

加速器ニュートリノ振動実験における 多地点間のフラックス相関の評価法について

東北大学理学研究科

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

T2K の概要 - ニュートリノ振動の精密測定 -



J-PARC (Tokai) で生成したニュートリノを Super-Kamiokande で観測する
 ニュートリノ振動の精密測定により、
振動パラメータの一部を決定する

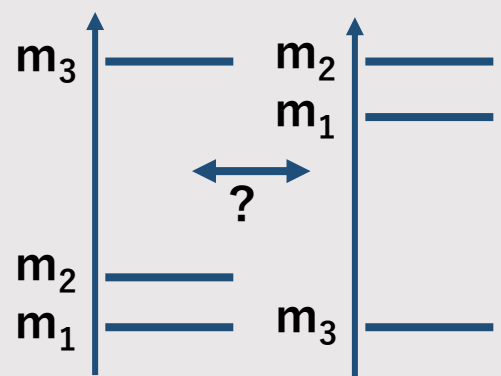
$$\theta_{23}, \theta_{31}, \delta_{CP}, |\Delta m_{23}|$$

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

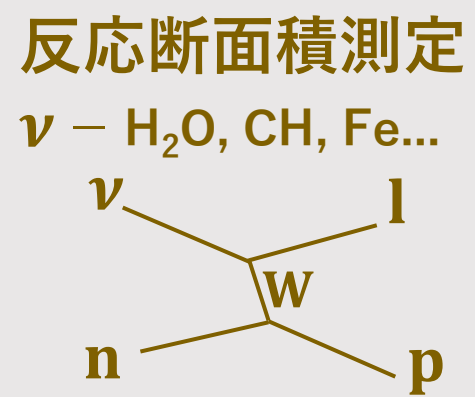
$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_\nu} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_\nu} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12}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

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$
 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$

CP 対称性の破れの発見
3σ の確度が目標



質量順序問題
 Δm_{23}^2 を測定し、
 他実験と比較

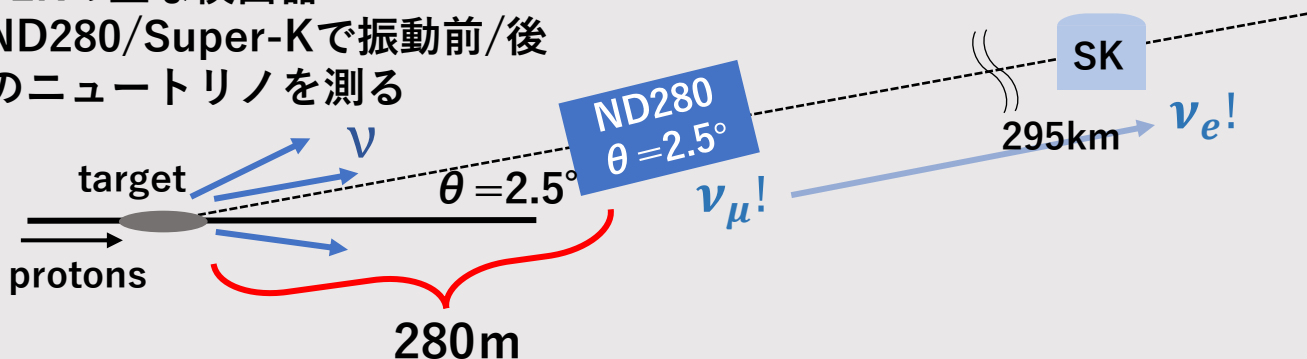


T2K の概要 -Off-Axis method-

Phys. Rev. D 87, 012001

T2Kの主な検出器

ND280/Super-Kで振動前/後のニュートリノを測る



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
295km（東海 - 神岡間）移動したとき、
0.6GeVのニュートリノは振動確率が最大

High Energyの部分はBackground

Backgroundを減らすには？

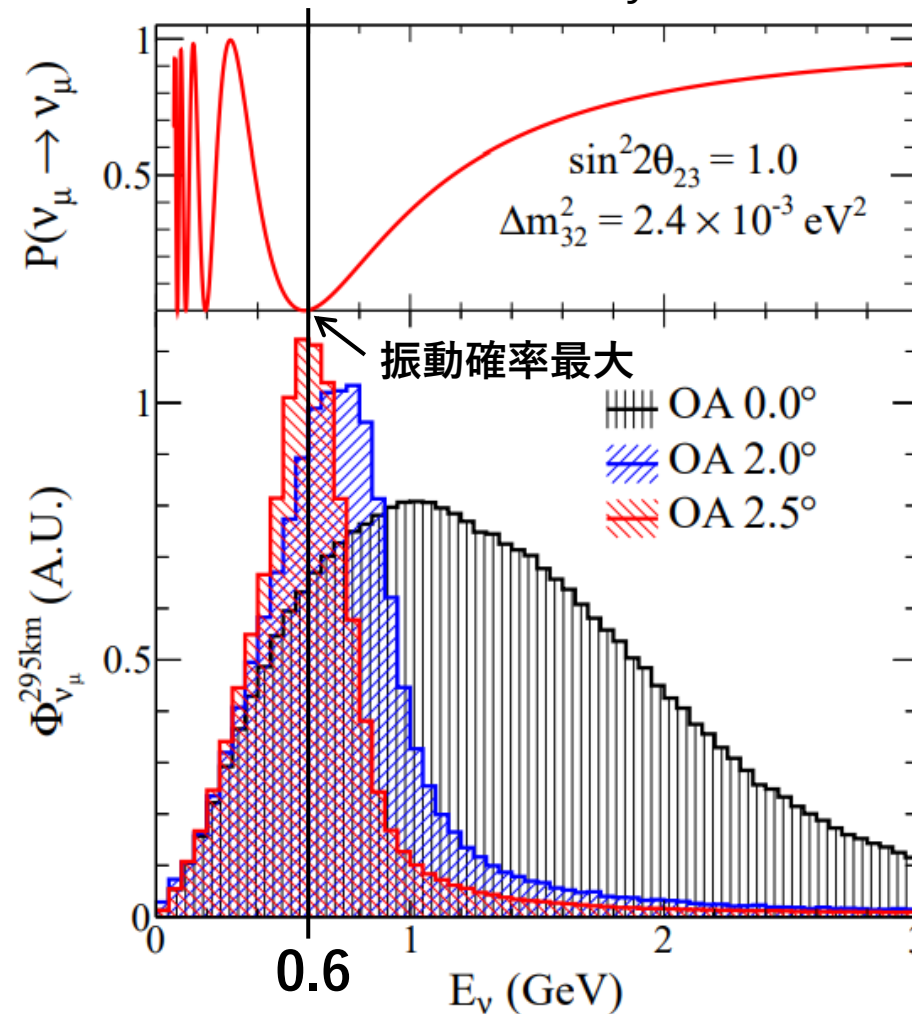
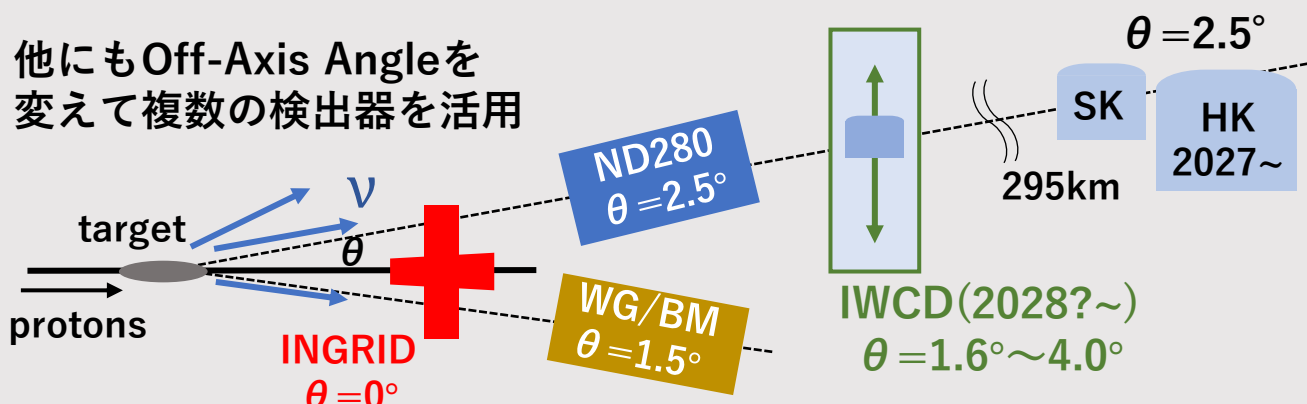


FIG. 1: Muon neutrino survival probability at 295 km and neutrino fluxes for different off-axis angles.

T2K の概要 -様々なニュートリノ検出器-

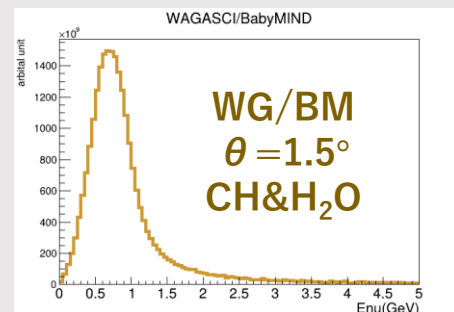
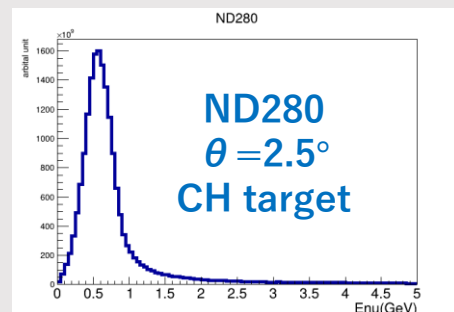
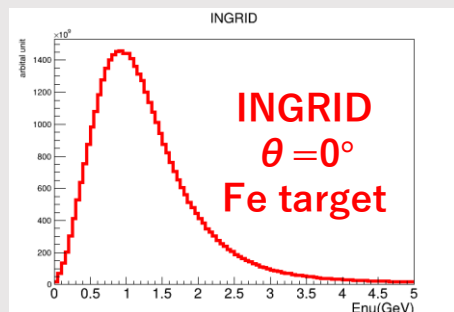
他にも Off-Axis Angle を変えて複数の検出器を活用



異なる Off-Axis Angle に置かれた複数の検出器

J-PARC 内の前置検出器 (ND) :
異なる検出標的とスペクトルを測定
反応断面積測定による系統誤差削減

J-PARC 外の水チェレンコフ検出器 :
Super-K と建設中の Hyper-K
振動前のニュートリノ測定のための
IWCD が HK 時代に建設予定



Off-Axis Angle を変えるとニュートリノのスペクトルも変わり、これらの結果を足し引きして High Energy Background を取り除いたデータが得られる。

正確な誤差評価と相関の重要性

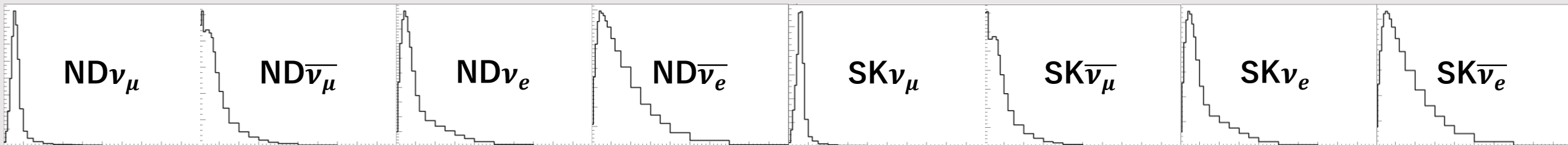
系統誤差を小さくするだけでなく、正確に評価することも重要
誤差伝播の計算のため、相関が必要

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

※振動解析の簡単なイメージ式： $ND_{\text{data}} \times \frac{SK_{\text{simu}}}{ND_{\text{simu}}} = SK_{\text{pred}} \leftrightarrow SK_{\text{data}}$

ビームモード・検出地点・フレーバー・エネルギー毎の
ニュートリノフラックスは互いに相関を持つ

→ND280とSKなら以下のヒストグラムの各Binが互いに相関を持つ変数



フラックス相関

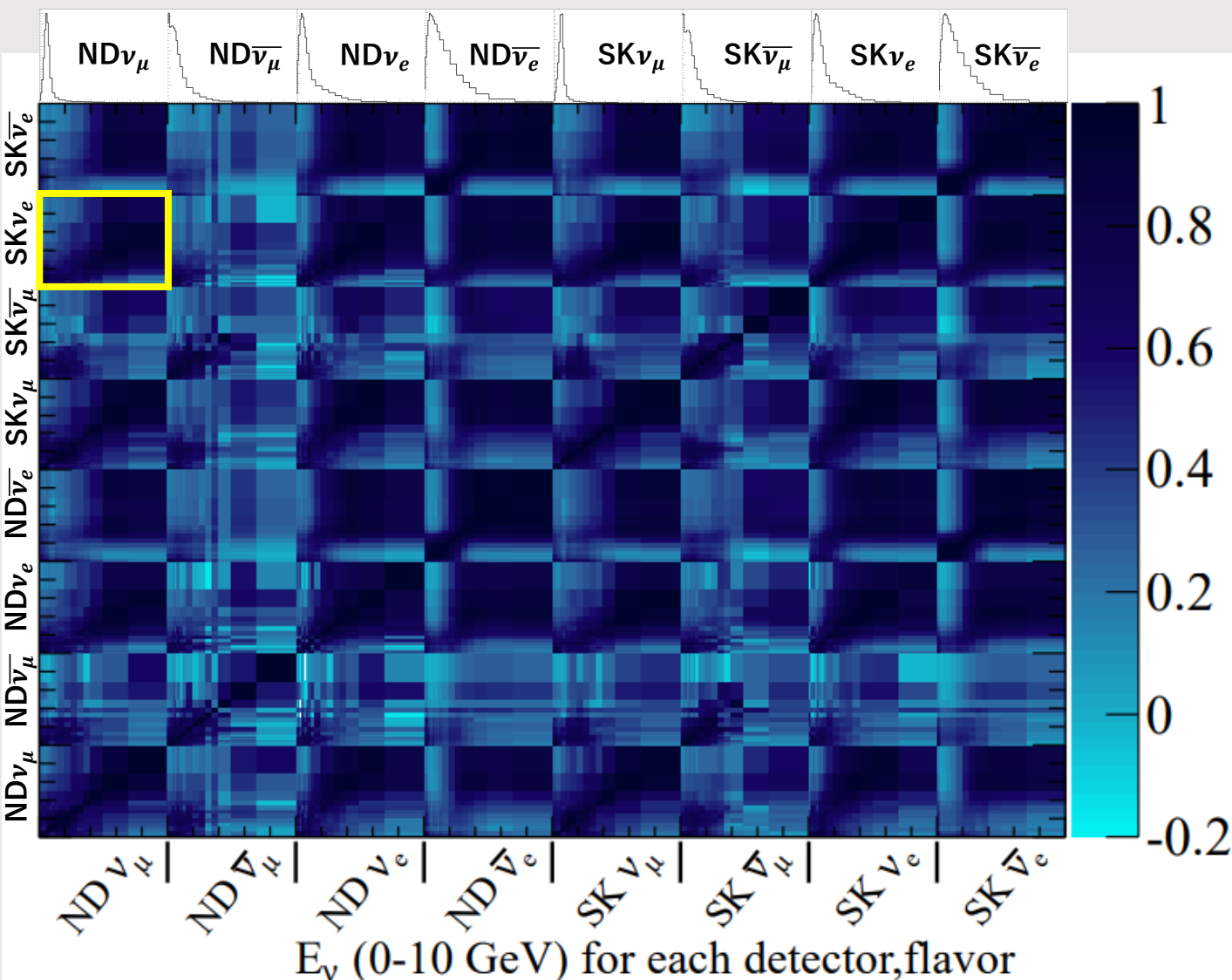
Flux Correlation Matrix

フラックス相関を扱う行列

- ・ニュートリノフラックスの各Bin間の相関
- Bin: beam mode(2)*detection point(2)
flavor(4) E_ν (20Bins)=320Bins

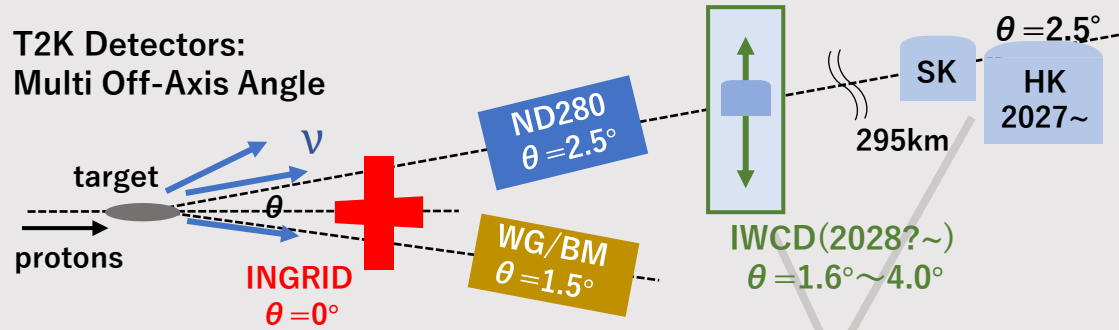
現在はND280とSuper-Kのみを含む

例：黄色で囲んだ領域は、全体的に正の相関があり、以下に対応する
ND280で ν_μ が多く観測された
→SKで ν_e が多く観測されると予想



多地点のフラックス相関を取り扱うには？

T2K Detectors:
Multi Off-Axis Angle



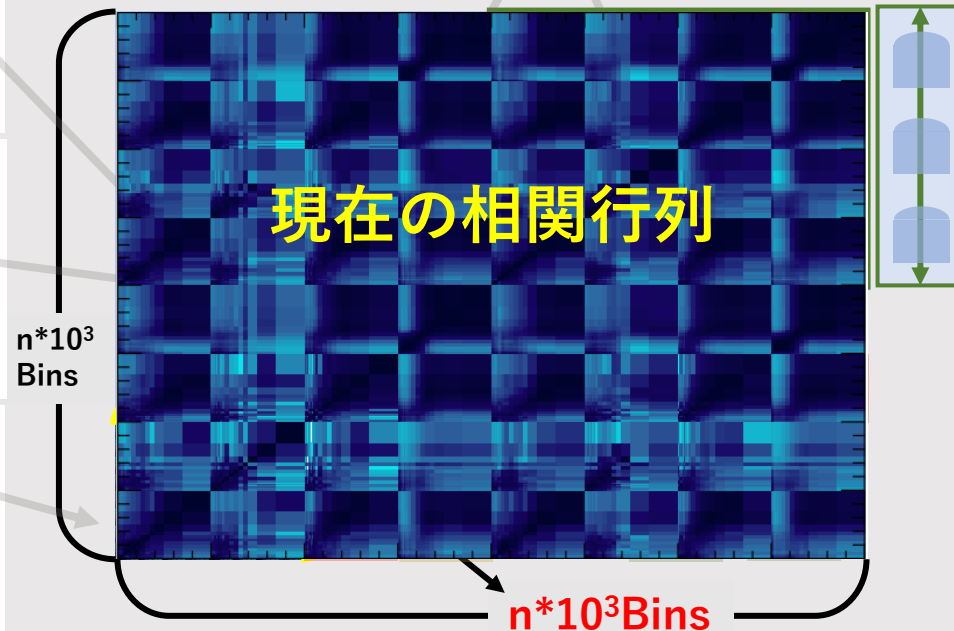
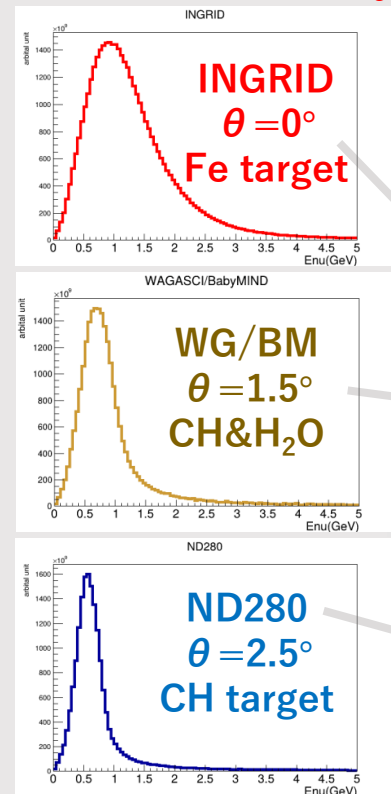
Flux Correlation Matrix

多地点のフラックスを相関行列で扱うには、解析の計算量が大幅に増加する

HK時代のIWCDは、一つの検出器が複数の検出地点にアクセスするため特に深刻

→ 少ない計算量でフラックス相関を扱う新しい手法が必要

→ 相関のもとである、誤差を考える



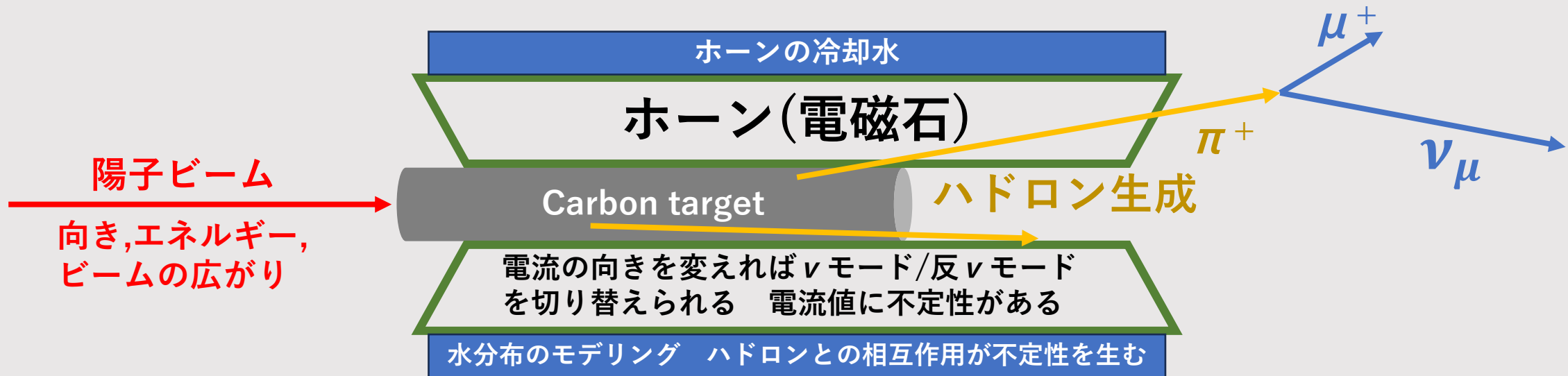
現在の相関行列

HK時代の相関行列

フラックス誤差の源 -ニュートリノ生成の系統誤差-

フラックス不定性に繋がる要素が複数ある

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。



ハドロン生成反応は誤差の主要因の一つで
シミュレーションの観点では最も複雑な要素

フラックス誤差の源 -Hadron production-

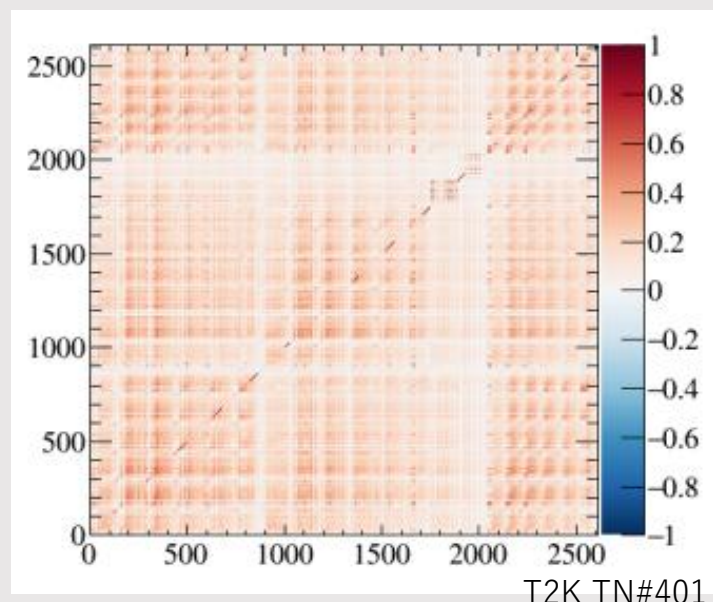
ハドロン生成反応は外部実験(NA61/SHINE実験)の結果を利用するため変数が非常に多い(2609個) →これを減らすことを考える

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

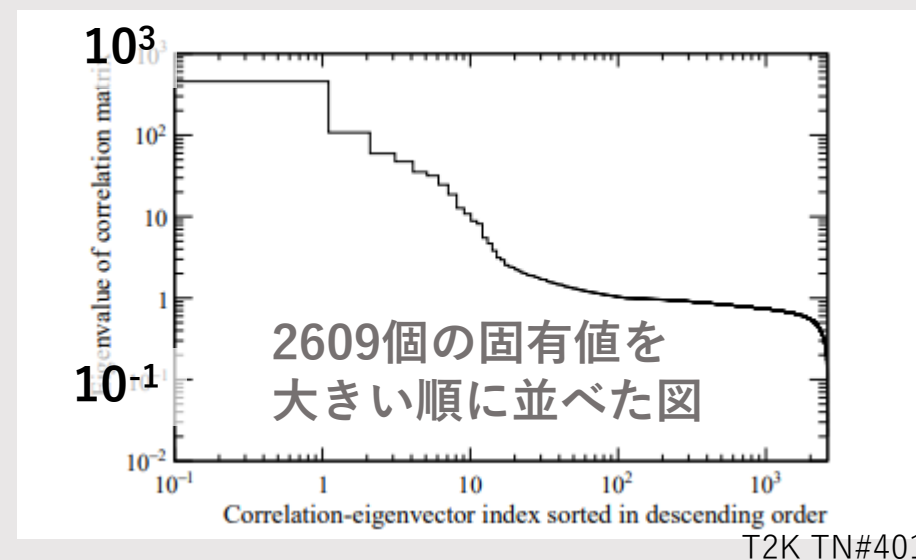
→固有値が大きいベクトルほど多くの変数間の相関を反映する

→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？

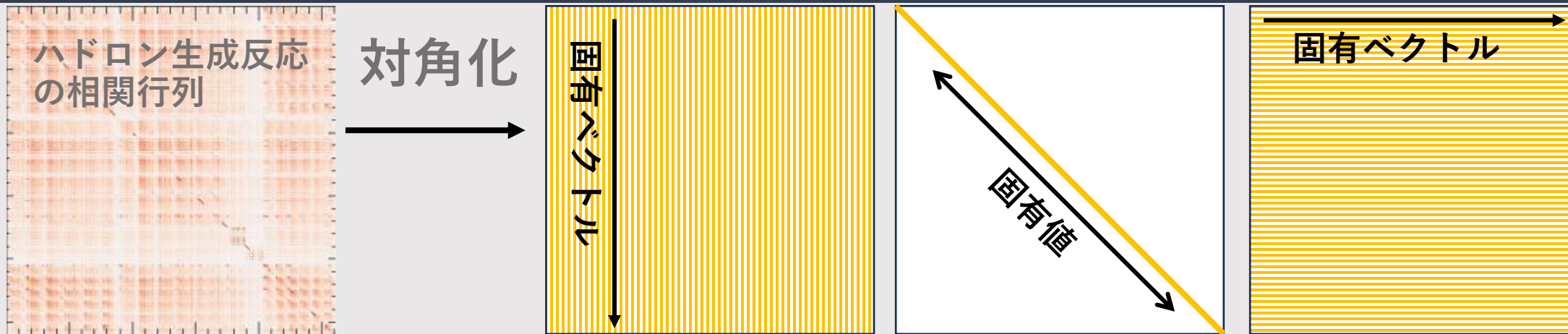


← NA61/SHINE実験
の相関行列

この固有値は3-4桁の
範囲にわたる →

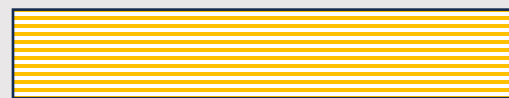
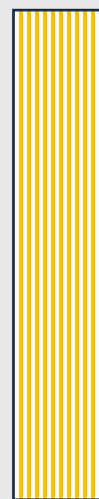


計算量を減らす方法：主成分分析で変数を減らす



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

重要な部分
だけを残す



$$(c_1, c_2, \dots, c_{10}) * (u_1, u_2, \dots, u_{10})$$

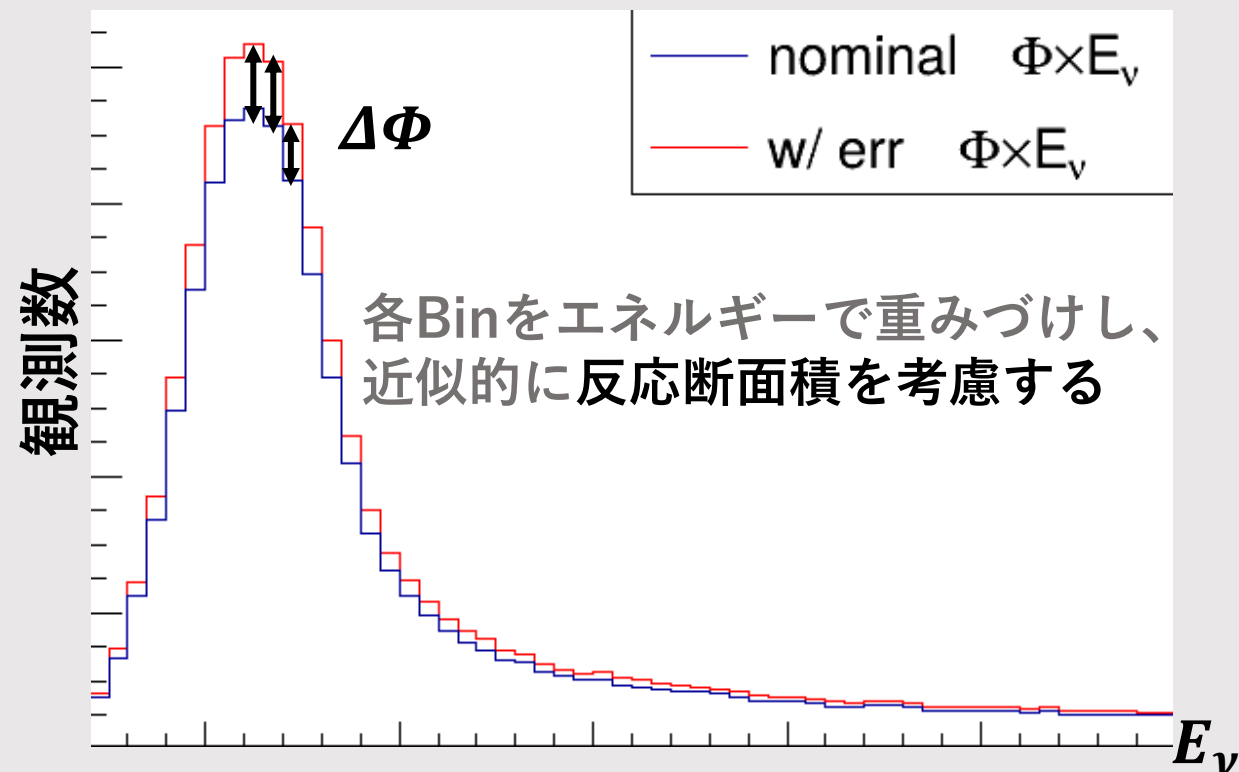
固有値展開により**相関の無い新しい変数**を作り、そのうち**影響が大きいものだけを残す**

フラックス誤差への寄与をどう比べる？

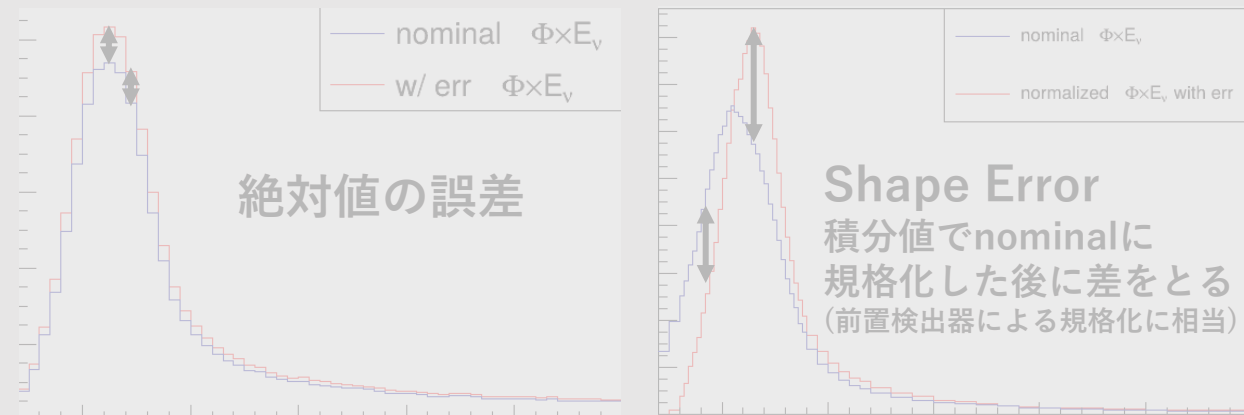
フラックス誤差への寄与の評価方法

χ^2 -like evaluation

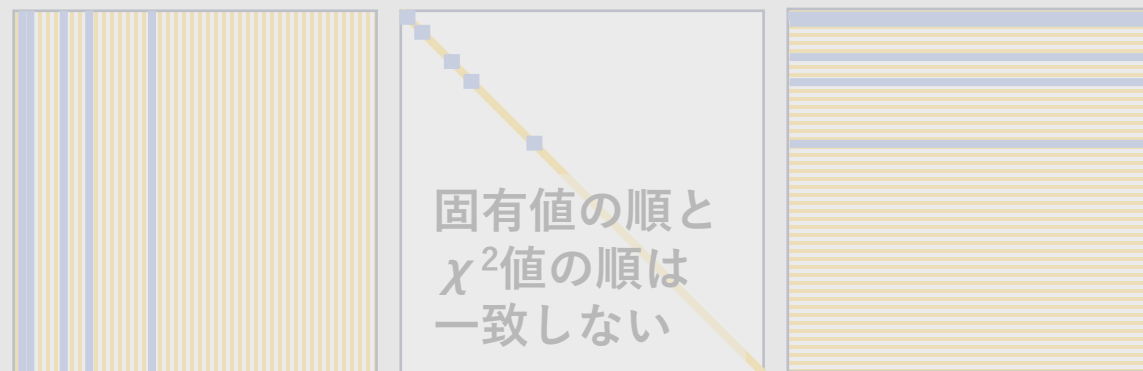
$$\chi^2 = \sum_{\text{ithbin}}^{0.2 \sim 3 \text{ GeV}} \frac{\left(\Phi_{\text{w/err}}^{(\text{ithbin})} - \Phi_{\text{nom}}^{(\text{ithbin})} \right)^2}{\Phi_{\text{nom}}^{(\text{ithbin})}}$$



評価した2種類の誤差 (イメージ図)



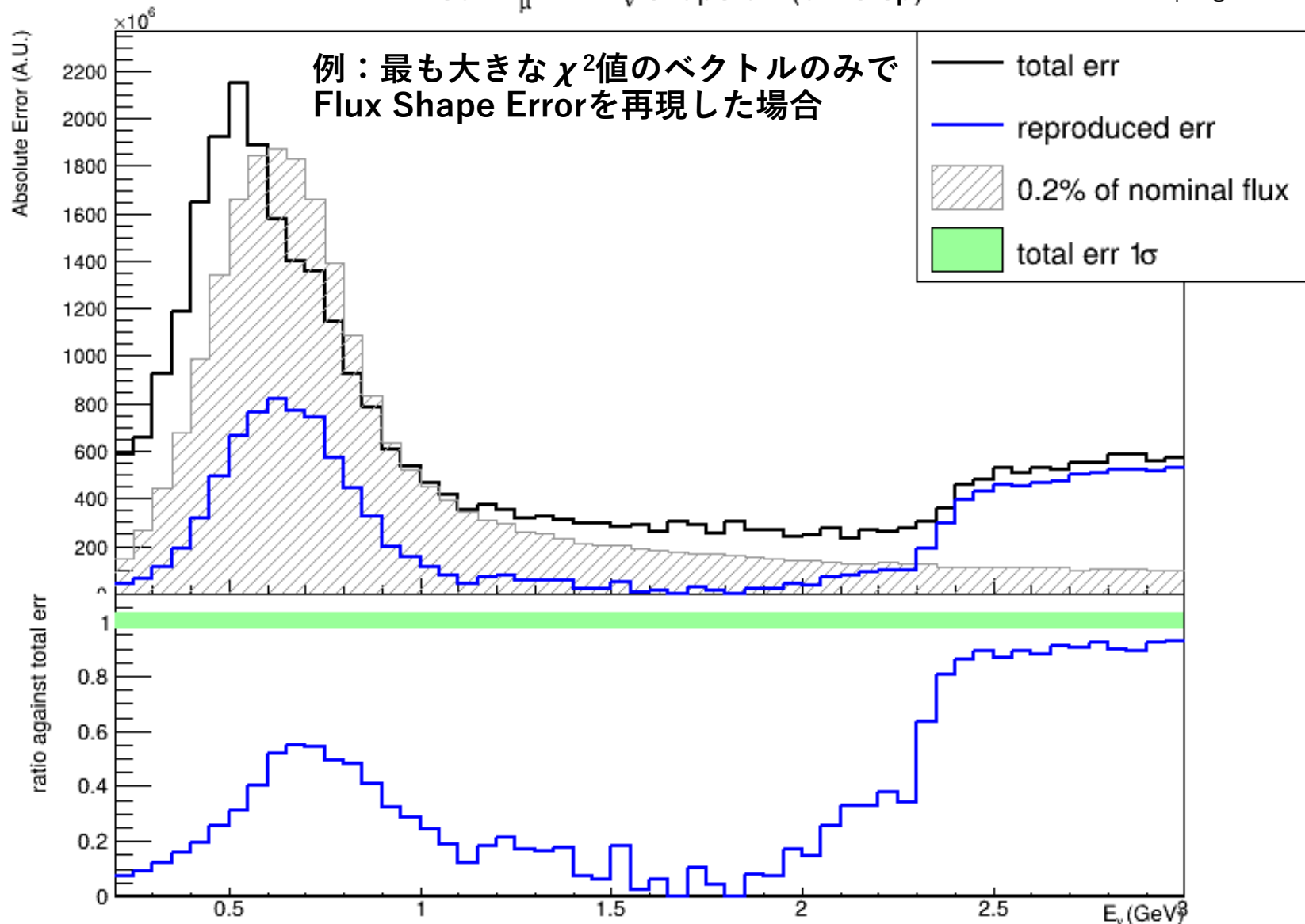
固有ベクトルを χ^2 値に対してソートする
その順に足し上げるベクトルを増やしていき、
再現された誤差を見て十分な数を判断する
固有値の順に残るとは限らない



結果：再現した誤差と実際の誤差の比較

ND280 ν_μ $\Phi \times E_\nu$ shape err (0th step)

work in progress



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

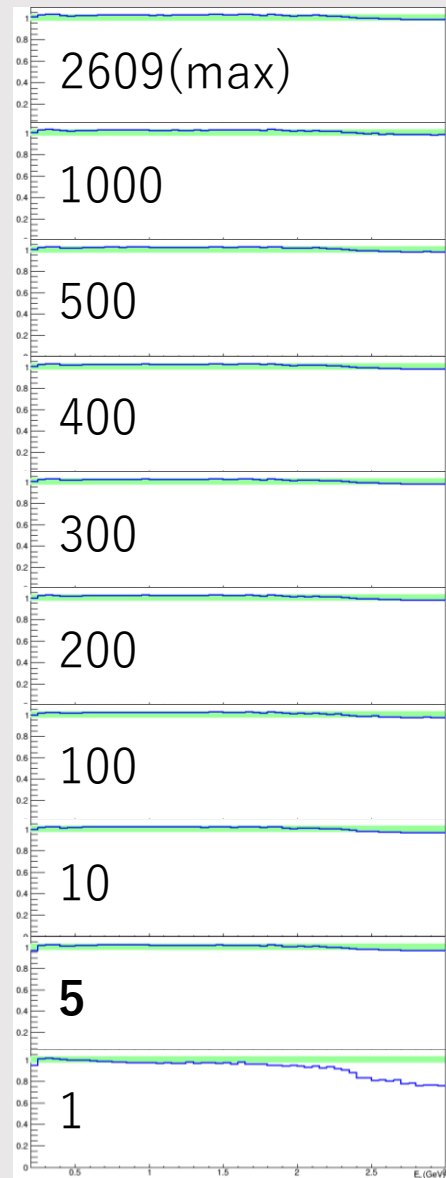
灰: スケールしたフラックス
(誤差のスケールを見るため)
(規格化無: 2%, 有: 0.2%)

青: 一部の固有ベクトルで
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
MC 統計誤差 1σ の範囲
比がここに達すれば十分

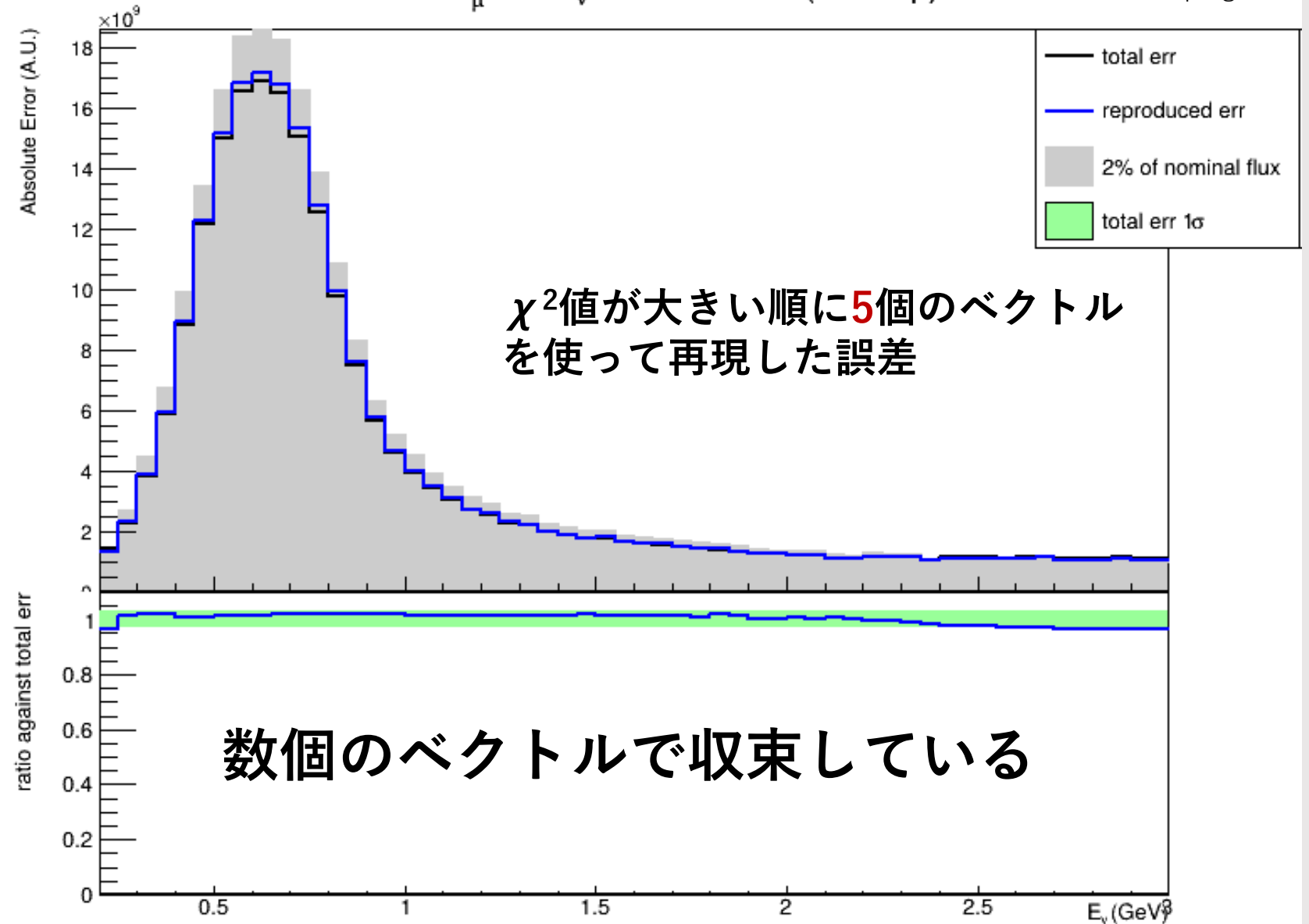
絶対値Error

↑ベクトルの数

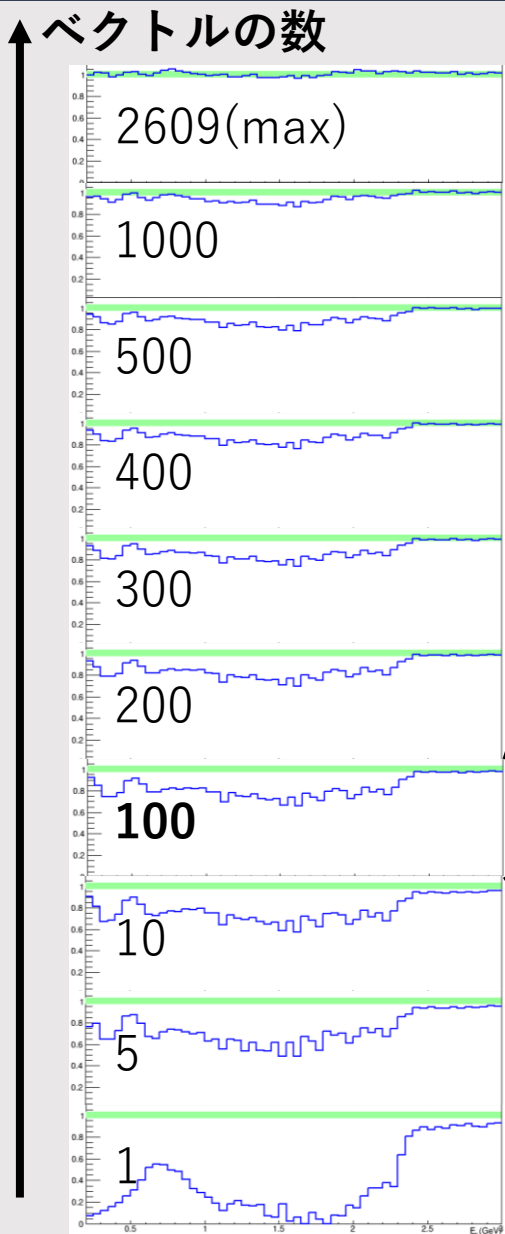


ND280 ν_μ $\Phi \times E_\nu$ absolute error (4th step)

work in progress

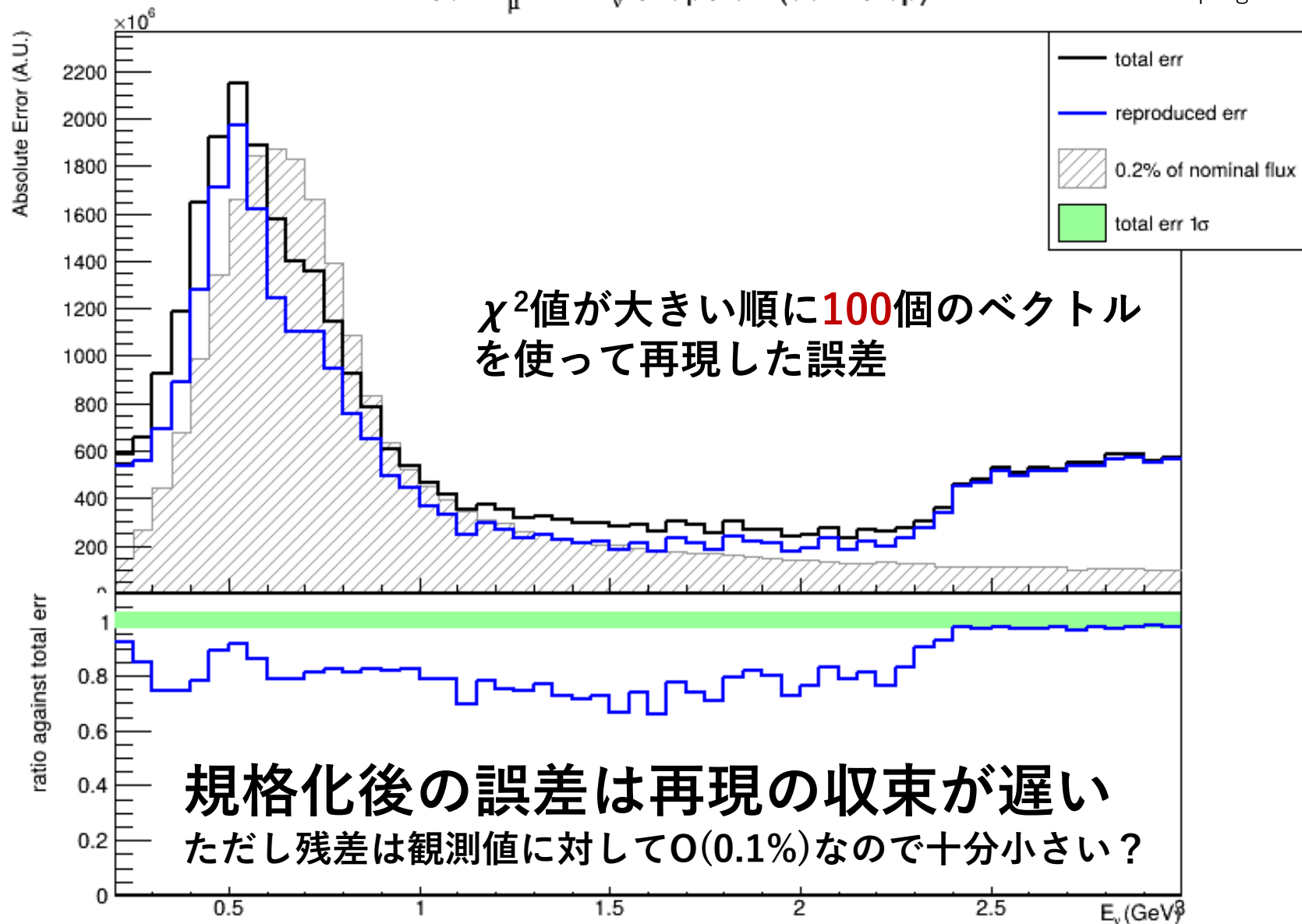


Shape Error



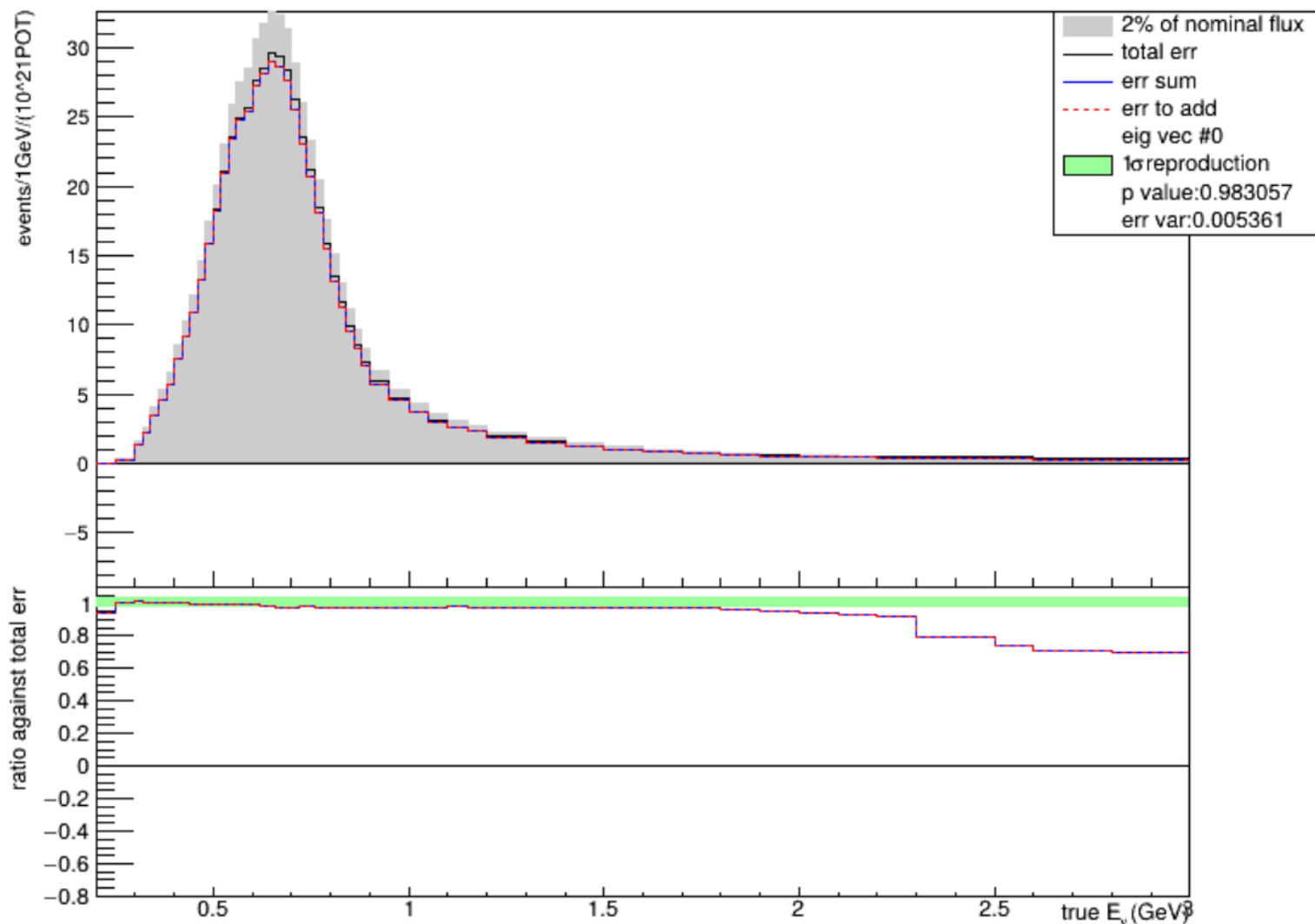
ND280 ν_μ $\Phi \times E_\nu$ shape err (99th step)

work in progress



今後の展望

Super-K 1Rmu from mu ν_μ flux absolute error (0th step) work in progress



これまでは簡易的な断面積のみ取り入れていたが、**実際のエネルギー依存性はより複雑である**

また、**実データには検出効率や振動確率がかかっている**

これらを考慮した、**より実際の測定に近い条件でも比較を行う**

また、振動パラメータ測定に、**どこまで系統誤差を再現する必要があるかを調べる**

(←例：Super-Kで ν_μ と判断されたイベントの分布の誤差

振動確率は考慮されていない)

まとめ

- T2Kでは多地点にある複数のニュートリノ検出器を活用し、ニュートリノ振動の精密測定によりCP対称性の破れなどを探索する
- 全ての検出器から得られた結果を統合的に取り扱うには、多地点間のフラックス相関を取り扱う新しい方法が必要
- フラックス誤差の主要因の内最も複雑なハドロン生成反応について、その一部の要素からフラックス誤差を再現することに取り組み、2609個のパラメータを100個程度に減らせる可能性を示した
- 今後は正確な断面積、検出器の検出効率や振動確率を考慮に入れた、より実験データとの比較に適した条件でも同様の研究を続ける

Backup

T2K の概要 -Off-Axis method-

295km (東海 - 神岡間) 移動したとき、
 0.6GeVのニュートリノは振動確率が最大
 ニュートリノ検出の観点でも都合がいいエネルギー
 領域で、逆にHigh Energyの部分はBackground

Phys. Rev. D 87, 012001

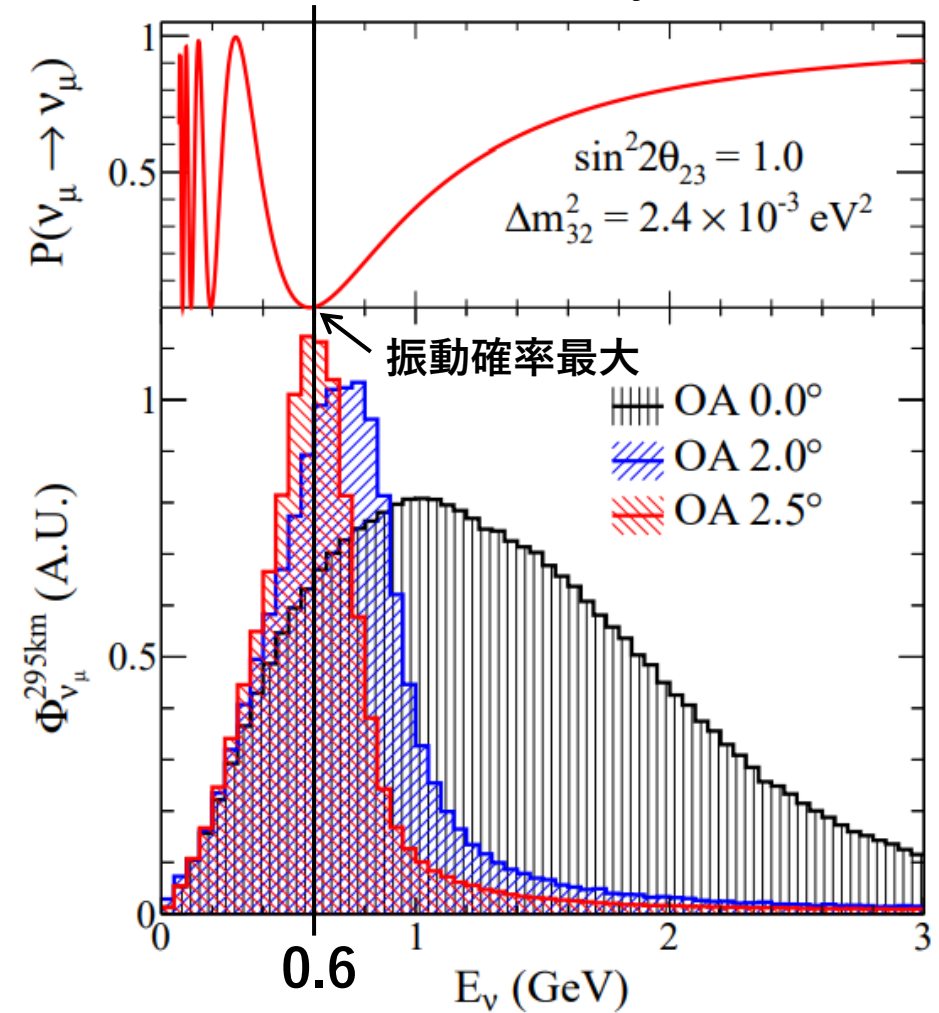
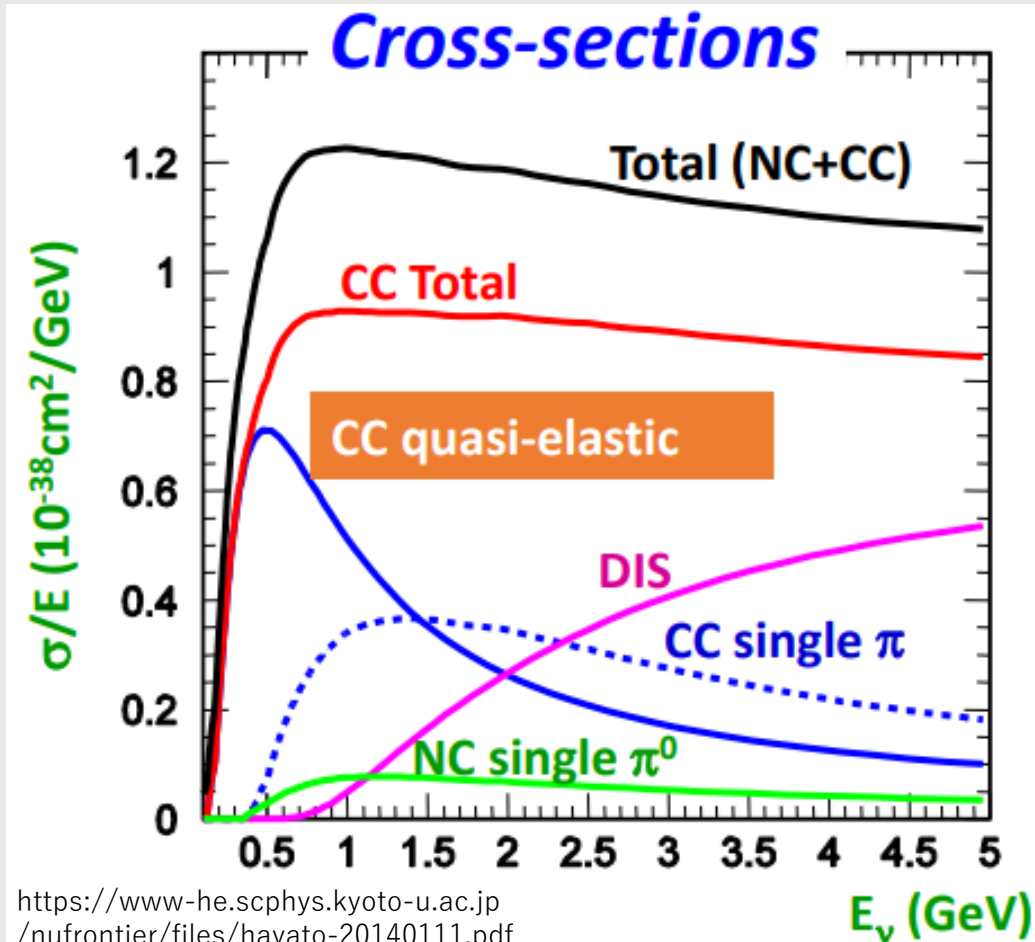


FIG. 1: Muon neutrino survival probability at 295 km and neutrino fluxes for different off-axis angles.

NA61/SHINE実験

NA61/SHINE実験 at CERN

ハドロン相互作用は理論的に完全には理解されていない

J-PARCの陽子ビームと炭素標的を再現した実験

標的から出てきた粒子の種類、場所、向き、運動量などのシミュレーションに、実験結果を代入

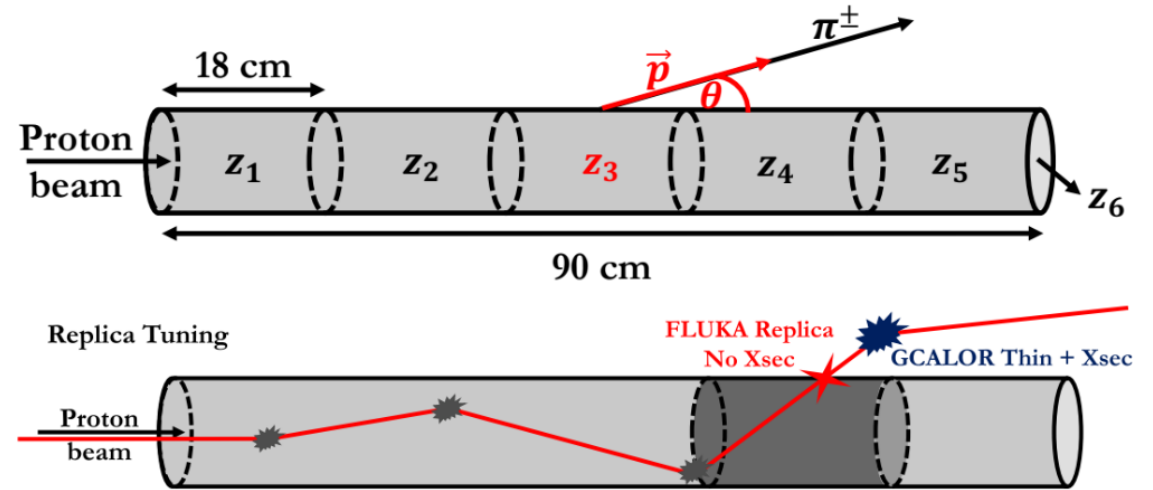
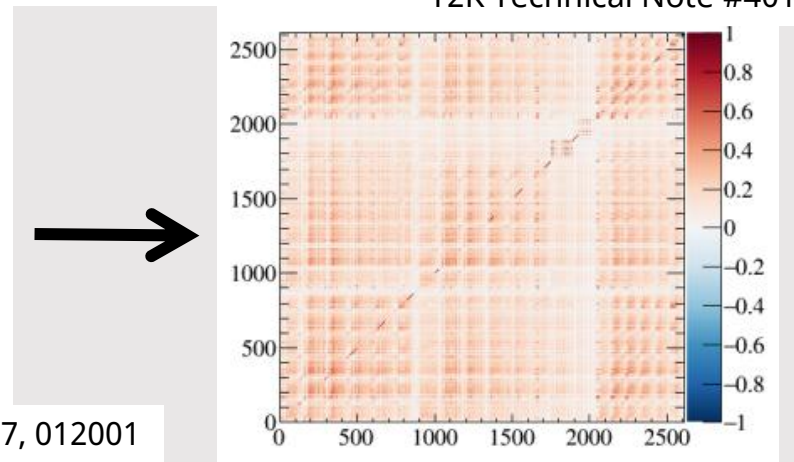
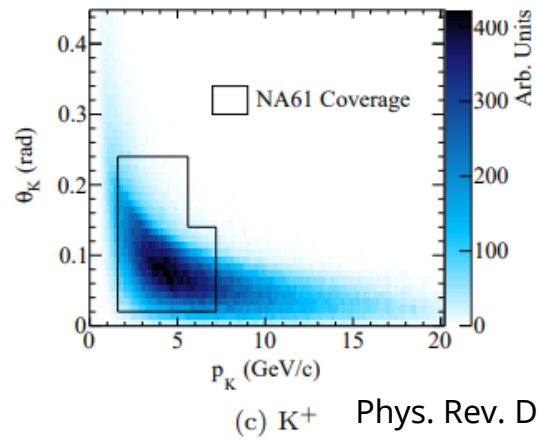
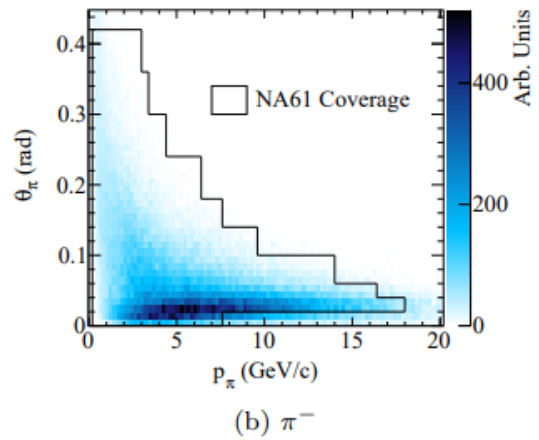
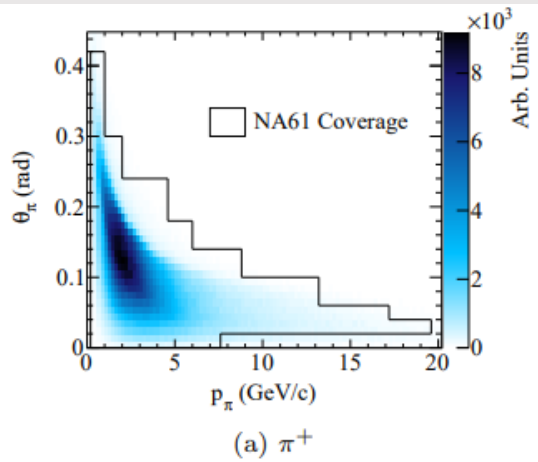


Figure 10: Top: Replica-target with observables p , θ and z . Bottom: Illustration of the concept behind replica target tuning. For the interactions inside the target a single weight is applied based on the exiting position and momentum. For **out-of-target interaction thin target tuning is used.**



フラックス誤差への寄与の評価方法

T2Kの通常の方法:

$(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_{2609})$

それぞれの変数に相関通りの分布で乱数を代入(σ の単位)

MCでフラックスの標準偏差を求める

→検出地点数 $\times 10^3$ のフラックス変数間の相関行列

本研究:

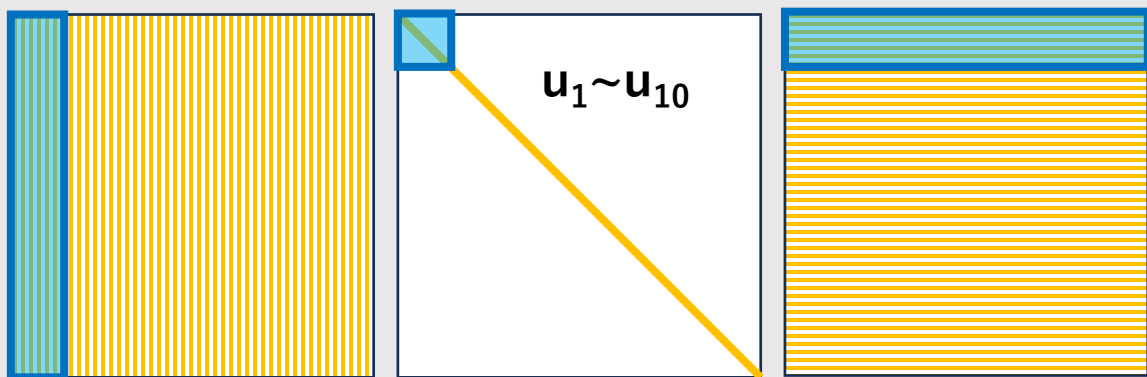
$(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_{2609})$ に固有ベクトルを代入

その固有ベクトル由来の 1σ 分の誤差に相当

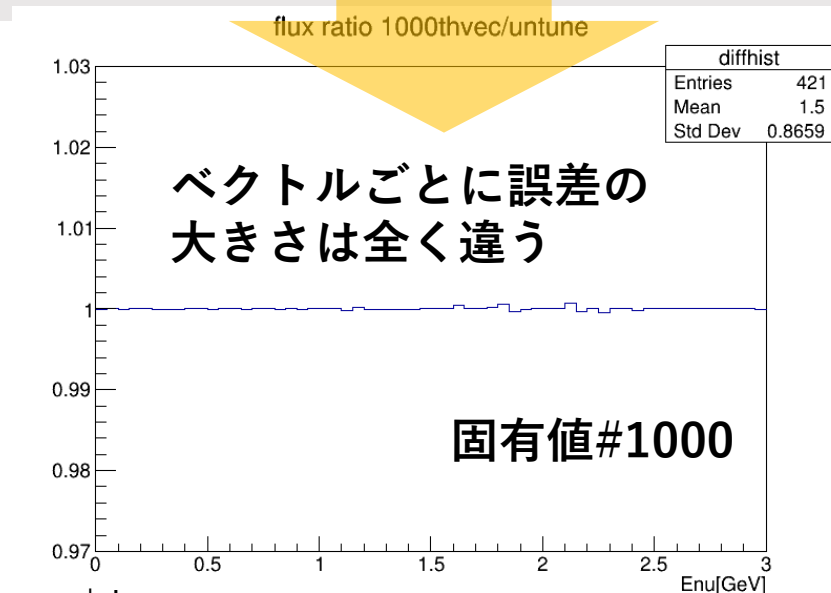
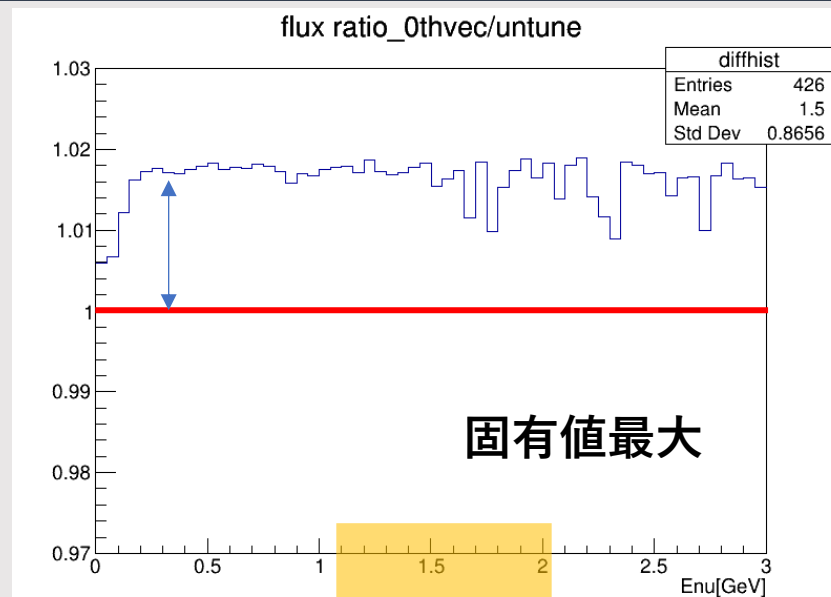
誤差の再現は複数のベクトル由来の誤差の2乗和をとり、
その平方根をとる

$$\sigma_{\text{total}}(E_\nu) = \sqrt{\Sigma \left(\Phi_{\text{err}}^{\text{ithvec}}(E_\nu) - \Phi_{\text{nom}}(E_\nu) \right)^2}$$

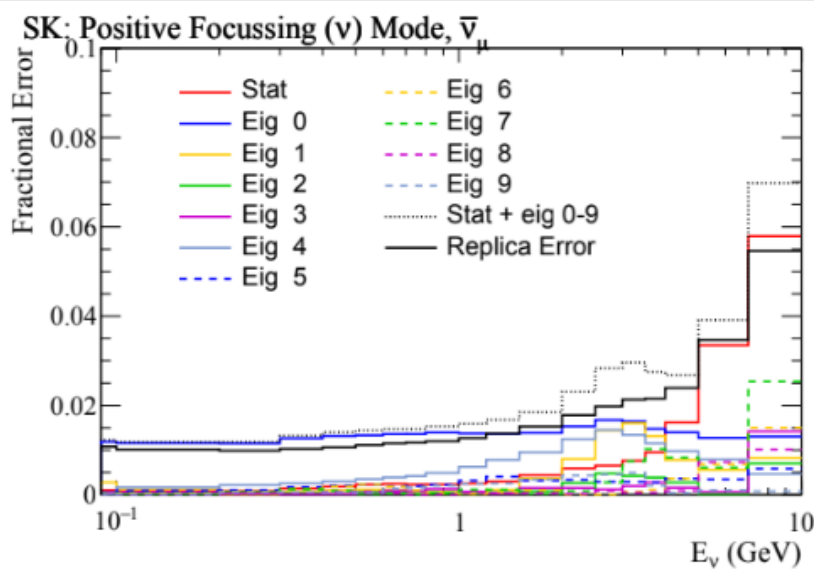
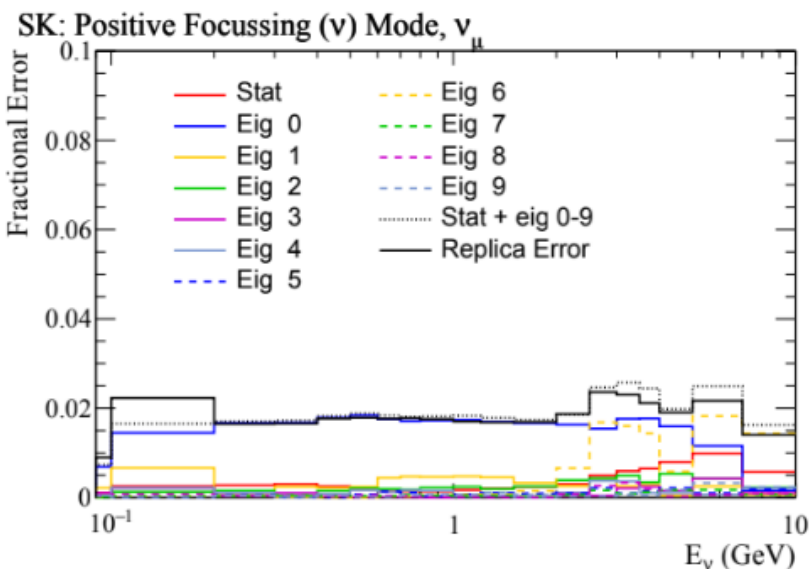
T2K 内での先行研究 (T2K Technical Note #401)



固有値が大きい順に10個残すことを試したが、
固有値が小さいものが無視できるとは限らない



work in progress



T2K TN#401

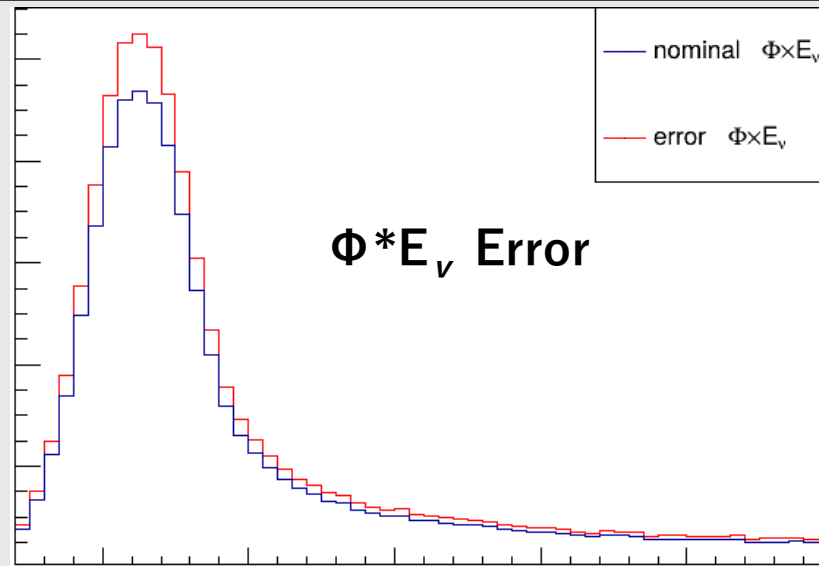
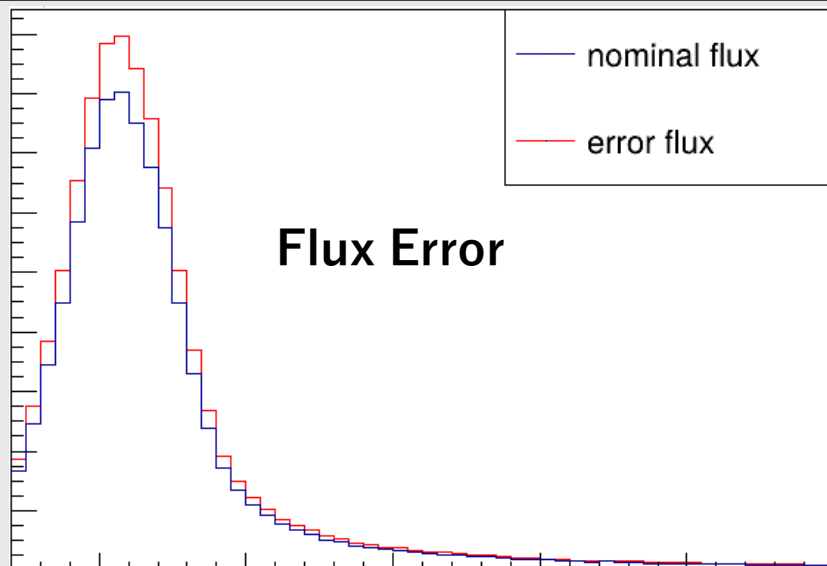
χ^2 値による固有ベクトルのソート ND280

固有値	ν_μ				$\bar{\nu}_\mu$				ν_e				$\bar{\nu}_e$			
	Φ abs	Φ shape	$\Phi \times E_\nu$ abs	$\Phi \times E_\nu$ shape	Φ abs	Φ shape	$\Phi \times E_\nu$ abs	$\Phi \times E_\nu$ shape	Φ abs	Φ shape	$\Phi \times E_\nu$ abs	$\Phi \times E_\nu$ shape	Φ abs	Φ shape	$\Phi \times E_\nu$ abs	$\Phi \times E_\nu$ shape
0	0	1	0	6	0	1	0	1	0	6	0	6	0	0	0	200
1	1	6	1	1	4	4	4	4	6	0	6	0	7	200	7	0
2	2	2	6	4	5	5	1	3	1	1	1	2	4	151	200	151
3	4	4	2	2	1	9	5	7	2	2	2	1	200	153	4	153
4	6	10	4	0	9	3	9	5	4	2539	4	2539	151	7	151	155
5	5	0	5	3	12	7	7	0	5	2501	2539	2501	5	155	153	103
6	3	5	3	5	3	0	8	2536	2539	10	2501	4	153	103	5	148
7	10	3	9	10	6	13	14	2	2501	4	5	5	202	148	202	202
8	9	12	18	12	7	14	3	13	3	5	3	467	259	202	259	7
9	18	9	10	9	19	19	12	9	10	467	467	3	203	105	203	105
10	38	29	38	2066	14	2	2536	19	9	3	1529	2047	103	1	261	150
11	22	23	12	7	8	2536	6	8	467	7	1970	1970	1	259	1	152
12	12	11	22	2350	13	8	2448	2448	18	1529	9	2350	155	203	103	203
13	11	41	41	29	2	2448	2	14	7	1970	7	1529	261	150	262	259
14	31	1995	2066	70	23	2439	2439	2439	1529	2485	2006	2048	148	152	155	262

χ^2 値による固有ベクトルのソート Super-K

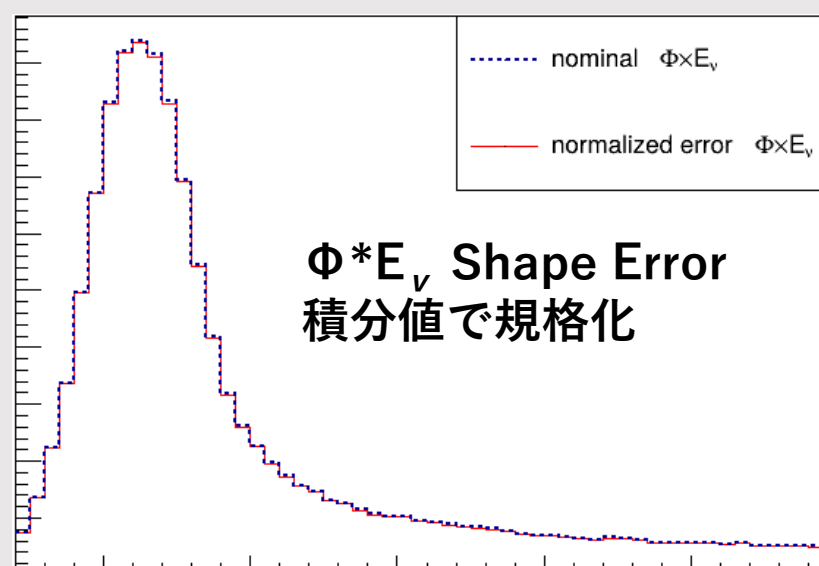
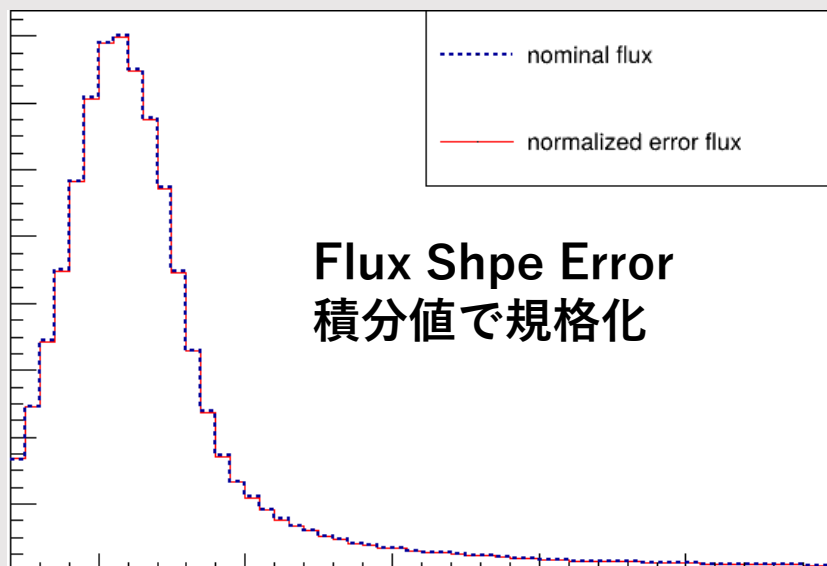
	ν_μ				$\bar{\nu}_\mu$				ν_e				$\bar{\nu}_e$			
固有値	Φ abs	Φ shape	$\Phi \times E_\nu$ abs	$\Phi \times E_\nu$ shape	Φ abs	Φ shape	$\Phi \times E_\nu$ abs	$\Phi \times E_\nu$ shape	Φ abs	Φ shape	$\Phi \times E_\nu$ abs	$\Phi \times E_\nu$ shape	Φ abs	Φ shape	$\Phi \times E_\nu$ abs	$\Phi \times E_\nu$ shape
0	0	1	0	6	0	1	0	1	0	6	0	6	0	0	7	200
1	1	6	1	1	4	4	4	4	6	0	6	0	7	200	0	0
2	2	10	6	4	1	7	1	7	1	1	1	2	4	7	200	202
3	6	2	2	2	5	3	5	3	2	2	2	1	200	202	4	7
4	4	4	4	0	9	5	7	0	4	10	4	2501	5	203	202	203
5	5	0	5	5	7	0	9	2	5	2539	2539	4	202	259	5	259
6	10	5	9	10	3	13	3	2536	2539	2501	2501	2539	259	1	259	1
7	3	3	3	3	19	19	8	19	10	4	5	5	203	4	203	262
8	9	12	10	2066	12	14	14	13	2501	5	3	3	1	262	1	261
9	18	9	18	7	8	9	2536	8	3	467	467	467	261	261	262	257
10	38	29	38	12	6	2	12	5	9	3	7	2350	2	257	261	4
11	22	23	2066	9	14	8	2448	14	7	7	1529	2047	262	408	257	408
12	12	11	12	2350	13	2536	2439	113	467	1529	1970	1529	9	1570	1571	1570
13	11	41	7	2267	23	2448	2	2448	1529	1970	9	1970	1571	1571	1570	1571
14	29	2066	22	29	2536	2439	19	2439	18	2047	2006	10	257	2	408	2

フラックス誤差への寄与の評価方法

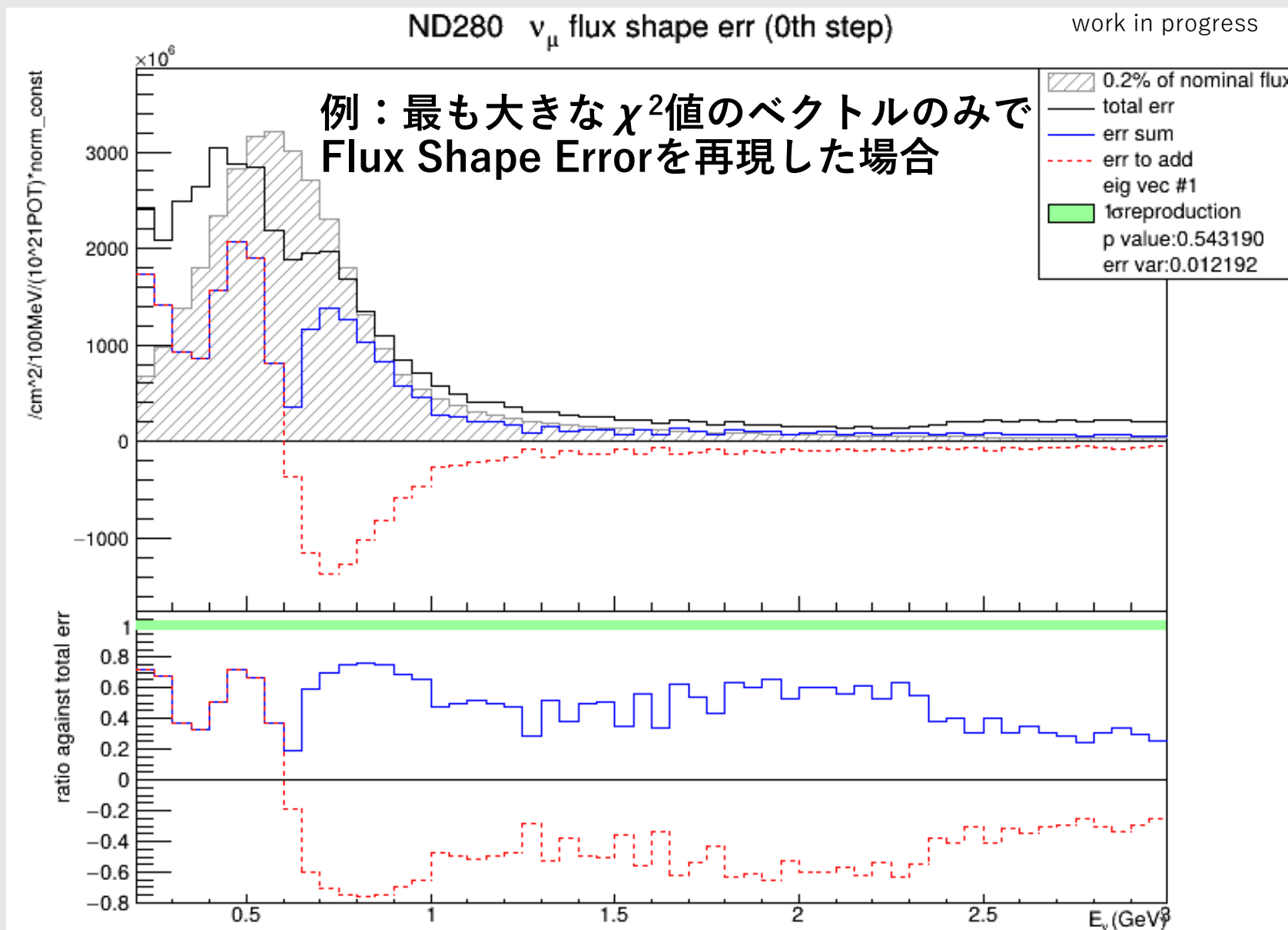


4種類の誤差について 評価

先行研究との違い:
フラックスに対する誤差の比を
取らずに比較することで、
ピーク付近の誤差に対する寄与
が強調される



結果：再現した誤差と実際の誤差の比較



1. 誤差の絶対値(上)
2. total誤差に対する比(下)

黒: total誤差

青: 各stepでの再現した誤差

赤: 各stepで足される誤差

灰: 誤差の無いフラックス
(誤差のスケールを見るため)
($\times 2\%$ for flux, 0.2% for flux $\cdot E_\nu$)

Green: total誤差 1σ の範囲
誤差にもMC由来の標準偏差
比がここに達すれば十分