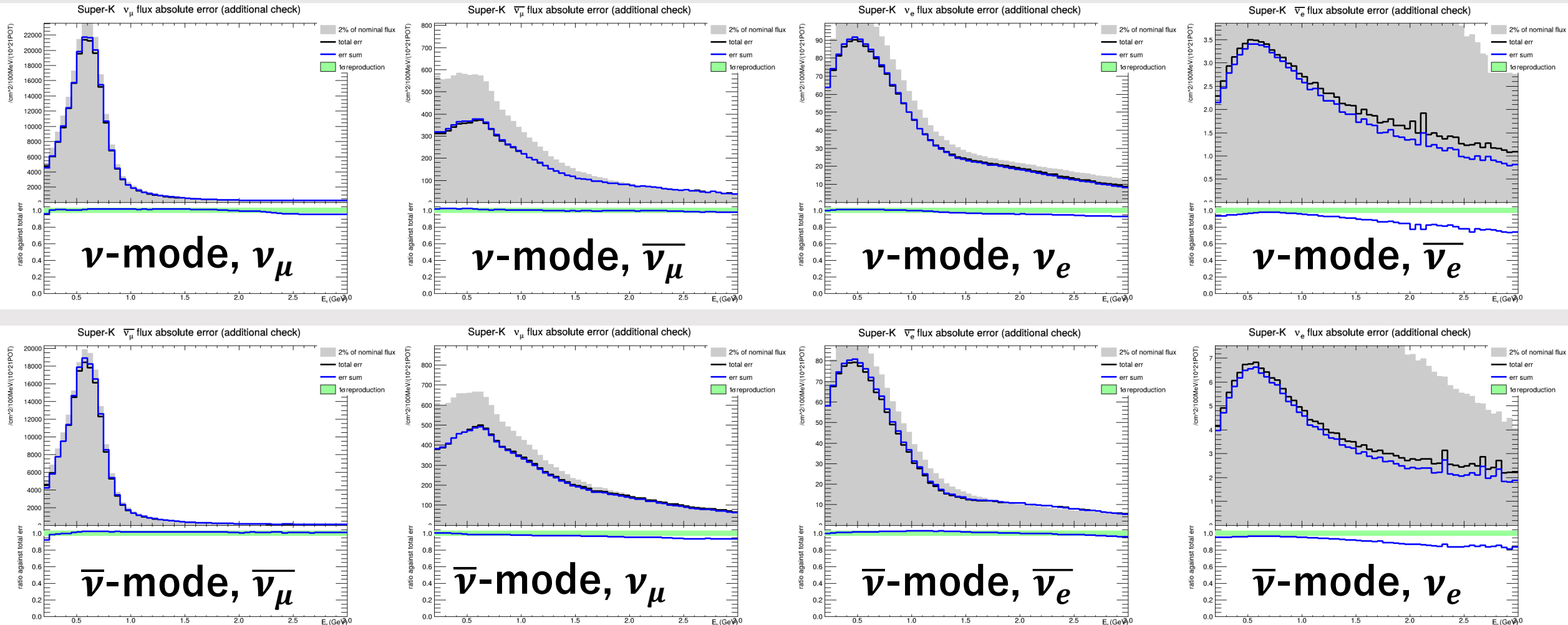
青: パラメーター10個で再現した誤差  
誤差の絶対値(上)  
total誤差に対する比(下)

緑: 再現誤差で目指す範囲  
比がここに達すれば十分

# 1. ニュートリノフラックスの予測

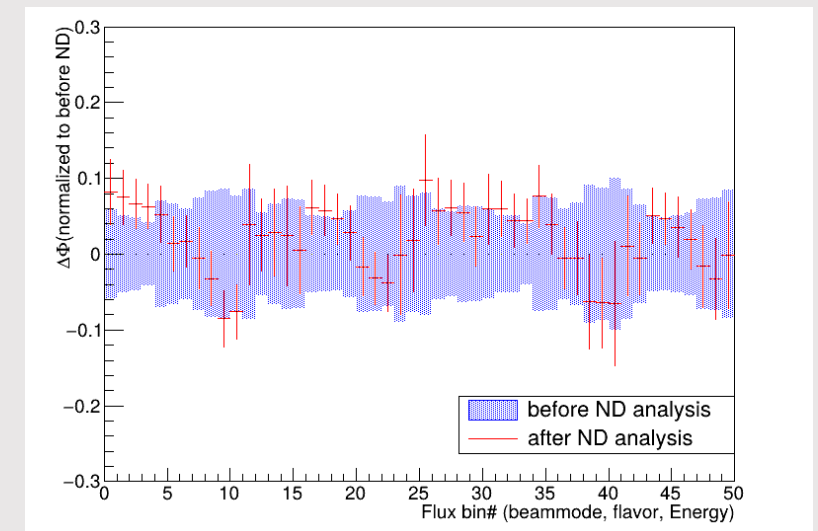
ビームモードとフレーバーごとに8種類のニュートリノフラックス  
全て十分に再現できた

Work in progress



# T2K実験 解析の流れ

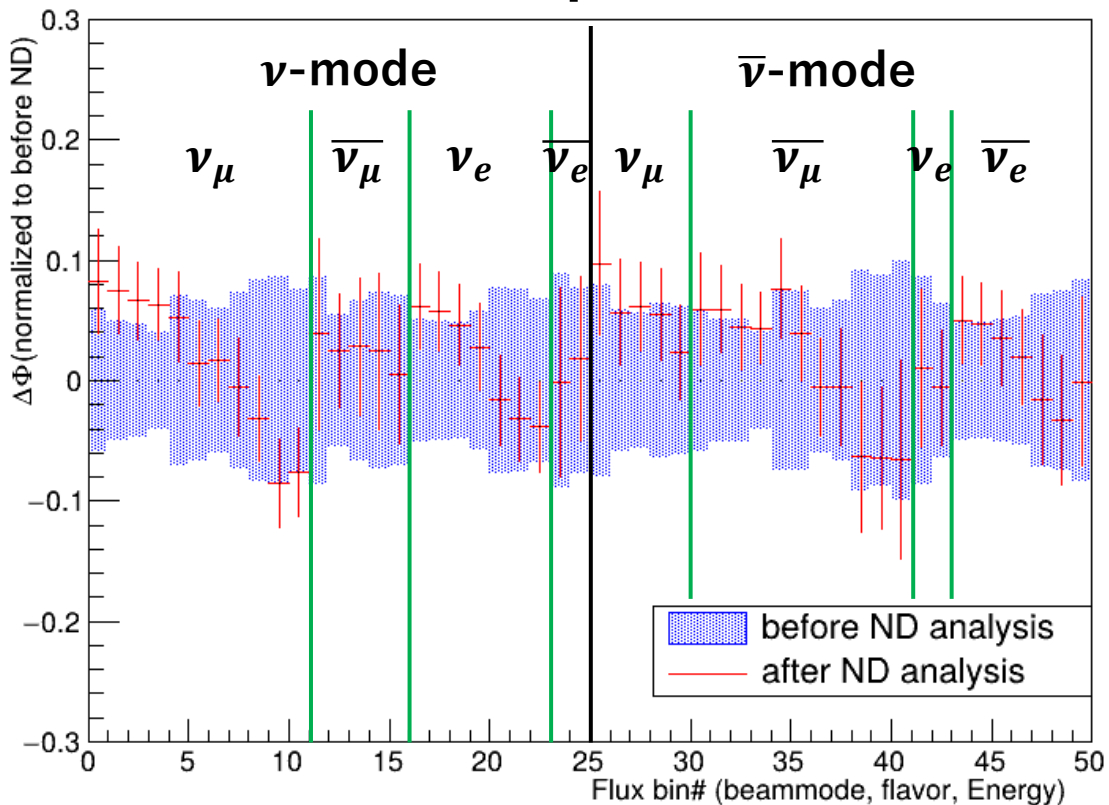
1. 各検出器におけるニュートリノフラックスの予測
- 2. 前置検出器によるフラックスと反応断面積の同時フィット**
3. 後置検出器でのイベント分布予測
4. 振動パラメーターの決定



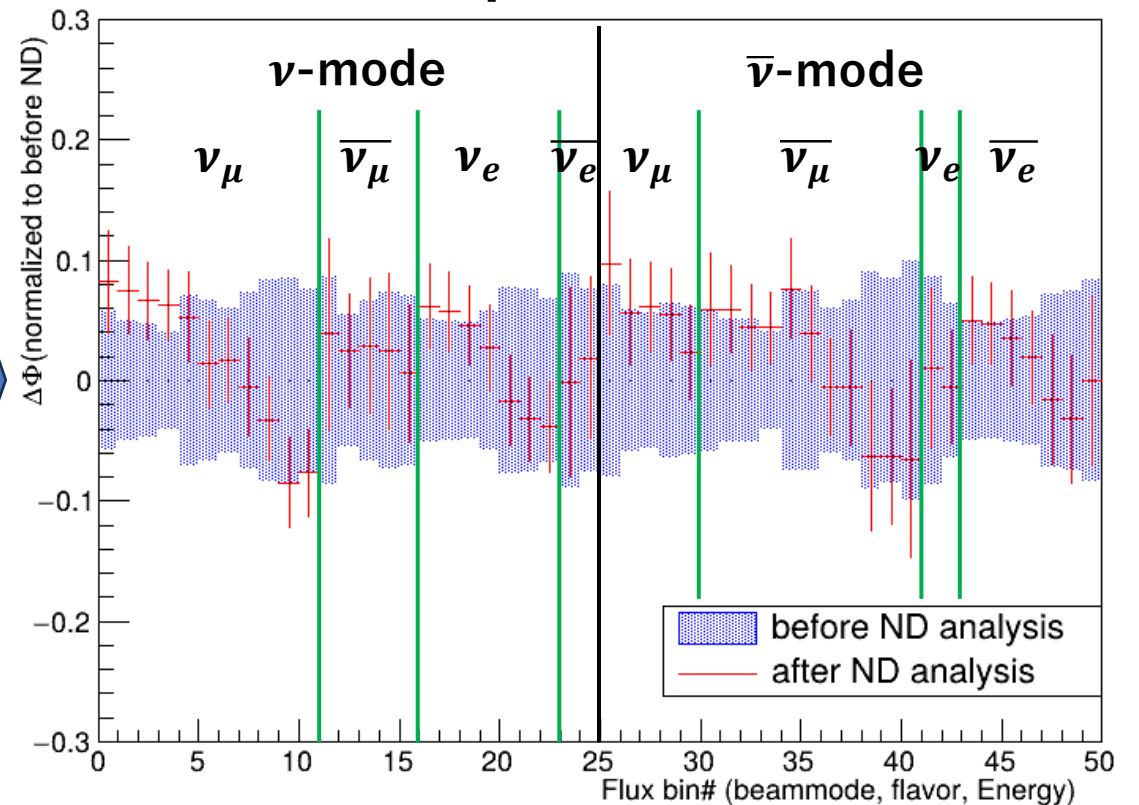
## 2. 前置検出器による制限 新しい手法

ND280による測定でフラックスの中心値と誤差が修正される  
新しいパラメーターによる解析で従来の結果を再現できる

2609(all) parameters



10 parameters



Work in progress

## 2. 前置検出器による制限 新しい手法

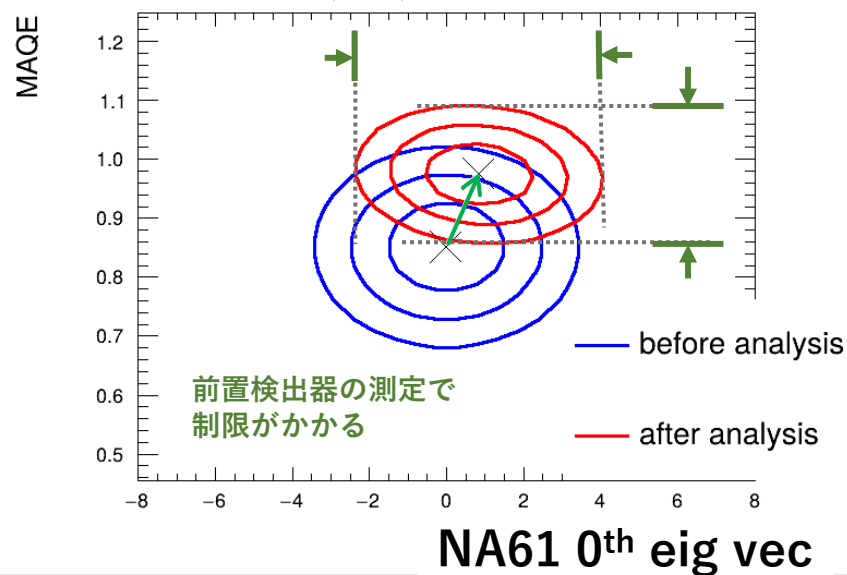
ND280ではフラックスと反応断面積に同時に制限をかける

新しいパラメーターも一部に反応断面積との相関が見られる

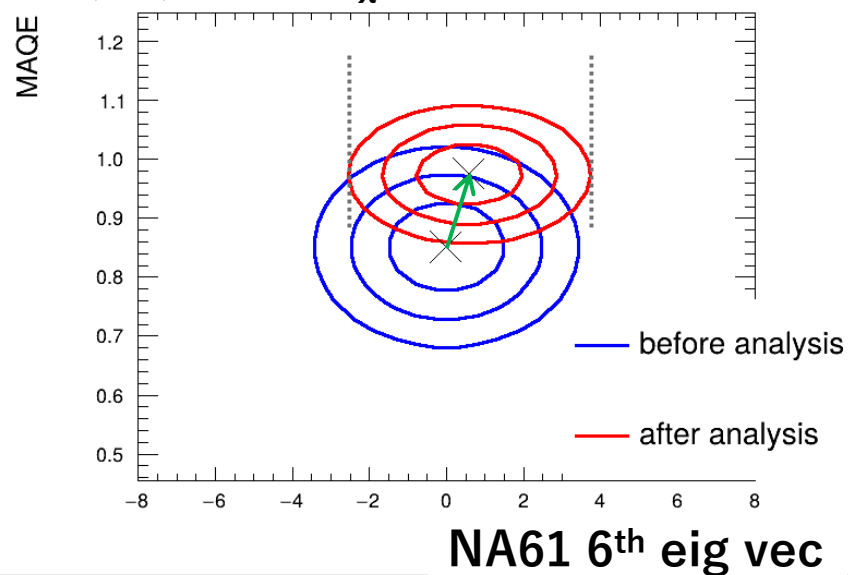
選ばれなかったパラメーターの多くはND280で制限が変化しない  
→既に誤差が無視できるほど小さいパラメーター？

Work in progress

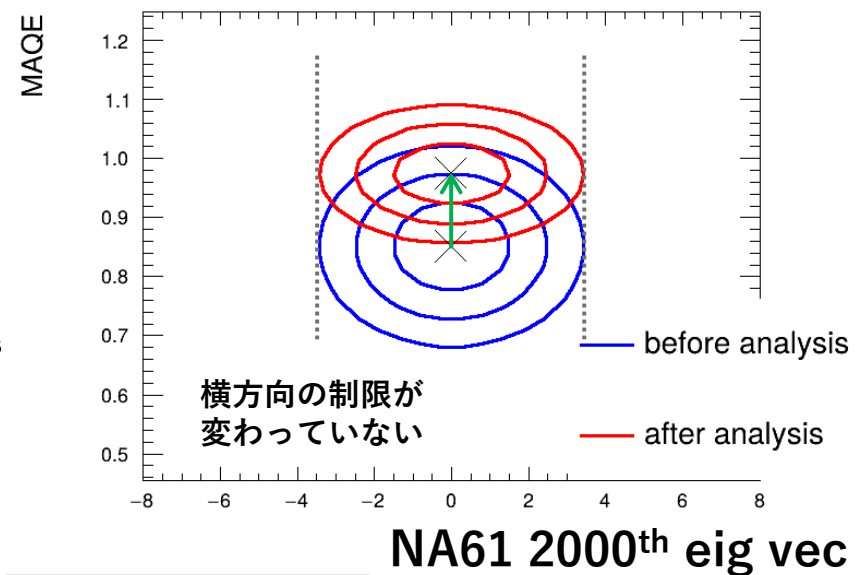
新しいパラメーター（横軸）と、ある反応断面積パラメーター（縦軸）についての $\chi^2$ 乗分布



反応断面積と負の相関があるパラメーター



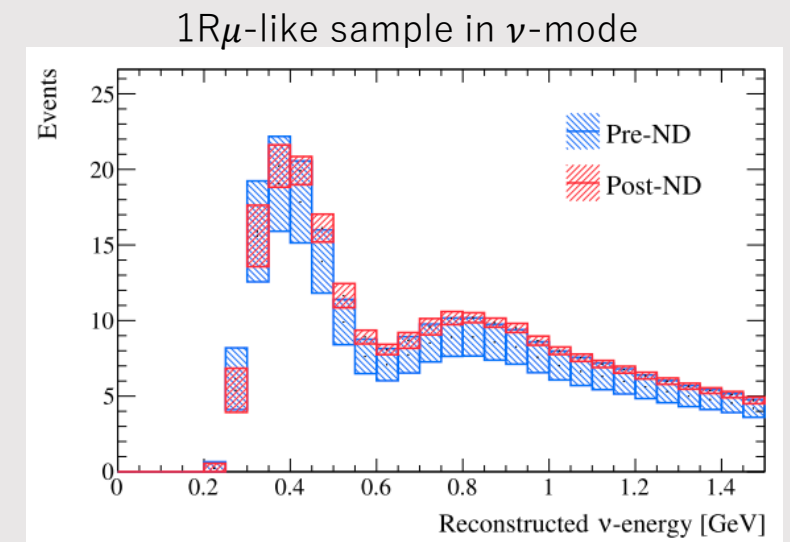
反応断面積と相関がないが制限されたパラメーター



それ以上制限できないほど誤差が小さいパラメーター

# T2K実験 解析の流れ

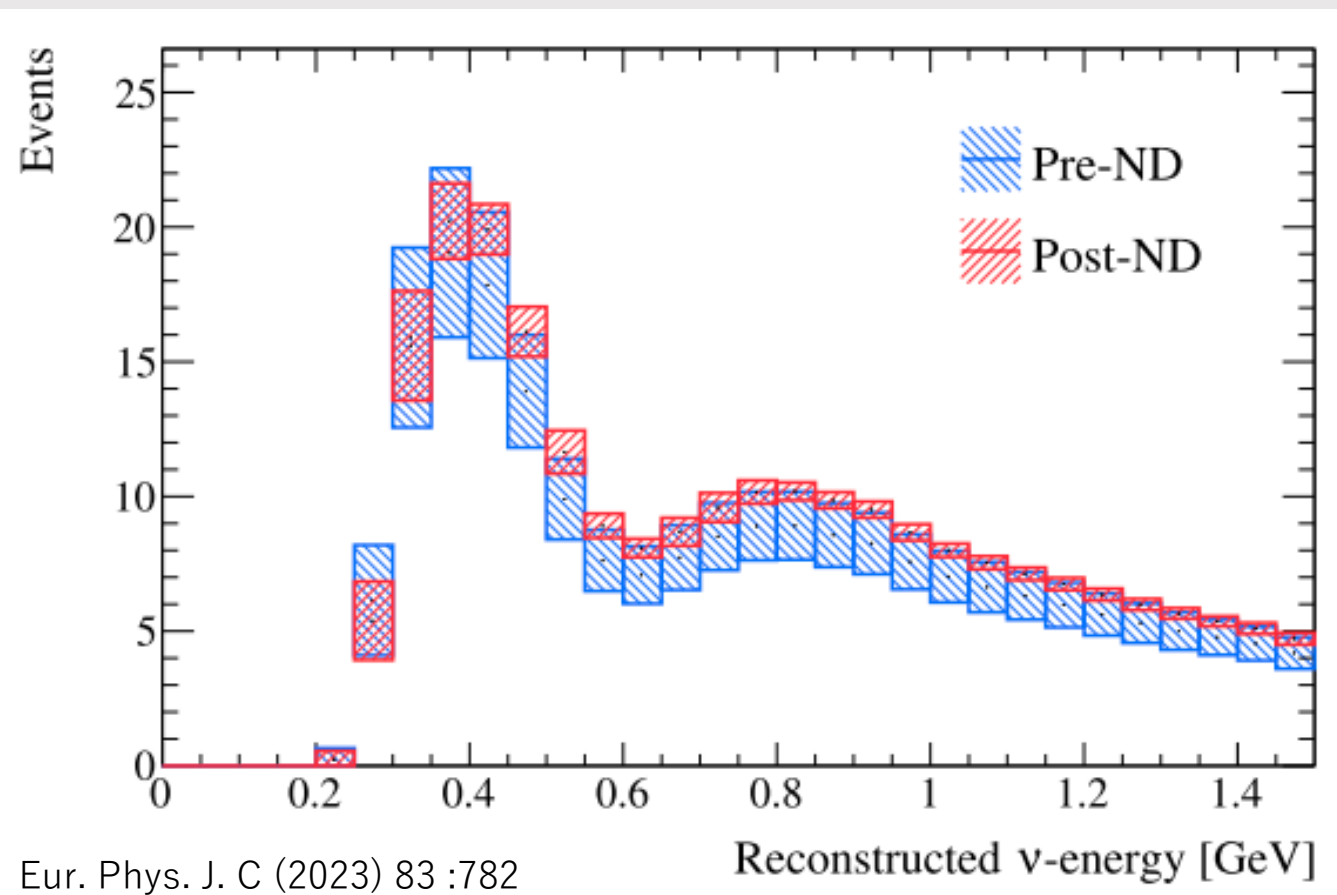
1. 各検出器におけるニュートリノフラックスの予測
2. 前置検出器によるフラックスと反応断面積の同時フィット
- 3. 後置検出器でのイベント分布予測**
4. 振動パラメーターの決定



Eur. Phys. J. C (2023) 83 :782

### 3. 後置検出器でのイベント分布予測

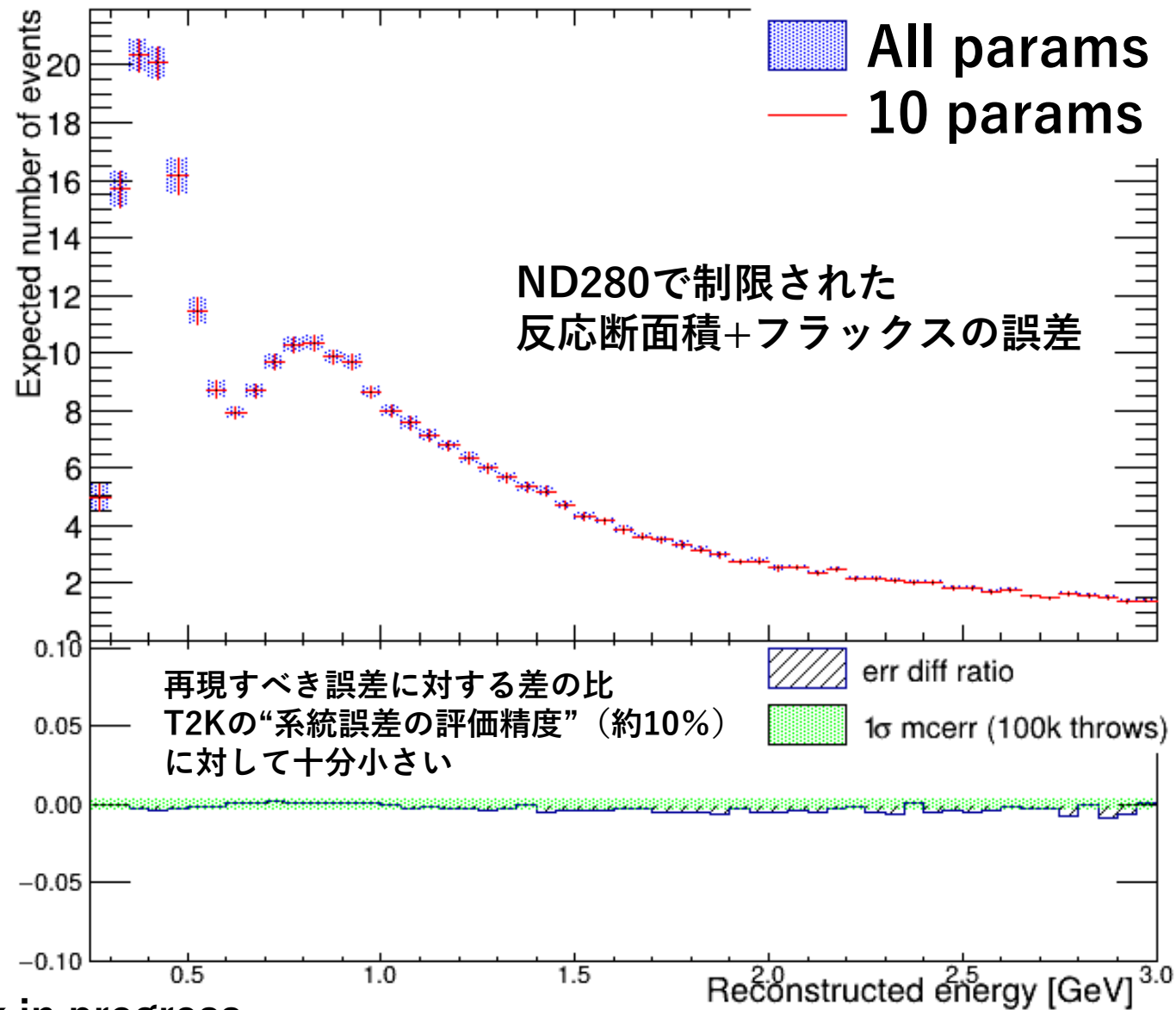
前置検出器によりフラックスと反応断面積が制限された  
ここにニュートリノ振動、検出器の感度などを考慮し、SKでの  
イベント数の分布を予測する



← イベント数の分布の予測と  
系統誤差の総計

誤差の総計で見ても前置検出器  
による制限は強力

### 3. 後置検出器でのイベント分布予測 ND280で制限した誤差



ND280は反応断面積と  
フラックスを同時に制限  
→フラックスパラメーター  
と深い関係がある

反応断面積+フラックスの  
不定性による誤差

誤差を1%未満の精度で再  
現できた

Work in progress

# T2K実験 解析の流れ

1. 各検出器におけるニュートリノフラックスの予測
2. 前置検出器によるフラックスと反応断面積の同時フィット
3. 後置検出器でのイベント分布予測

$$P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e} = \sin^2 2\theta_{\nu} \sin^2 \frac{\Delta m_{\nu}^2 L}{4E_{\nu}}$$

## 4. 振動パラメーターの決定

→現在検証中

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\delta_{\nu}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta_{\nu}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\delta_{CP}, \theta_{23}, |\Delta m_{23}^2|$  について従来の結果を再現できる模様

HK時代の大統計での影響などは今後検証予定

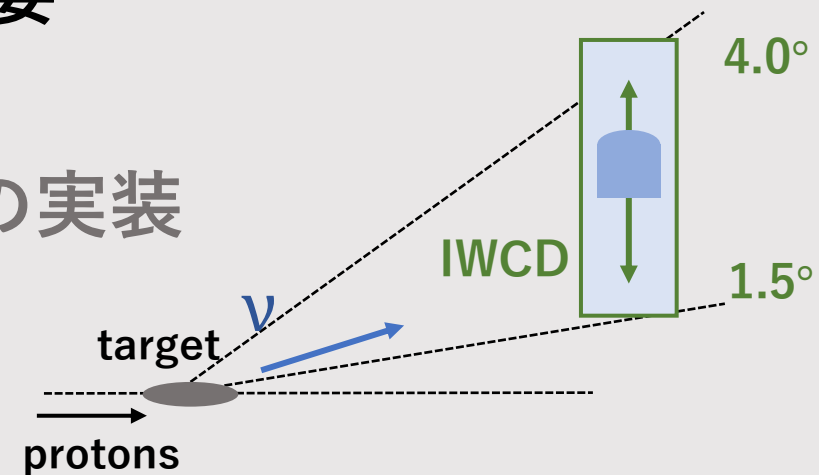
# 今後の課題

ここまで新手法のフラックス不定性への影響を調べた  
→次は前置検出器による反応断面積測定への影響を調べる

NA61/SHINE以外のフラックスパラメーターも追加した開発

OAA $2.5^\circ$ 以外の角度のフラックスも再現できるかを調べる  
特にIWCDがカバーする $1.5^\circ \sim 4.0^\circ$ の範囲が重要

新しい手法によるIWCDを含めたフラックスの実装  
特にIWCDはOAAを固定しない実装を目指す



T2Kは加速器を使ってニュートリノ振動を精密測定し、  
ニュートリノのCP対称性の破れを探索する

精密測定のためビーム軸に対し様々な位置に検出器を置くことが有用  
位置ごとのスペクトルの違いを利用するには計算量の軽減が必要

変数を減らした方法は、解析の各段階で従来の結果を再現した

今後はNA61/SHINE以外のフラックスパラメーターを追加することや  
新手法を使ってIWCDのフラックス実装などに取り組む



Backup

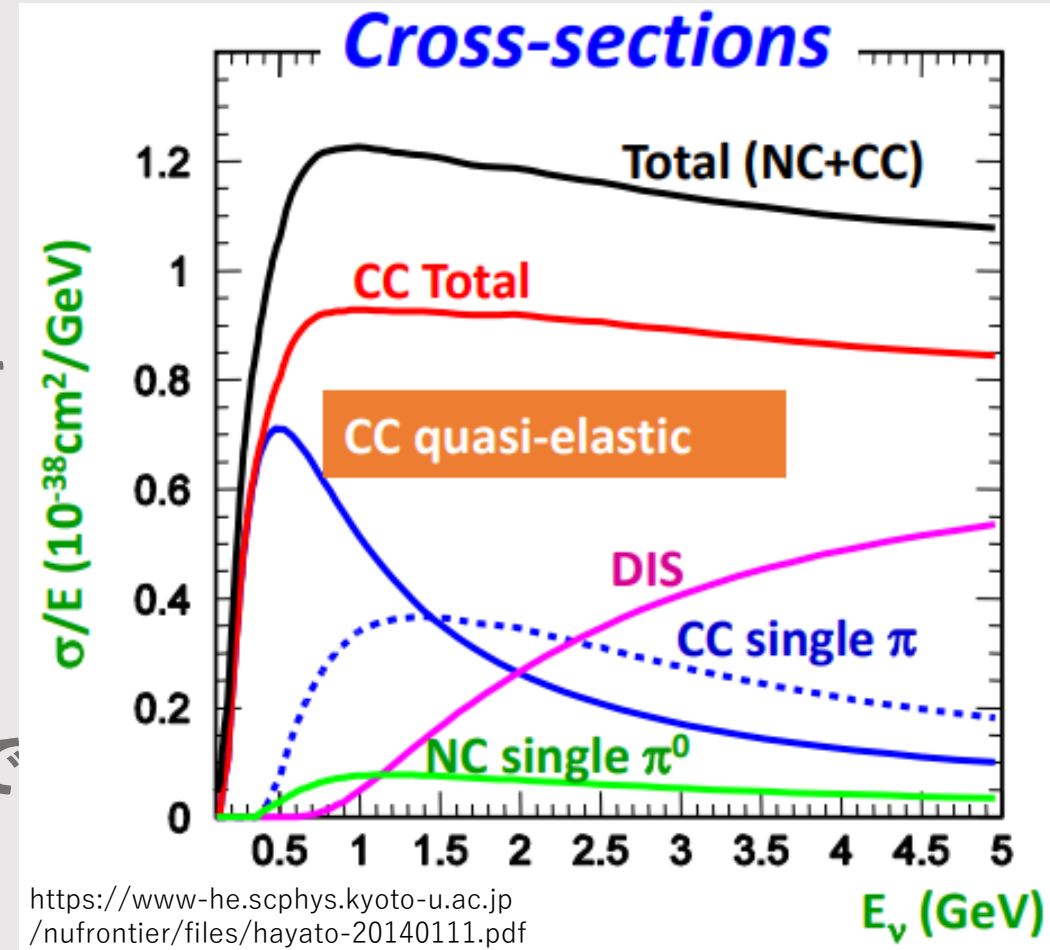
# ニュートリノと原子核の反応

T2Kのエネルギー領域はCCQE反応が主  
しかし高エネルギーでDISなどが増える

CCQEは比較的簡単な反応で、発生したレプトン一つが見えればよい

DISなどは発生した2次粒子の運動量を全て測る必要があるが、陽子など飛跡が短くて見えない粒子が発生しうる

T2KはCCQEサンプルを選ぶが、DISなどでレプトン以外の粒子が見えなければ、その分実際よりも低エネルギーに見積もられ、そのエネルギー領域のBackgroundになる



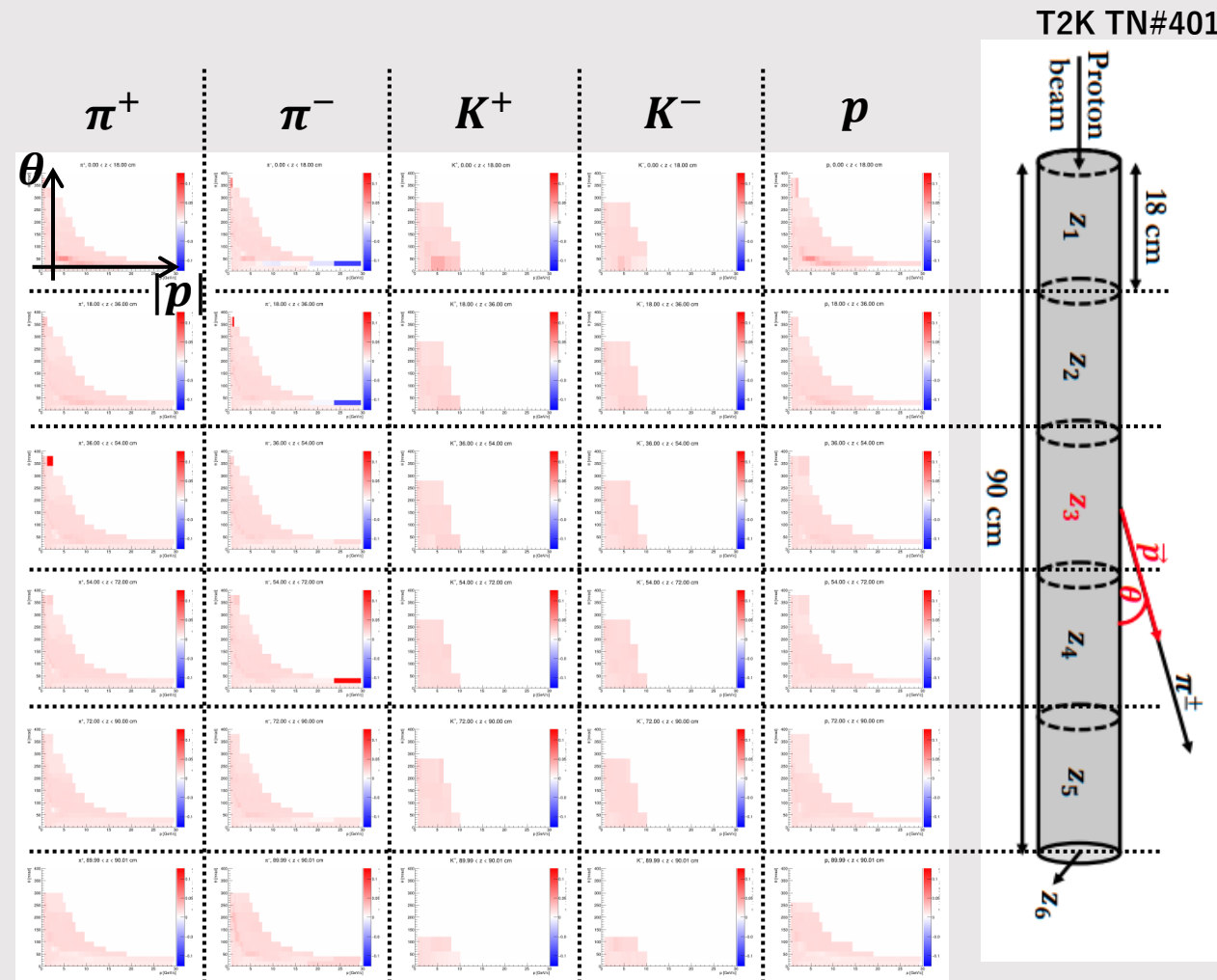
# NA61/SHINE 実験

T2Kの炭素標的と陽子ビームを再現し、生成されるハドロンのyieldを、標的から出た位置、角度、運動量に分け、5種類のハドロン( $\pi^\pm, K^\pm, p$ )について測定

計2609点の測定点があり、したがってこれを扱うパラメーターの数が2609個と膨大になる

今回選ばれた固有ベクトルのID:  
0, 7, 6, 1, 2, 4, 200, 3, 5, 137

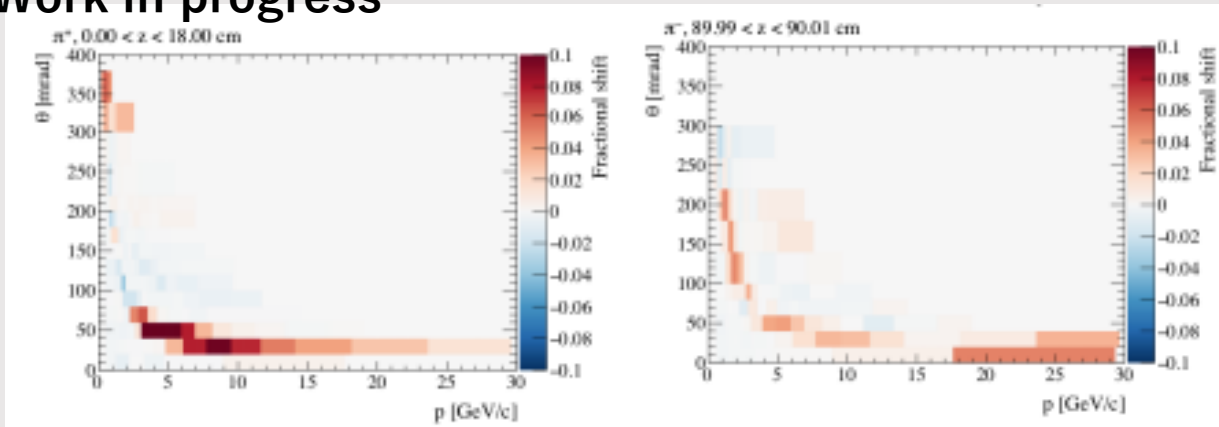
特徴的な物をハドロンの応答とニュートリノの応答で紹介



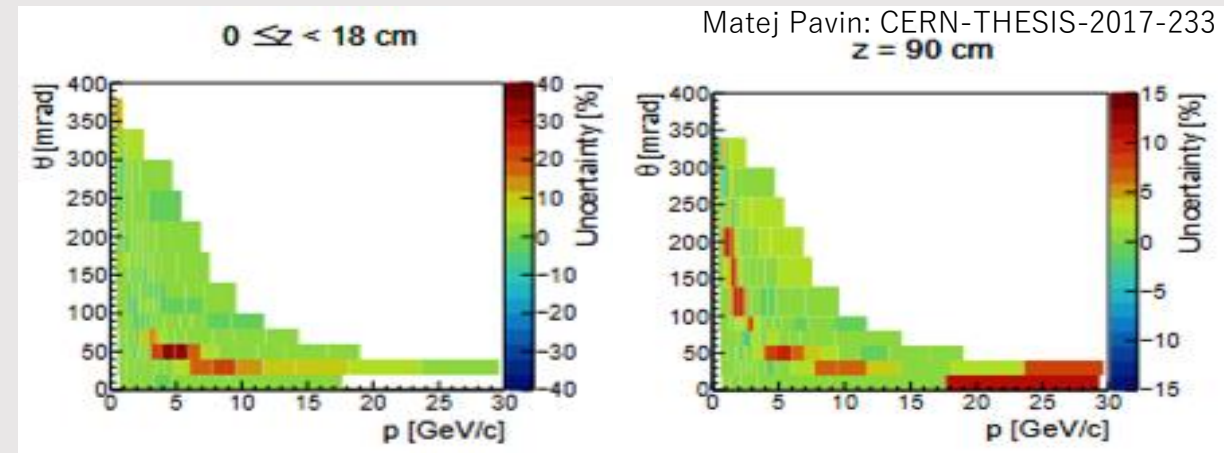
# 新しいパラメーターの物理的解釈

新しいパラメーターは相関行列の固有ベクトルとして得られた  
選ばれた10個のうち一部はNA61/SHINEの系統誤差に対応  
数学的手順で作ったパラメーターにも物理的解釈の余地あり

Work in progress



2番目に固有値が大きい  
ベクトルに対応する応答



NA61/SHINEの系統誤差  
hadron lossに対応する応答

※NA61/SHINEで測定したphase spaceのうち特徴的な一部を示した

# フラックス誤差の源 -Hadron production-

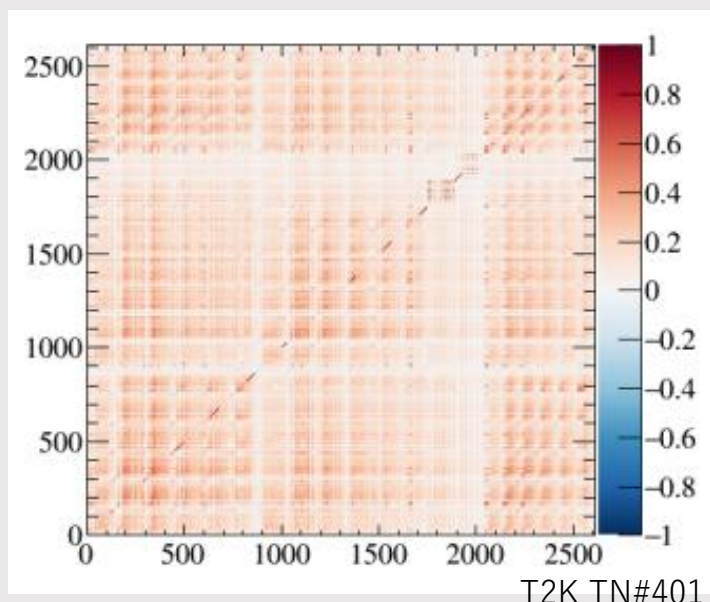
ハドロン生成反応は外部実験(NA61/SHINE実験)の結果を利用するため変数が非常に多い(2609個) →これを減らすことを考える

これにも相関をまとめた相関行列がある

→固有値展開してみると固有値に大きな差がある

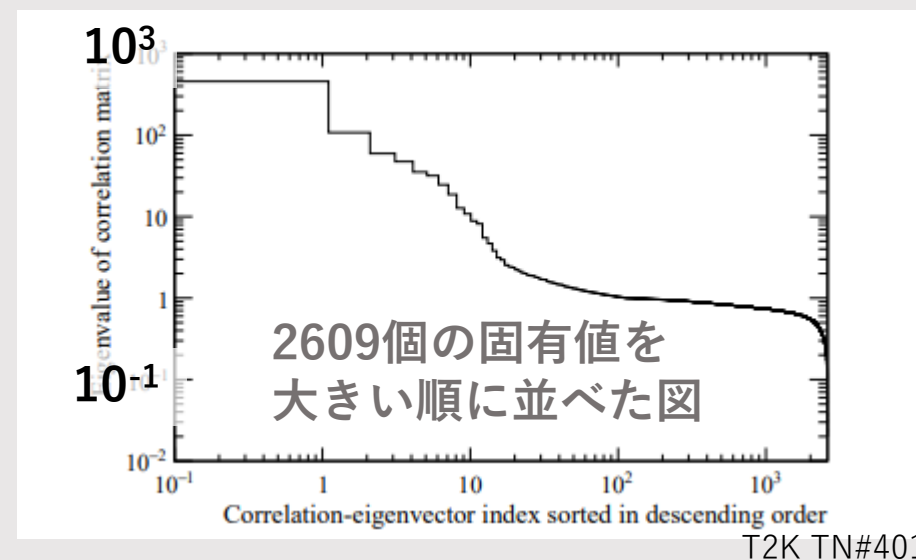
→固有値が大きいベクトルほど多くの変数間の相関を反映する

→**影響が大きい部分だけでフラックス誤差を再現できないか？**

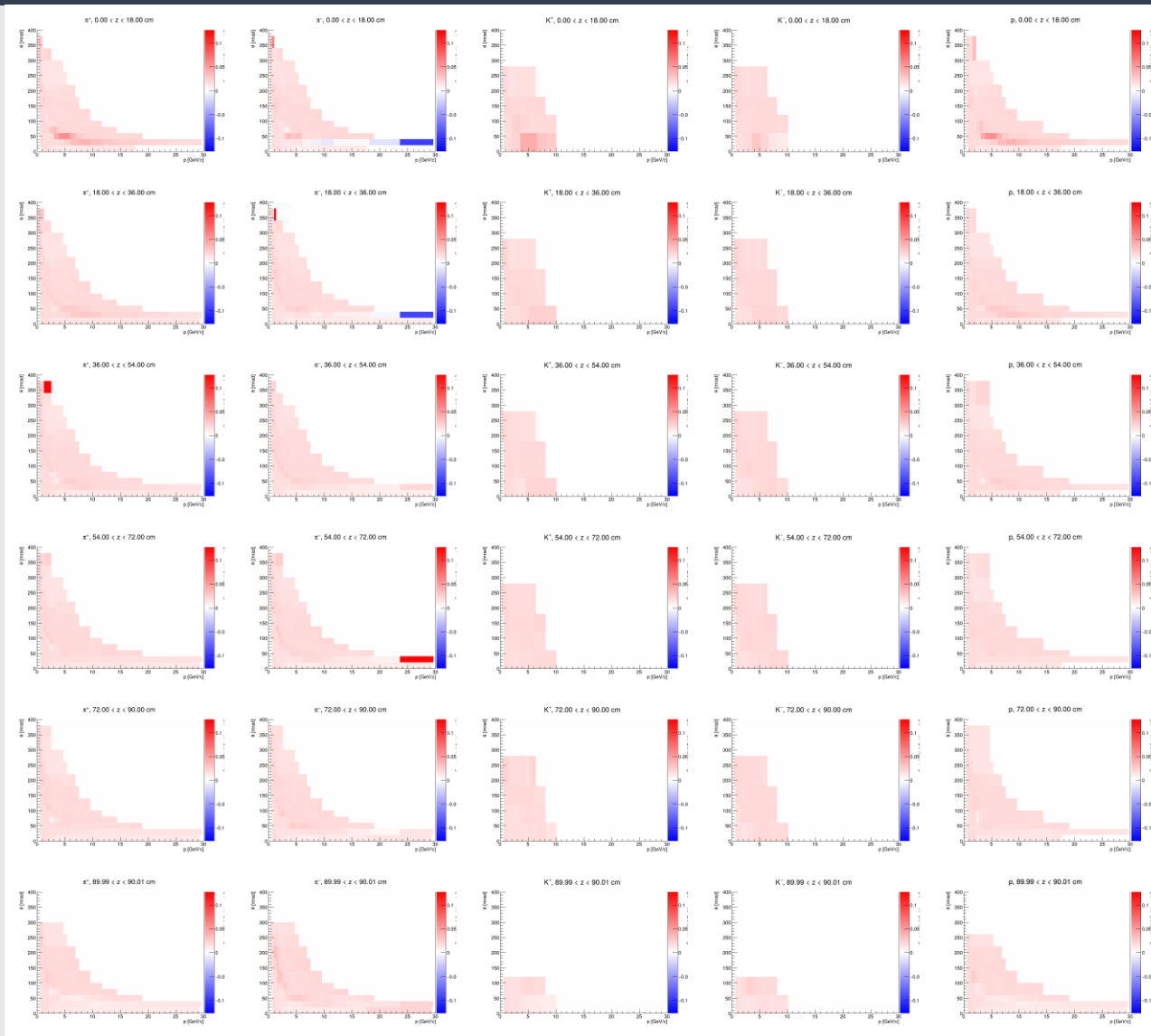


←NA61/SHINE実験  
の相関行列

この固有値は3-4桁の  
範囲にわたる →



# Response of hadron phase space of eig vec #0



測定されたハドロンの位相空間  
全体のyieldを同時に増減させる  
効果

ニュートリノフラックスでも全  
体が増加（減少）すると予想さ  
れる

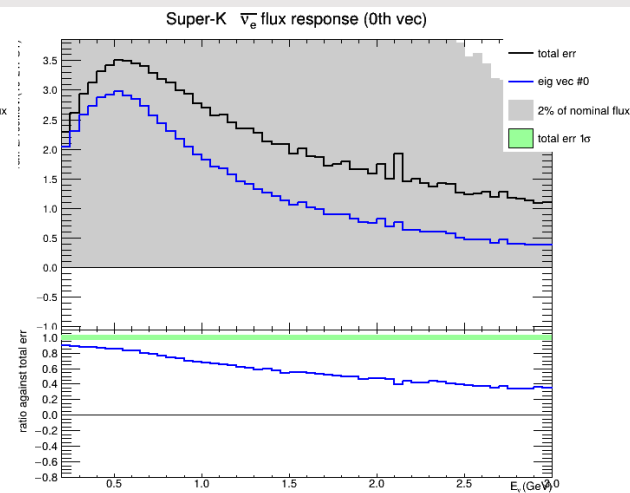
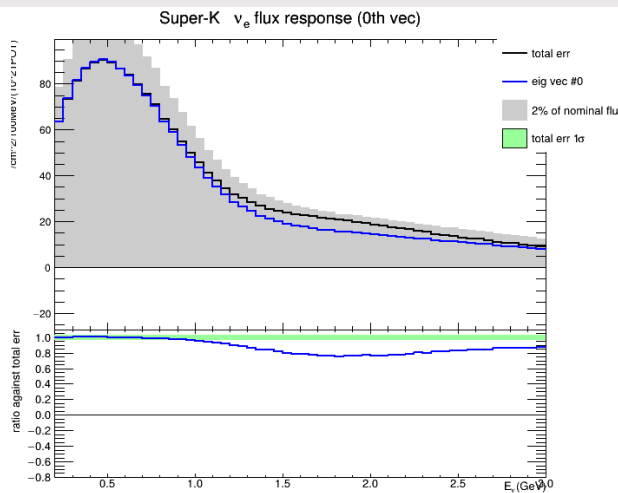
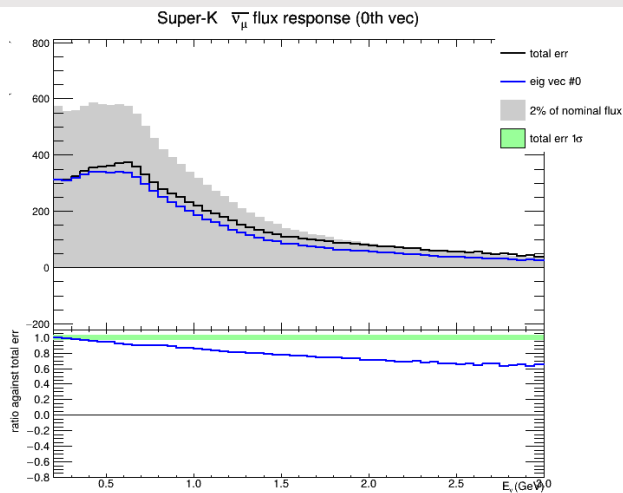
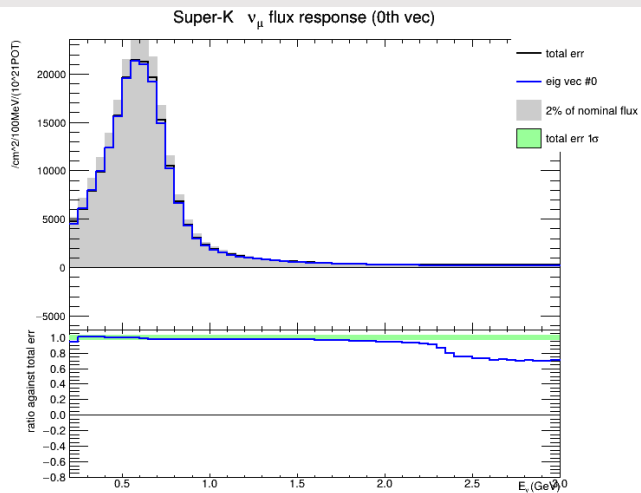
NA61/SHINE実験の系統誤差  
reconstruction biasに対応

Work in progress

# Response of neutrino flux on new parameter: eig vec #0

## 全体のフラックス強度が同時に増減する応答

Work in progress

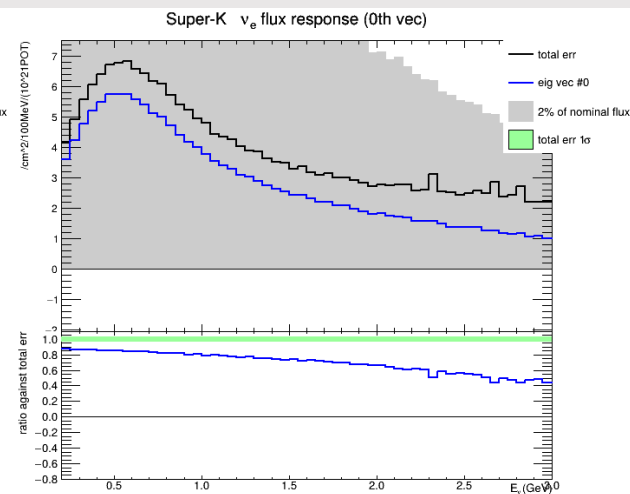
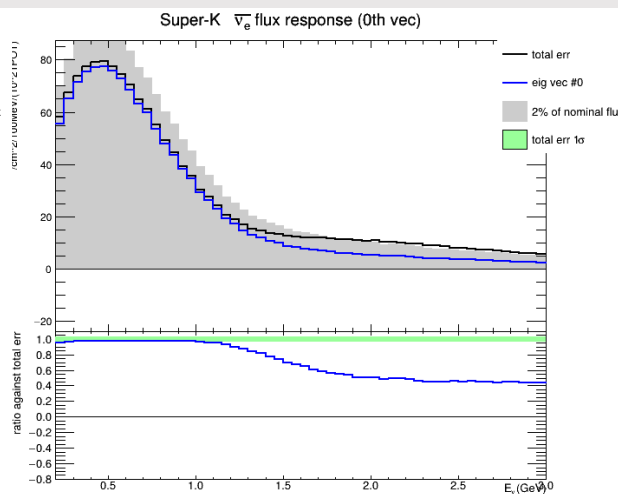
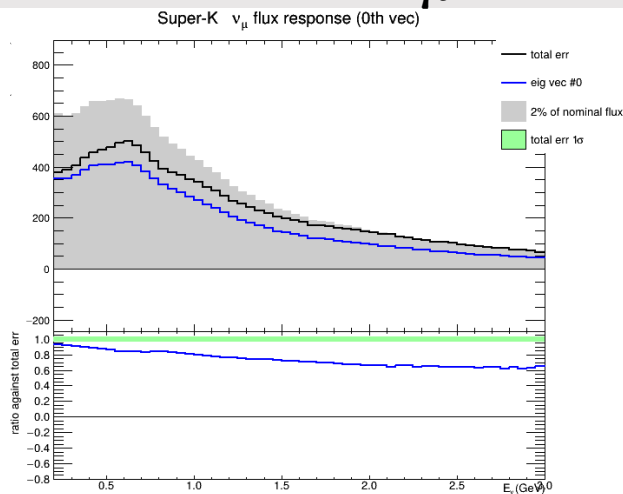
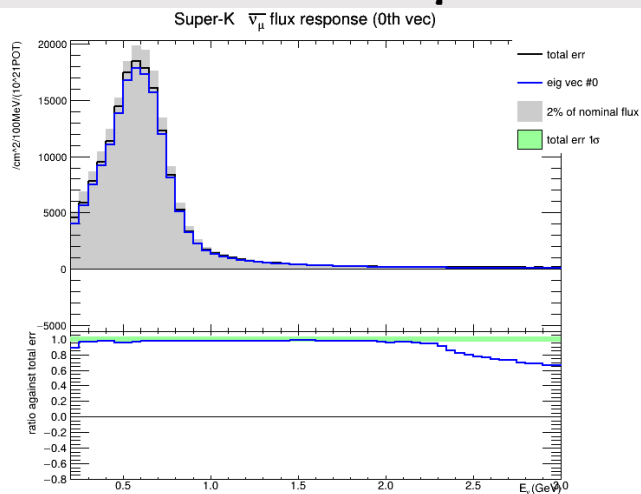


$\nu$ -mode,  $\nu_\mu$

$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$

$\nu$ -mode,  $\nu_e$

$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_e$



$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$

$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_\mu$

$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_e$

$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_e$

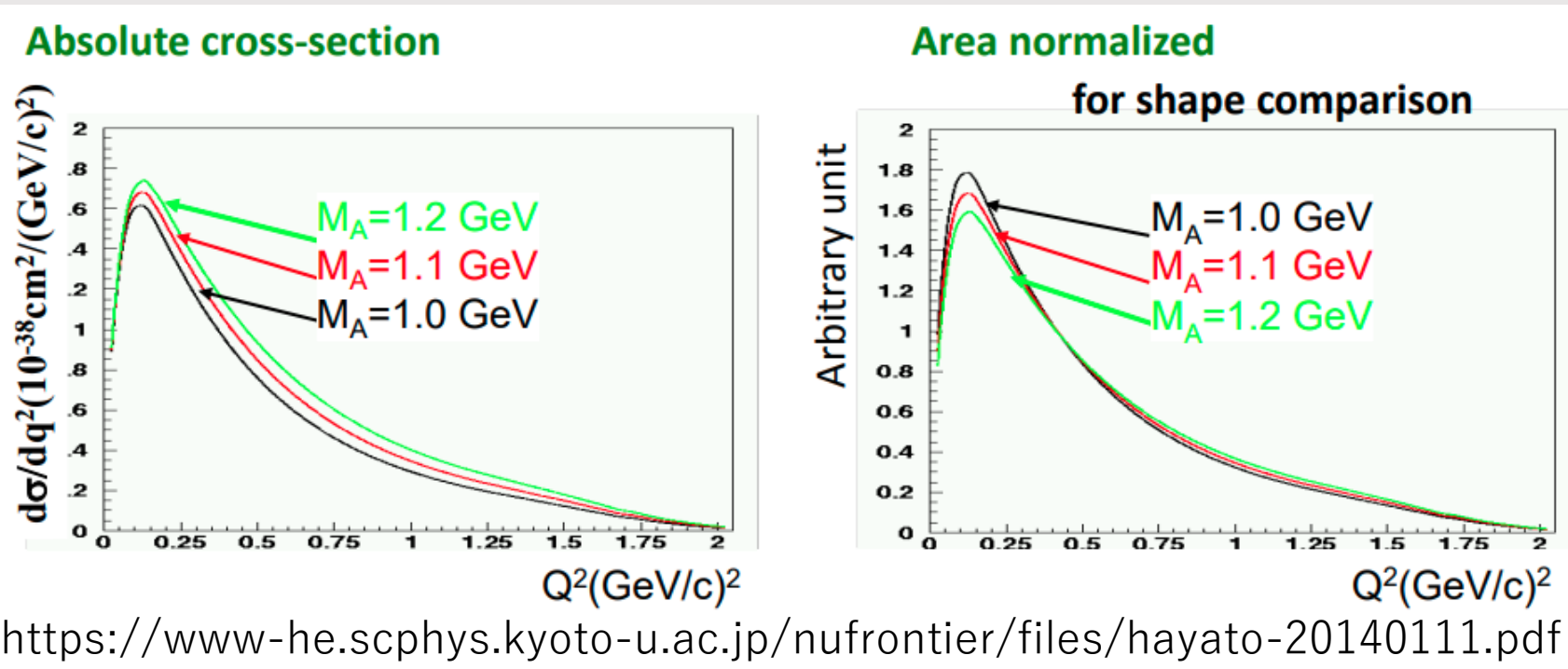
# X-sec parameter: MAQE (Quasi-elastic axial vector mass)

準弾性散乱の全散乱断面積をスケールする

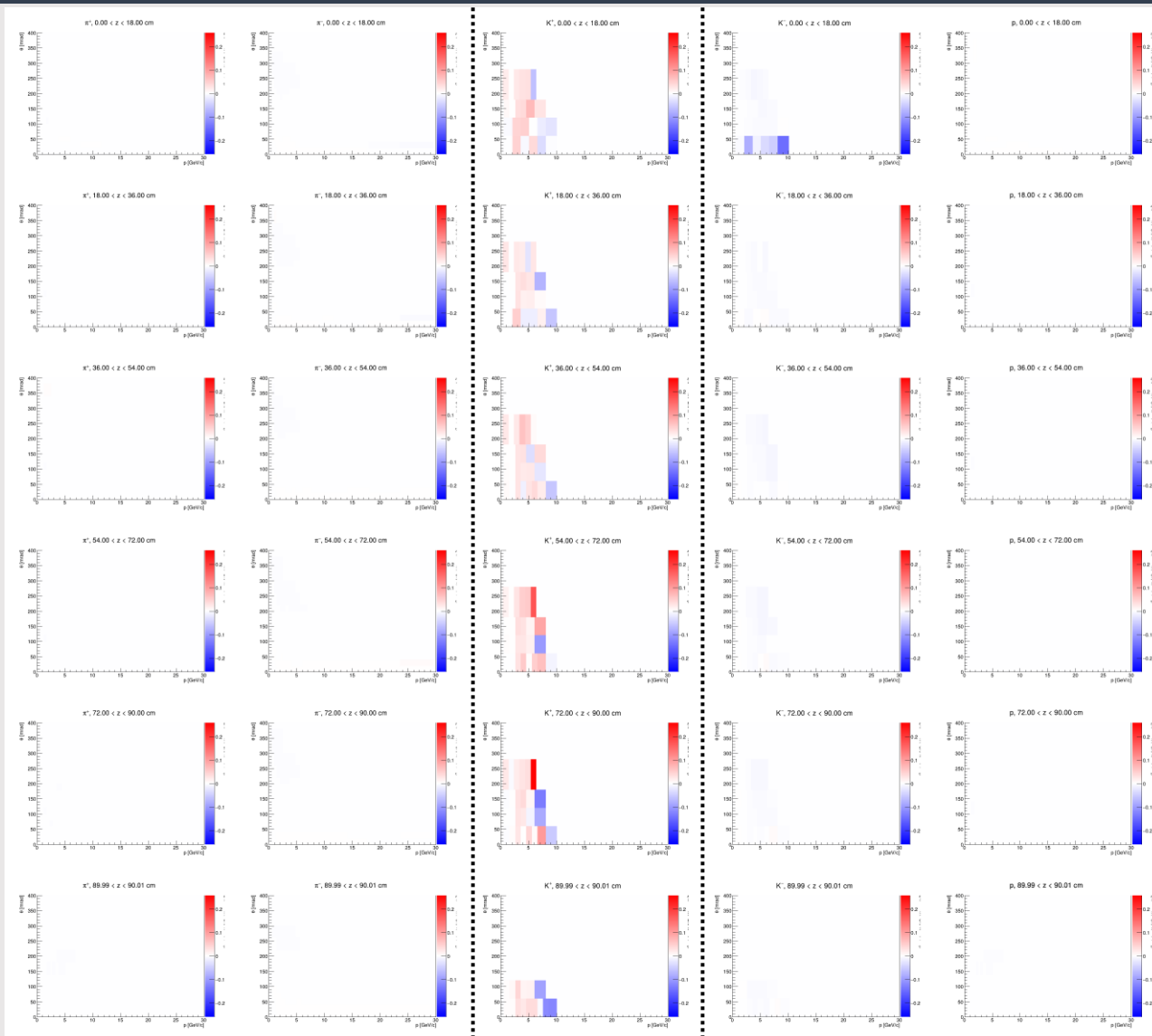
運動量移行の大小でスケールに違いが見える

$M_A$ が大きくなると後方散乱の割合が増え前方散乱の割合は減る

QE散乱が起こるエネルギー帯のフラックスをスケールする変数  
(vec#0) と相関がある



# Response of hadron phase space of eig vec #6



主に $K^+$ 中間子のyieldを増減させる効果

$K$ 中間子は比較的高エネルギーの $\mu$ ニュートリノを生じ、電子ニュートリノの主な親粒子でもある

$$K^+ \rightarrow \begin{cases} \mu^+ \nu_\mu & 63.55\% \\ \pi^0 \nu_\mu & 3.353\% \\ \pi^0 e^+ \nu_e & 5.07\% \end{cases}$$

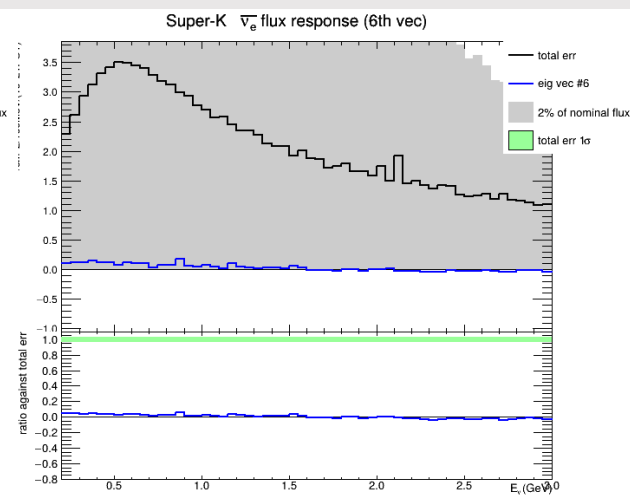
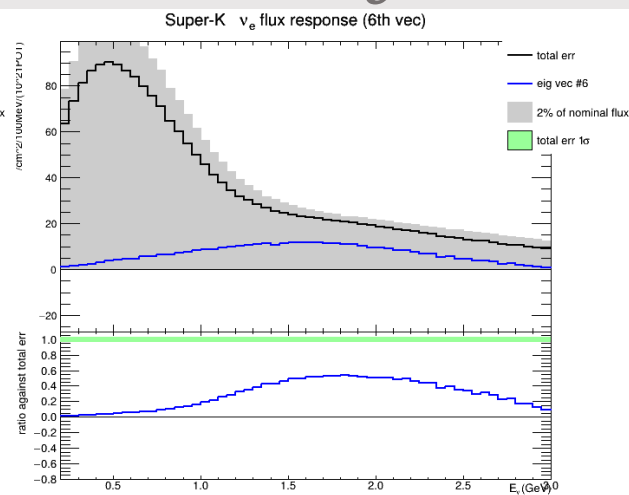
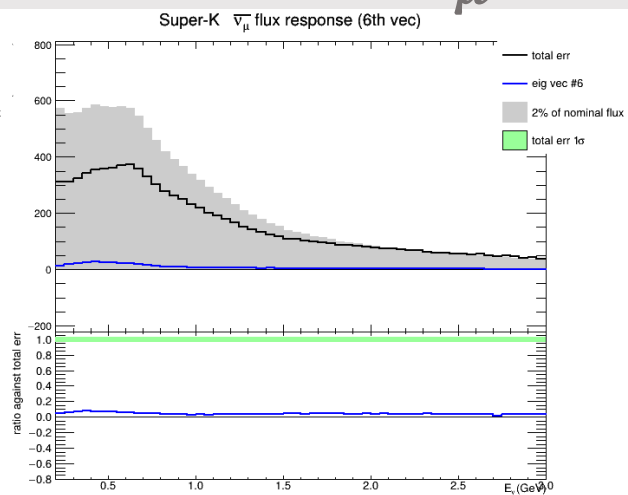
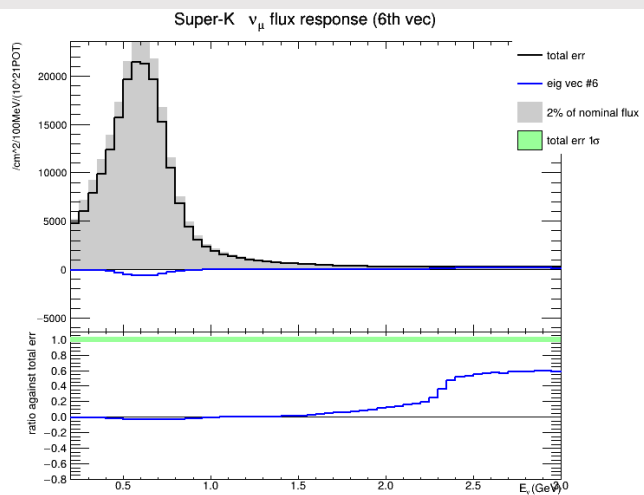
Work in progress

$K^+$

# Response of neutrino flux on new parameter: eig vec #6

## $\nu$ -モードの高エネルギーの $\nu_\mu$ と両モードの $\nu_e$

Work in progress

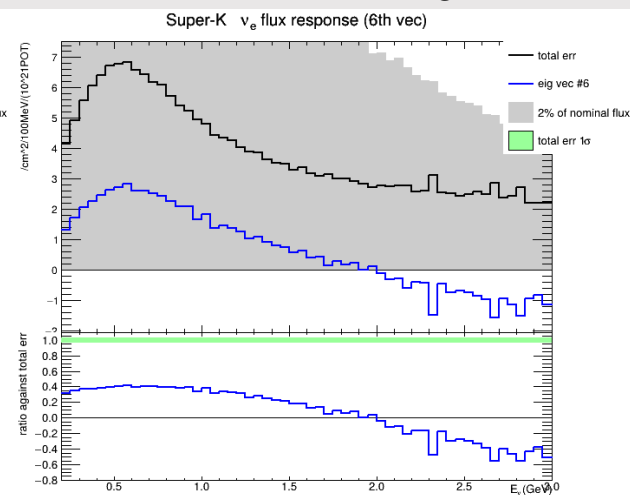
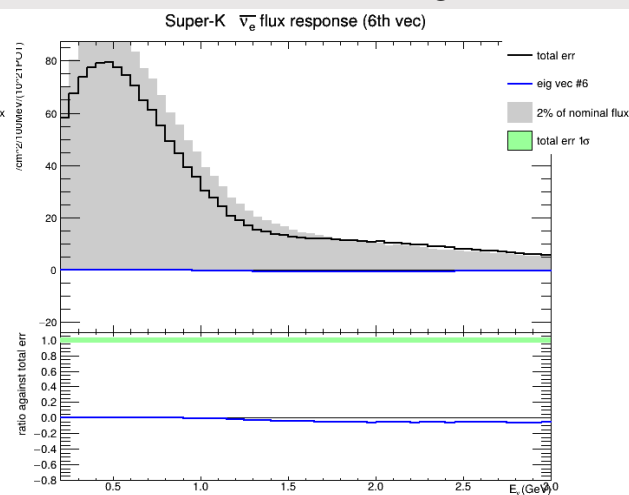
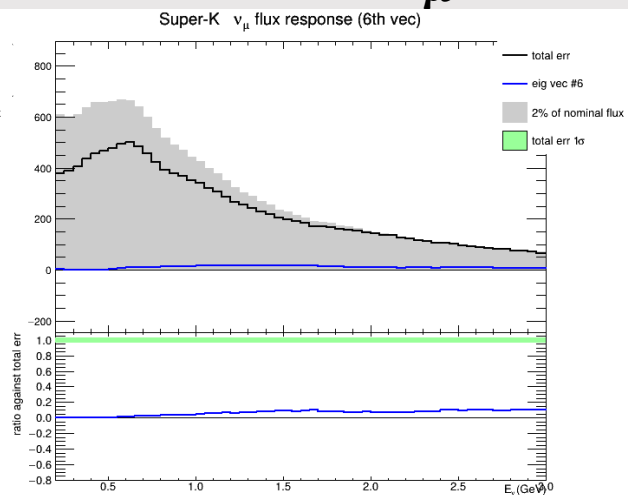
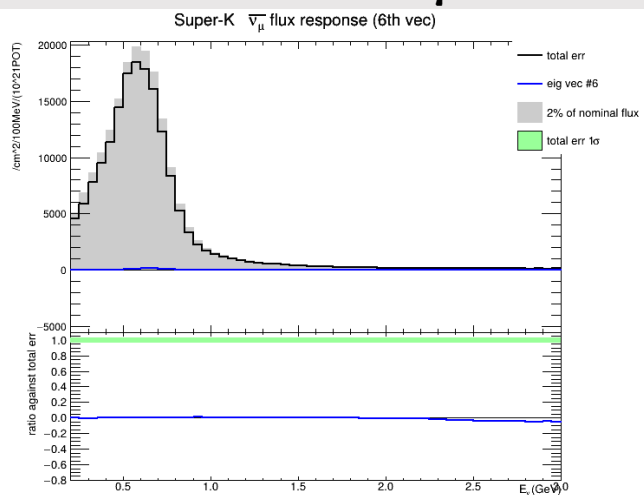


$\nu$ -mode,  $\nu_\mu$

$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$

$\nu$ -mode,  $\nu_e$

$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_e$



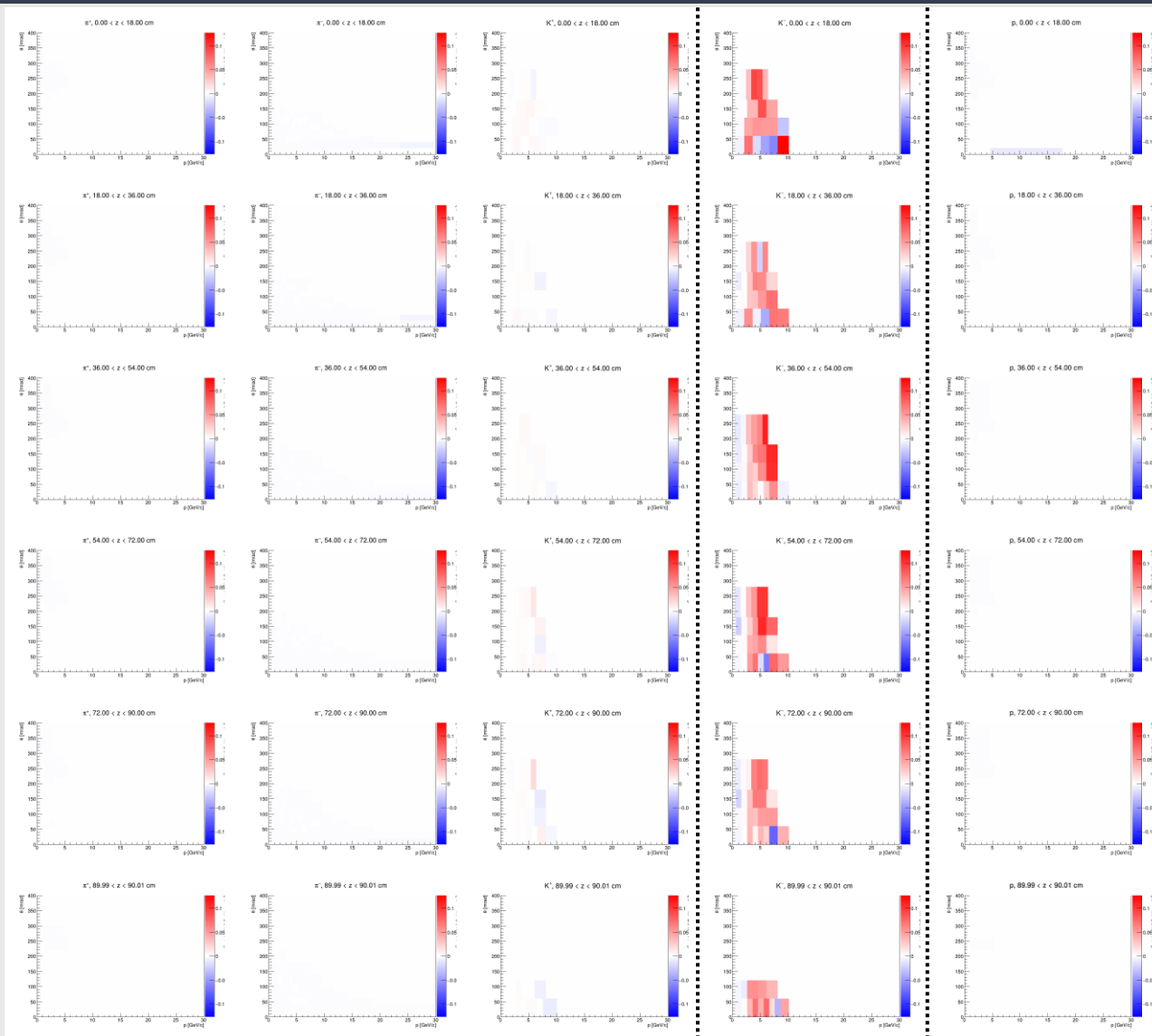
$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$

$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_\mu$

$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_e$

$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_e$

# Response of hadron phase space of eig vec #7



主にK-中間子のyieldを増減させる効果

K-中間子は比較的高エネルギーの反 $\mu$ ニュートリノを生じ、反電子ニュートリノの主な親粒子でもある

$$K^- \rightarrow \begin{cases} \mu^- \nu_\mu & 63.55\% \\ \pi^0 \nu_\mu & 3.353\% \\ \pi^0 e^- \nu_e & 5.07\% \end{cases}$$

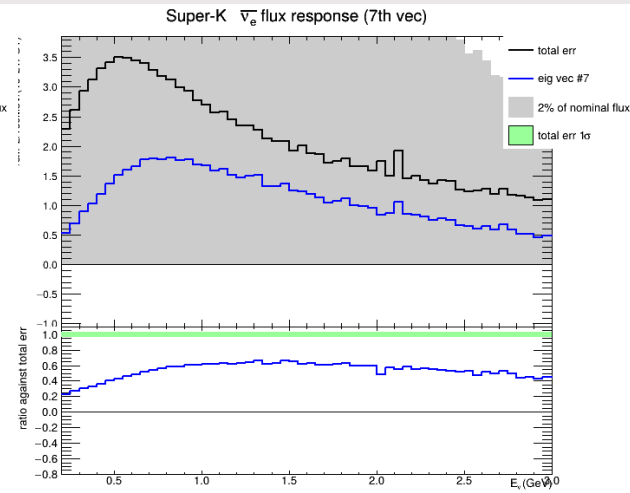
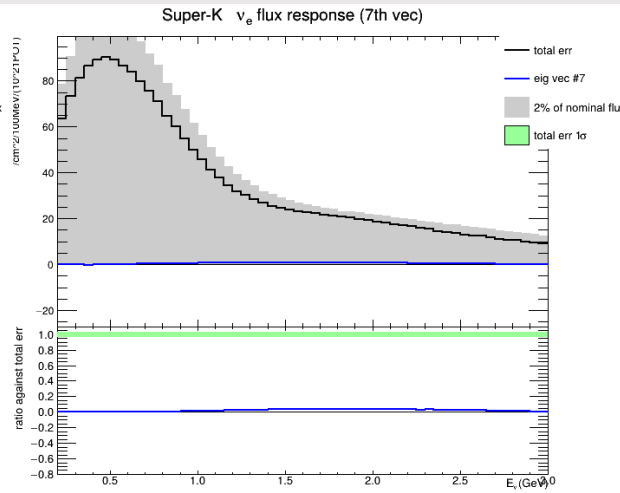
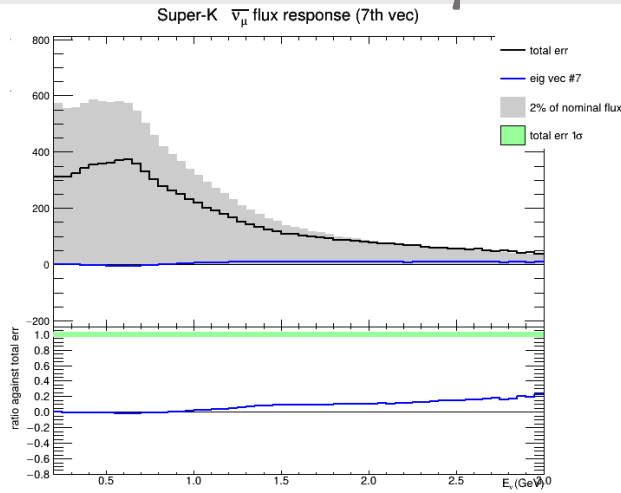
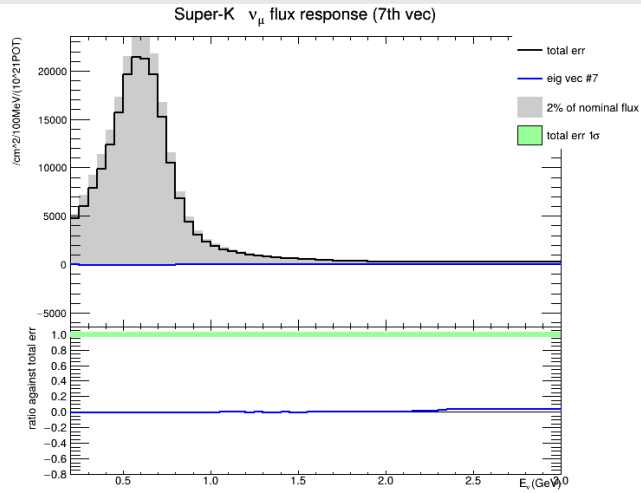
Work in progress

$K^-$

# Response of neutrino flux on new parameter: eig vec #7

## $\bar{\nu}$ -モードの高エネルギーの $\bar{\nu}_\mu$ と両モードの $\bar{\nu}_e$

Work in progress

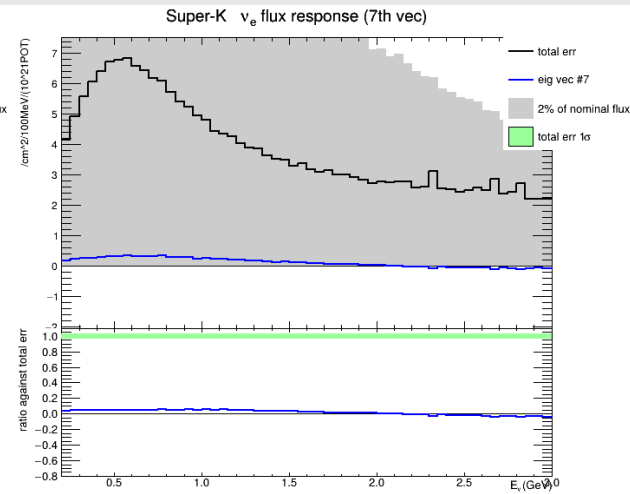
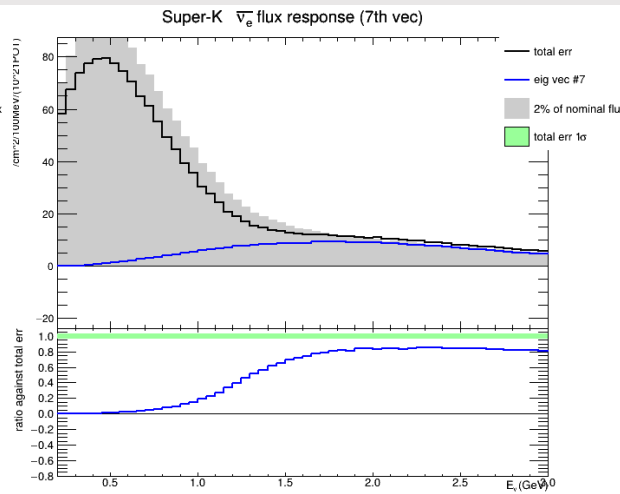
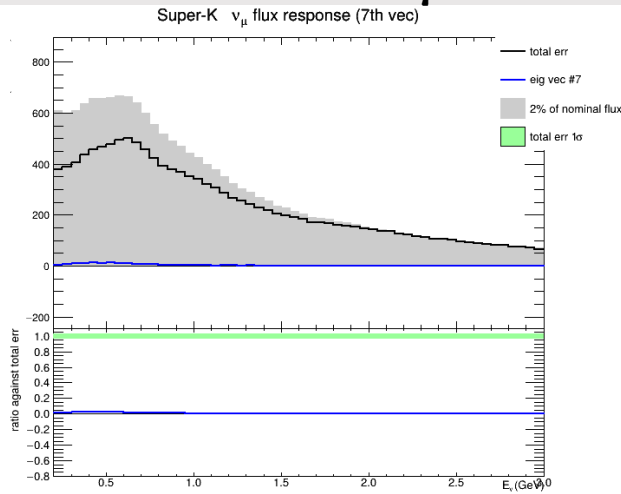
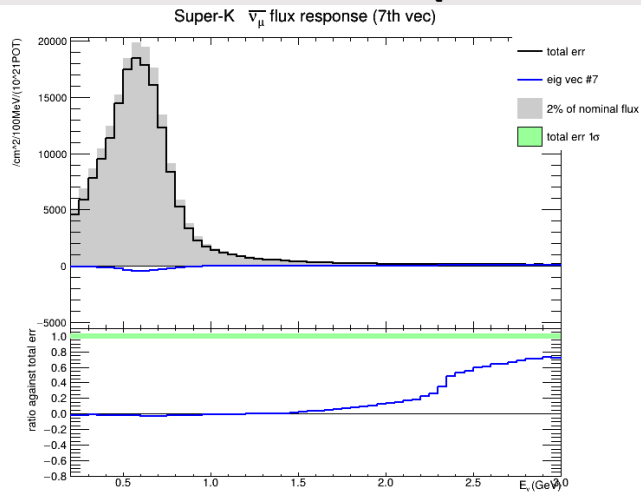


$\nu$ -mode,  $\nu_\mu$

$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$

$\nu$ -mode,  $\nu_e$

$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_e$



$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$

$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_\mu$

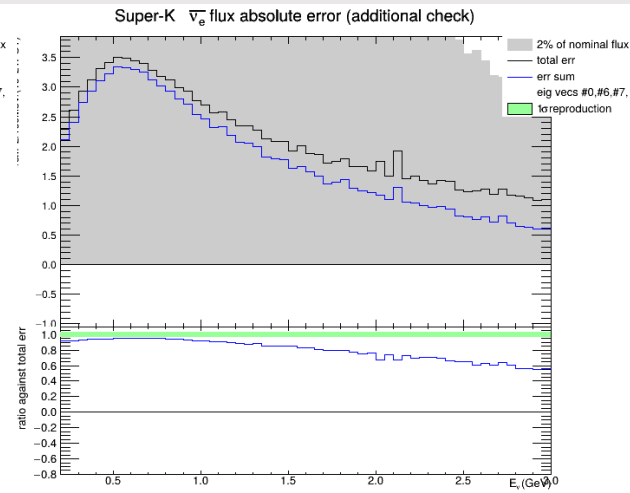
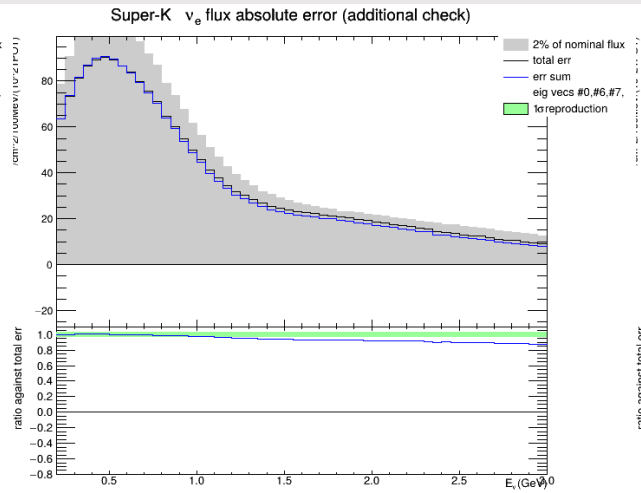
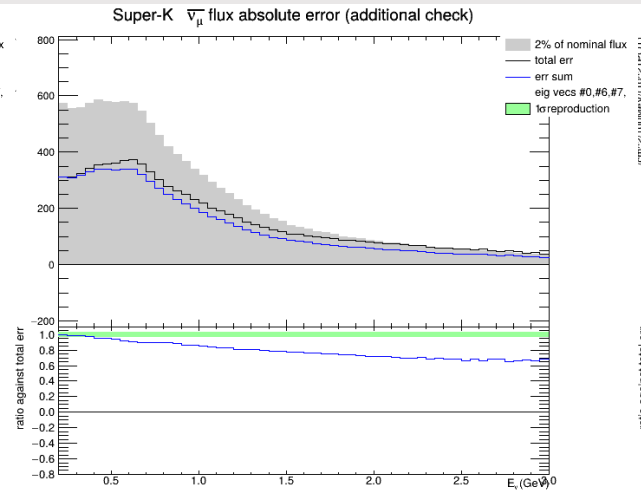
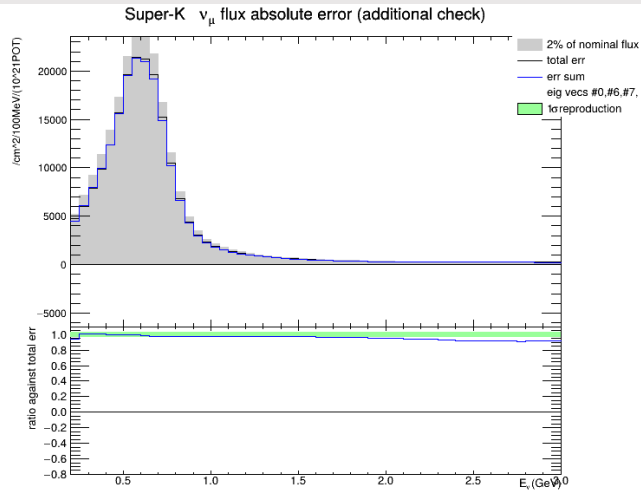
$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_e$

$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_e$

# Response of neutrino flux on new parameter: eig vec #0+#6+#7

## Right sign flux are reproduced

Work in progress

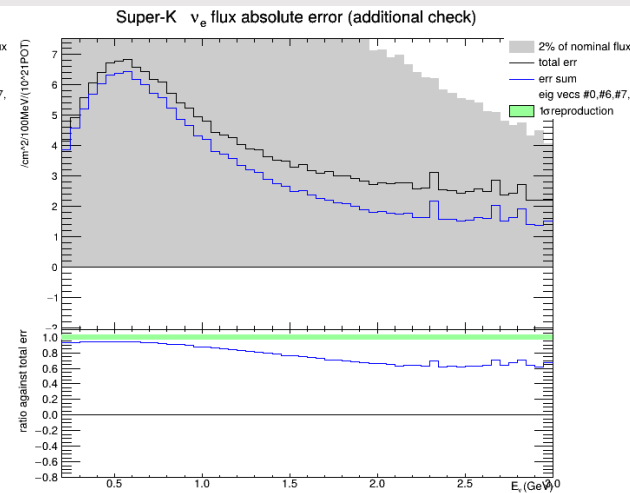
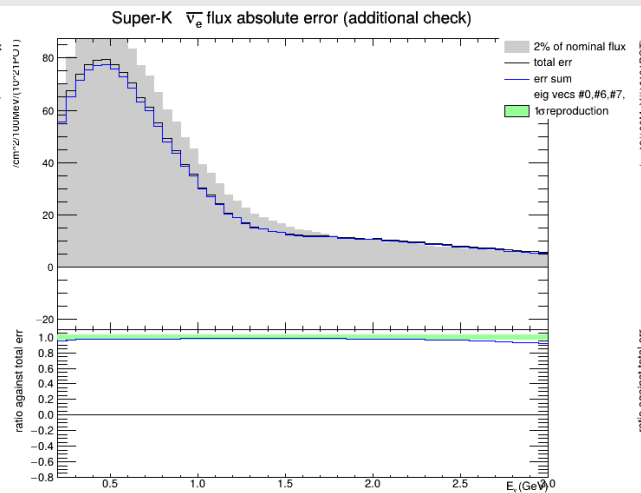
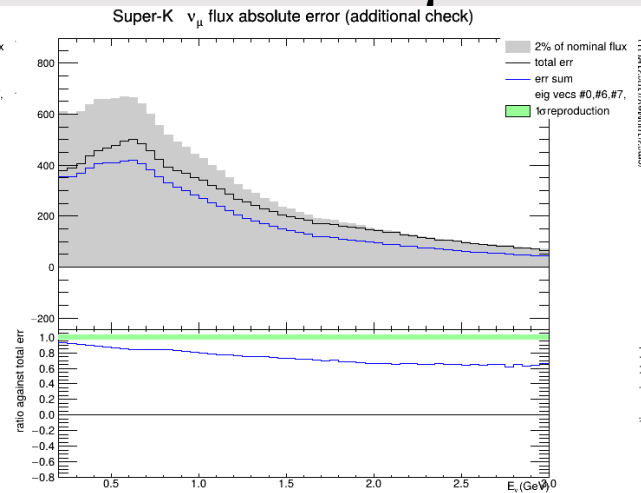
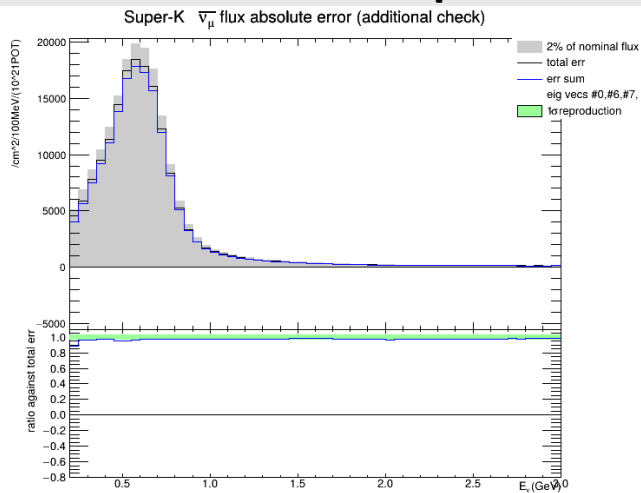


**$\nu$ -mode,  $\nu_\mu$**

**$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$**

**$\nu$ -mode,  $\nu_e$**

**$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_e$**



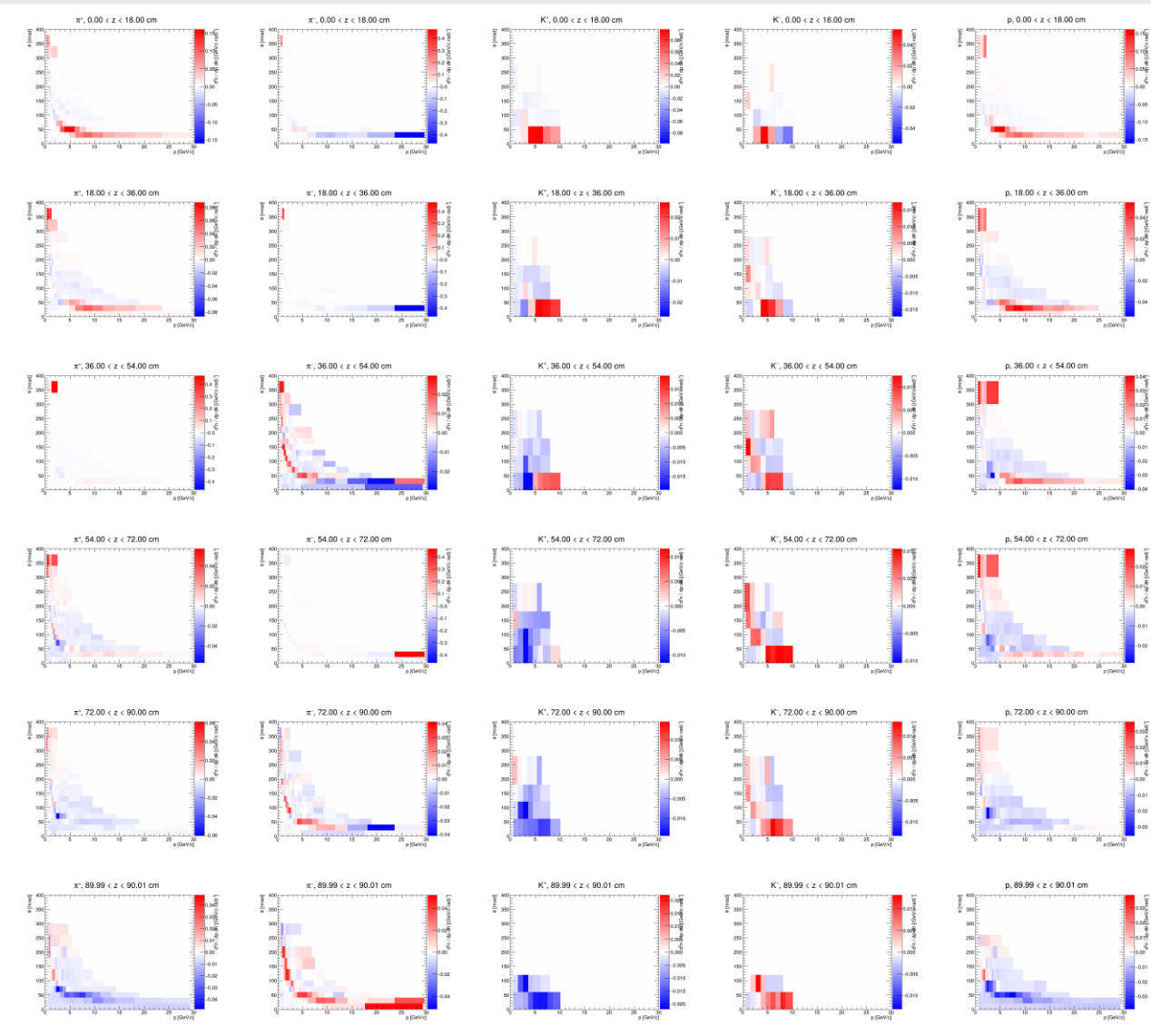
**$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$**

**$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_\mu$**

**$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_e$**

**$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_e$**

# Response of hadron phase space of eig vec #1

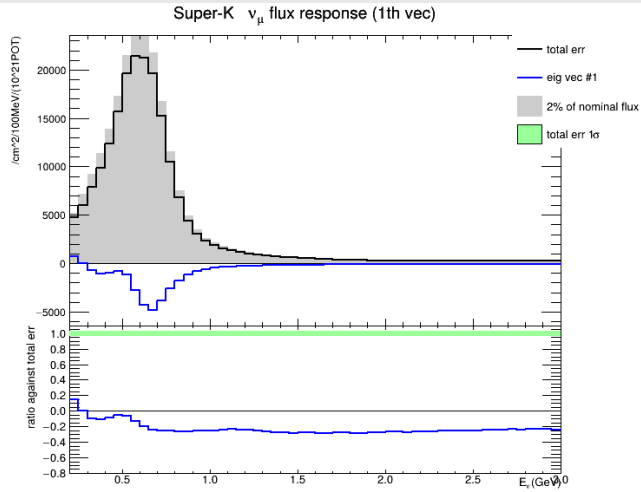


NA61/SHINE実験の系統誤差  
Hadron lossに対応

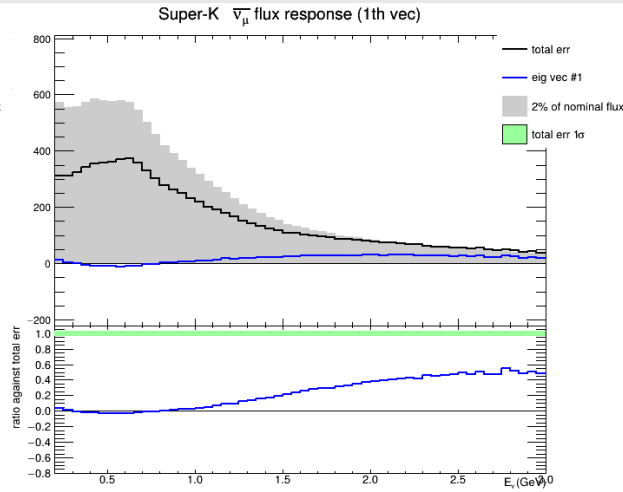
Work in progress

# Response of neutrino flux on new parameter: eig vec #1

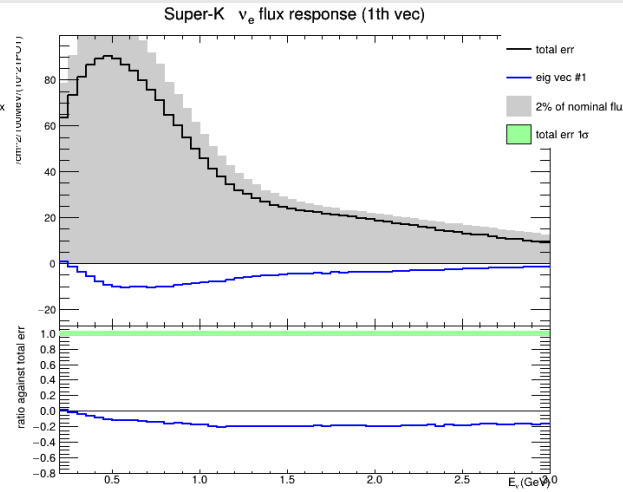
Work in progress



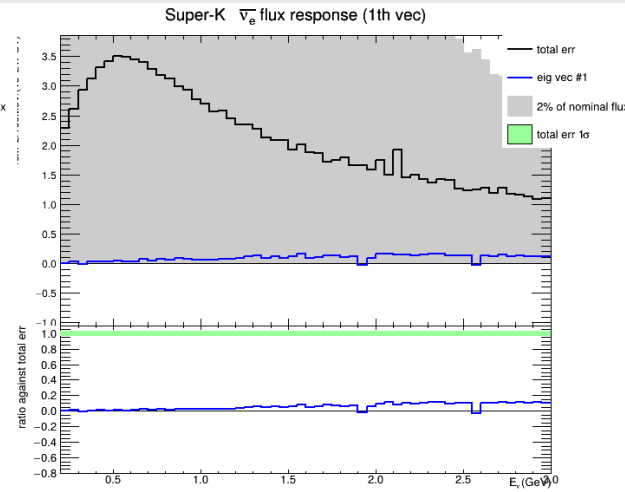
$\nu$ -mode,  $\nu_\mu$



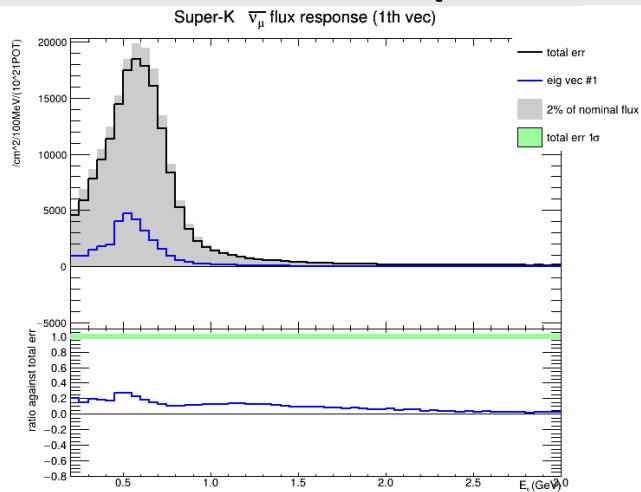
$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$



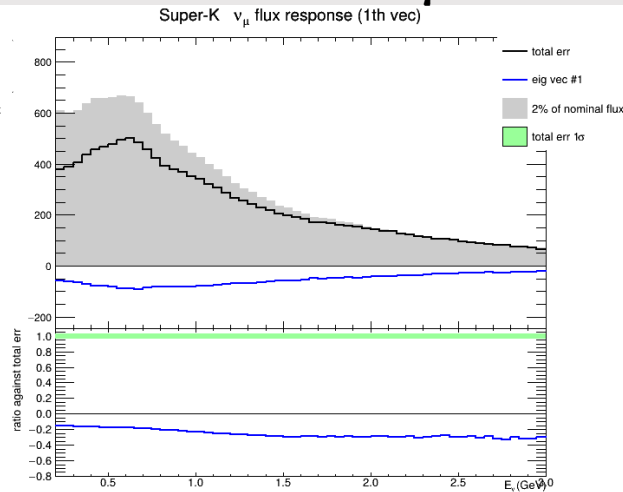
$\nu$ -mode,  $\nu_e$



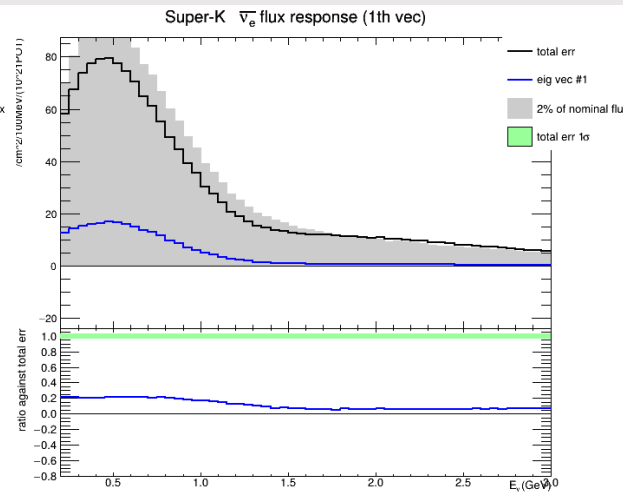
$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_e$



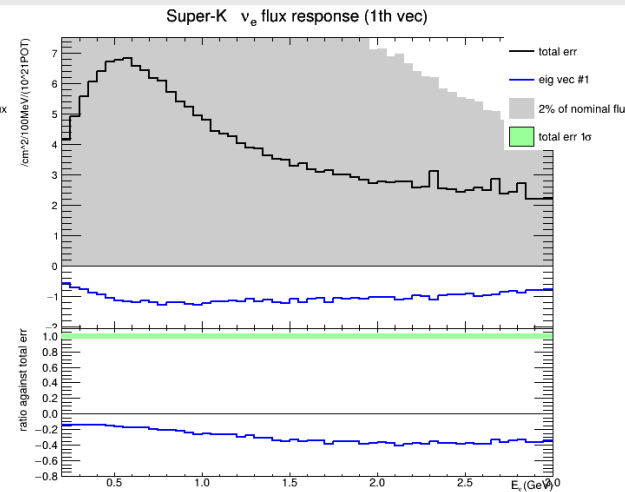
$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$



$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_\mu$

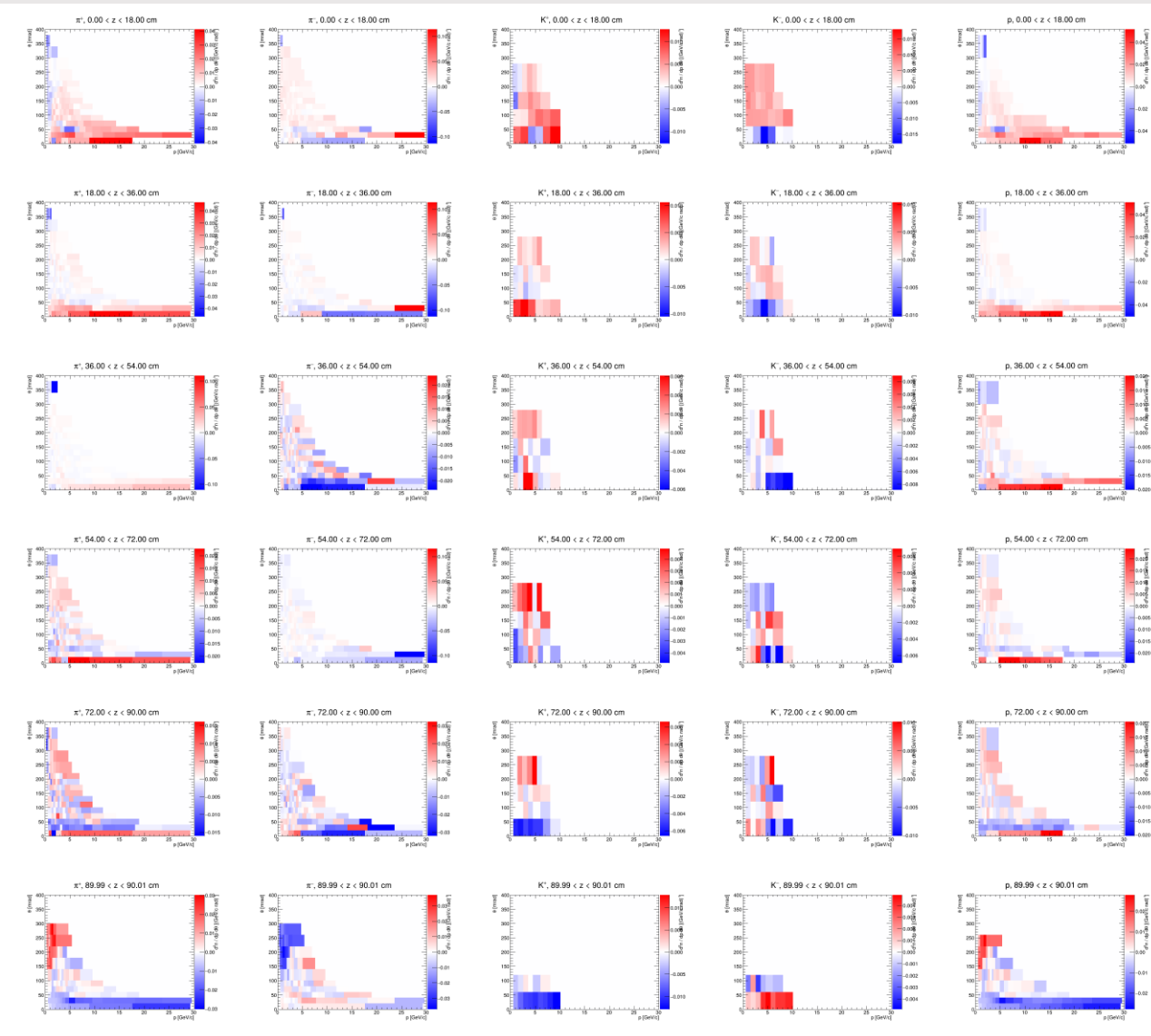


$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_e$



$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_e$

# Response of hadron phase space of eig vec #3

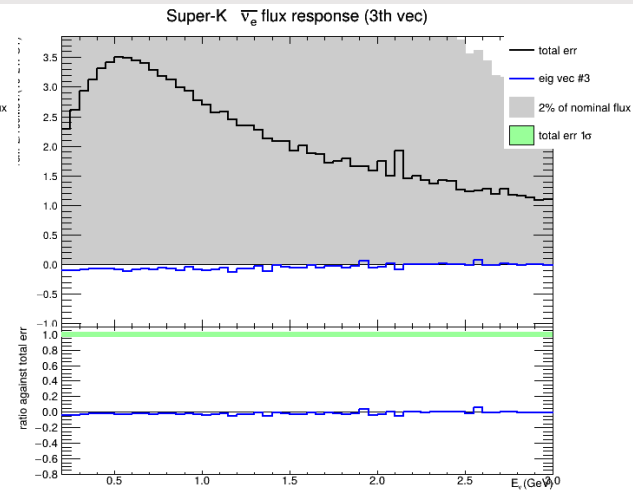
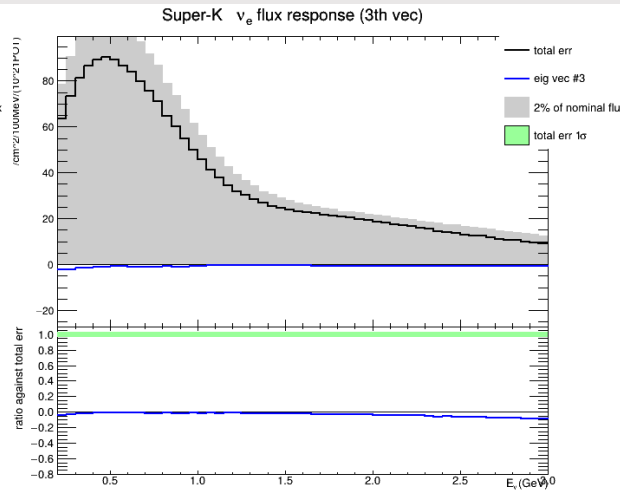
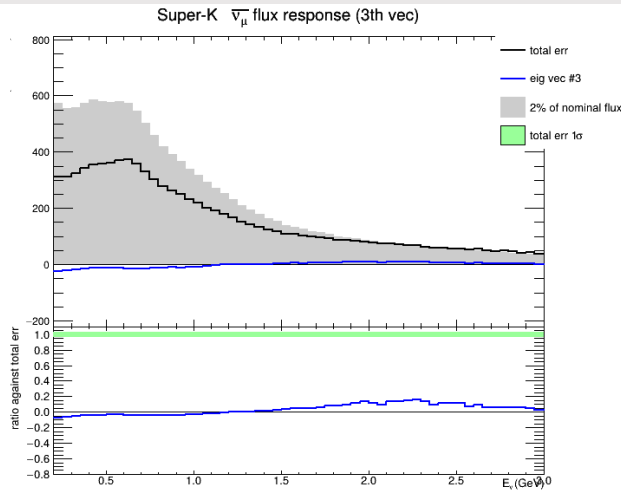
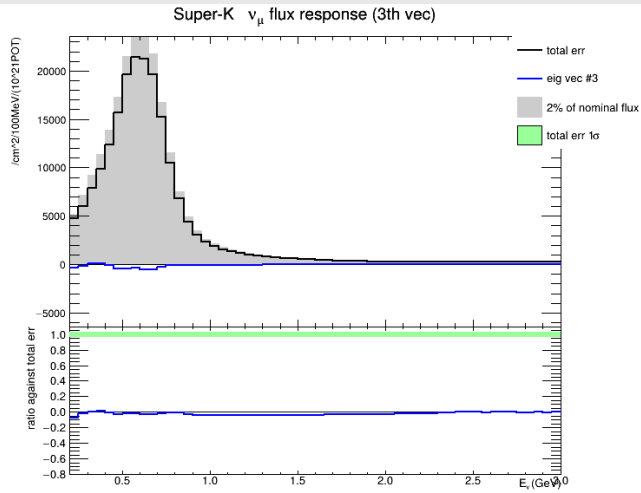


NA61/SHINE実験の系統誤差  
Backward extrapolation  
uncertaintyに対応

Work in progress

# Response of neutrino flux on new parameter: eig vec #3

Work in progress

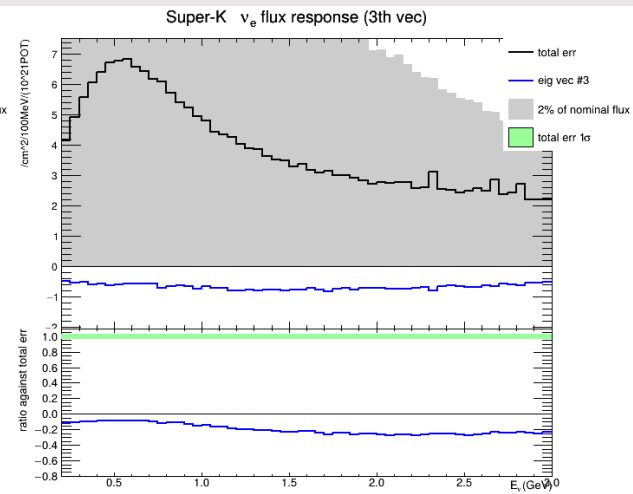
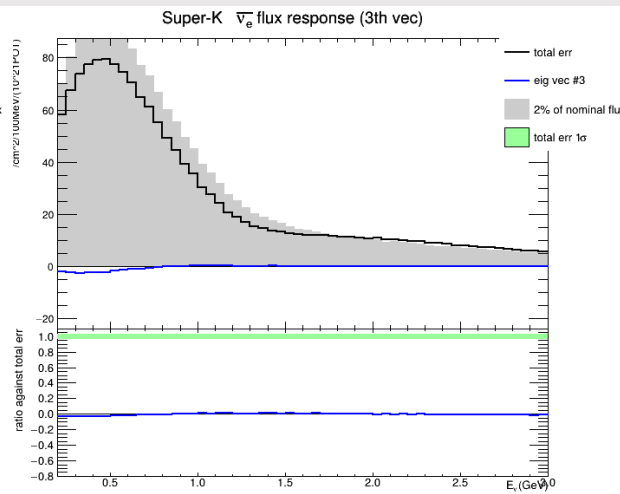
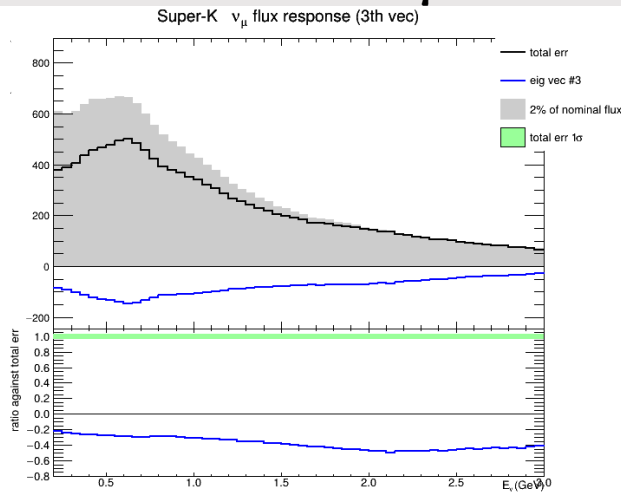
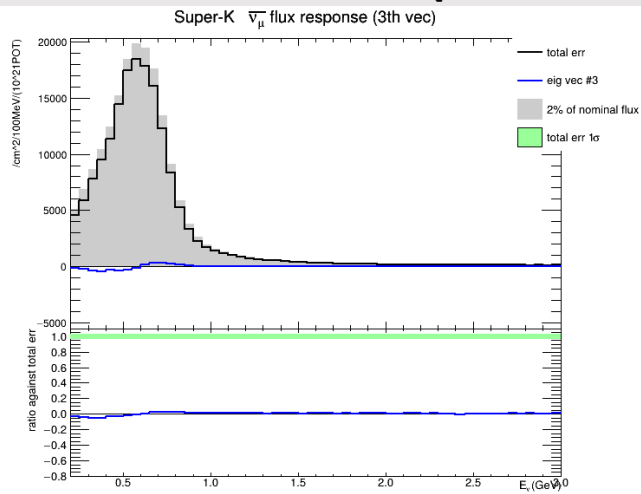


$\nu$ -mode,  $\nu_\mu$

$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$

$\nu$ -mode,  $\nu_e$

$\nu$ -mode,  $\bar{\nu}_e$



$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_\mu$

$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_\mu$

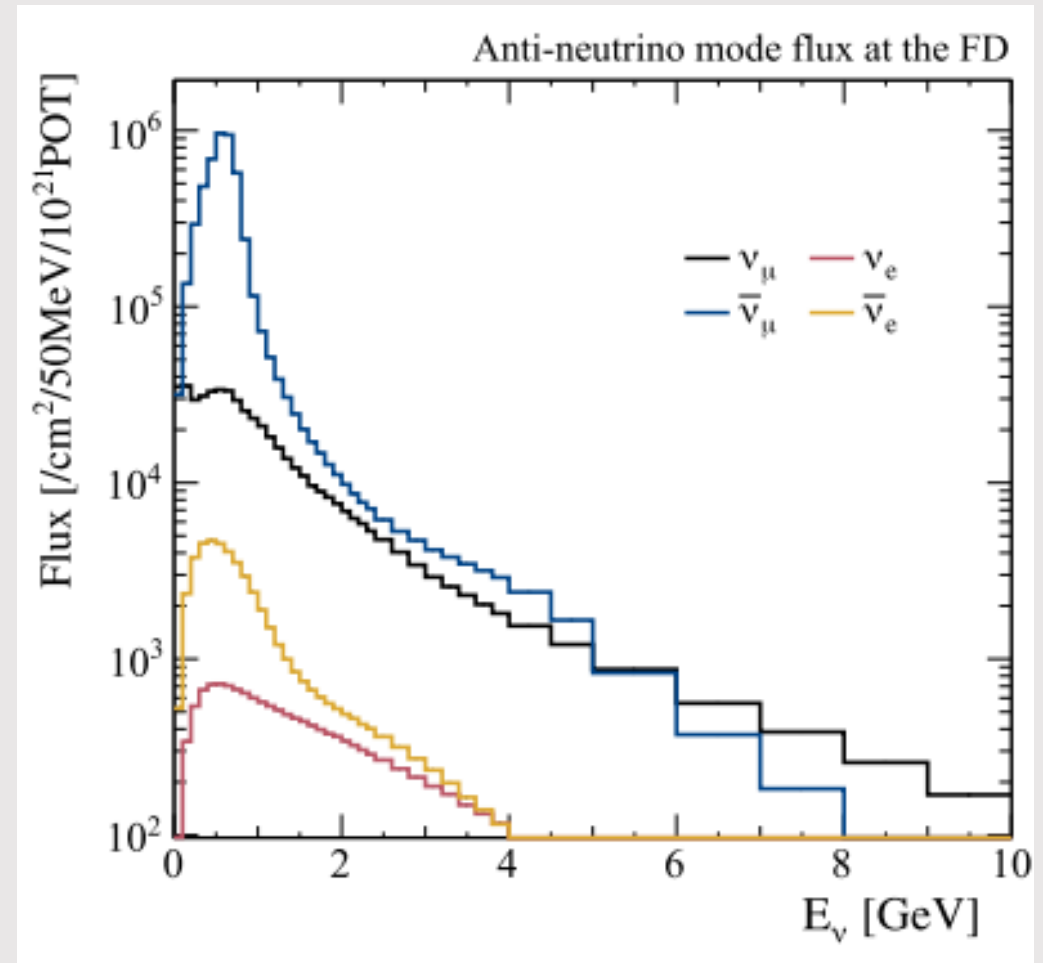
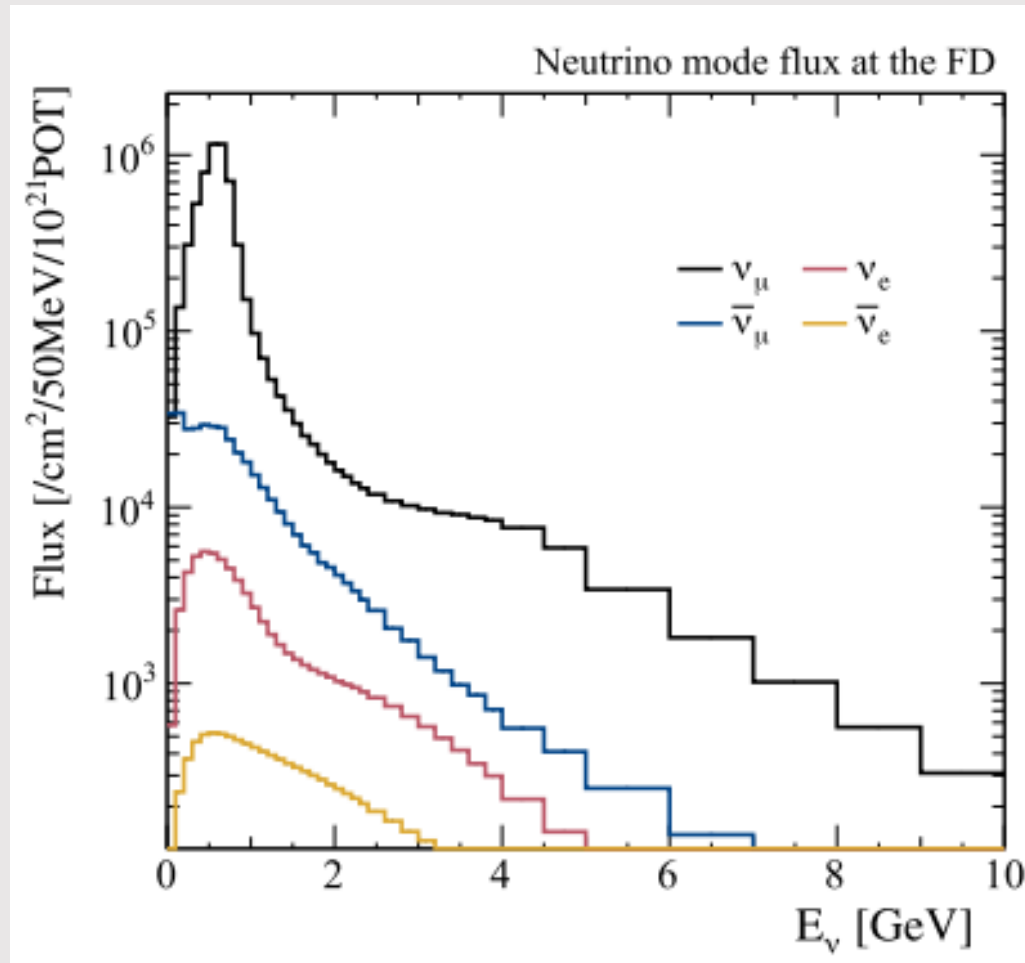
$\bar{\nu}$ -mode,  $\bar{\nu}_e$

$\bar{\nu}$ -mode,  $\nu_e$

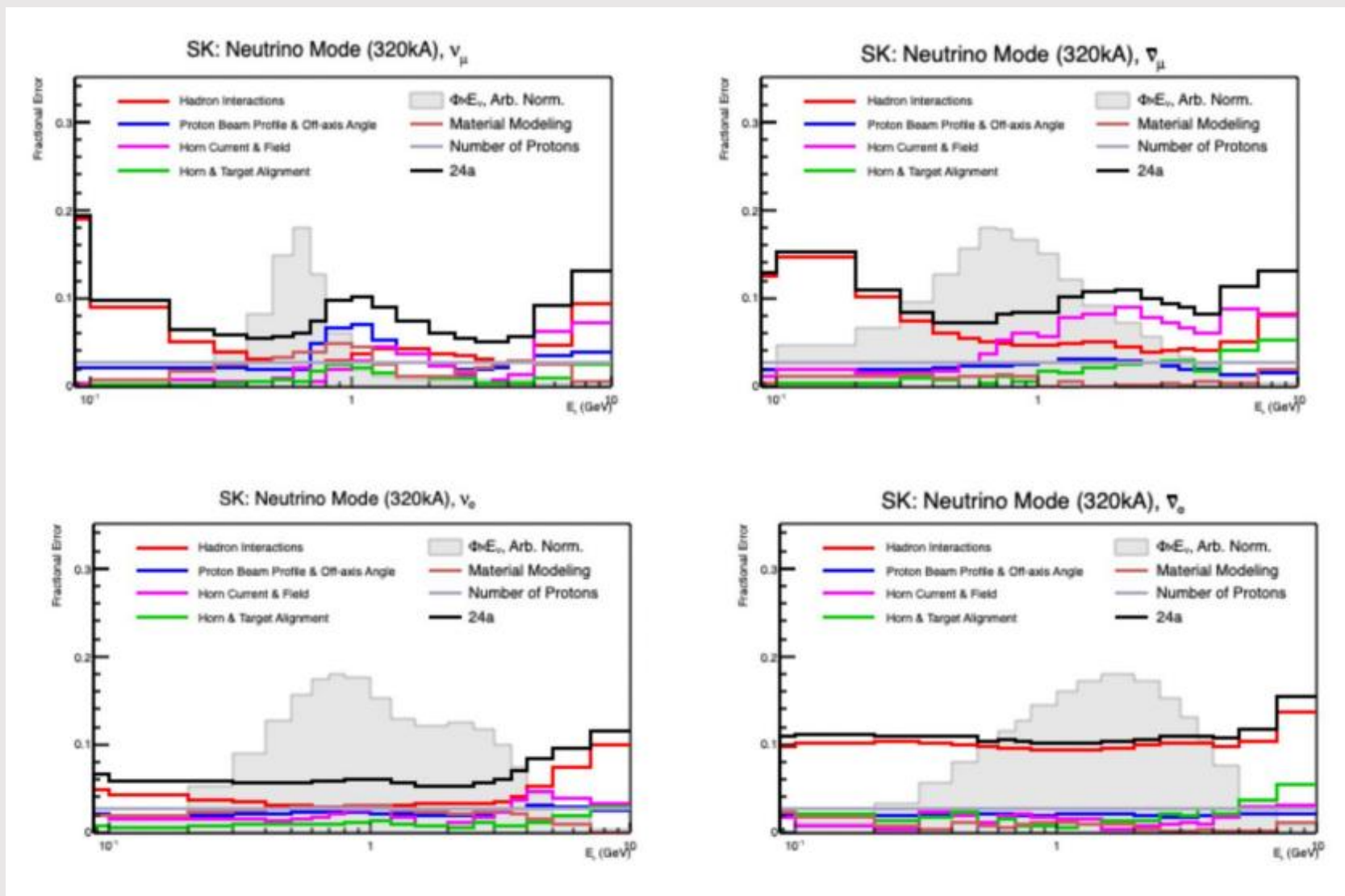
# ニュートリノフラックス強度 フレーバー別

フレーバーごとに強度のオーダーが違う

Eur. Phys. J. C (2023) 83:782

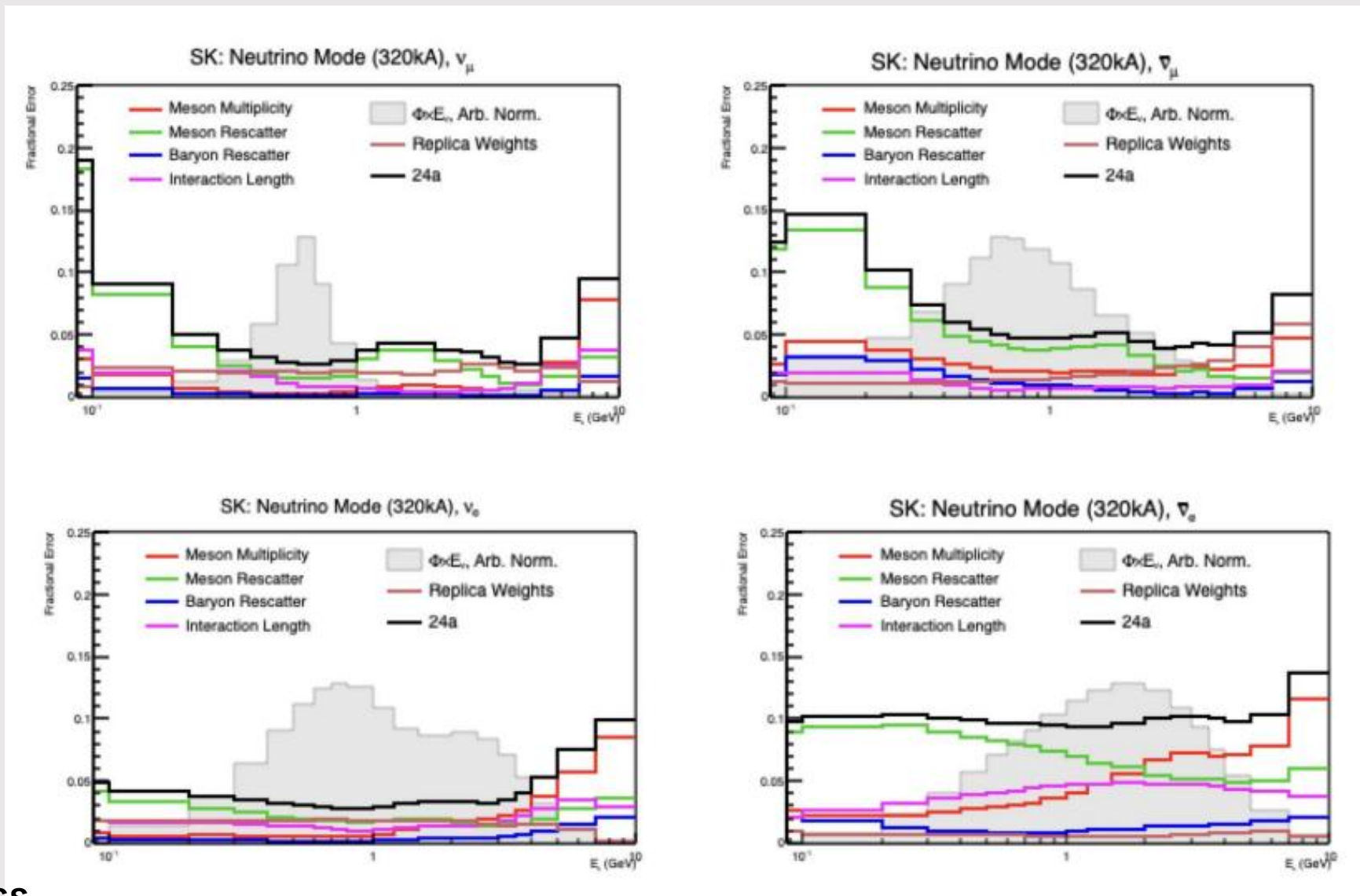


# T2Kのフラックスの不定性一覧 Total



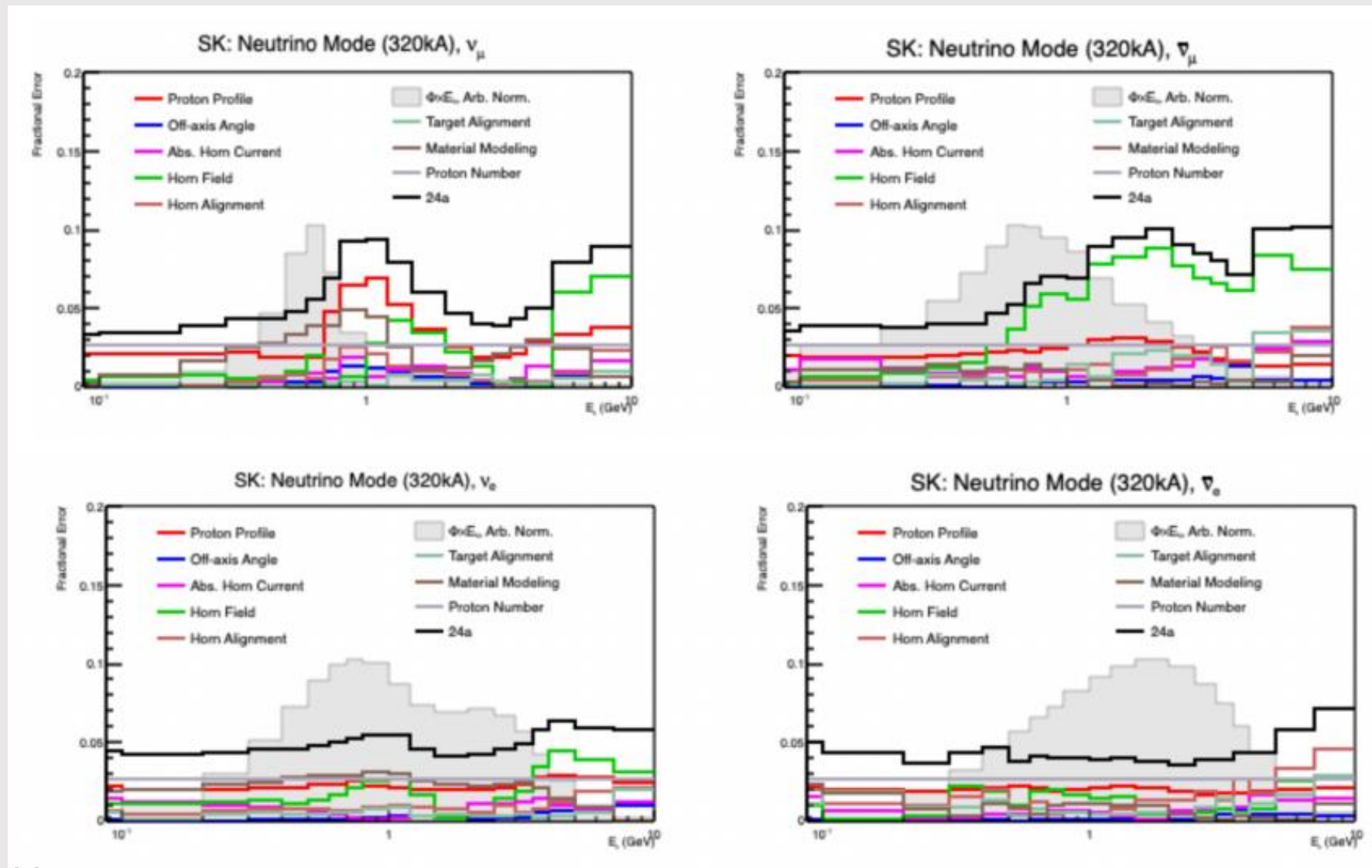
Work in progress

# T2Kのフラックスの不定性一覧 Hadronic



Work in progress

# T2Kのフラックスの不定性一覧 non-hadronic



Work in progress