

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の発展



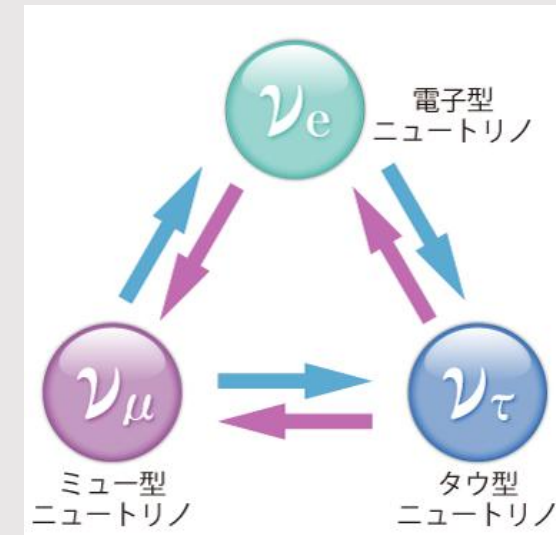
東北大学理学研究科
石田健浩, 市川温子, Lukas Berns
and T2K Collaboration

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

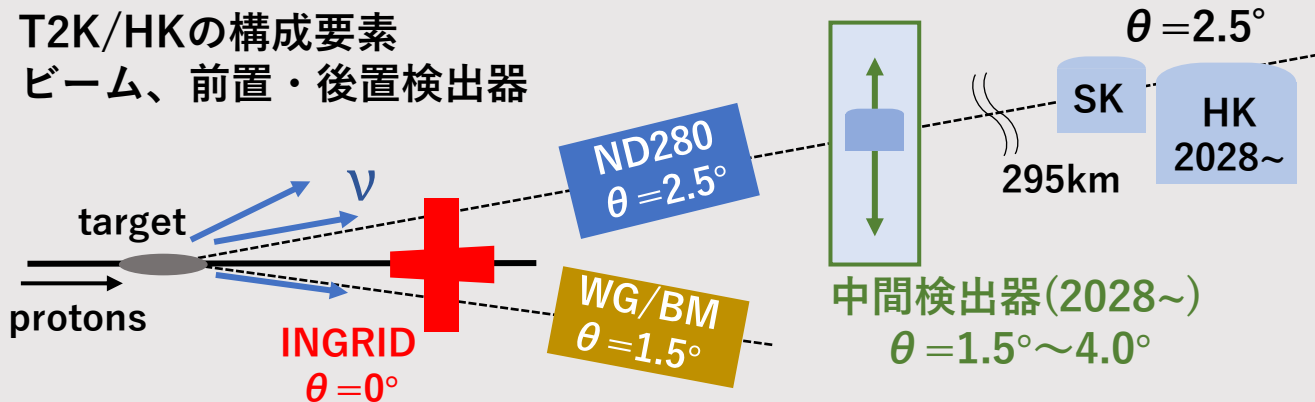


ニュートリノ振動と反ニュートリノ振動を加速器を使って比較

T2K実験とHyper-Kamiokande実験

T2K/HKの構成要素

ビーム、前置・後置検出器



SK→HK (8倍の有効体積) + ビーム増強

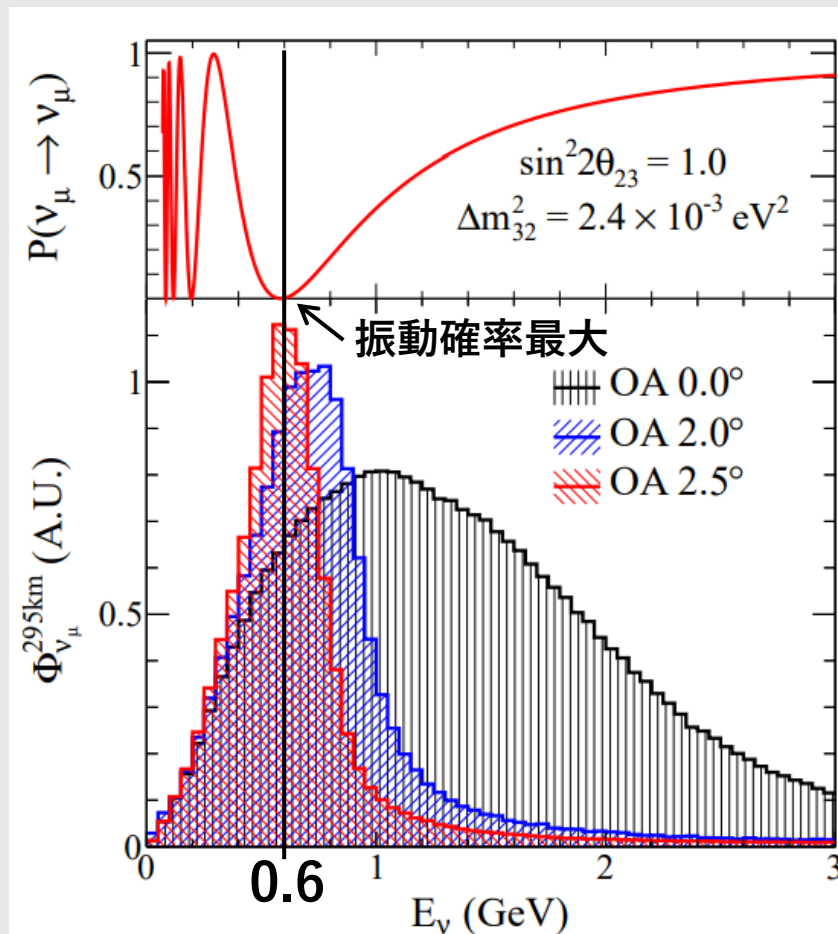
→ 統計量が大幅に増加 → 系統誤差が重要に

最大の系統誤差要因は ν -原子核間の反応断面積
特にそのエネルギー依存性を知ることが必要

→ ND280, WAGASCI/BabyMIND (WG/BM)
さらにHKに向けて **中間検出器IWCD** を建設中

Off-Axis法

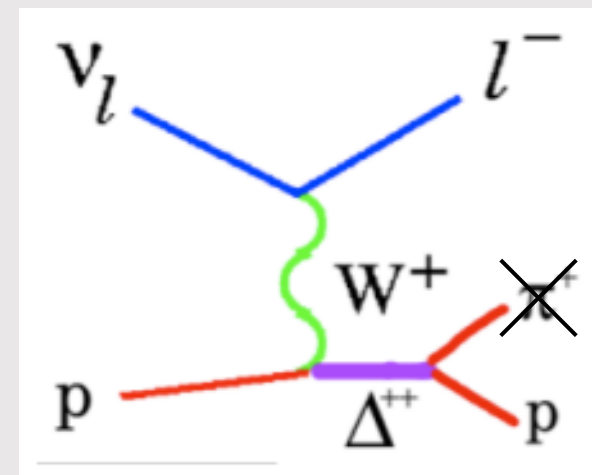
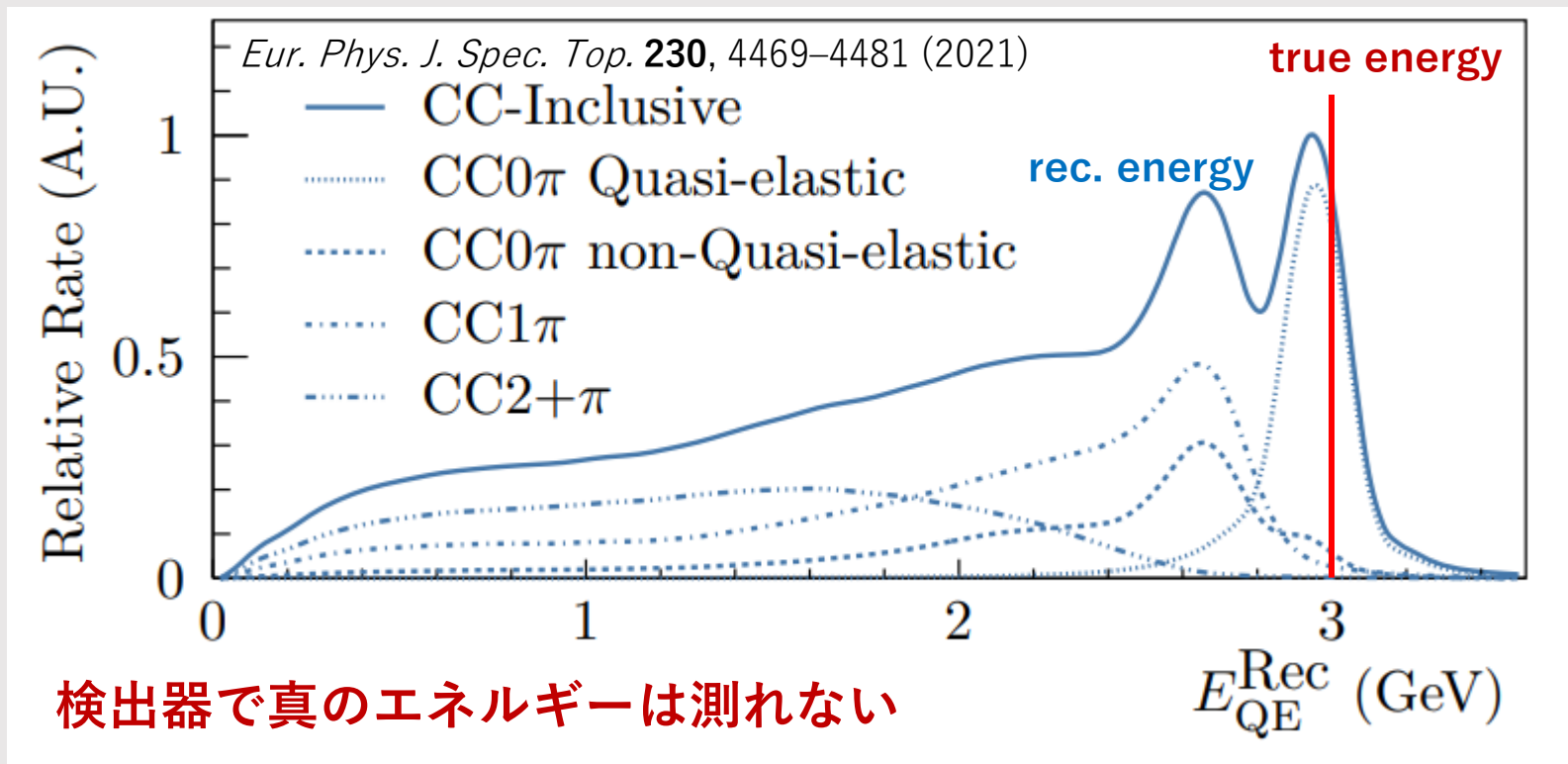
ビーム中心からずれたニュートリノを使い、効率的に振動を測定



Phys. Rev. D 87, 012001

ニュートリノのエネルギー再構成と反応断面積測定

~~$P(E_\nu) \propto \Phi(E_\nu) \times \sigma(E_\nu)$~~ ← 実際の測定ではこれほど単純でない



CC1π反応でπを検出できない
→ CCQE反応と区別できない
など、全ての粒子を見なければ
正しいエネルギーが分からない

$$P(E_\nu^{Rec}) \propto \int \Phi(E_\nu^{True}) \times \sigma(E_\nu^{True} \rightarrow E_\nu^{Rec}) dE_\nu^{True}$$

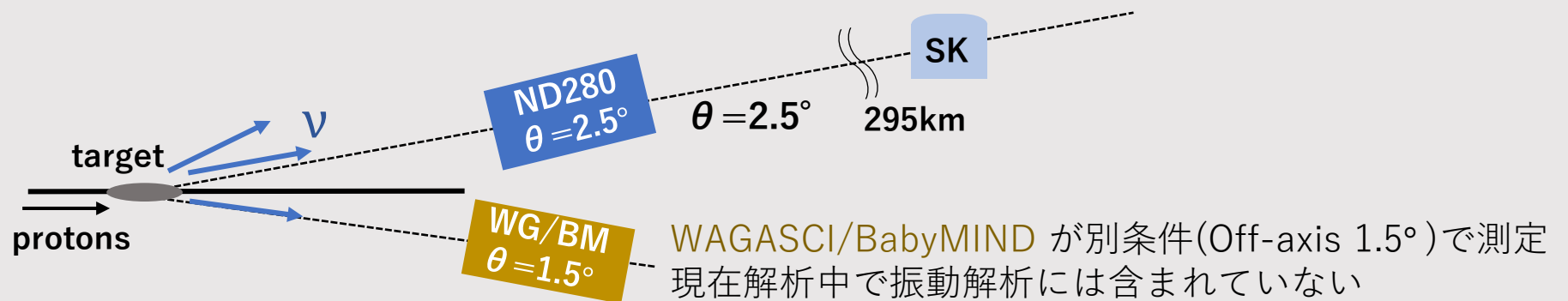
$E_\nu^{True}, E_\nu^{Rec}$ の2変数関数としての反応断面積を知る必要がある

T2Kにおける反応断面積測定

前置検出器ND280による測定

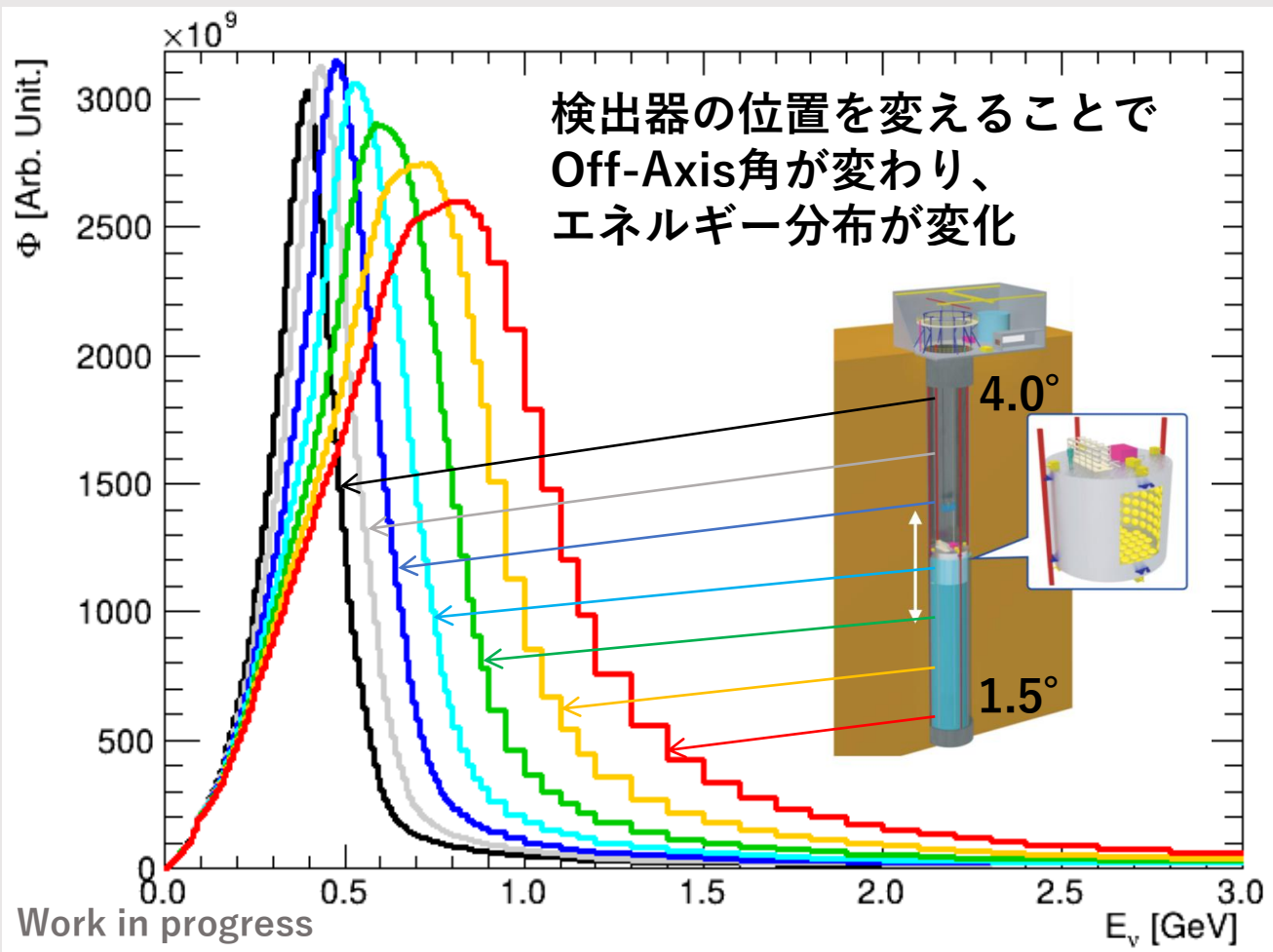
$$\text{Event Rate } (p_l, \theta_l) \propto \int \Phi_{\text{ND280}}(E_\nu^{\text{True}}) \times \sigma(E_\nu^{\text{True}} \rightarrow (p_l, \theta_l)) dE_\nu^{\text{True}}$$

一つの条件でしか測れないため2変数関数を知る上では不十分
→ ある原子核モデル(NEUT)を仮定して解析される



Hyper-Kにおける反応断面積測定

中間検出器IWCDの追加 (Intermediate Water Cherenkov Detector)



$$\left\{ \begin{array}{l} \int \Phi_{1.5^\circ}(E_\nu^{\text{True}}) \times \sigma(E_\nu^{\text{True}} \rightarrow E_\nu^{\text{Rec}}) dE_\nu^{\text{True}} \\ \int \Phi_{2.0^\circ}(E_\nu^{\text{True}}) \times \sigma(E_\nu^{\text{True}} \rightarrow E_\nu^{\text{Rec}}) dE_\nu^{\text{True}} \\ \vdots \end{array} \right.$$

様々なフラックスの条件で測定
→ モデルに依存しない形で
反応断面積を測定できる

解析の計算コストが課題→本研究

系統誤差評価のための共分散行列

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

系統誤差を共分散行列または相関行列にまとめて使用

T2Kにおける系統誤差:

フラックス強度、反応断面積、検出器の系統誤差など

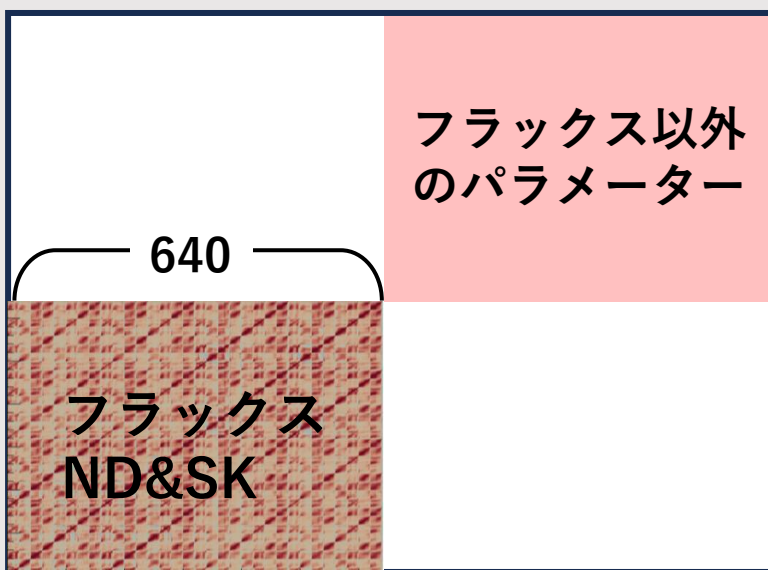
→ 本研究では異なる検出地点間のフラックス相関が最も重要

HK実験で予測される深刻な計算コストの問題

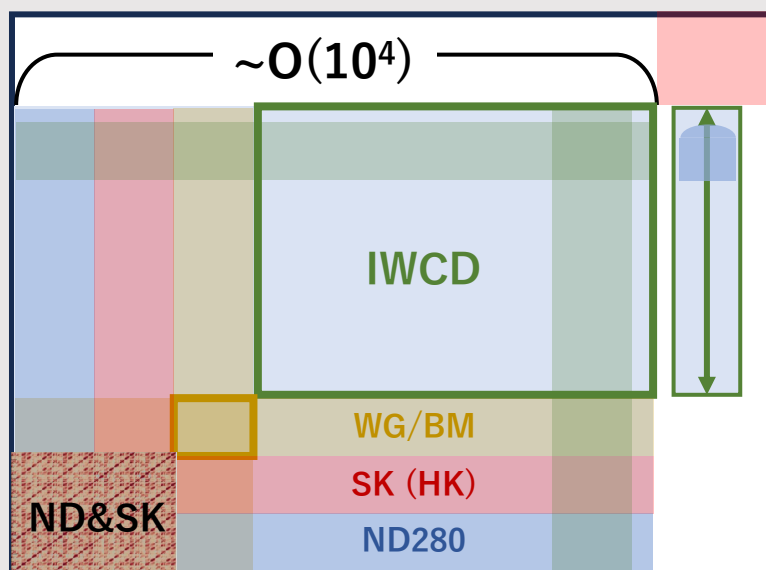
フラックス変数は各測定点・ビームモード・フレーバー・エネルギーでビン分けされたフラックス強度

→ 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

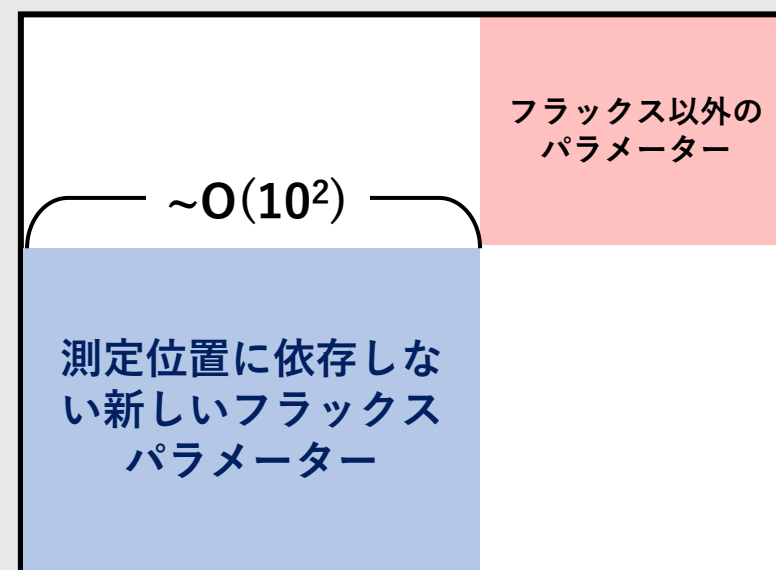
測定位置に依存しない大元の系統誤差変数を使ってこれを回避する



現在の共分散行列



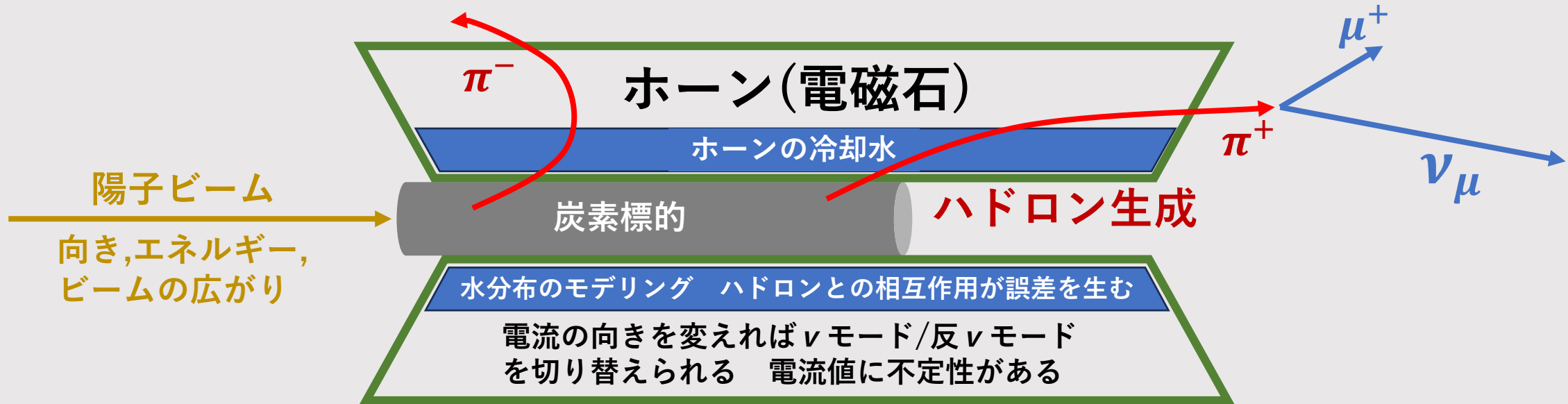
HK時代に共分散行列が巨大化すると予想される



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

炭素標的に陽子を照射、生成したハドロンがニュートリノに崩壊



- 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
- ホーン電流などを変数とし、フラックスへの応答関数を使用
- ハドロン相互作用**は外部実験の測定結果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

T2Kにおけるフラックス予測とその誤差評価手順

2つのMonte-Carloソフトと測定データによるチューニング



誤差の分ずれたデータ値を入力し
フラックスの応答を計算可能

未拘束の反応

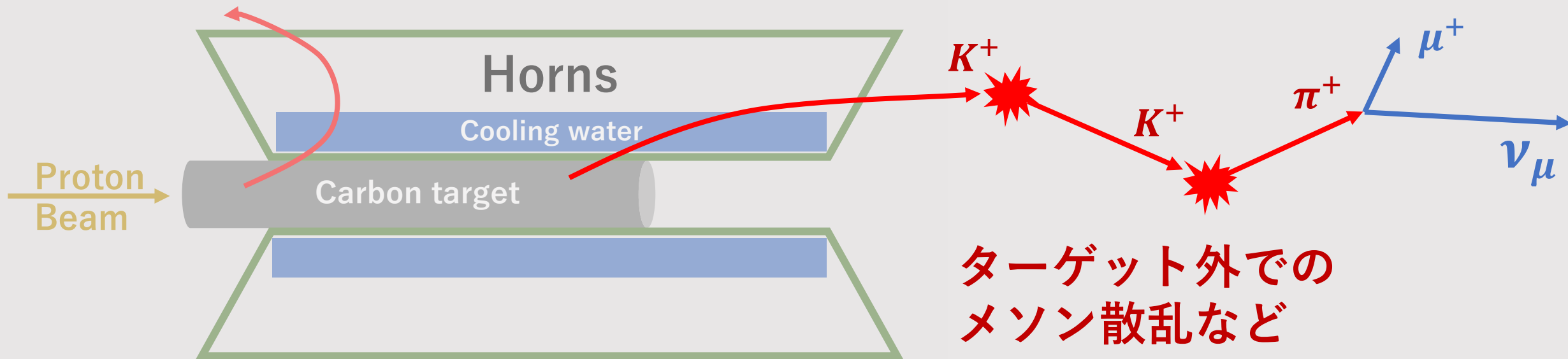
未拘束の反応：測定データがなく制限できないハドロン反応

これらの反応も多くのパラメーターを使って記述している

フラックスはこのパラメーターに対し非線形に応答

7つの始状態と5つの終状態の35種類の散乱モードを考慮

$$(\pi^\pm, K^\pm, K_L^0, p, n) \rightarrow (\pi^\pm, K^\pm, K_L^0)$$



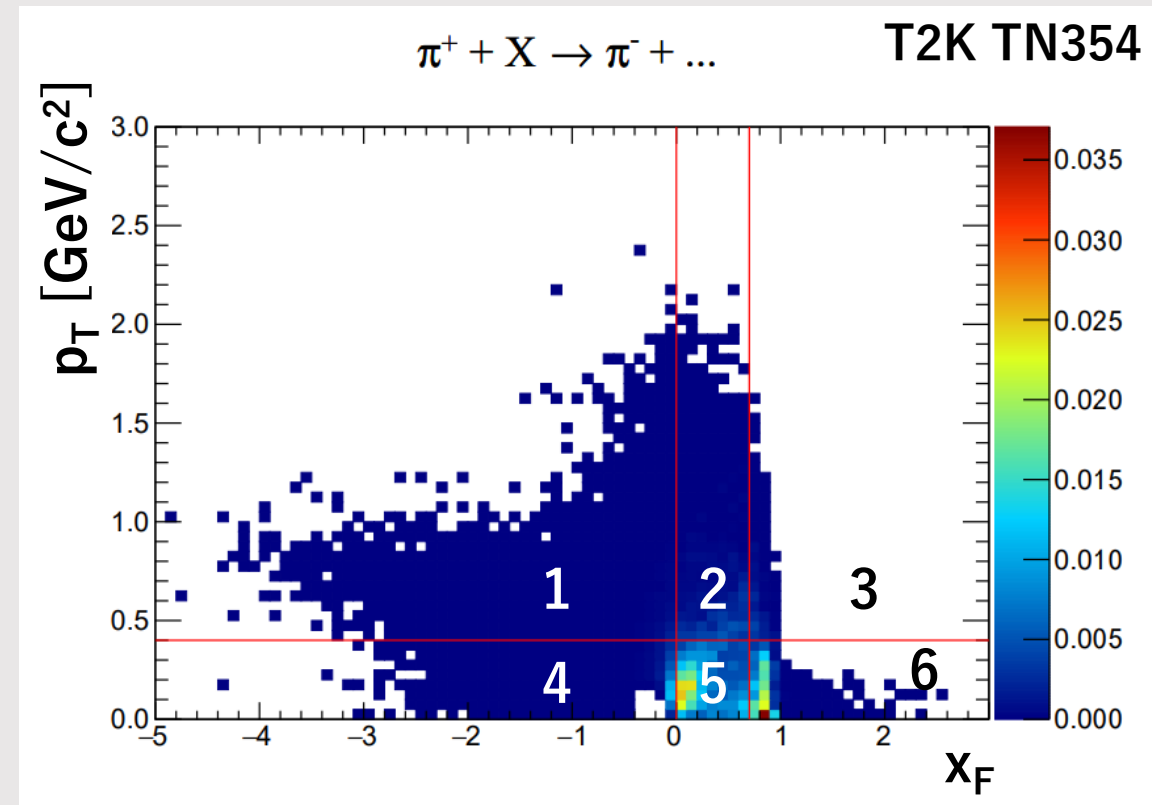
未拘束の反応

(x_F, p_T) で記述される各散乱モードの位相空間を6つの領域に分割
それぞれの領域に誤差を計上した、 6×6 サイズの共分散行列を使用
複数の理論モデルの比較から、各領域に独立の50%の誤差と、
全領域一様に相関した50%の誤差が計上されている

誤差の評価方法:

共分散行列の固有ベクトルに対応する
変化を与えた時のフラックスの応答を
計算し合算する

非線形性を考慮し $\pm 1\sigma$ 両方で計算
→ $35 \times 6 \times 2 = 420$ 個のパラメーター

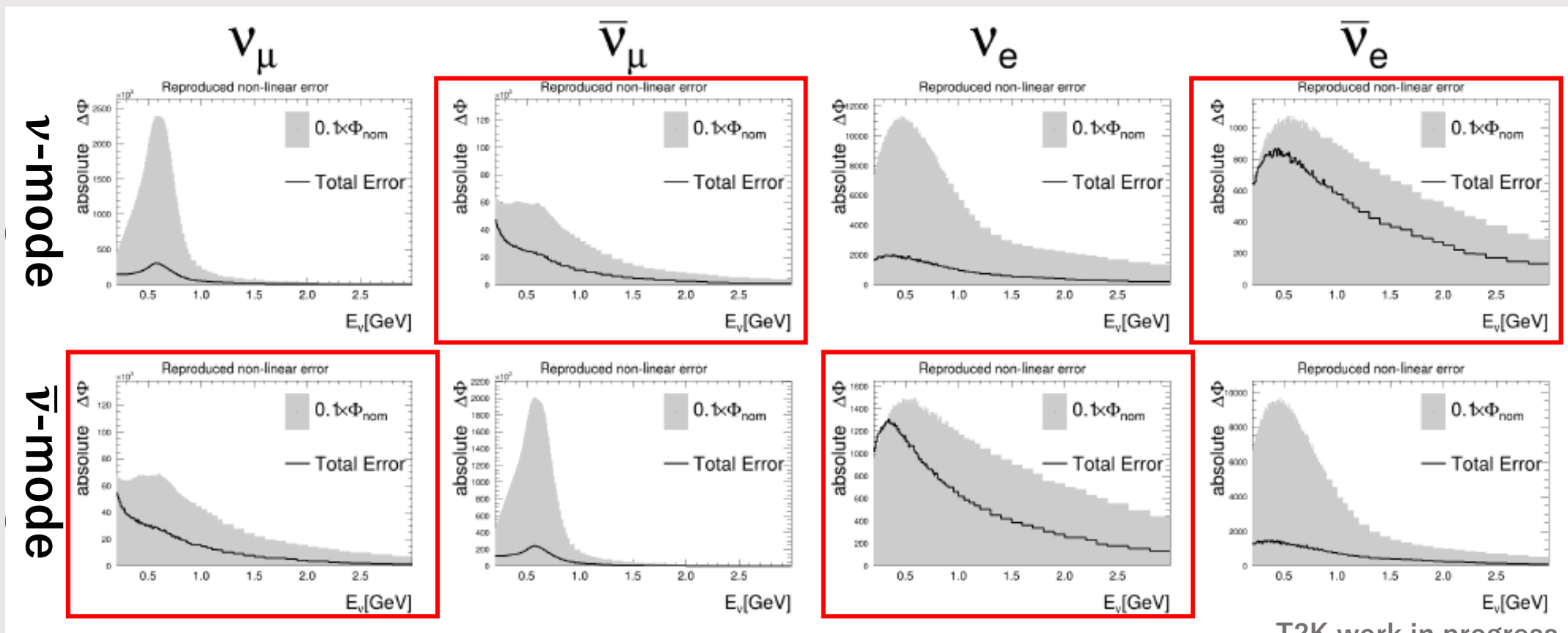


未拘束の反応に由来するフラックス誤差

ν -modeの $\bar{\nu}$ などで特に大きく、最大10%程度の誤差

灰: 0.1倍にスケールしたフラックス強度

黒: 未拘束の反応由来の合計の誤差



T2K work in progress

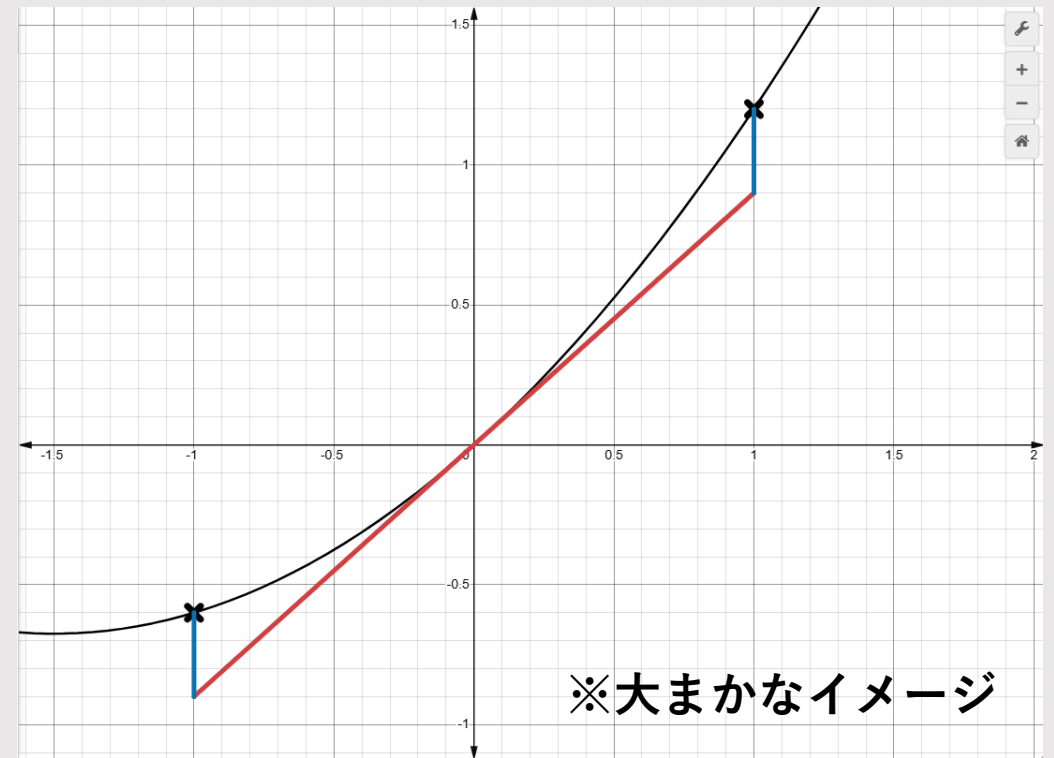
非線形成分に関する考察

$\pm 1\sigma$ の応答を**対称な成分**と**非対称な成分**に分離

$$\Delta\Phi^2 = \frac{1}{2}(\Delta\Phi_+^2 + \Delta\Phi_-^2) = \left(\frac{1}{2}\Delta\Phi_+ - \frac{1}{2}\Delta\Phi_-\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\Delta\Phi_+ + \frac{1}{2}\Delta\Phi_-\right)^2$$

大まかに**線形成分**と**非線形成分**に対応

もし非線形な成分が無視できるなら
その時点でパラメーターを半分に
減らせる

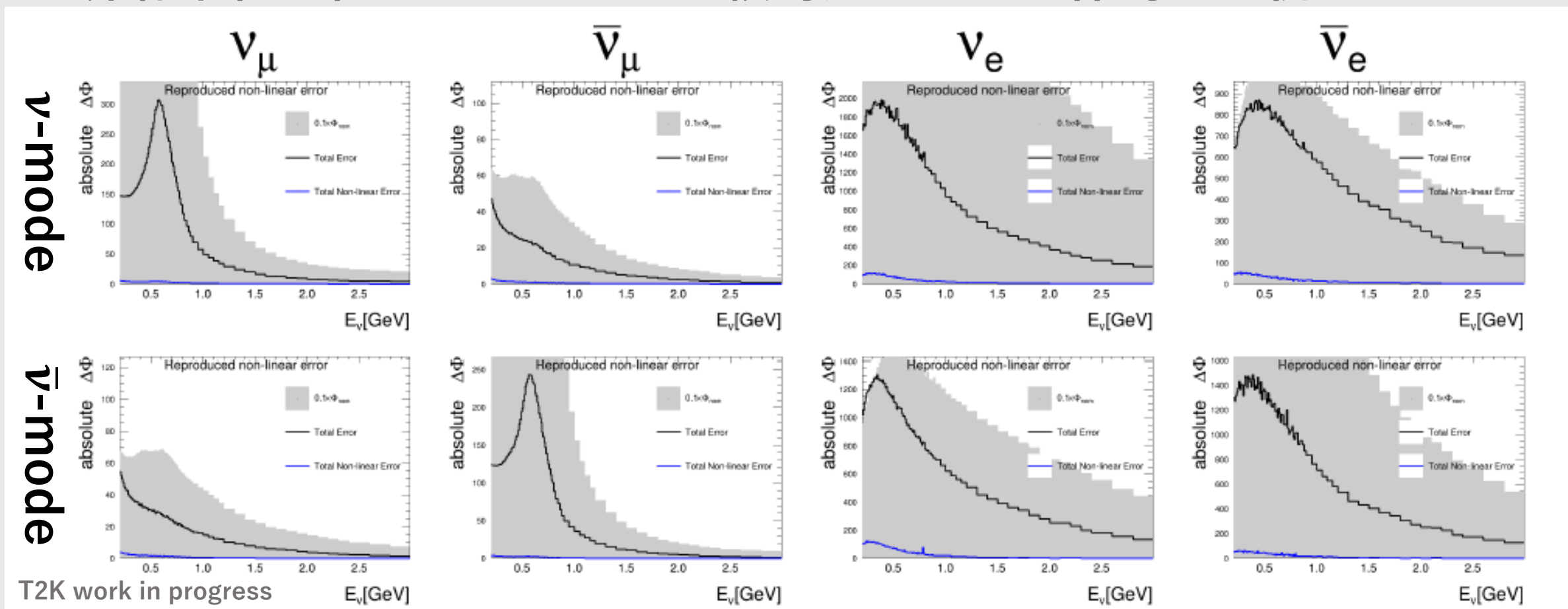


非線形成分に関する考察

黒: 誤差の合計

青: 非線形成分の誤差の合計

非線形性は低エネルギーで比較的大きいが全体的に無視できる



非線形成分に関する考察

非線形な応答を生むイベントは ν 生成までに同じ散乱モードを複数回経験した場合にのみ発生する

線形成分の例 : $p \rightarrow K^+ \rightarrow \pi^+ \rightarrow \pi^+$

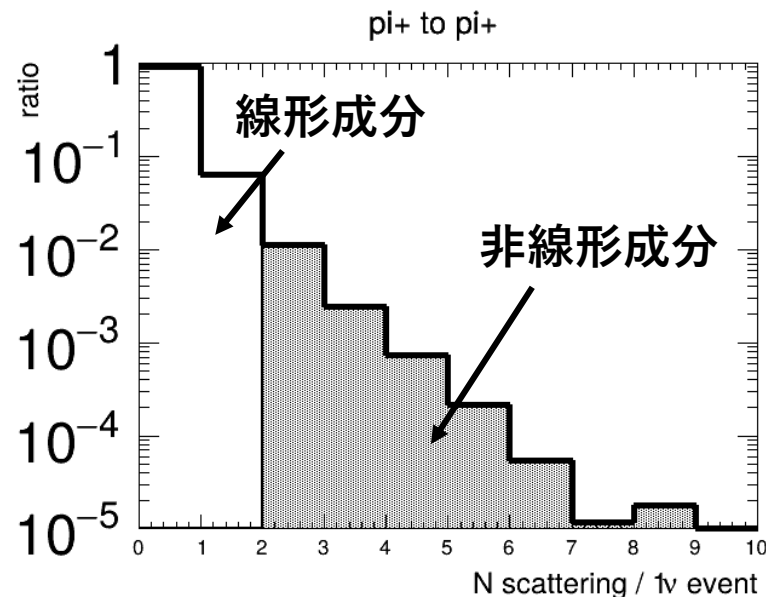
非線形成分の例: $\pi^+ \rightarrow \pi^+ \rightarrow \pi^+$

それぞれの散乱モードが平均何回発生するかを調べてみる

MCの段階で同じ散乱モードをN回経験した ν イベントの割合

← $\pi^+ \rightarrow \pi^+$ モードの場合、
非線形成分は1%程度だった

他の散乱モードについても調査→→



T2K work in progress

非線形成分の要因

Final particle

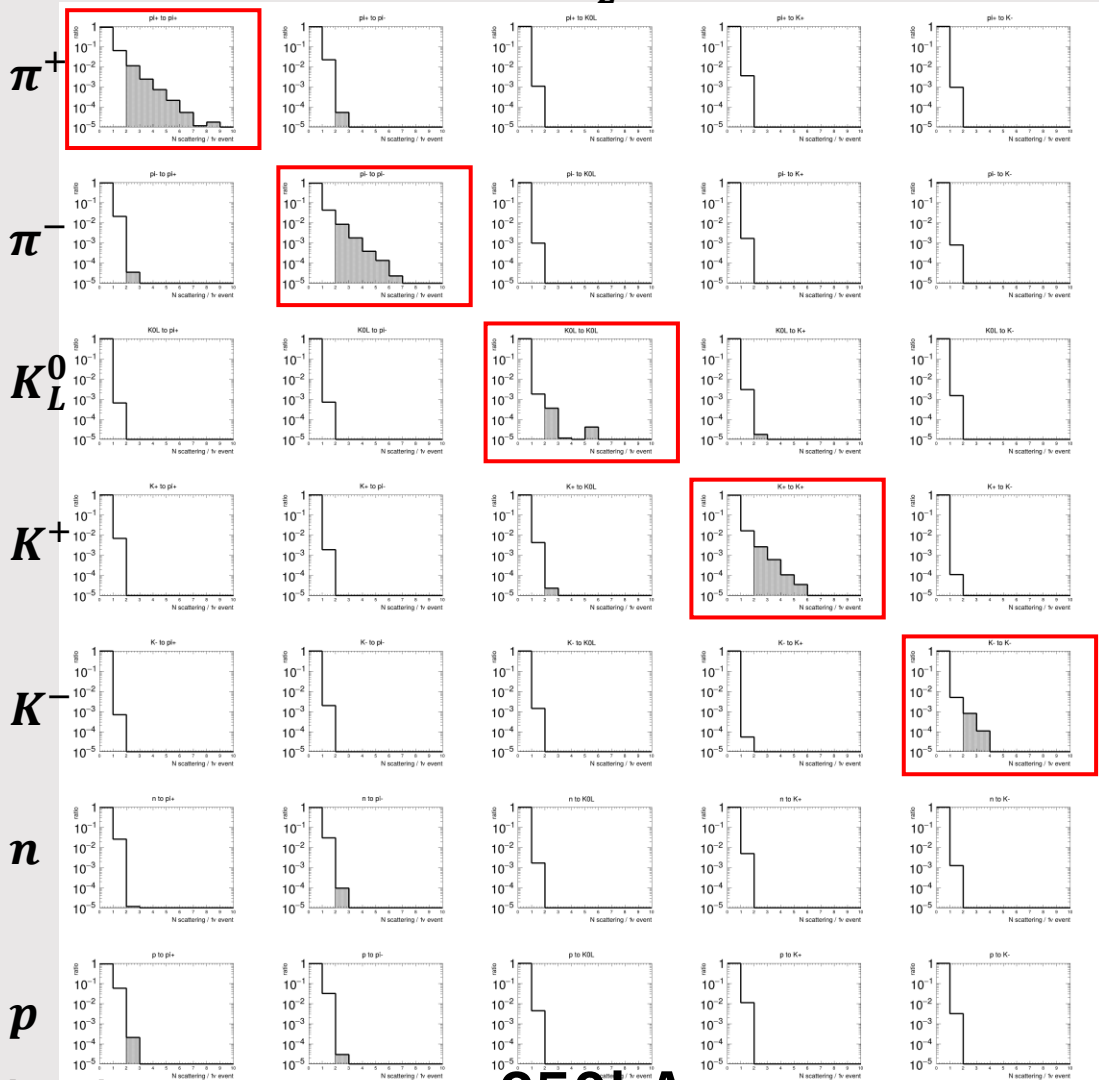
π^+

π^-

K_L^0

K^+

K^-



粒子の種類が変わらない5つの散乱モード以外ではほぼ存在しない

粒子の種類が変わる散乱モードは、2回起こるのに3回以上の散乱が必要

→ 非線形性が少なくなる

これら5つの散乱モードそれぞれの最大固有値の固有ベクトルにあたる、計5つのパラメーターだけで非線形誤差を再現してみる→→

T2K work in progress

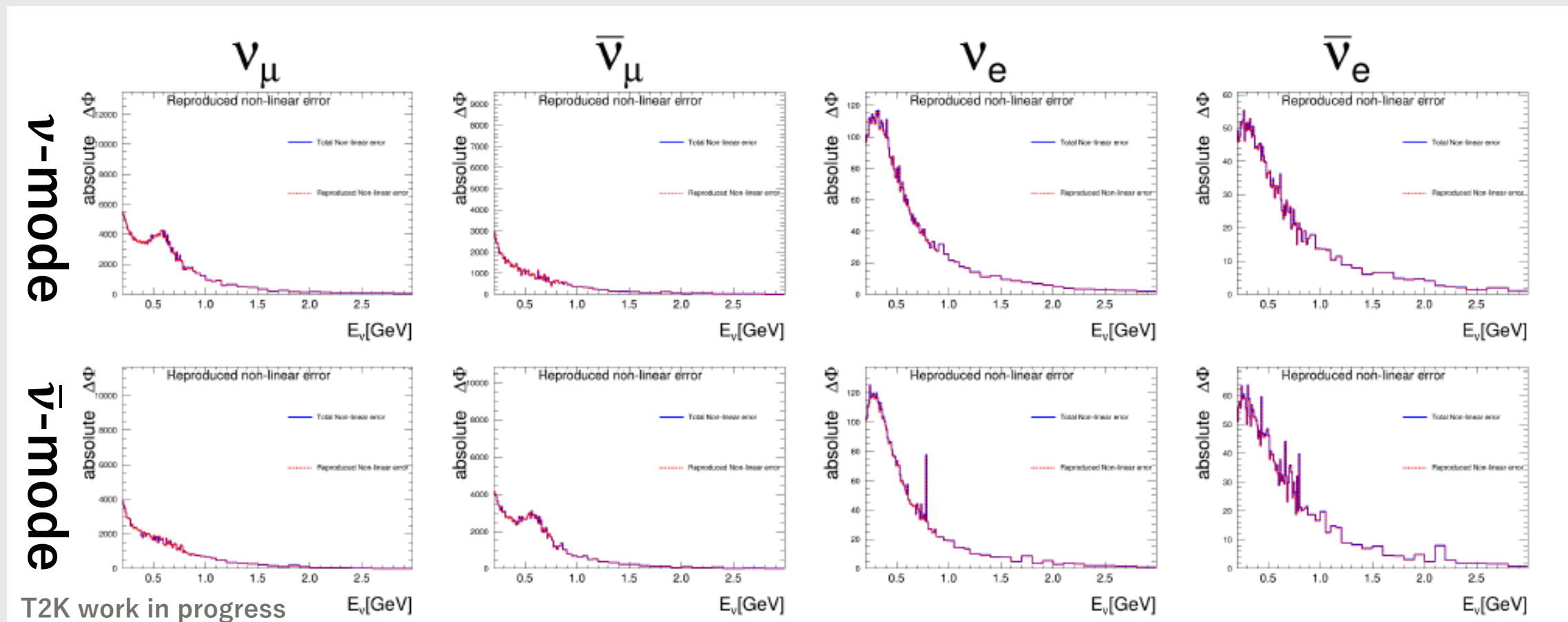
+250kA

再現した非線形誤差

210個の非線形パラメーターの内5個を使って再現

青：非線形誤差の合計、赤：再現した非線形誤差

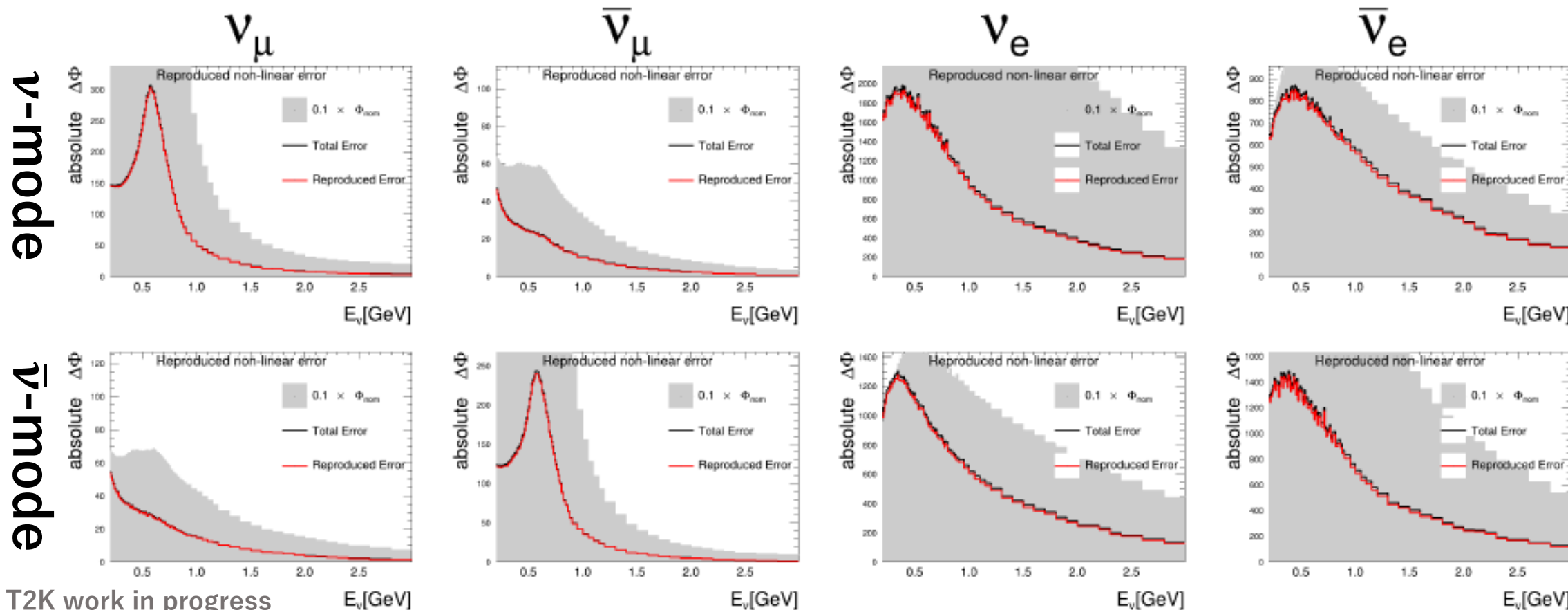
高い精度で再現できた



T2K work in progress

49個のパラメーターで再現した誤差

灰: フラックス($\times 0.1$), 黒: 誤差総計, 赤: 再現誤差



以下の散乱モードの寄与は無視できた:

$$\pi^\pm \rightarrow K^{\pm, \mp}, K_L^0 \rightarrow \pi^\pm, K^+ \rightarrow \pi^-/K^-, K^- \rightarrow \pi^\pm/K^+, n \rightarrow K_L^0/K^-, p \rightarrow K^\pm$$

まとめと展望

- 精密なニュートリノ反応断面積測定に向け多地点のフラックス相関を少ないフィッティングパラメーターで取り扱う新しい方法が必要
- 各検出器のフラックス強度から元の系統誤差要因の変数に変更ハドロン相互作用を記述する膨大な数の変数を減らす必要あり
- ハドロン相互作用を記述するパラメーターの削減に取り組んだ
NA61 Replica: 2609→11, 未拘束の反応: 420→49

今後の展望:

1. 残る全てのフラックス変数に関する開発
2. Off-Axis角 2.5° 以外の位置に関する開発
3. ニュートリノ振動解析への実装