

加速器ニュートリノの多地点観測における フラックス相関を取り扱う新しい手法の開発

石田健浩

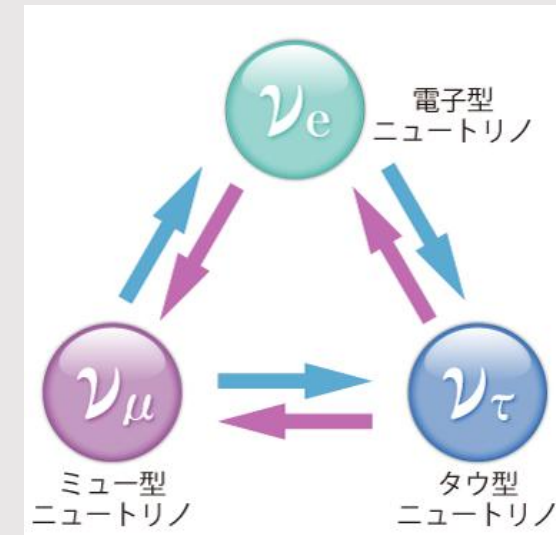
素粒子実験（加速器）研究室

物質-反物質の対称性の破れ

粒子-反粒子の対称性に反し、今の宇宙は 物質 ≧ 反物質 で非対称
→ 必要な条件の一つ：CP対称性が破れていること

クォークのCPの破れは現在の宇宙を説明できるほど大きくない
→ クォークではなく レプトンにおけるCPの破れが鍵

ニュートリノ振動の発見 → ニュートリノは混合する
→ レプトンにおけるCP対称性の破れの可能性

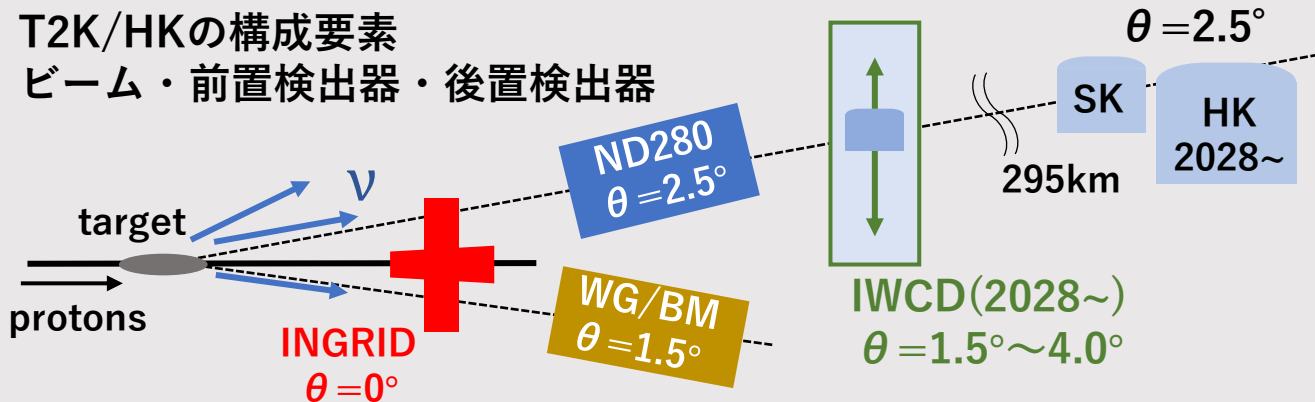


ニュートリノ振動と反ニュートリノ振動を加速器を使って比較

T2K実験からHyper-Kamiokande実験へ

T2K/HKの構成要素

ビーム・前置検出器・後置検出器



SK → HK (体積8倍) + ビーム増強 → 統計量増加

残る課題はニュートリノ反応断面積の不定性

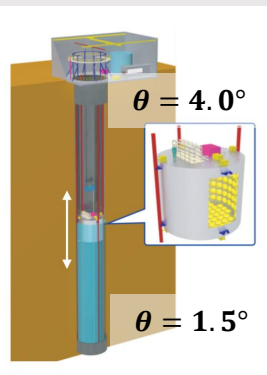
→ ND280のアップグレード、WG/BMの利用

さらにHKでは中間検出器 **IWCD** を建設中

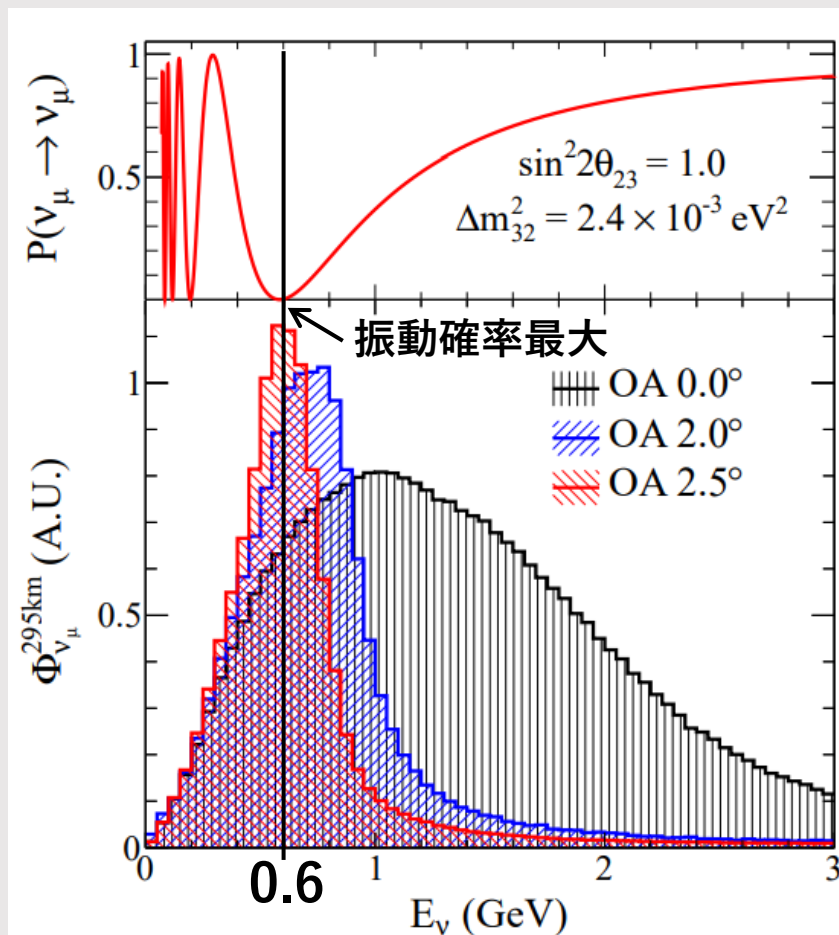
IWCD: 上下に移動してOff-Axis角を選べる

場所ごとにスペクトルが変わることを利用

深刻な計算コストが課題 → 本研究



ビームの中心軸からずれた位置で、
実験に適したニュートリノを取り出す



Phys. Rev. D 87, 012001

測定誤差を記述する共分散行列

誤差伝播の式

$$\sigma(f(\mathbf{x}, \mathbf{y}))^2 \approx \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + 2 \left(\frac{\partial f}{\partial x} \times \frac{\partial f}{\partial y}\right) \underline{\sigma_{xy}}$$

系統誤差は共分散を含む2次元の情報で記述される

→ 共分散行列

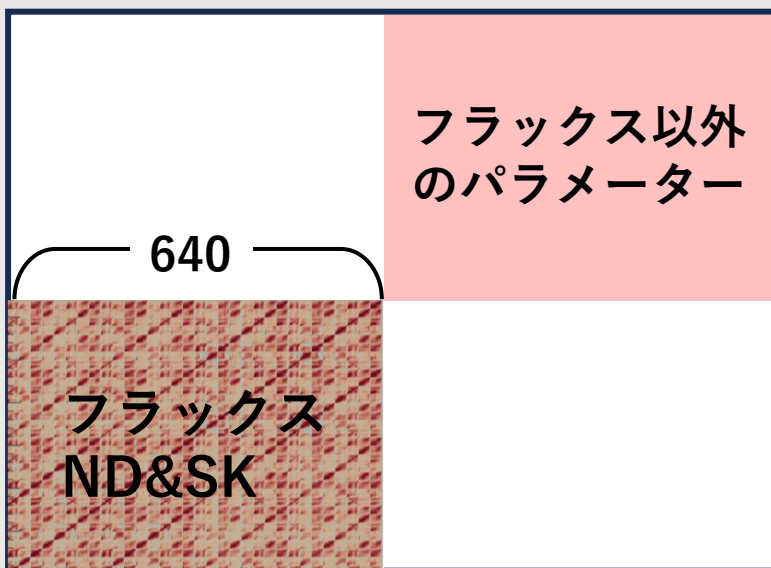
T2Kの系統誤差：フラックス強度・反応断面積・検出器誤差など

→ 本研究で重要なのはフラックス誤差を記述する共分散行列

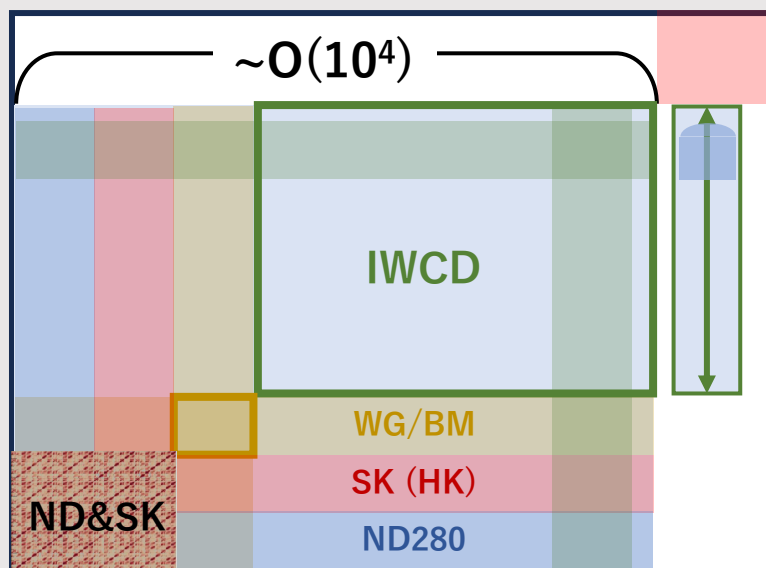
HK実験で予測される深刻な計算コストの問題

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

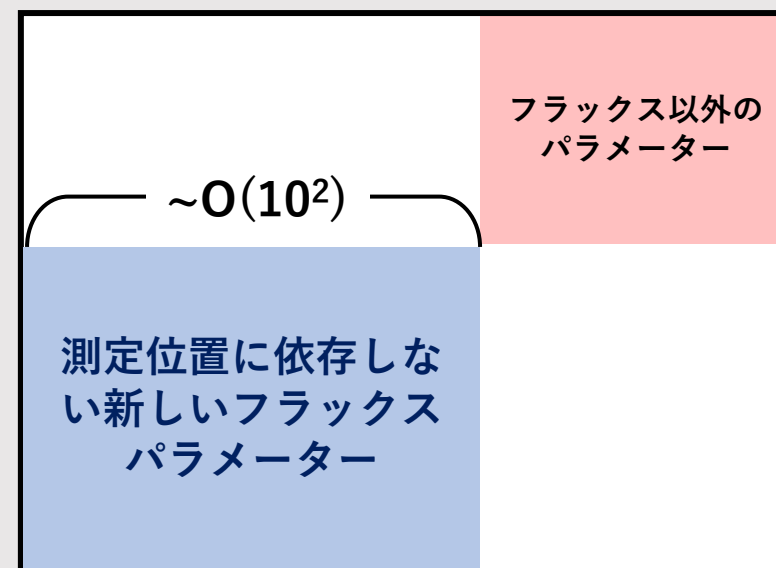
測定位置に依存しないパラメーターを使うことで、測定点が増えた際の計算コストを抑える



現在の共分散行列



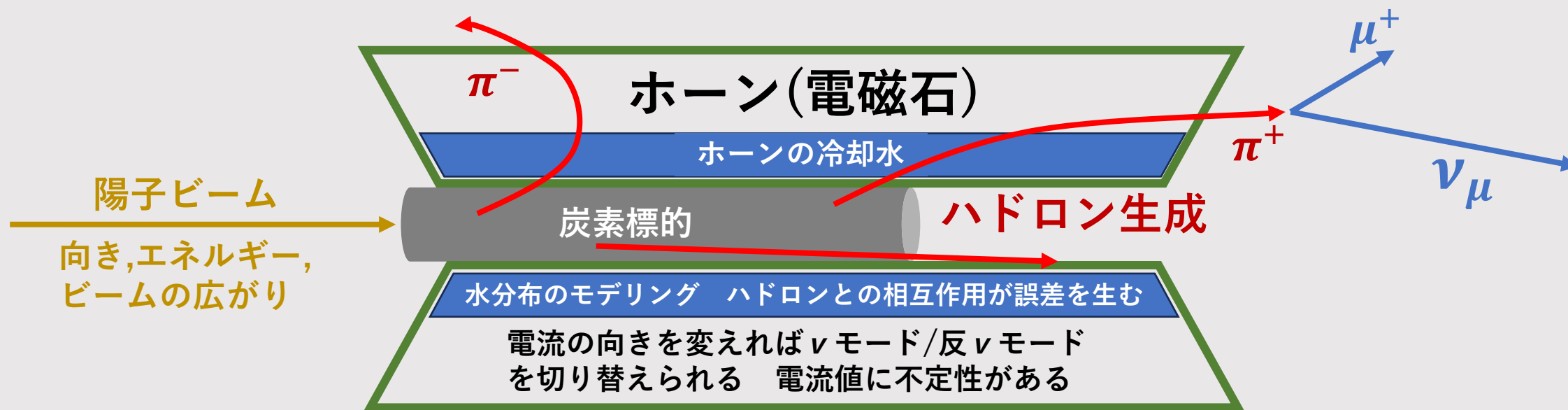
HK時代に共分散行列が巨大化すると予想される



本研究で変数の数を減らすことを目指す

ニュートリノフラックスの不定性の要因

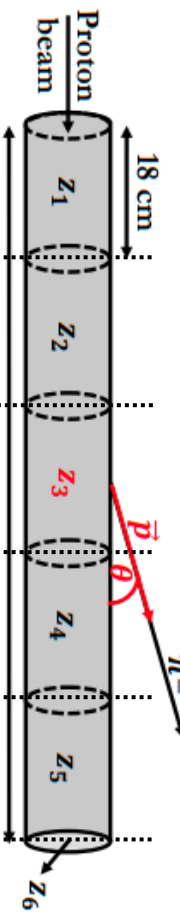
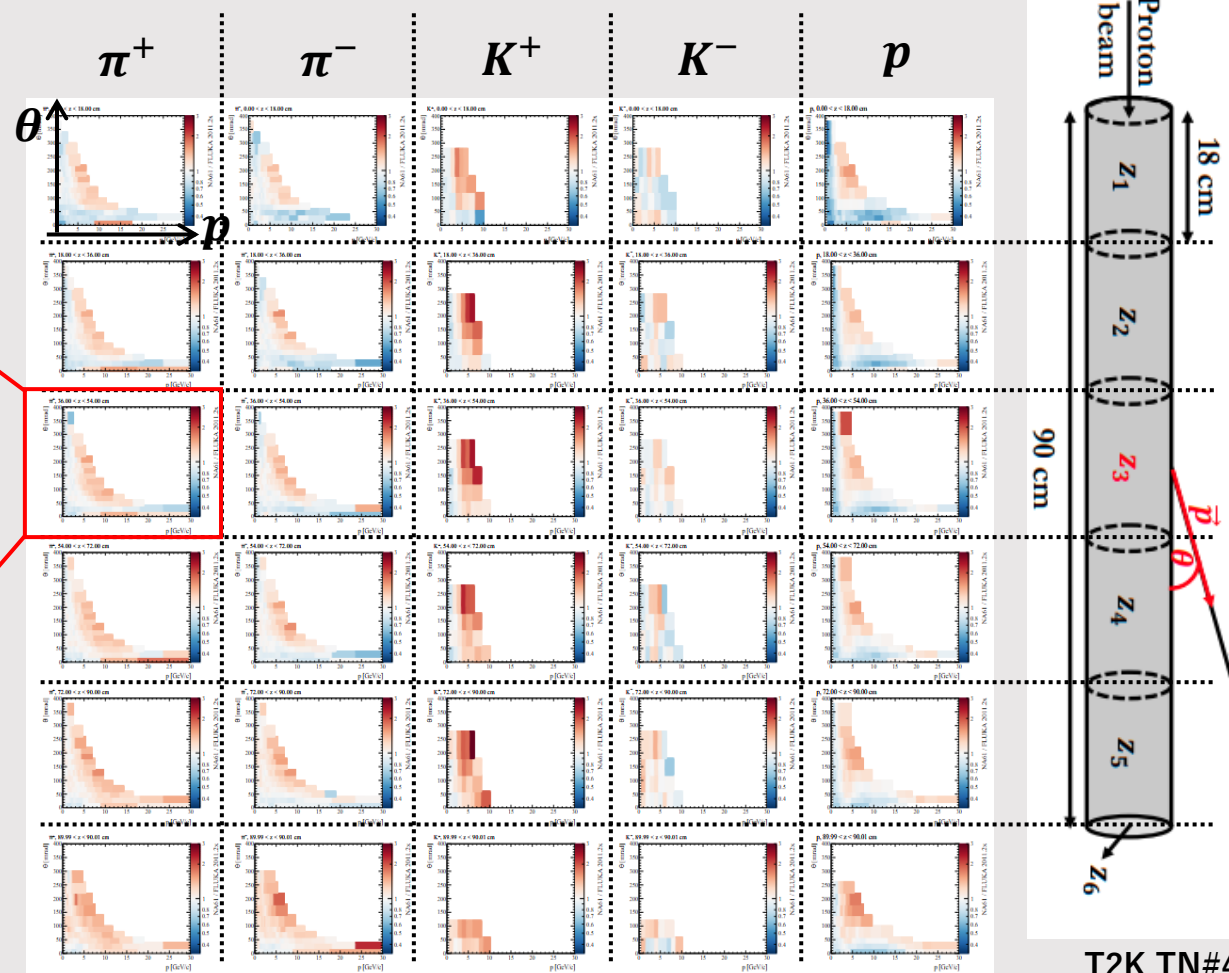
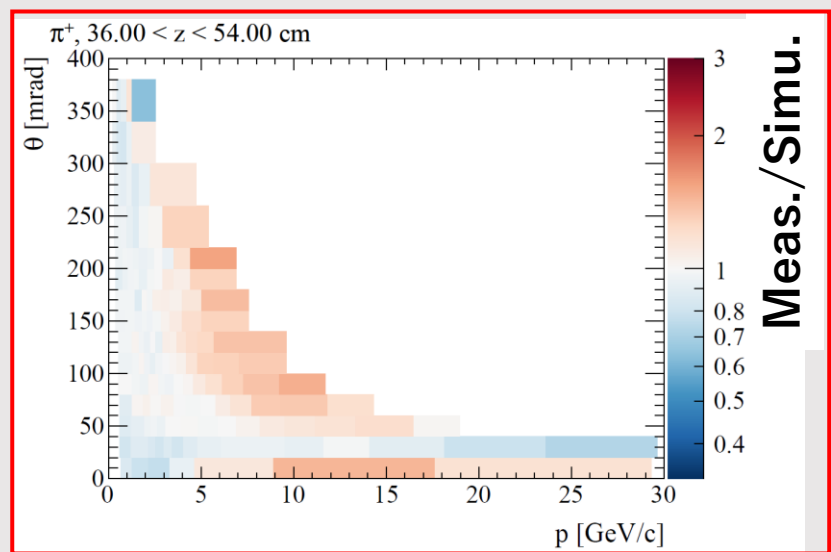
T2Kでは炭素標的に陽子を照射し、パイオンなどのハドロンを生成、それらが崩壊しニュートリノを放出する



フラックスに直す前の系統誤差変数は検出器の位置に依存しない
ハドロン相互作用は実験に基づいて記述される
→測定値そのものをフラックス変数とするため**最も複雑**になる

NA61/SHINE実験 Replicaターゲットの測定

T2Kと同じ形状のターゲットを使ったハドロン生成測定



T2K TN#401

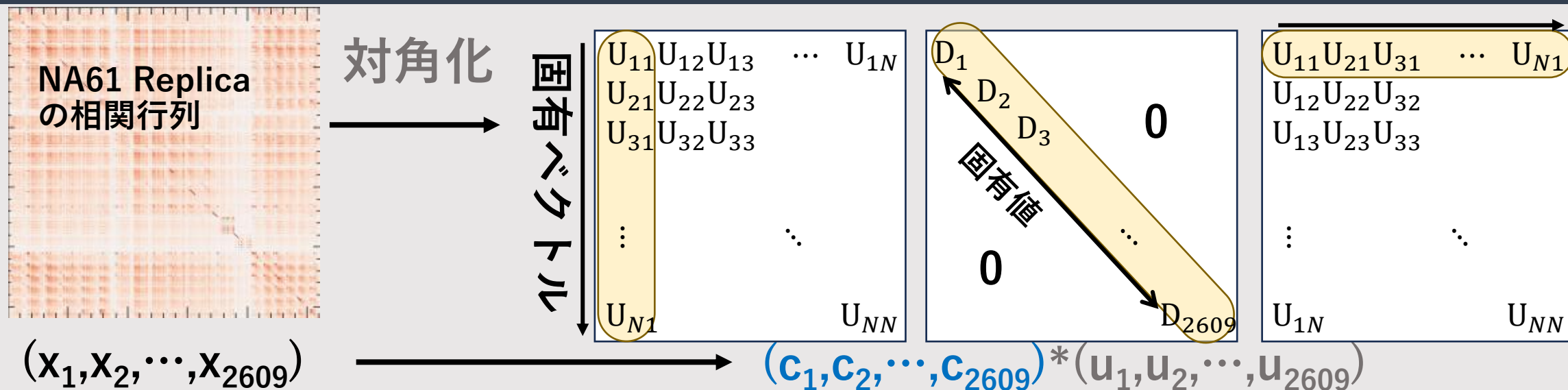
シミュレーション上のハドロン生成率と実測値の比を測定

→ MCシミュレーションを修正

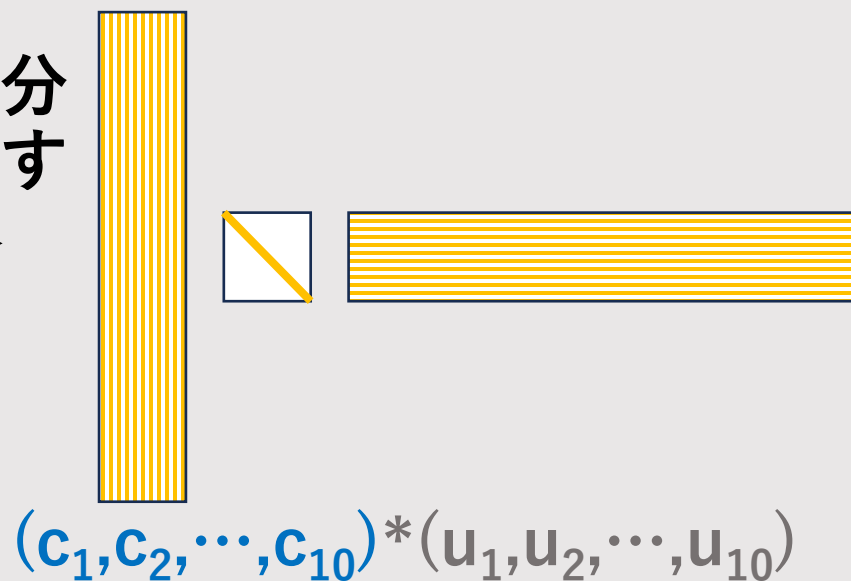
↑ 2609個の測定値全てが変数

→ フラックス変数を減らせていない

NA61/SHINE実験の不定性 計算量を減らす方法



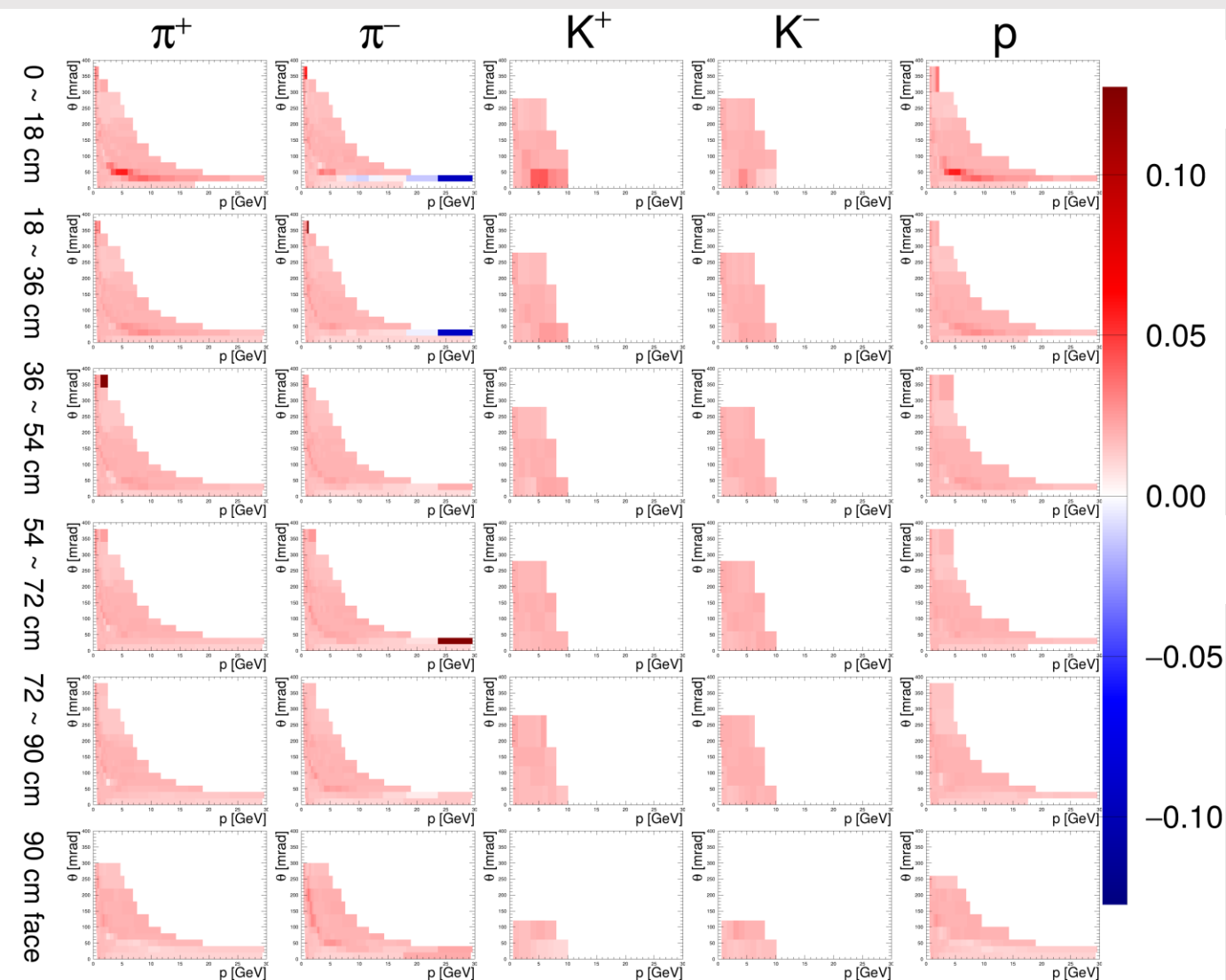
重要な部分
だけを残す



1. 固有値展開で無相関の
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

固有ベクトル#0のハドロン生成の応答



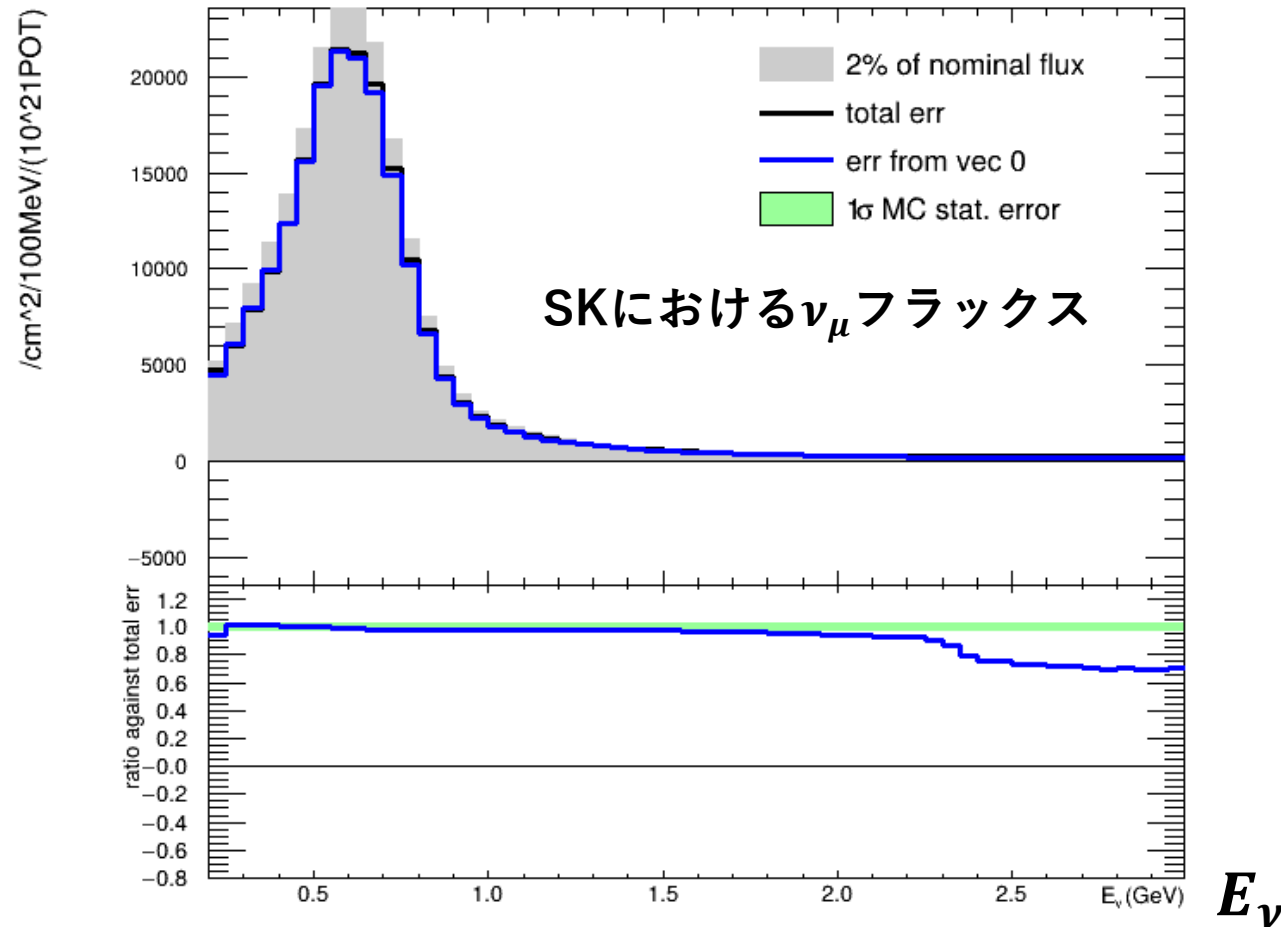
測定した位相空間のほとんどの領域で同時に2%変化する応答

ニュートリノフラックスの応答も広い範囲で同時に変化すると予測

NA61/SHINE実験における再構成効率に由来する系統誤差と一致 (位相空間全体に2%の誤差)

固有ベクトル#0のニュートリノフラックスの応答

固有ベクトル#0の変数を 1σ 変化させたときのフラックスの変化
低エネルギーの誤差の支配的な成分



灰: 2%にスケールしたフラックス
誤差の大きさを見るため

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

青: ニュートリノフラックスの変化(上)
変化のtotal誤差に対する比(下)

緑: 再現誤差で目指す範囲
合計の誤差がこの範囲に達すればOK

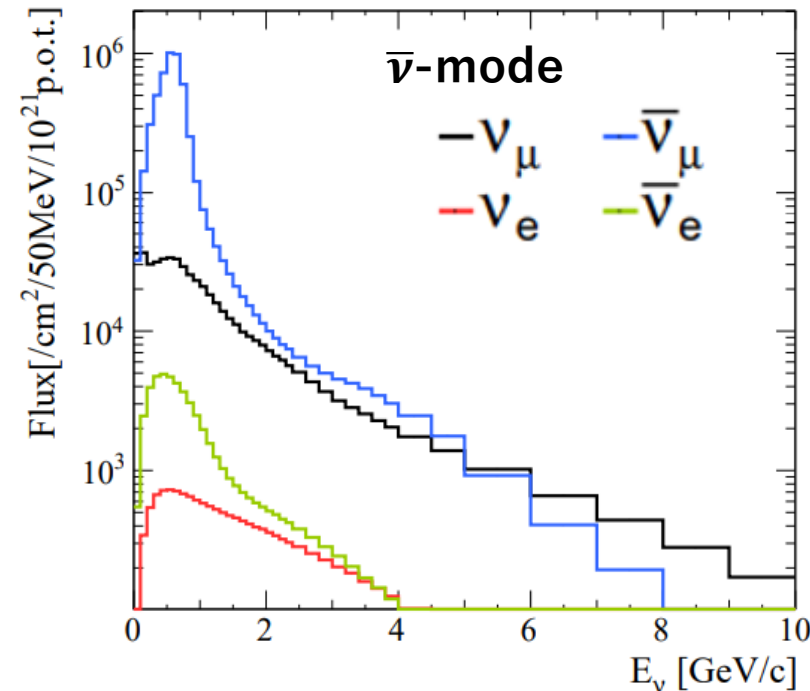
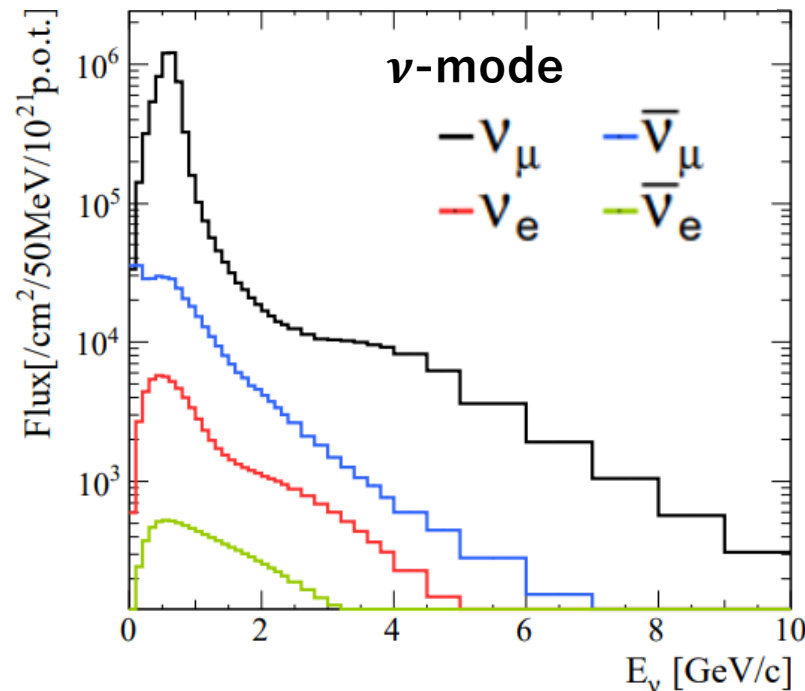
ニュートリノフラックス強度 フレーバー別

ν -modeでは ν_μ が最も多いが、高運動量の π^- などから他のフレーバーも生じる

フレーバーごとに強度のオーダーが違う

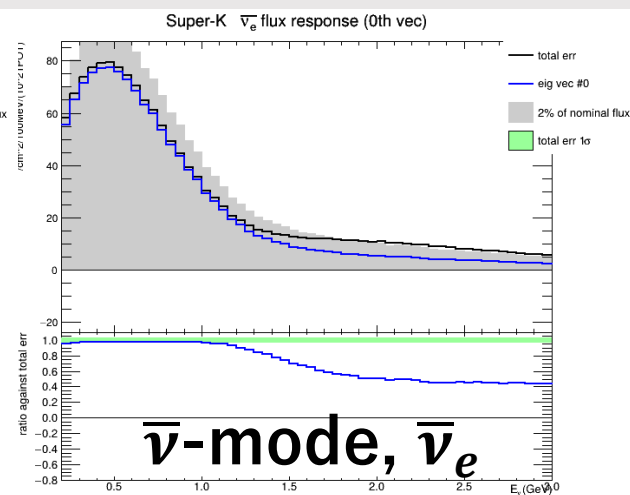
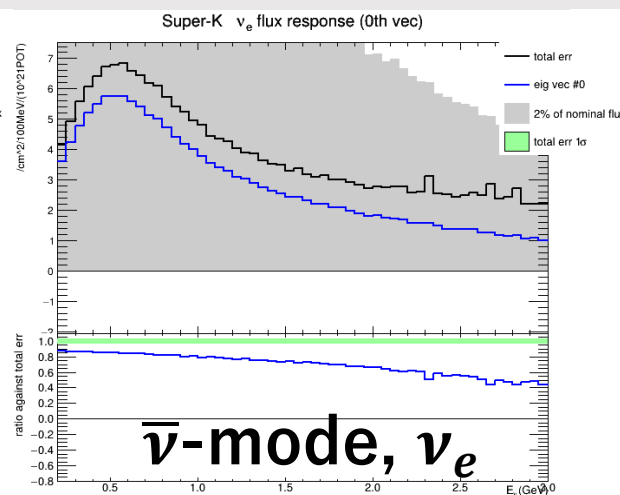
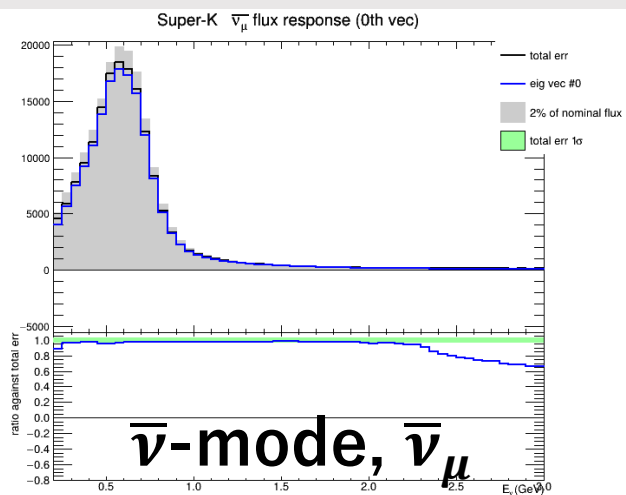
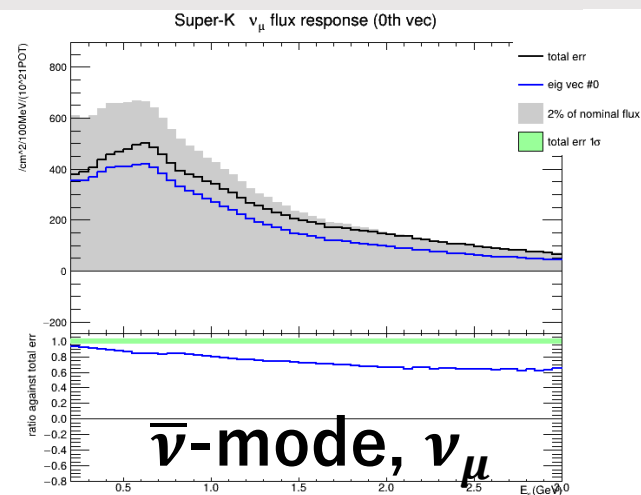
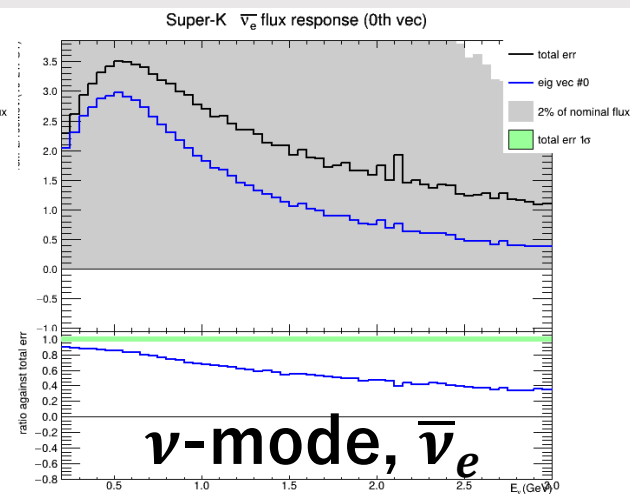
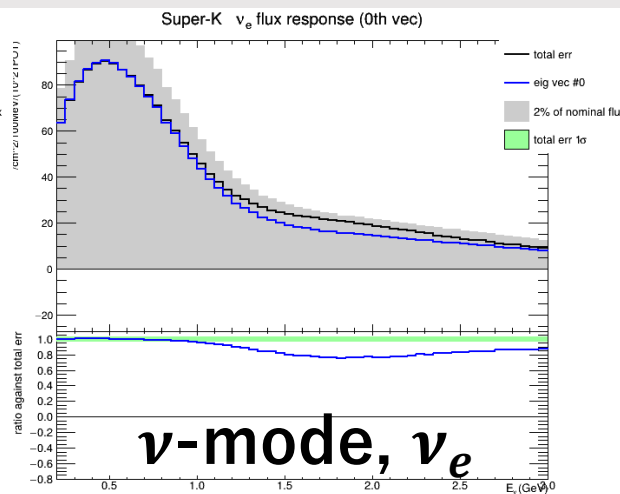
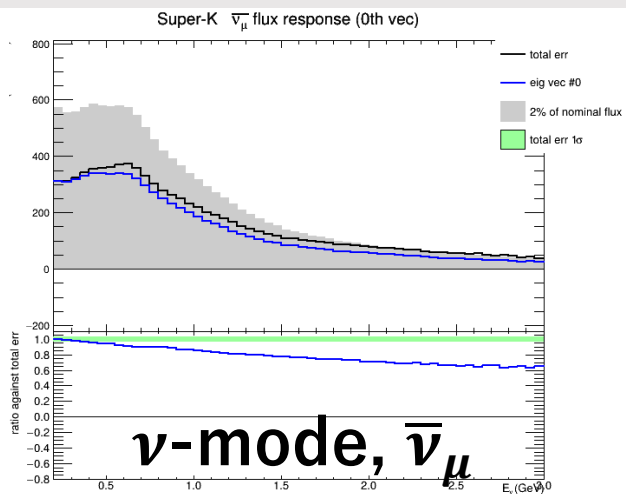
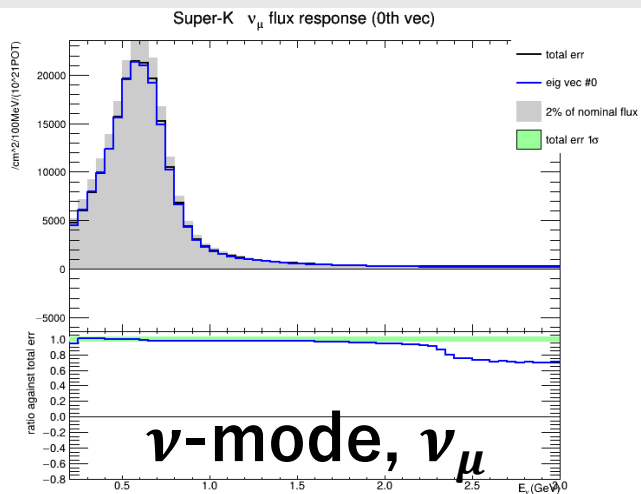
$\bar{\nu}$ -modeも同様に計8種のフラックスについて開発が必要

Super-Kにおけるフラックス強度

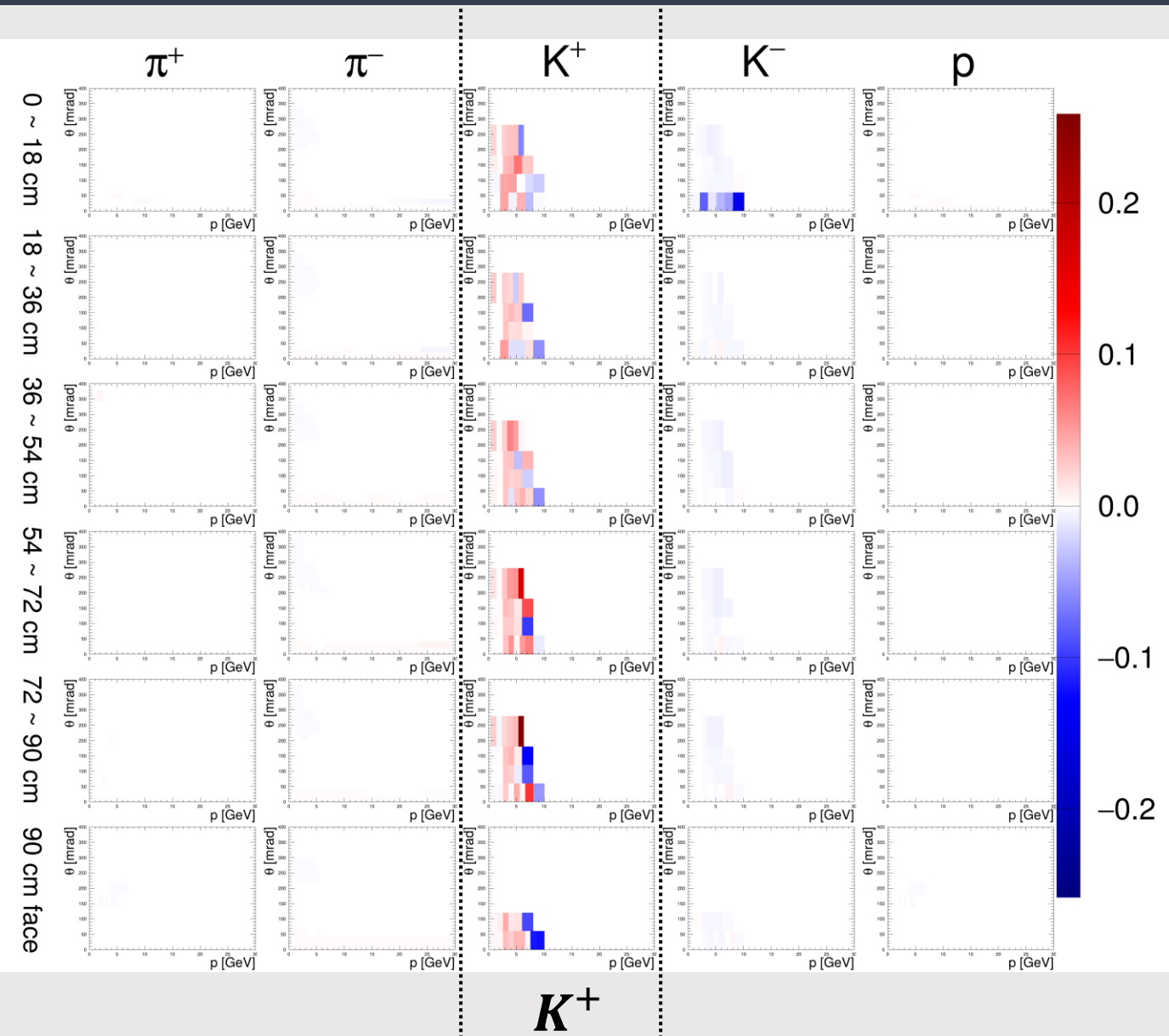


固有ベクトル#0のニュートリノフラックスの応答

広い領域でフラックス強度が変化する



固有ベクトル#6のハドロン生成の応答



主に K^+ の生成数が増える応答

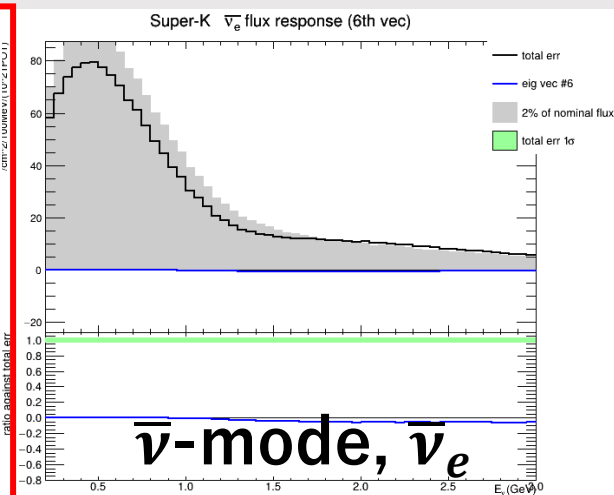
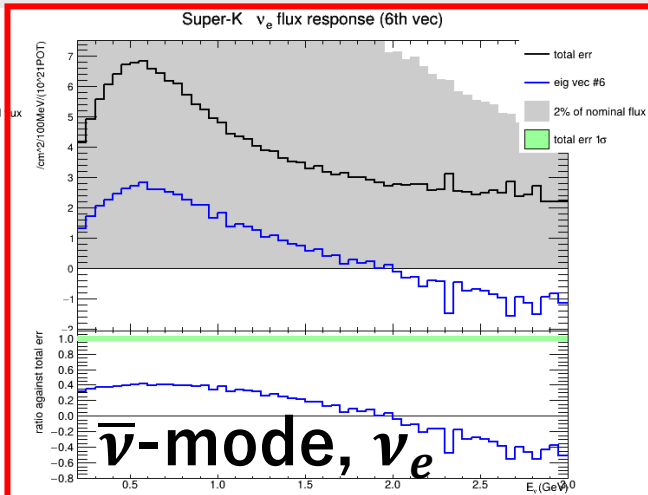
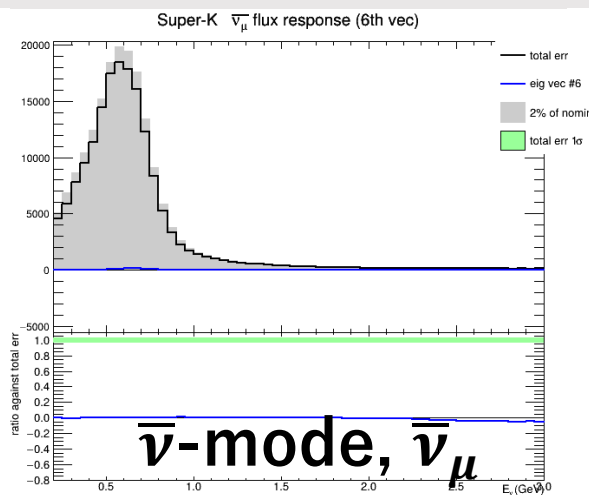
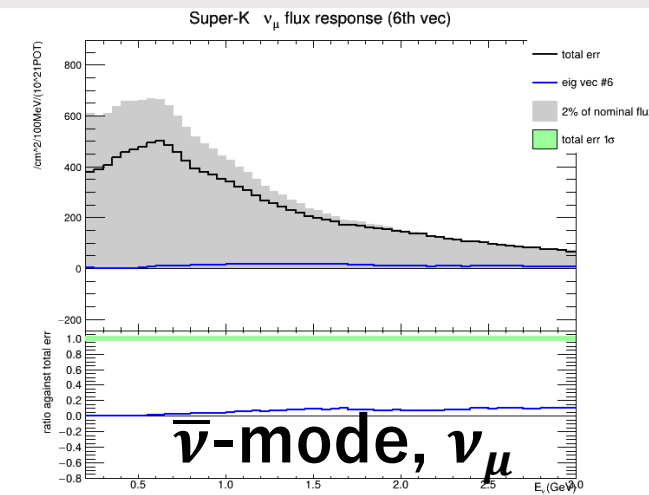
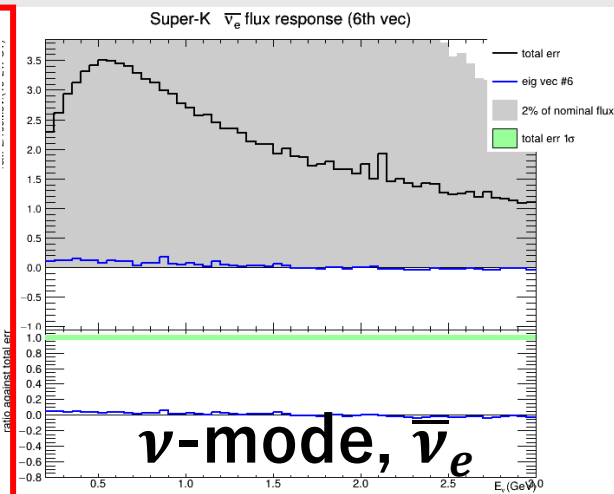
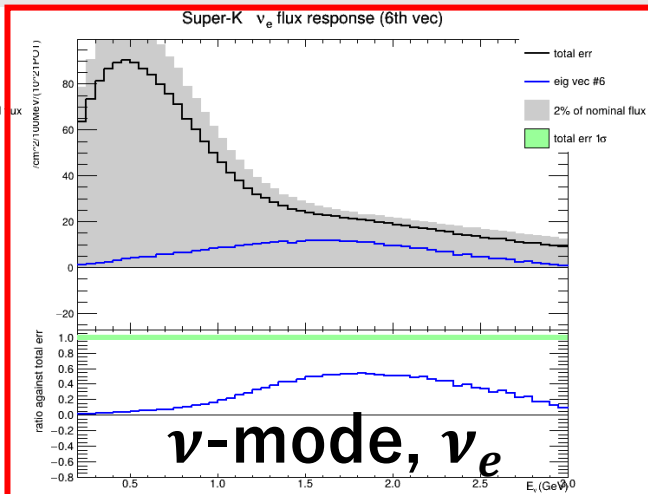
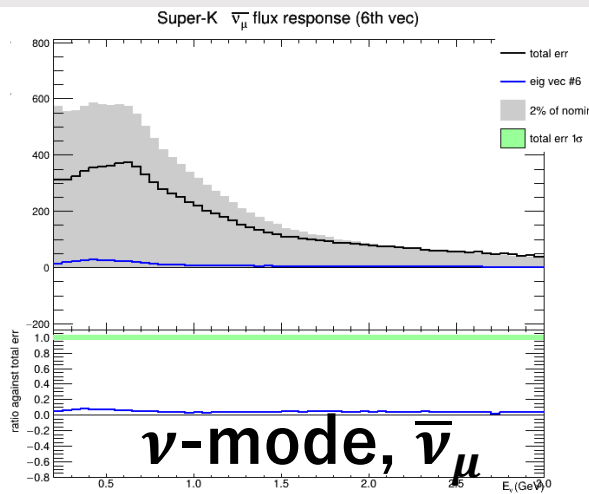
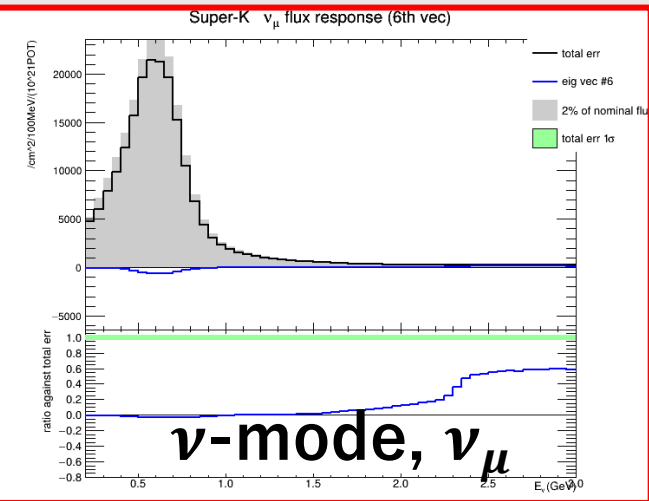
K^+ は ν_e と高エネルギーの ν_μ の
主な親粒子

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

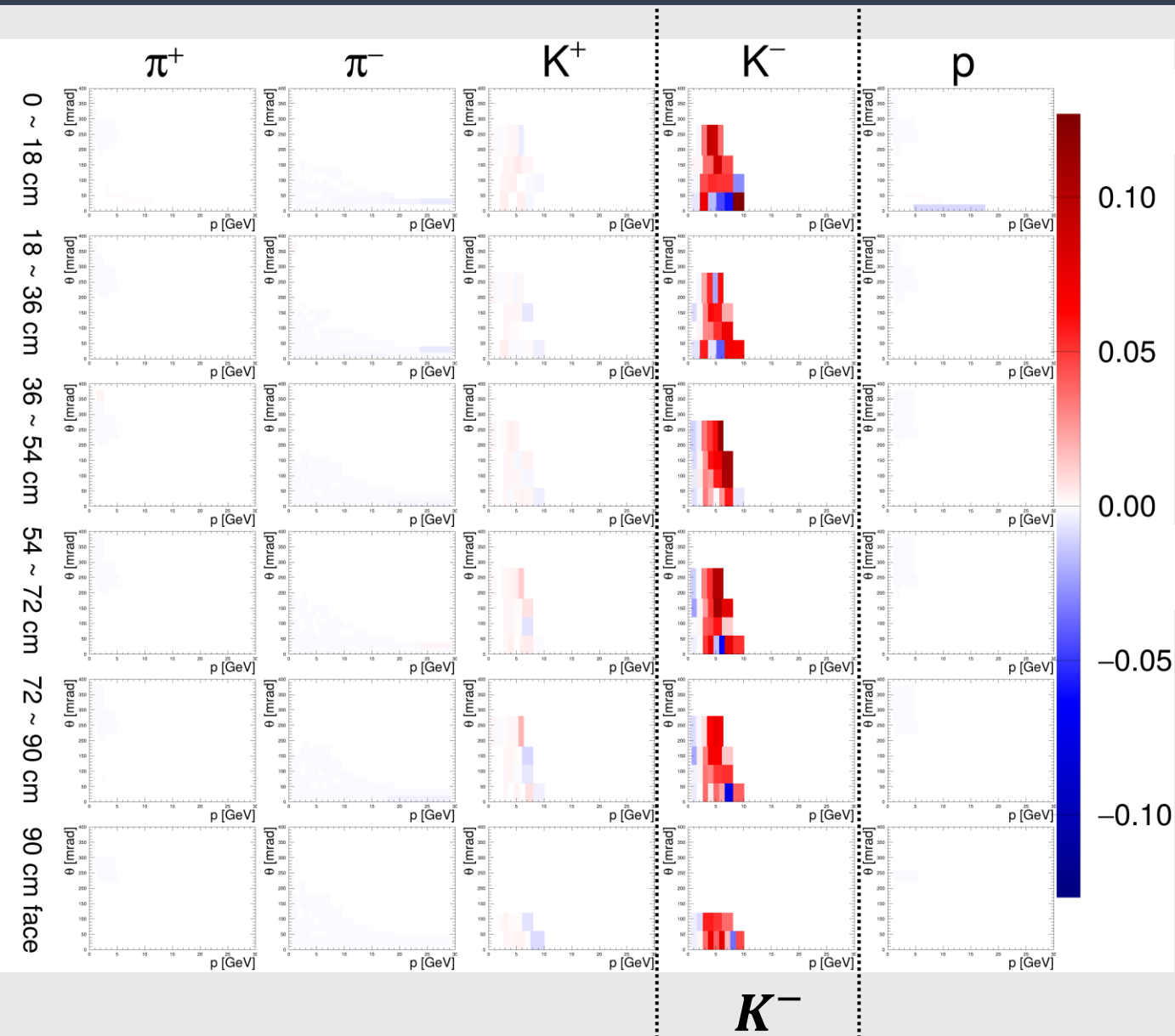
粒子識別の系統誤差に対応

固有ベクトル#6のニュートリノフラックスの応答

両ビームモードの ν_e と ν -mode における高エネルギーの ν_μ



固有ベクトル#7のハドロン生成の応答



主に K^- の生成数が変化する応答

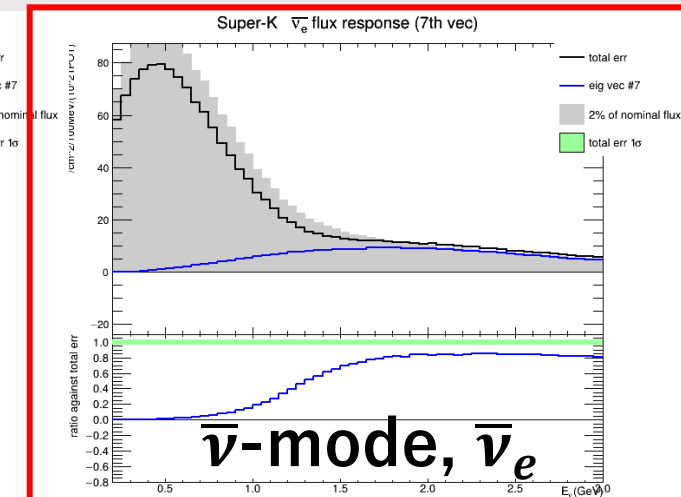
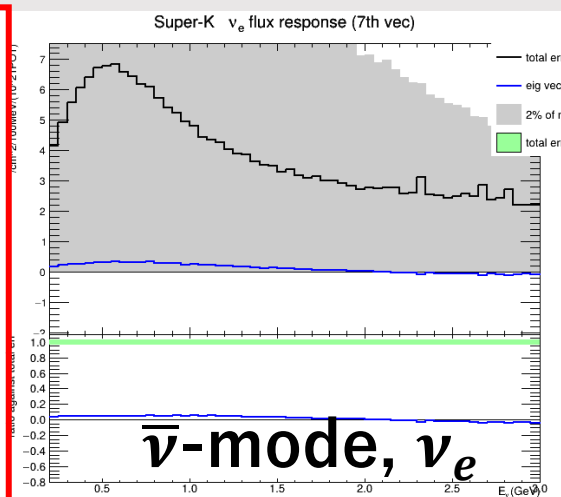
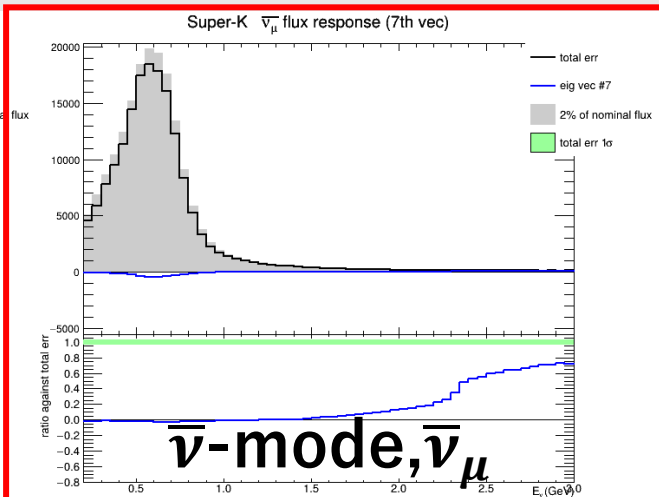
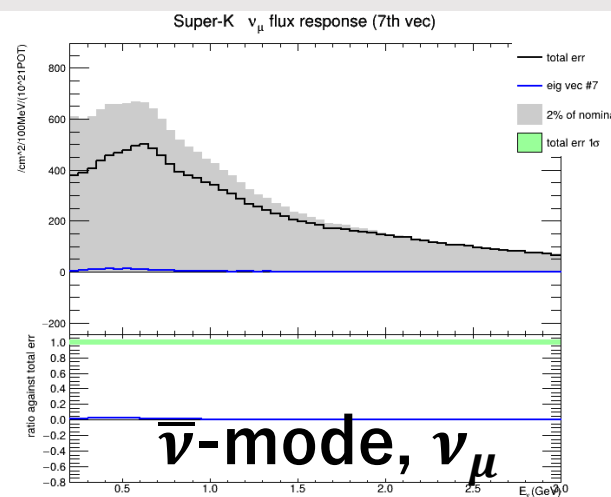
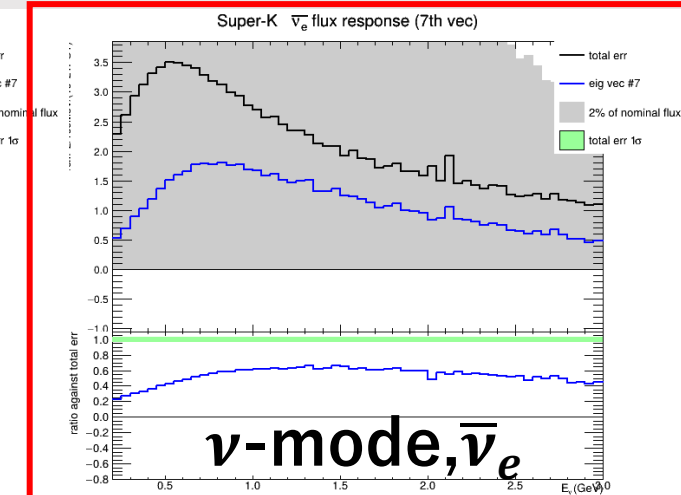
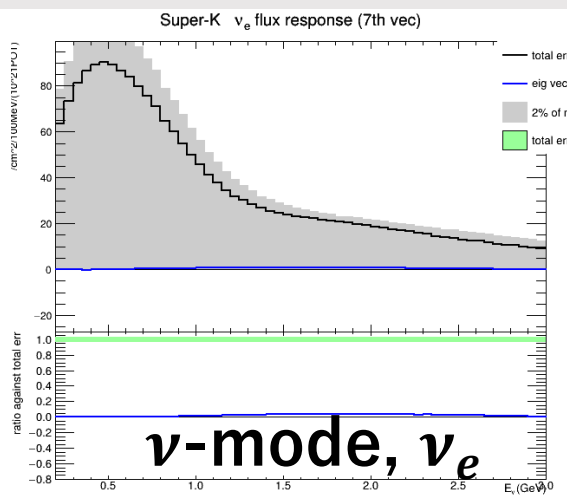
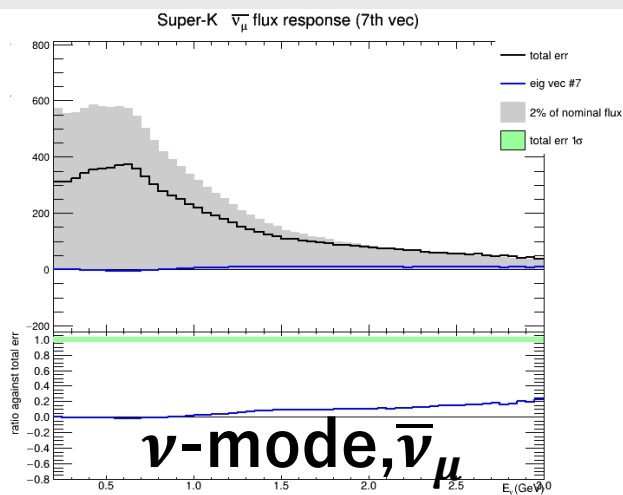
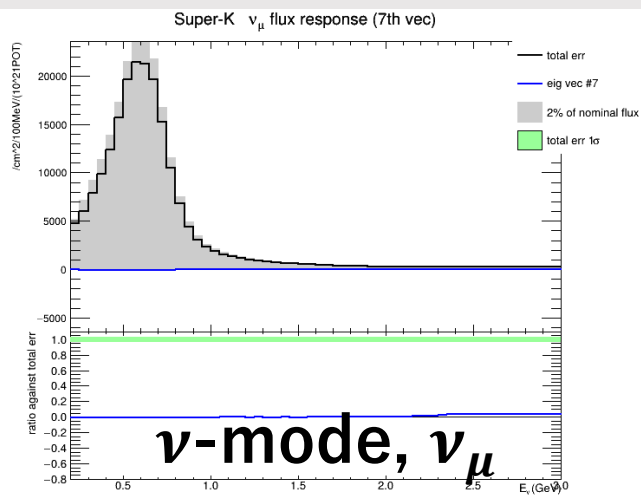
K^- は $\bar{\nu}_e$ と高エネルギーの $\bar{\nu}_\mu$ の
主な親粒子

$$K^- \rightarrow \begin{cases} \mu^- \bar{\nu}_\mu 63.55\% \\ \pi^0 \mu^- \bar{\nu}_\mu 3.353\% \\ \pi^0 e^- \bar{\nu}_e 5.07\% \end{cases}$$

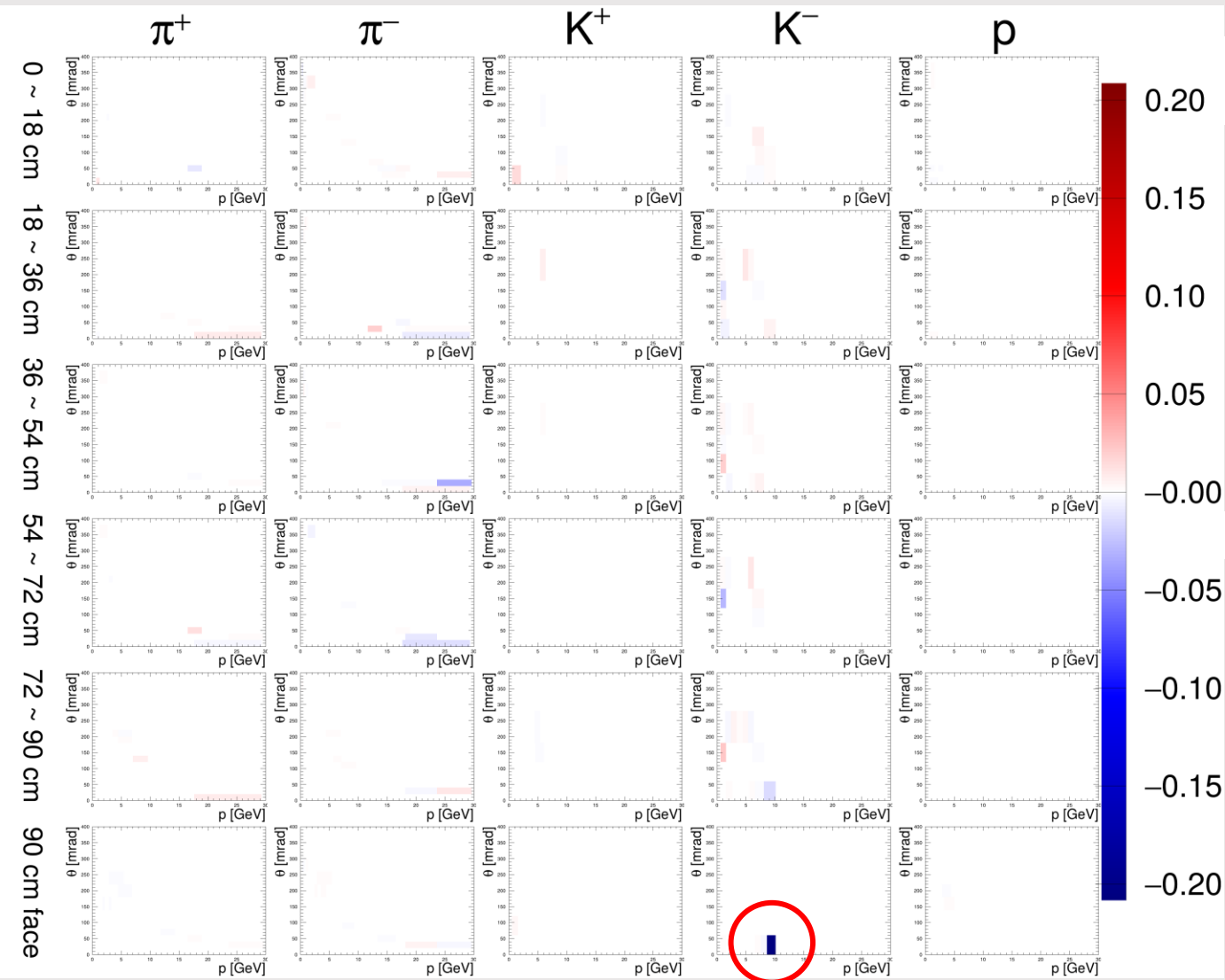
粒子識別の系統誤差に対応

固有ベクトル#7のニュートリノフラックスの応答

両ビームモードの $\bar{\nu}_e$ と $\bar{\nu}$ -modeにおける高エネルギーの $\bar{\nu}_\mu$

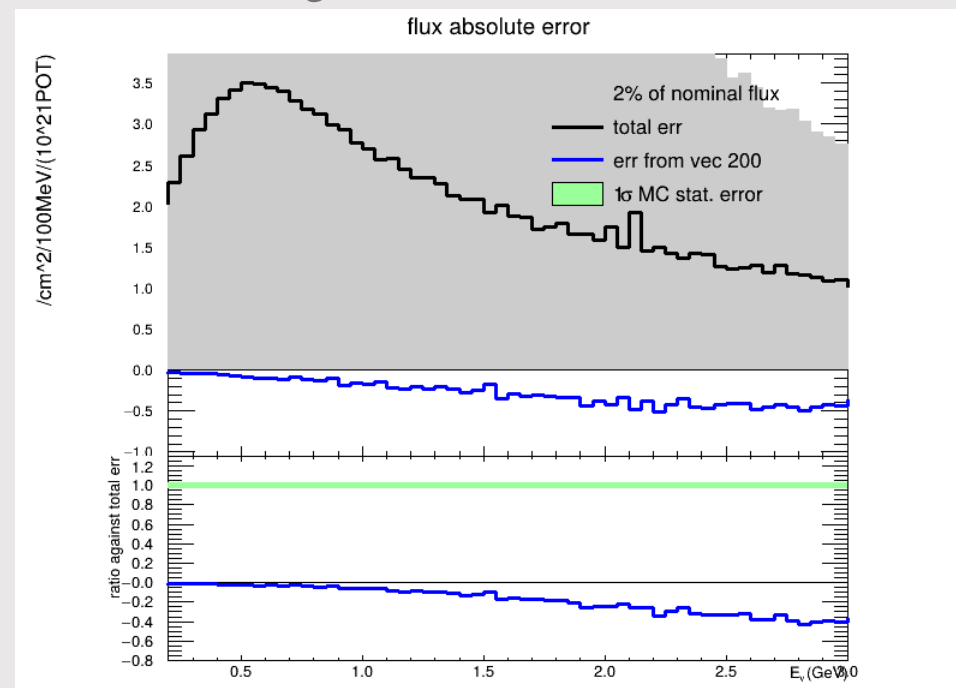


固有ベクトル#200のハドロン生成の応答



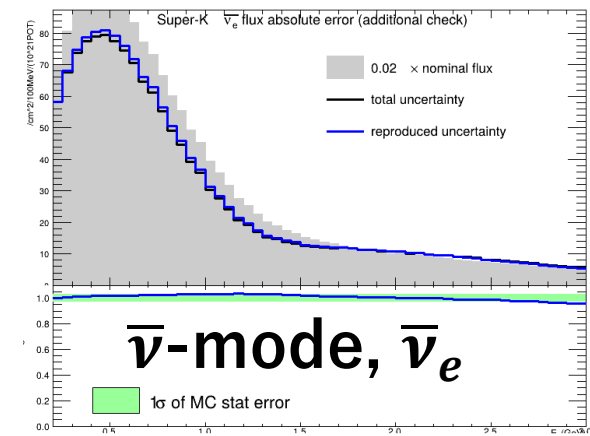
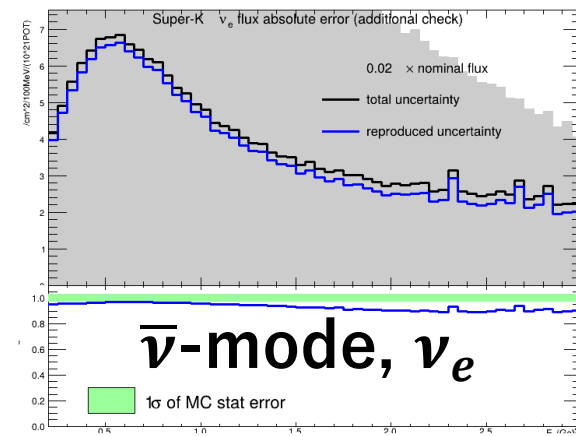
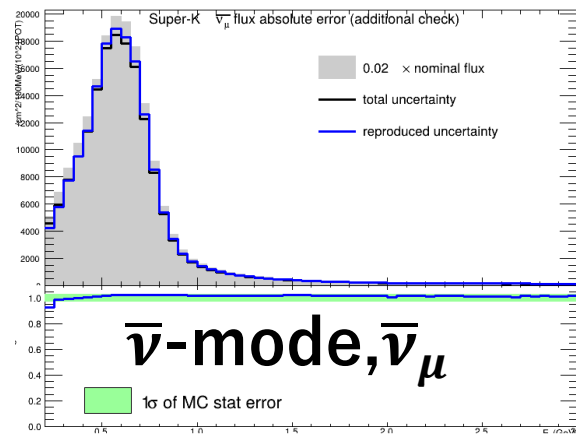
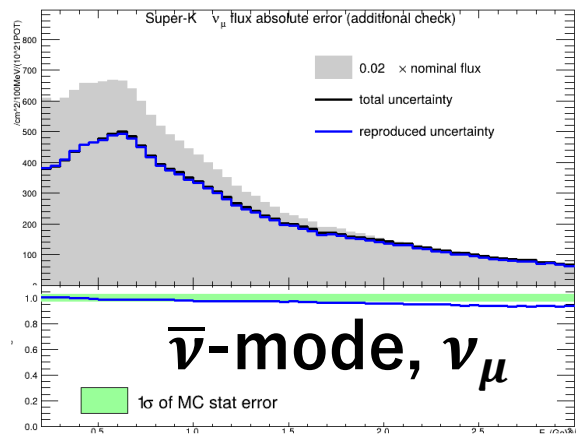
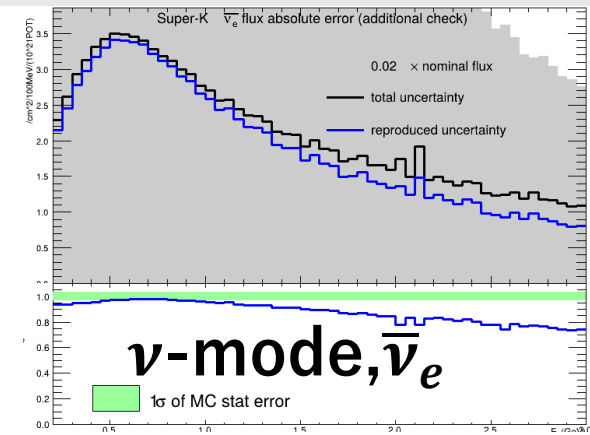
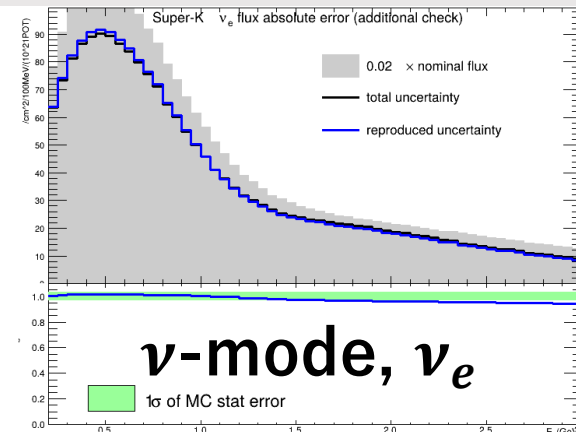
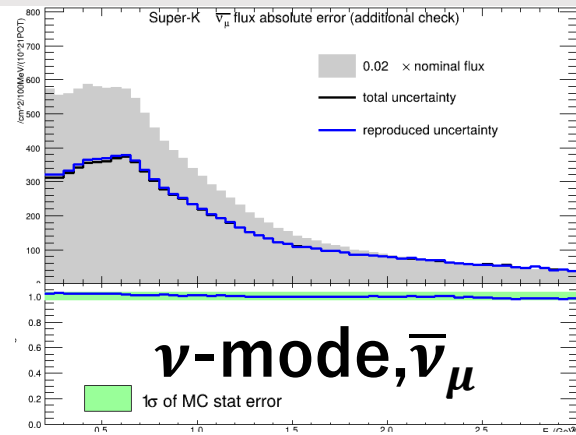
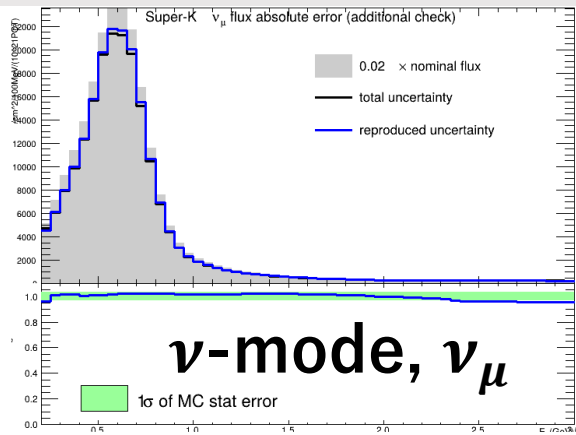
主に K^- の一部分だけが変化する
このビンの統計誤差に相当

固有値は小さいが、 ν -modeの $\bar{\nu}_e$ で大きな変化



ニュートリノフラックスの予測

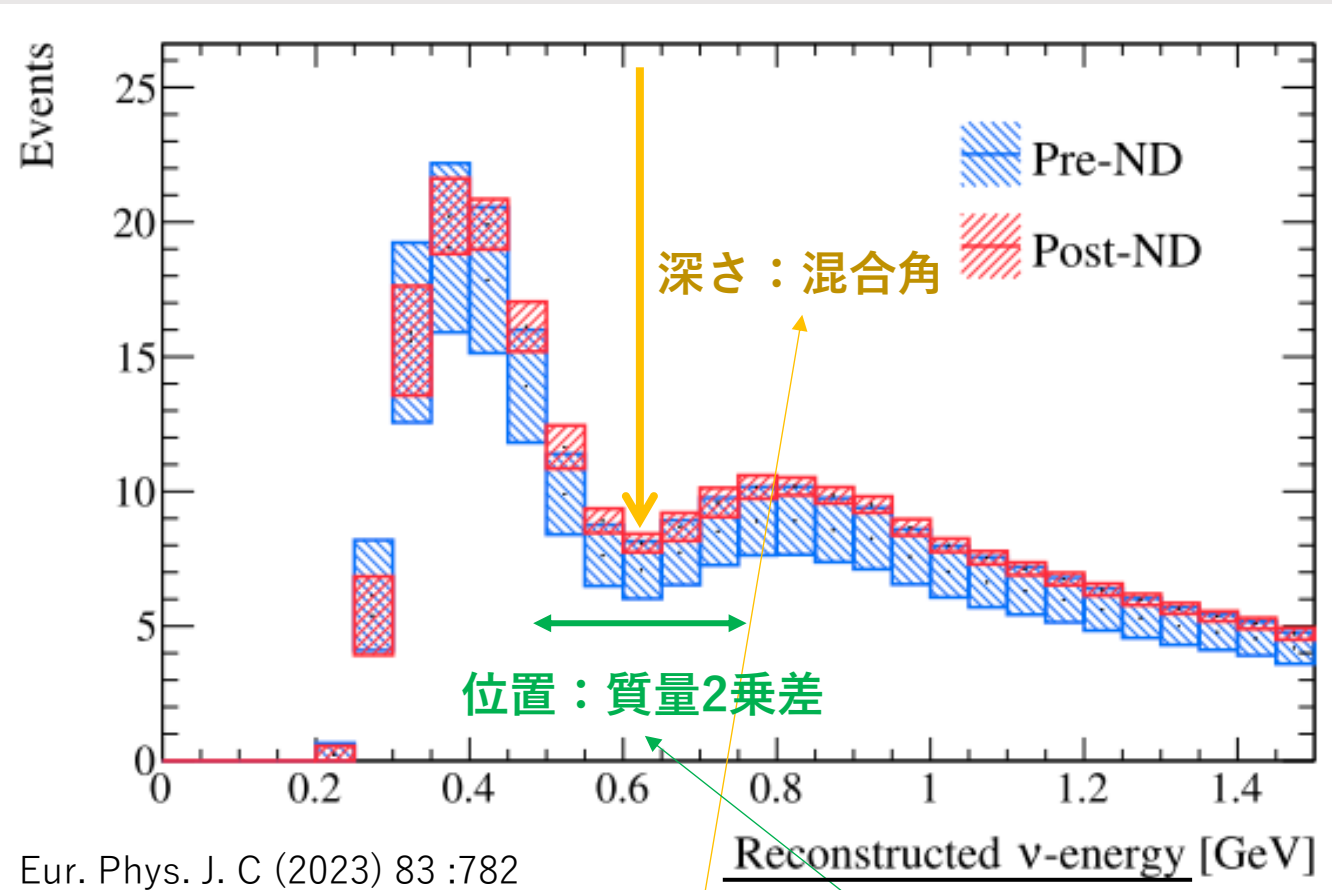
固有ベクトルの#0~#7, #200, #2501, #2539(計11個)を残すことで、
全てのビームモードとフレーバーのフラックス誤差を再現できた



ニュートリノ振動解析に おける影響の検証

ニュートリノ振動解析

後置検出器で見えるもの：フラックス×反応断面積×振動確率



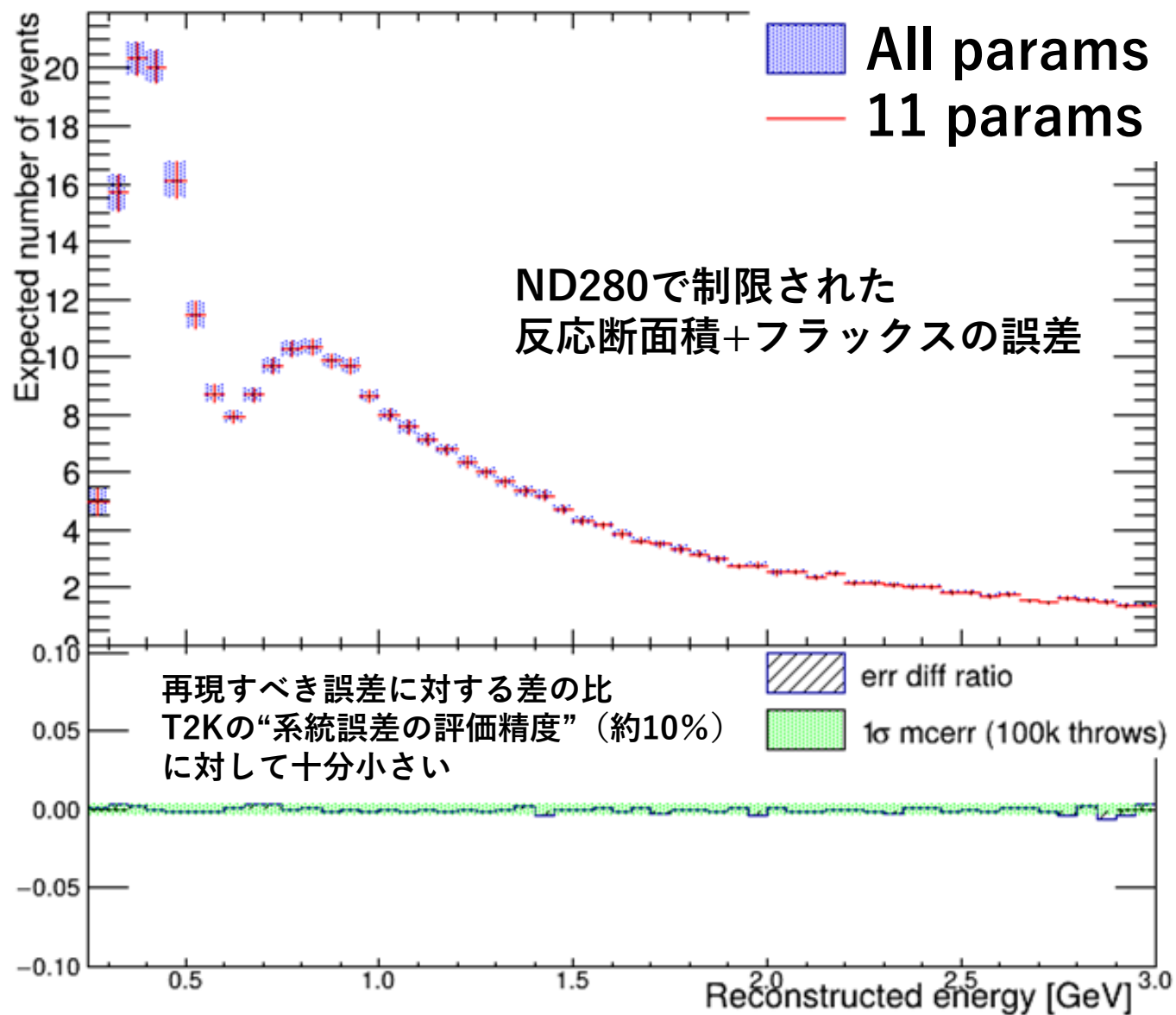
← イベント数の分布の予測と
系統誤差の総計

前置検出器による測定で、
フラックス×反応断面積を測定
→ 系統誤差を削減 (青→赤)

エネルギー再構成で生じる
背景事象の理解にも反応断面積
を知ることが必要

$$P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}} \approx 1 - \sin^2 2\theta_{\nu} \sin^2 \frac{\Delta m_{\nu}^2 L}{4E_{\nu}}$$

前置検出器による制限に対する影響



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

制限後の誤差を1%未満の
精度で再現できた

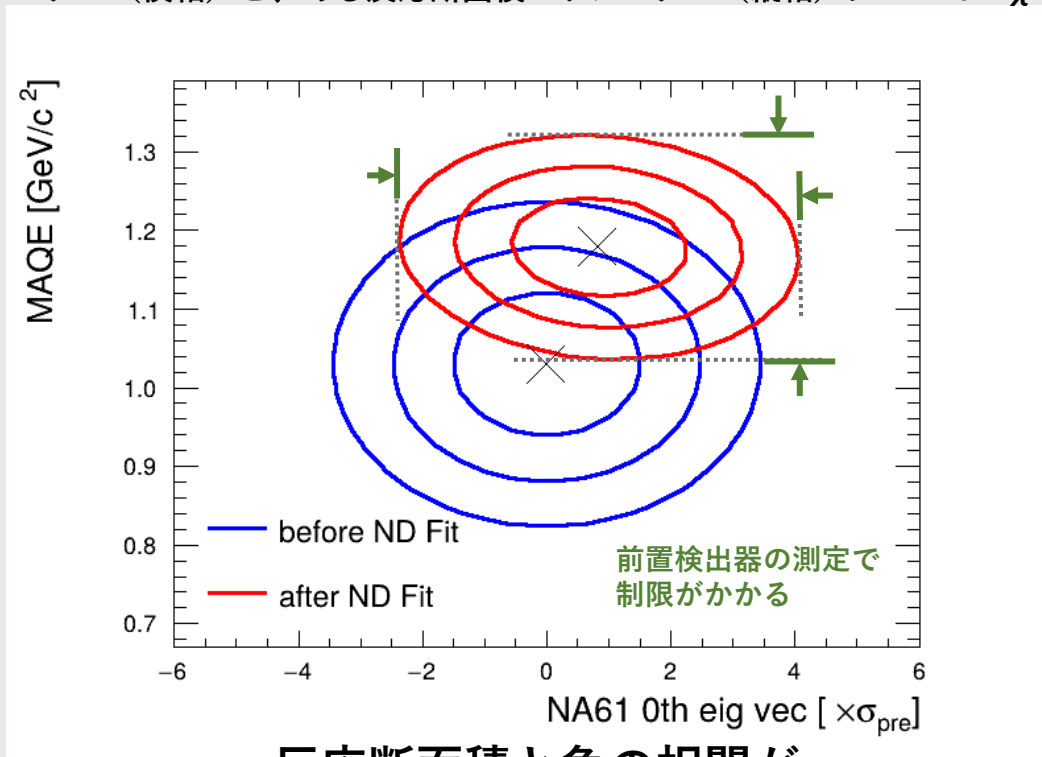
新しいフラックス変数の振る舞い

新しい変数がどのように制限されるかを予測することが可能

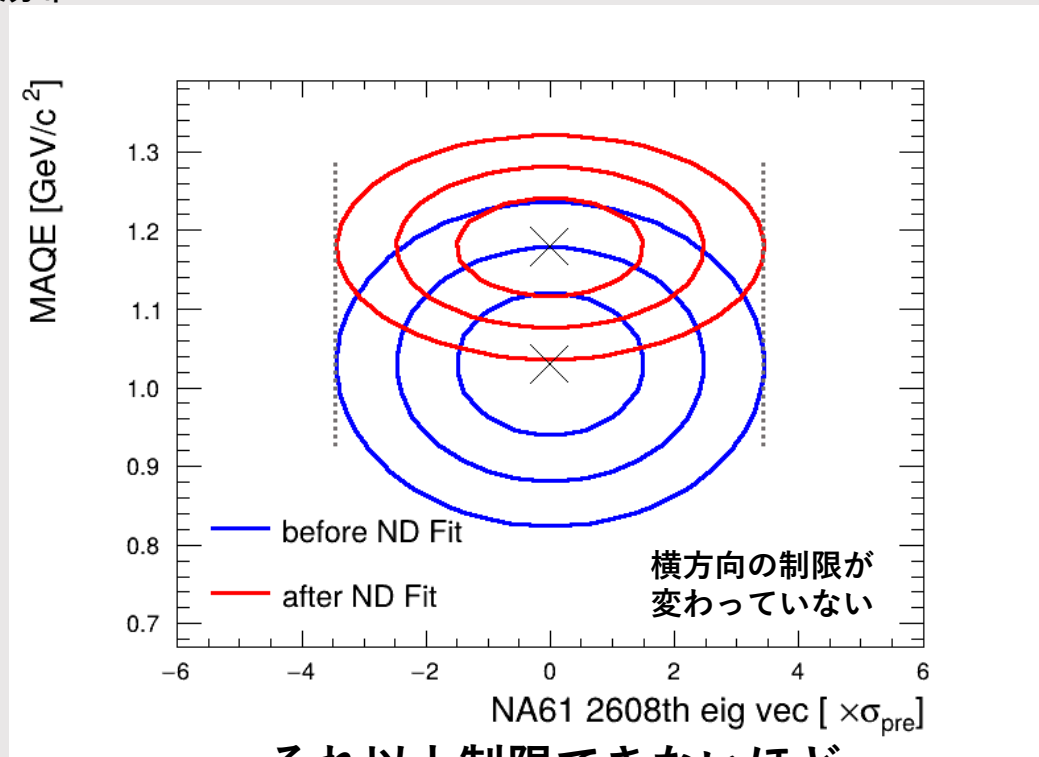
制限の変化の大小に大きな違い

→選ばれなかった変数は誤差が無視できるほど小さい

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 χ^2 乗分布



反応断面積と負の相関があるパラメーター



それ以上制限できないほど誤差が小さいパラメーター

ニュートリノ振動パラメーターに対する制限

代表的な3つの振動パラメーターについて検証

$\theta_{23}, \Delta m^2, \delta_{CP}$ 、特にCP位相 δ_{CP} がCPの破れの程度に相当

T2Kにとって最も重要な物理量

統計誤差が大きく系統誤差の変化を見るのに適さない

→HK実験での統計量を想定して検証

今回考慮した条件：

10年間のビーム運用 + 後置検出器の体積増加

前置検出器の統計変化は考慮しない（中間検出器を含めない）

現在得られている中心値から変化しないことを想定

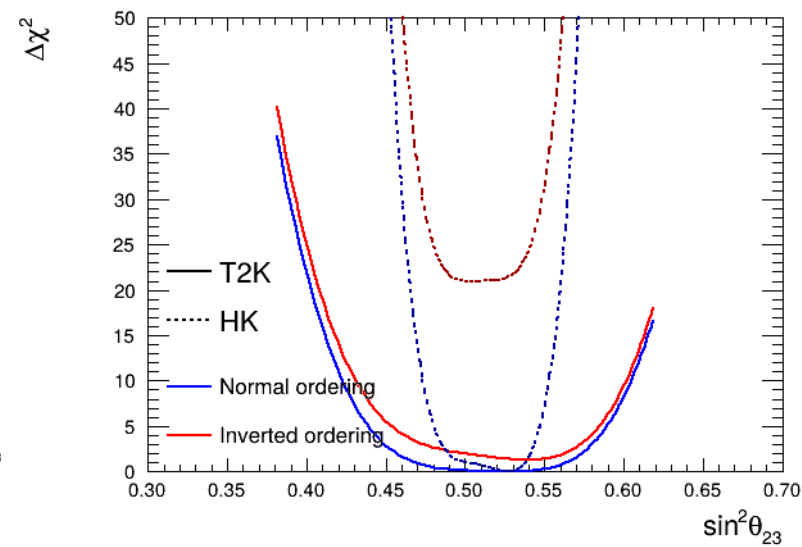
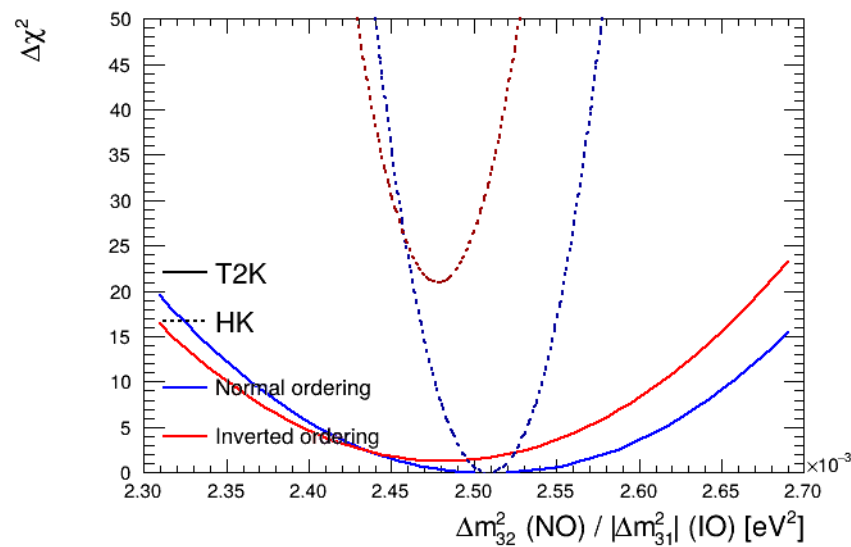
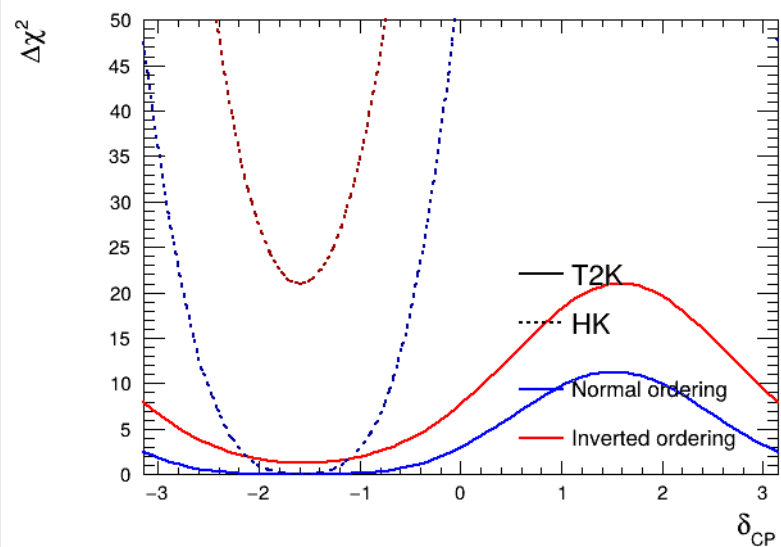
T2Kでの統計量とHKでの統計量の比較

T2K(実線)→HK(破線)

HK実験の統計量で棄却される範囲が広がる

統計誤差が小さくなることで測定感度が向上

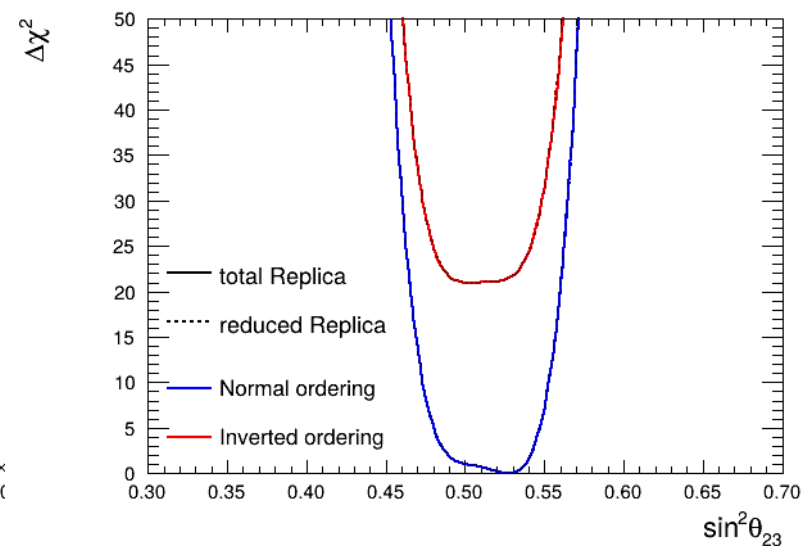
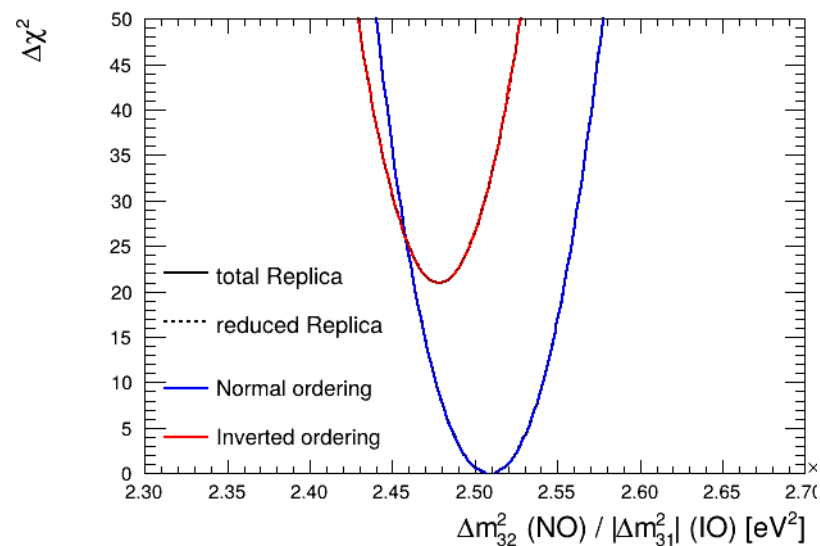
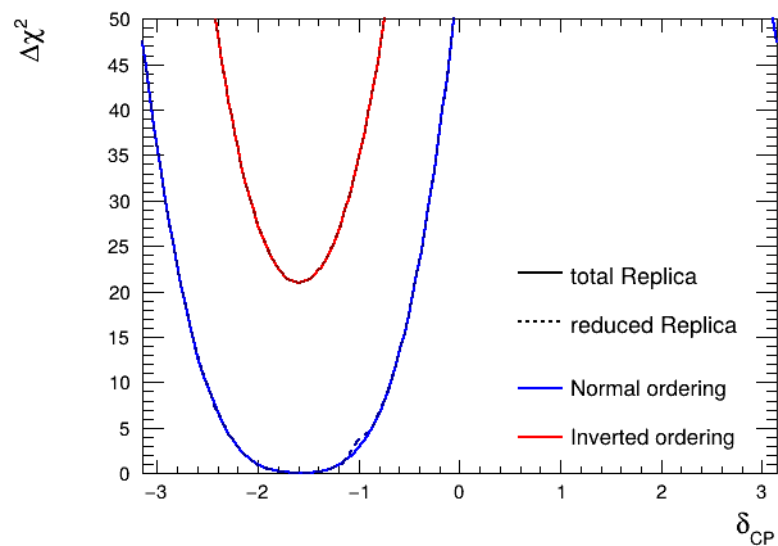
系統誤差の変化が見やすくなることを期待



線の色は質量順序が**標準**/**逆**順序に対応

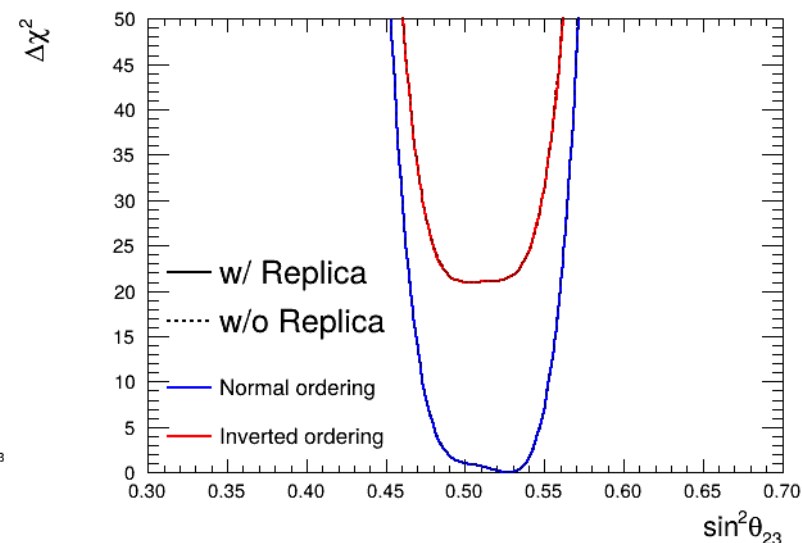
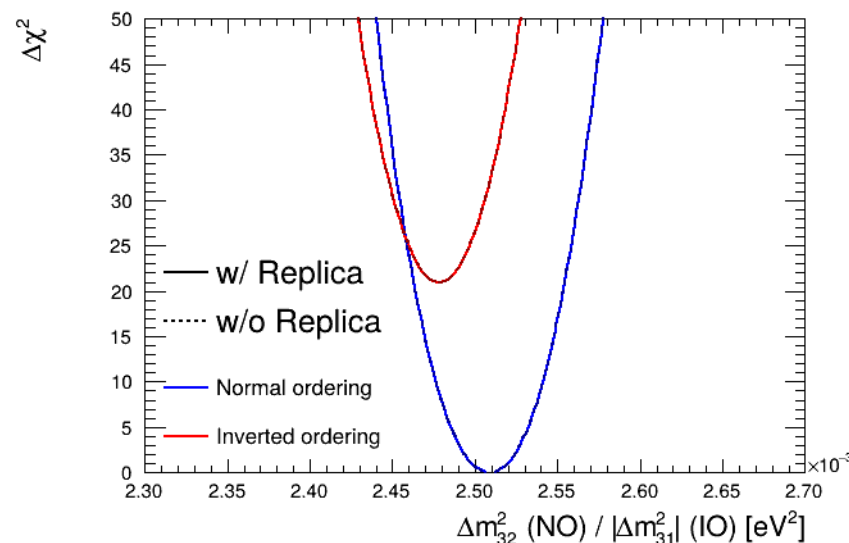
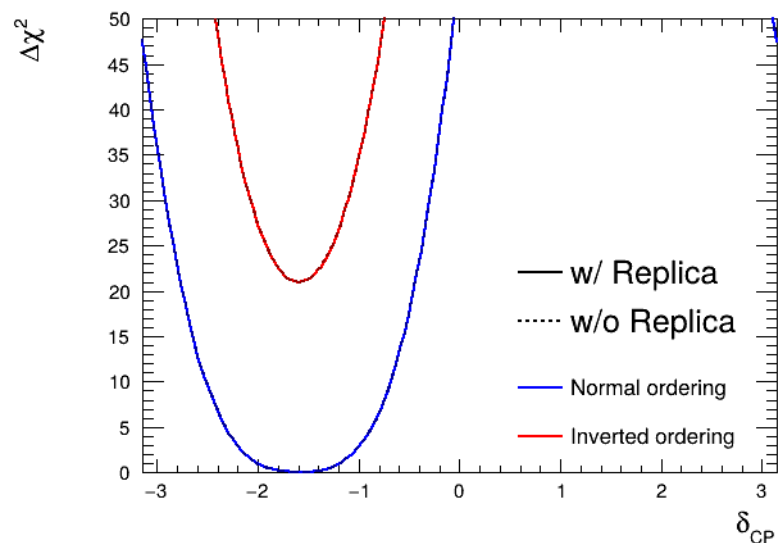
NA61 の変数を減らす前後の比較 (2609→11)

HK実験の統計量でも、変数を減らしたことによる誤差の変化は振動パラメーター測定に影響しない



NA61 Replicaの測定誤差を全て無視した場合

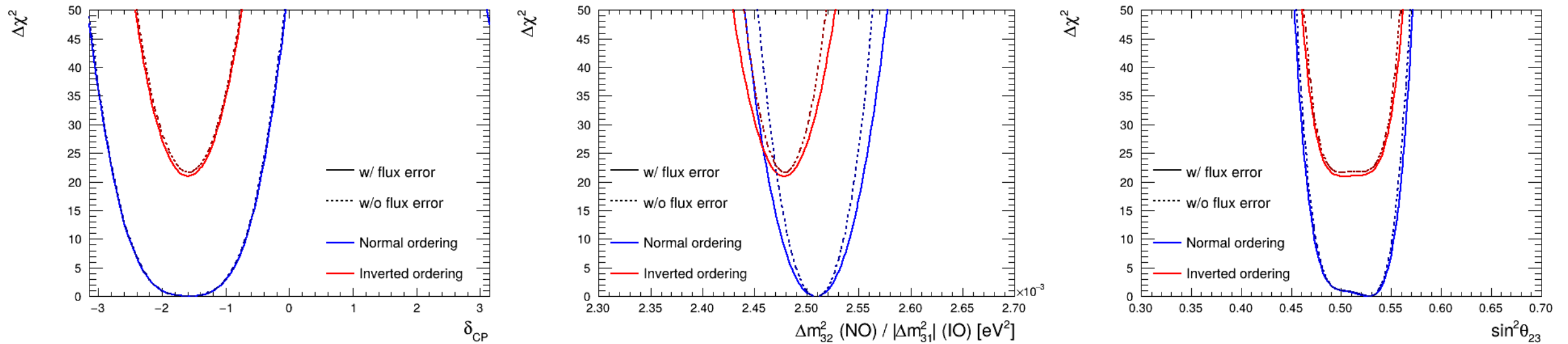
T2K実験の統計量で比較したときと同様に、NA61 Replicaの測定誤差は振動パラメーター測定において無視できるほど小さい



フラックスの不定性を全て無視した場合

前置検出器による制限がかかる前段階でフラックス誤差を無視した場合の測定感度の違い

極端な仮定にも関わらず違いが小さい



前置検出器による制限

前置検出器による制限の有無での測定感度の違い

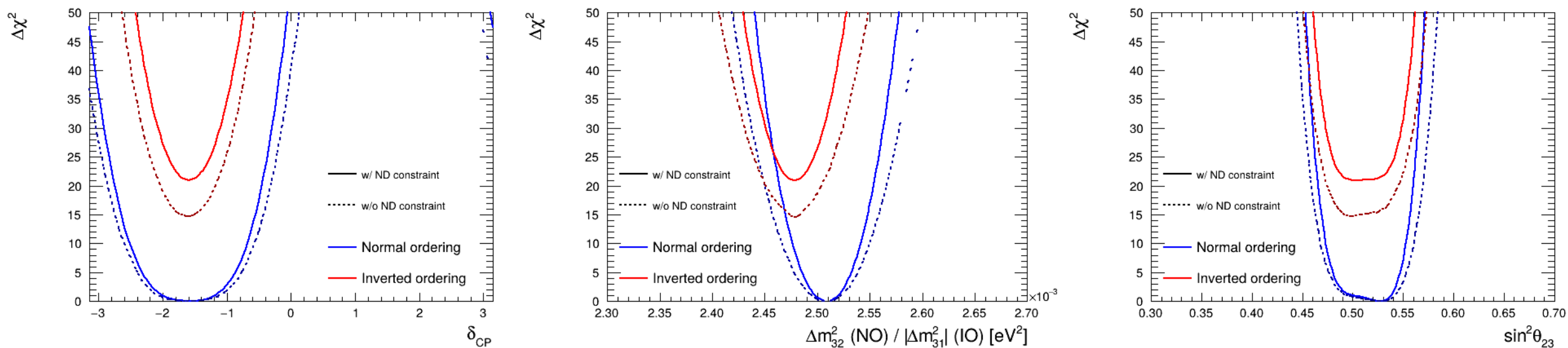
フラックス誤差を消した場合よりも大きな違い

→ 反応断面積に対する制限が重要

反応断面積の誤差要因としてフラックス誤差は大きい

中間検出器はフラックス誤差の変化の影響をより強く受ける

→ **フラックス誤差の要求精度を知るには本研究の継続が必要**

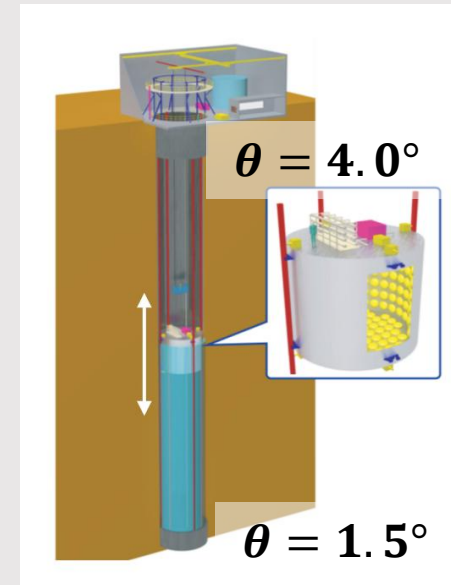


今後の課題

NA61実験以外のフラックス変数に関する開発
→全て同じ手法で開発可能（既に一部完了）

Off-Axis 2.5° 以外のフラックスに関する開発
→特に中間検出器(IWCD)がカバーする $1.5^\circ \sim 4.0^\circ$ が重要
→特にIWCDはOff-Axis 角を固定しない実装を目指す

既存の前置検出器(**ND280**, **WG/BM**)の統合解析
→IWCD開始前にOff-Axis 2.5° と 1.5° について解析可能
→IWCD運用時の参考にできる($3.0^\circ \sim 4.0^\circ$ を優先するなど)



まとめ

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
→ 主要な成分だけでフラックス誤差を記述し変数を減らす

変数を減らしても、解析の各段階で従来の結果を再現した

今後は全てのフラックス変数を同様に実装し、
HK実験に向けたフラックス相関の取り扱いを完成させる