

“T2K実験における新しい外挿法によるニュートリノフラックス予測”

日本物理学会第67回年次大会
(関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス)

京大理, 高工研^A 村上明, 市川温子, 久保一, 坂下健^A,
鈴木研人, 中平武^A, 中家剛, 丸山和純^A,
他T2K Collaboration

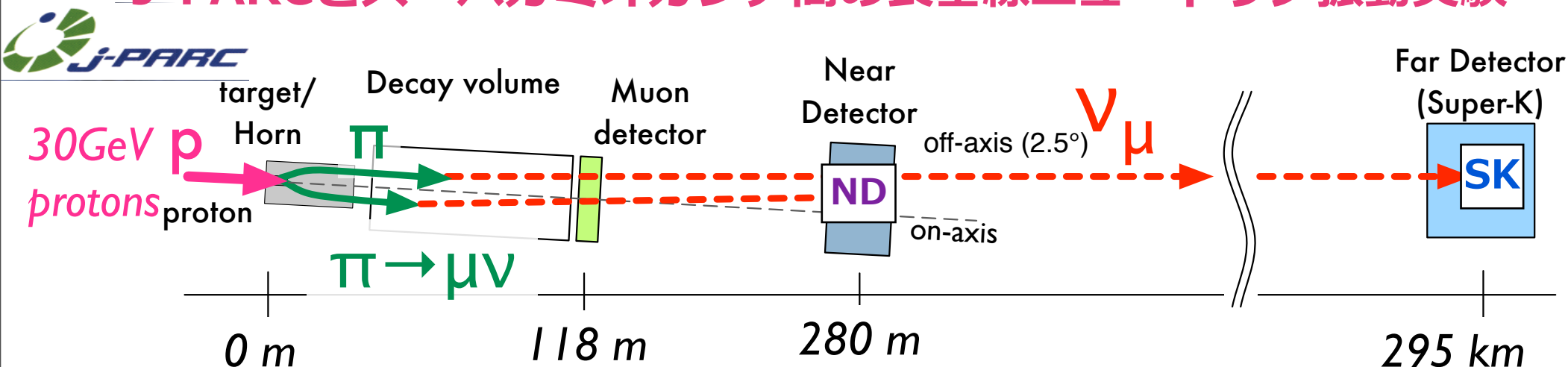
目次

- T2K実験・ニュートリノ振動解析
- 外挿(前置検出器→後置検出器)の手法
- Toy MCによるデモンストレーション
- まとめ

T2K実験

有限の質量を持つニュートリノが飛行中に別の世代に変化する現象
(ニュートリノ振動)を解明

J-PARCとスーパーカミオカンデ間の長基線ニュートリノ振動実験



ゴール

電子ニュートリノ出現($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$)モードの探索(5σ)
ミューニュートリノ消失モードの精密測定

2011年に最初の結果を出版

→ 2012年の物理データを用いての結果のアップデート

ニュートリノ振動解析 2010

NDの観測結果(例:ニュートリノの数N)をSKまで外挿,
SKの観測数と比較

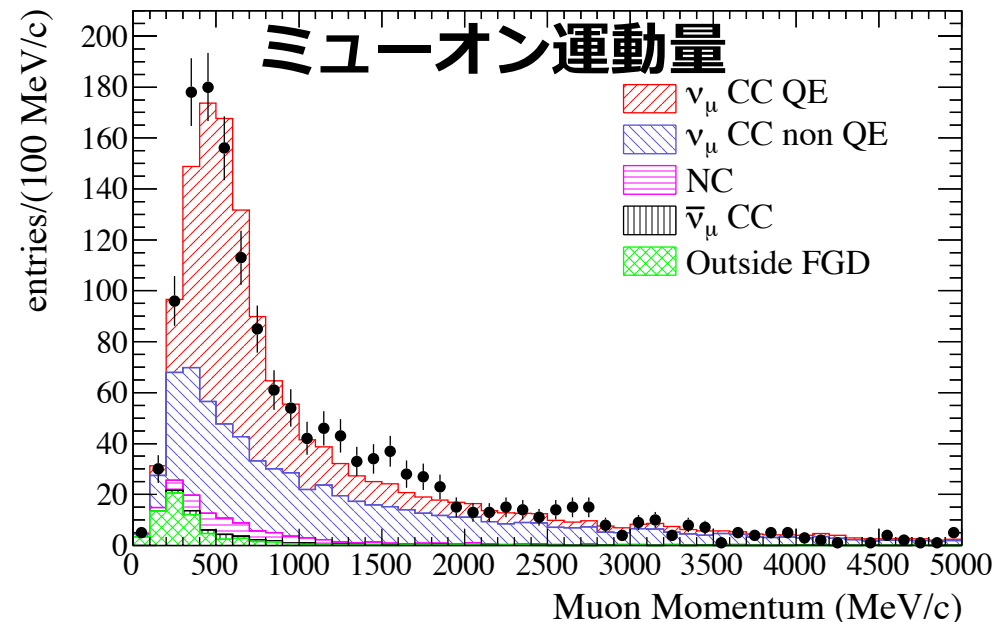
$$\underline{N_{SK}^{exp}} = N_{ND}^{Data} \times \underline{N_{SK}^{MC} / N_{ND}^{MC}} \longleftrightarrow \underline{N_{SK}^{Data}}$$

II

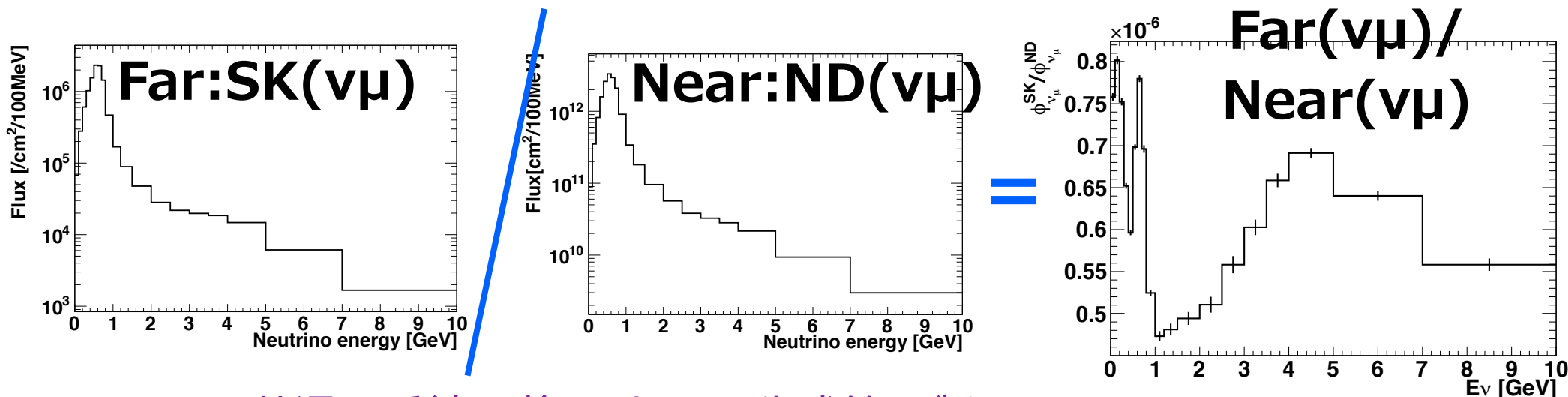
$$\frac{\int \phi_{SK}^{MC}(E) \times P_{osc}(E, \Delta m^2, \theta) \times \sigma_{CH}(E) \times \epsilon_{SK}(E) dE}{\int \phi_{ND}^{MC}(E) \times \sigma_{H_2O}(E) \times \epsilon_{ND}(E) dE}$$

NDの情報：ニュートリノ観測の数しか使っていない

➡ NDでのニュートリノのエネルギースペクトル情報をSKの観測数を外挿 = Sensitivityの向上



外挿法 : Far/Near (F/N)



- ND,SKで共通の系統誤差(ハドロン生成等)がキャンセル

- シンプル.

$$\phi_{SK}^{exp}(E_i) = F/N(E_i) \times \phi_{ND}^{Data}(E_i)$$

K2Kでの振動解析

$$L(\theta, \Delta m^2, \mathbf{f}) = L_{norm}(\theta, \Delta m^2, \mathbf{f}) \times L_{shape}(\theta, \Delta m^2, \mathbf{f}) \times L_{syst}(\mathbf{f})$$

($\theta, \Delta m^2$):振動パラメータ, $\mathbf{f}$ (vector):系統パラメータ 例) $\Phi'(E_i) = f_i \times \Phi(E_i)$

L_{syst} : $\prod \exp(-1/2 \mathbf{f}^T \mathbf{M} \mathbf{f})$ (M:error matrix)

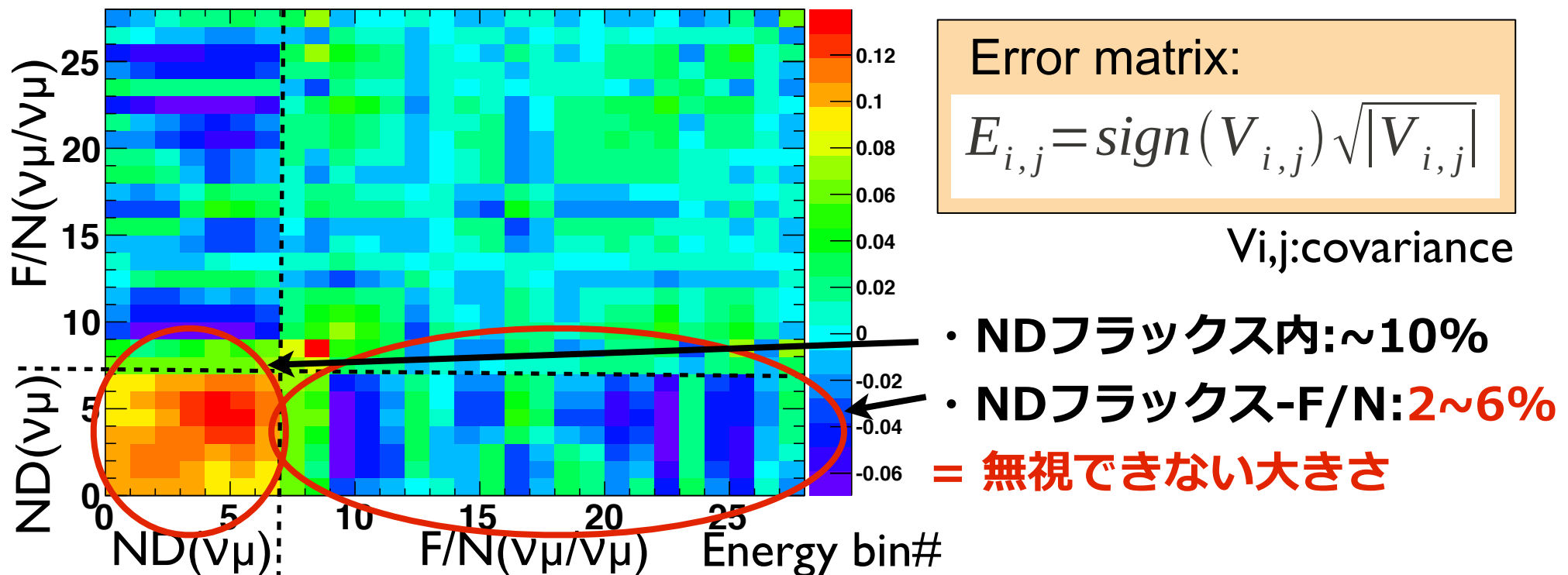
→ NDフラックスの系統パラメータに対する制限は入っていない(誤差大)

T2Kのフラックスは良い精度(10~20%)なので制限をかけたい。

NDフラックスとF/Nの相関

“NDのフラックスとF/Nは独立か？”を確認する必要あり

NDフラックスとF/Nの相関の大きさ(Error matrix)



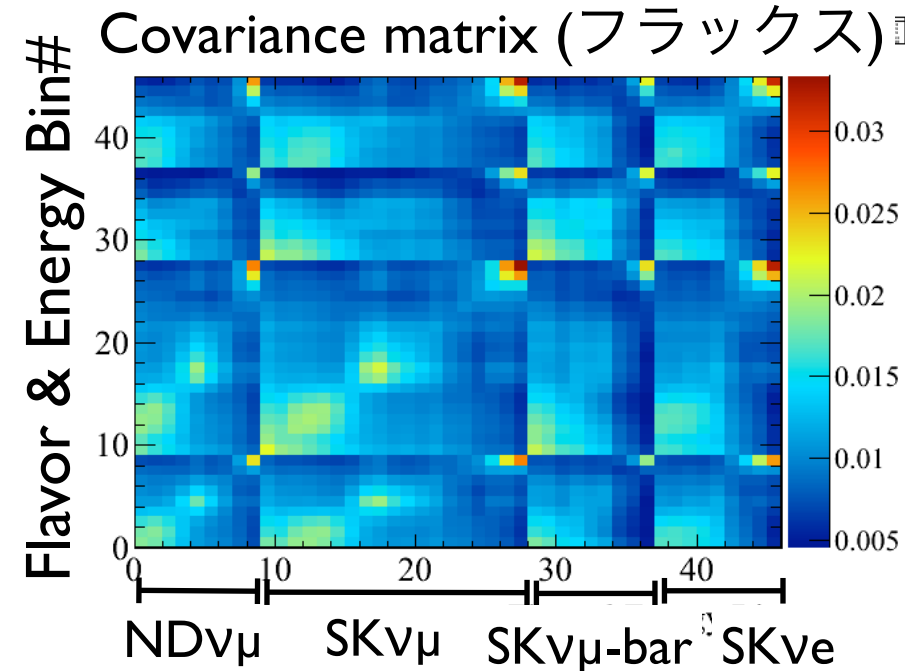
フィットで変化したNDのフラックスに応じて、F/Nの値も変える
必要がある → F/Nの利点(シンプルさ)が薄くなる.

→ 別の外挿法を考える : Covariance matrix

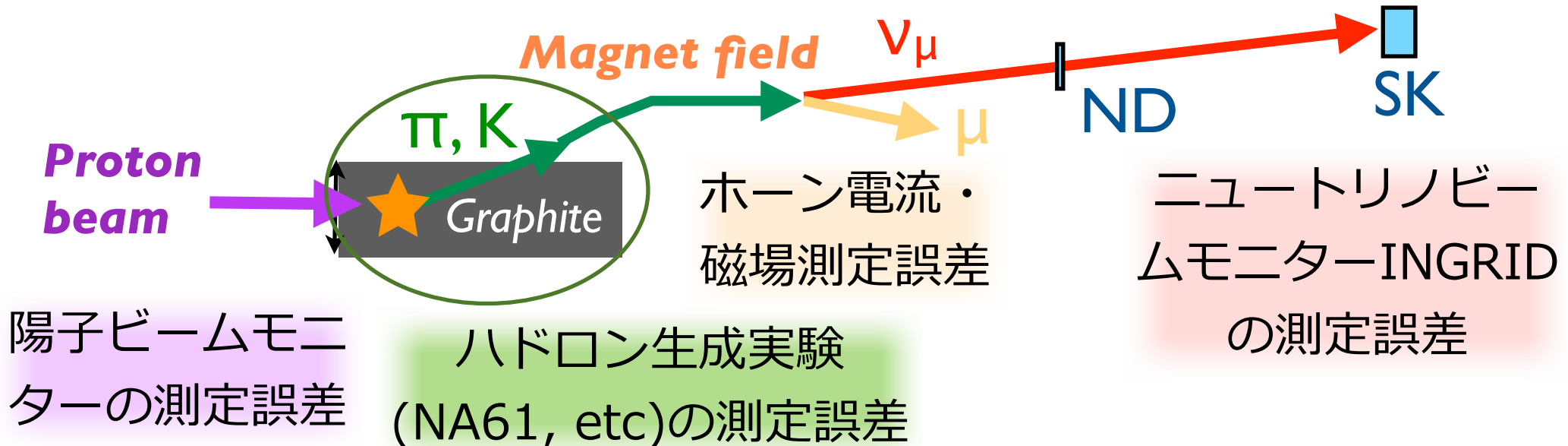
外挿法: Covariance matrix

● ND-SK間のcorrelationを計算

- エラーソースのパラメータを変化させた際のND,SKの変位を使用.
- フラックスの場合correlation($\Phi^{\text{ND}}(E_i)$, $\Phi^{\text{SK}}(E_j)$) ($i, j = \text{all bin\#}$)

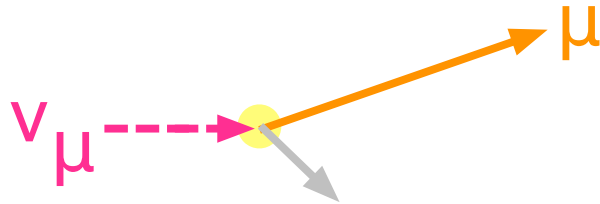


フラックス生成概要とエラーソース



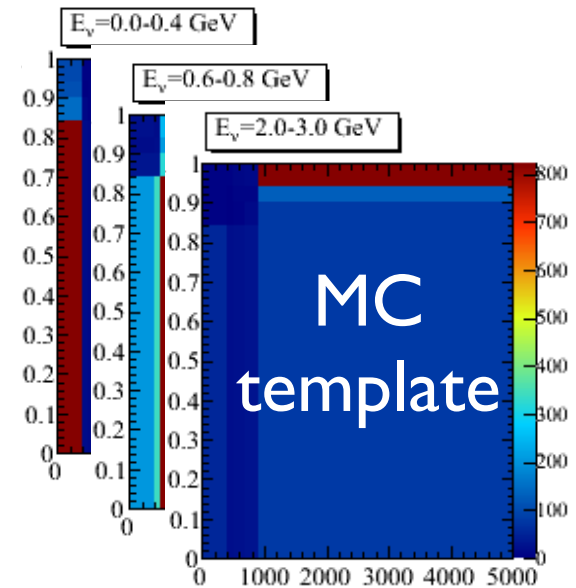
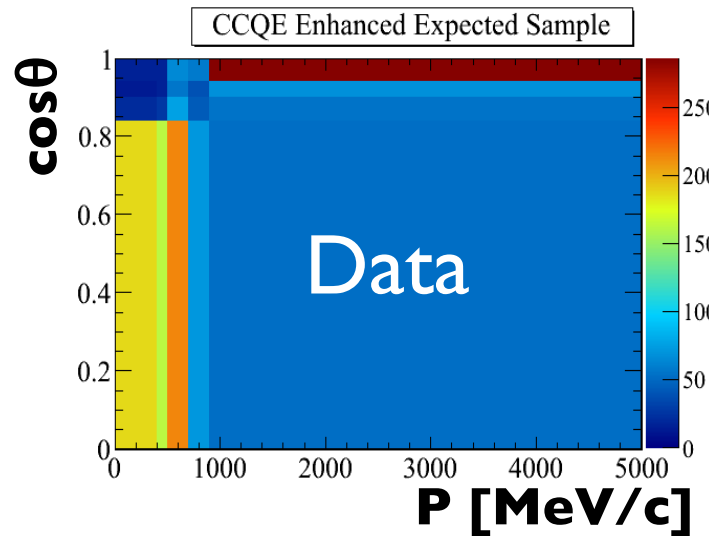
外挿法: Covariance matrix

荷電カレント反応



ミューオンの運動量-角度(P-θ)分布の観測数を
フィットする

NDで再構成したミューオンのp-θ分布



1. NDだけでフィット(例:フラックスエラーのみ)

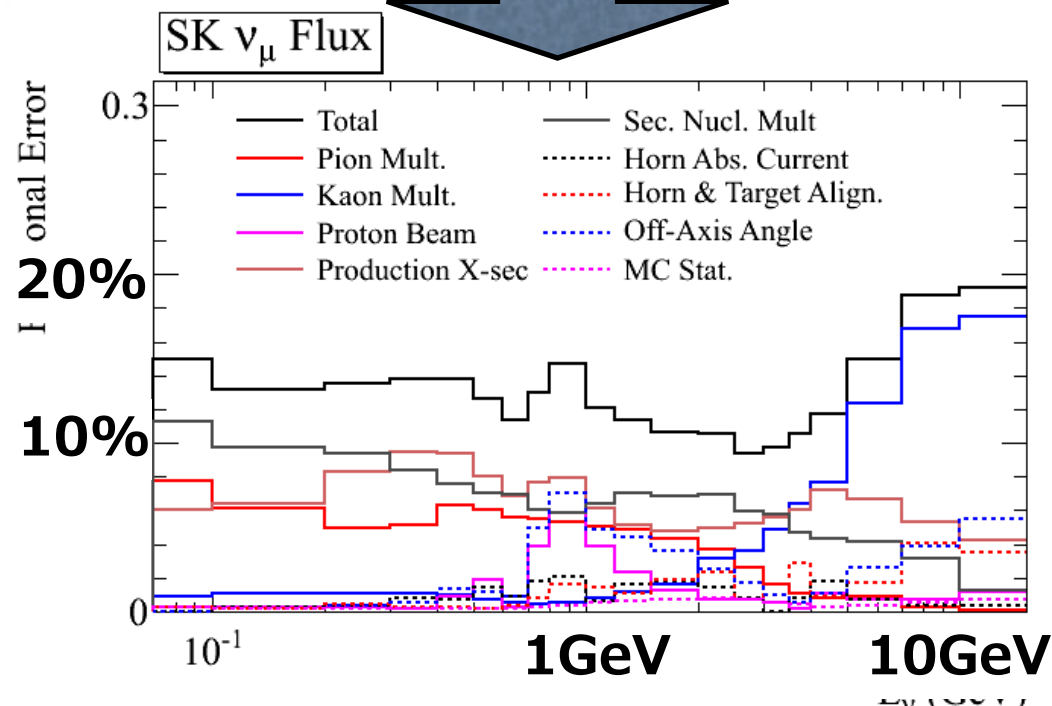
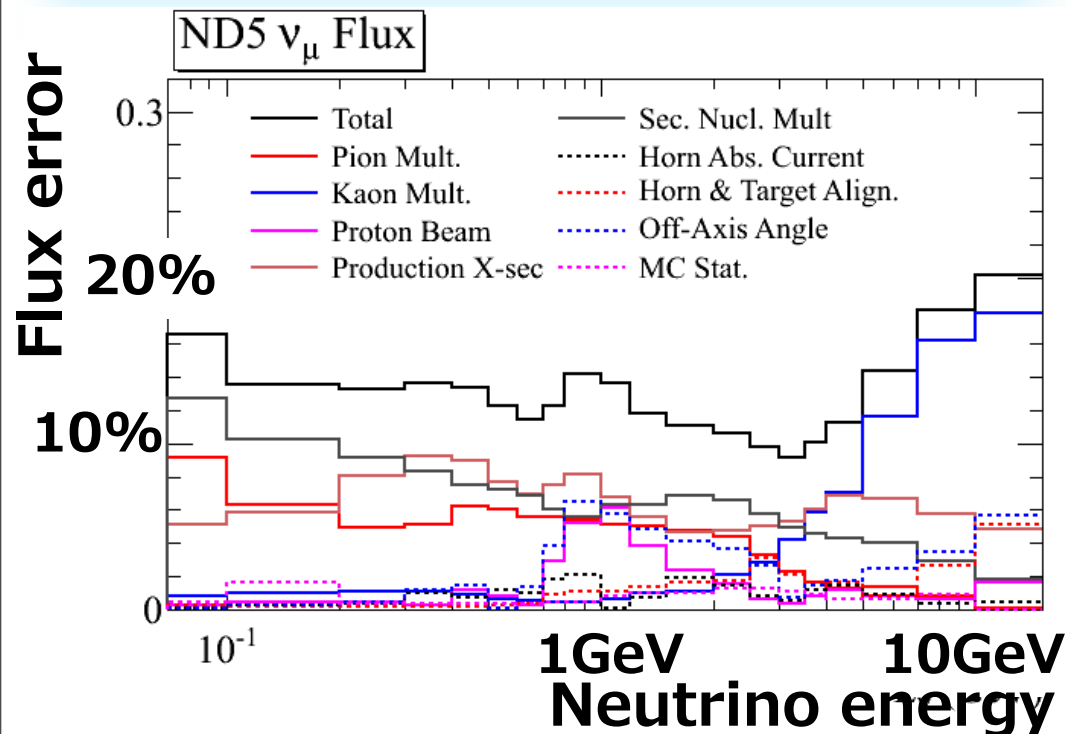
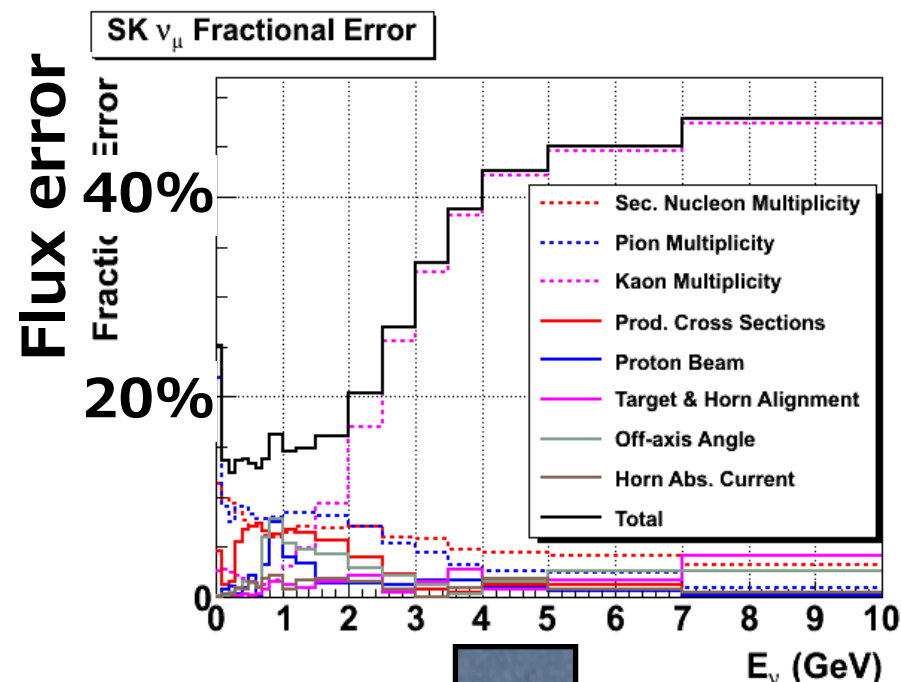
$$L_1 = \underbrace{Poisson(N^{data}; N^{exp}(\mathbf{f}))}_{\text{統計誤差: } \sim 3\%} \times \underbrace{\exp(-\frac{1}{2} \mathbf{f}^T V^{-1} \mathbf{f})}_{\text{系統誤差: } 10 \sim 20\%} \quad \mathbf{f}^T = (\mathbf{f}_{ND}^T, \mathbf{f}_{SK}^T) \quad V: \text{covariance matrix}$$

- 統計誤差 → ($\mathbf{f}_{ND}$ のフィットエラー) < (元の系統誤差)
- Covariance Matrix → ($\mathbf{f}_{SK}$ のフィットエラー) < (元の系統誤差)

2. フィット結果と再計算したcovariance matrixをSKの解析で使用

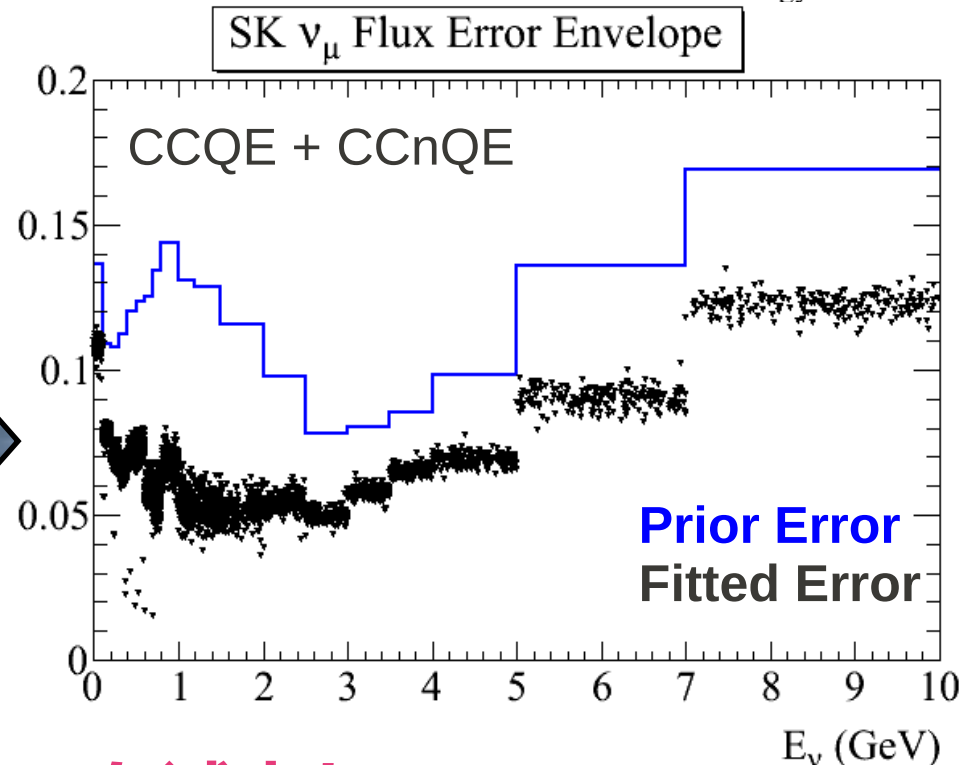
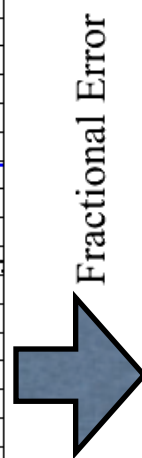
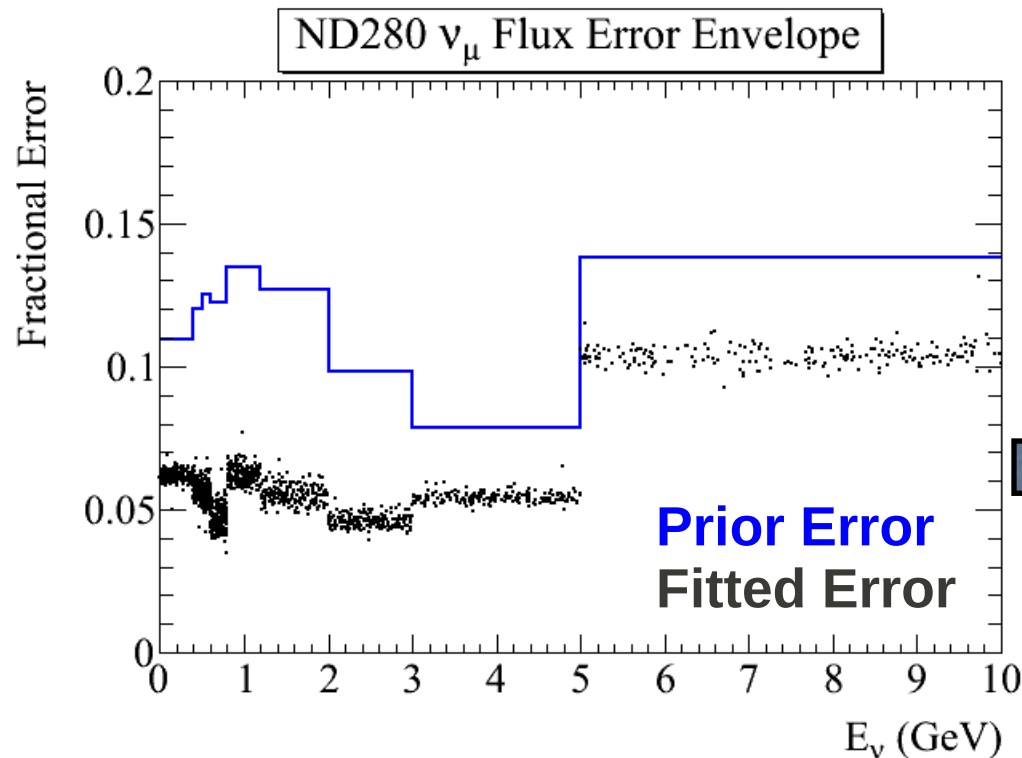
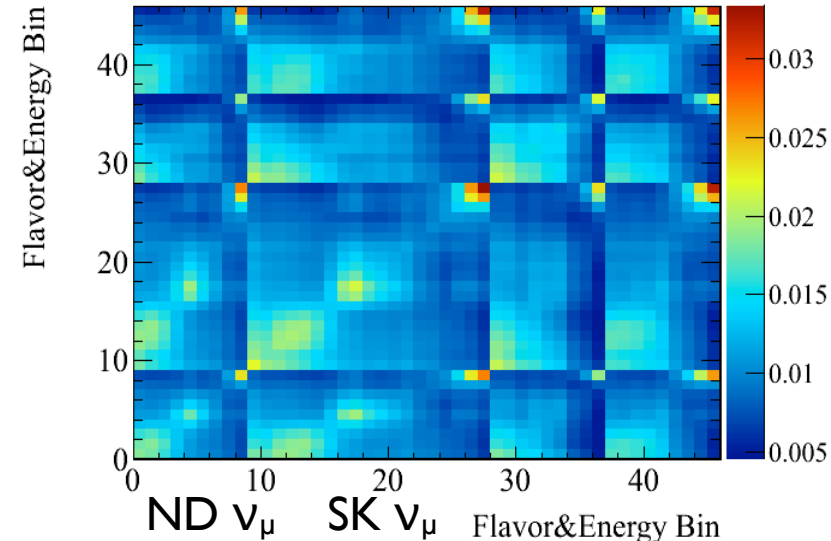
フラックスエラー

- ハドロン生成
- パイオン・ケイオンの(運動量,角度)分布
- 核子の反応断面積
- 陽子ビームの位置・角度
- ビーム方向(オフアクシス角度)
- 電磁ホーンの電流・磁場



フィットデモンストレーション

- NDでのミューオンの(運動量, 角度)分布のToy MC(200samples)をフィット.
- Likelihoodの中で, フラックス部分のみを考慮.



→ SKのフラックスエラーも減少している.

まとめ

- T2Kでのニュートリノ振動のSensitivityを向上させるため, データ測定を進める共に解析手法を改良している.
- 次の解析ではニュートリノエネルギーに依存した形で, NDの観測結果をSKに外挿する.
- K2Kで用いられていたF/Nでは問題があったため, 新しい外挿法を考案した.
- エネルギー毎のフラックスの誤差を考慮した場合には, 上手く外挿できている.
- 前置検出器の測定, ニュートリノ反応を考慮した場合でも外挿は上手くいっている.
- データを用いたNDのフィットの検証中

バックアップ

• ν_e appearance result ref: Phys. Rev. Lett 107, 041801, 2011

– 6 ν_e candidate found !!

- Background(BG): 1.5 ± 0.3 events
- 6事象がすべてBGである確率: $0.7\% (2.5\sigma)$

– θ_{13} 測定(90%CL)

- $0.03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28$ (cent. val.=0.11) @ $\Delta m_{23}^2 > 0$
- $0.04 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.34$ (cent. val.=0.14) @ $\Delta m_{23}^2 < 0$

– $\theta_{13} \neq 0 @ > 3\sigma$ を確認するため、より多くのデータが必要。

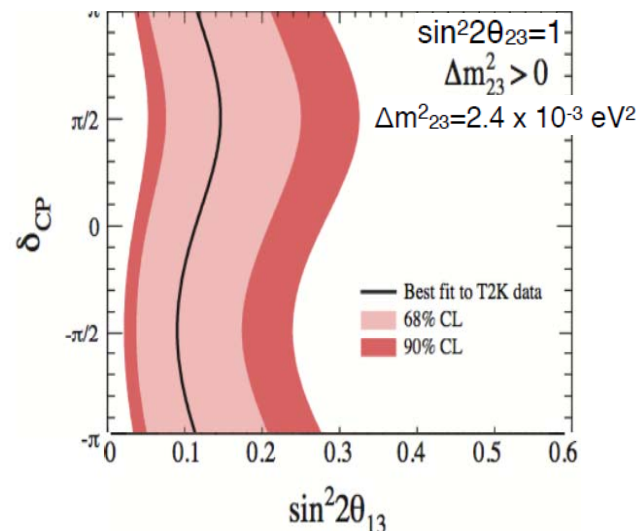
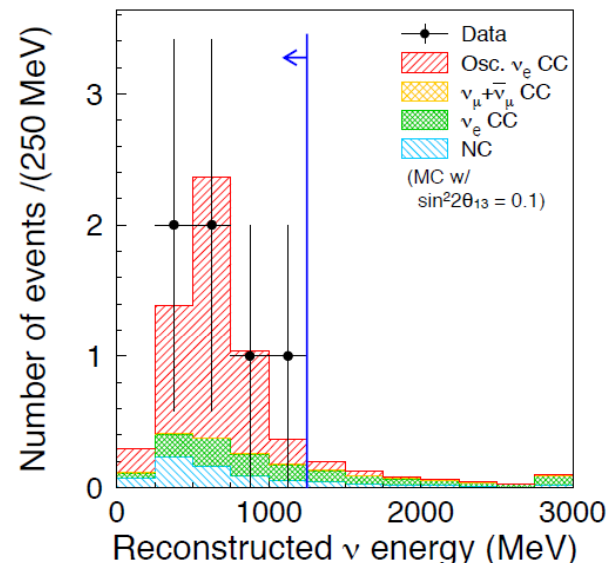
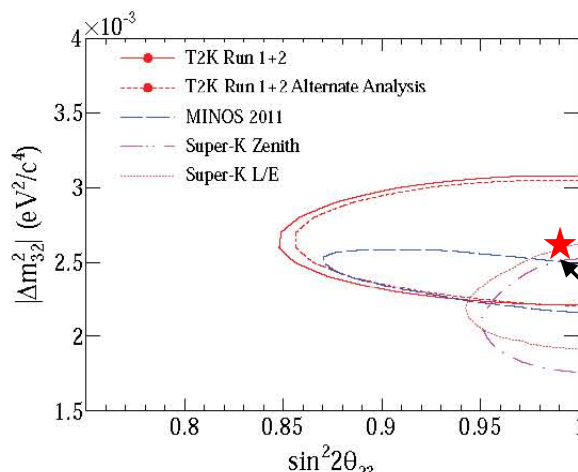
– Daya Bay (ν_e disappearance) ref: arXiv:1203.1669v1

- $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016(\text{stat.}) \pm 0.005(\text{sys.})$
- $\theta_{13} \neq 0$ を 5σ レベルでconfirm

• ν_μ disappearance result ref: Phys. Rev. D85, 031103(R), 2012

- $\sin^2 2\theta_{23} = 0.99$, $\Delta m_{23}^2 = 2.63 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ (best fit values)
- 90% CL region
- 更なる精度向上が必要。

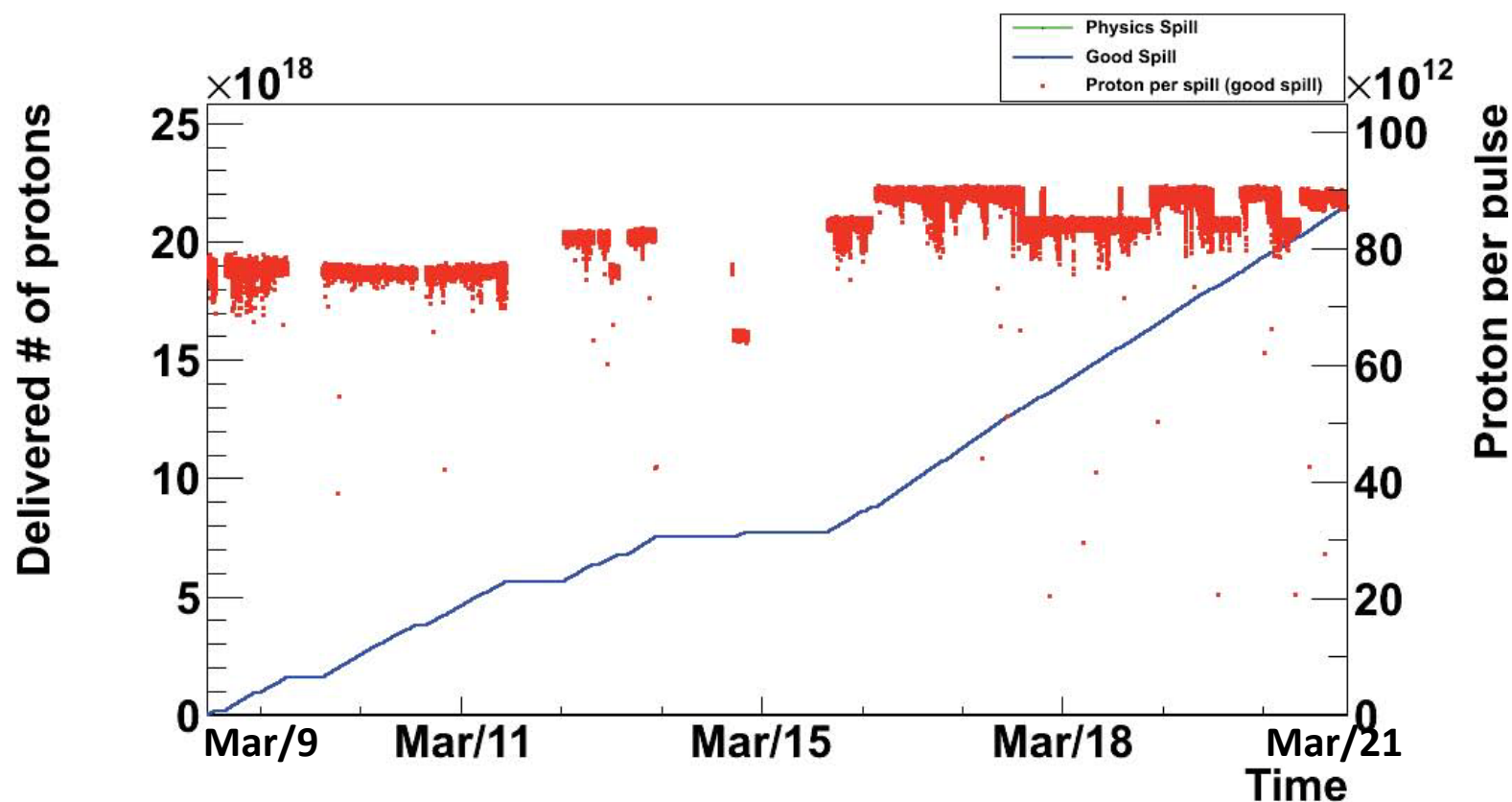
Talk by
亀田 (24aGF3)



Best fit

- 3/8から物理データ測定開始
 - 2.92秒サイクル(震災前は3.02秒)
 - ビームパワー150kWで連続運転(震災前は最高145kW)
 - ホーンは200kAで運転
 - 2.15×10^{19} POT 分のデータを収集(震災前のデータ 1.43×10^{20} POTの15%)
- 3/22にLinac電源重故障→最短で3/30再開予定

KEK 関口(27aBA4)

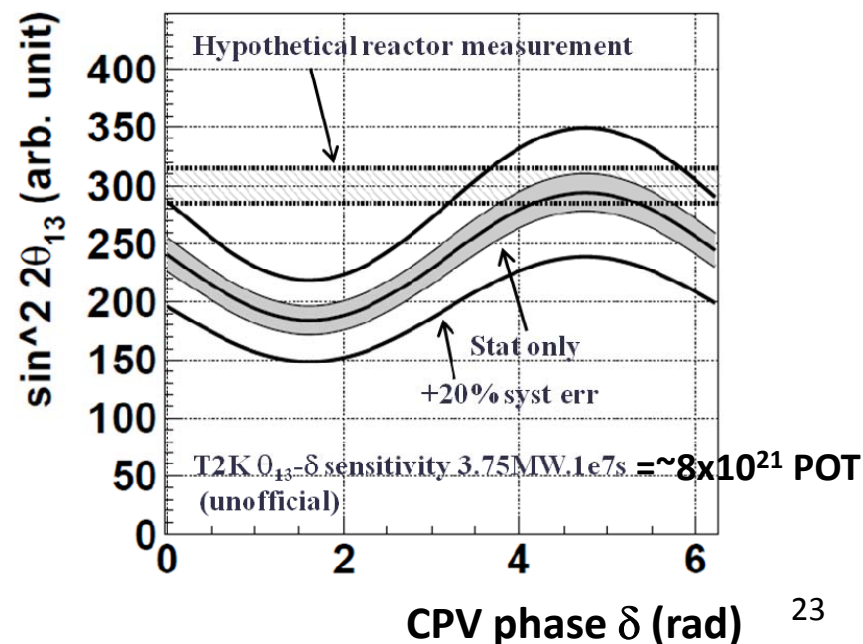
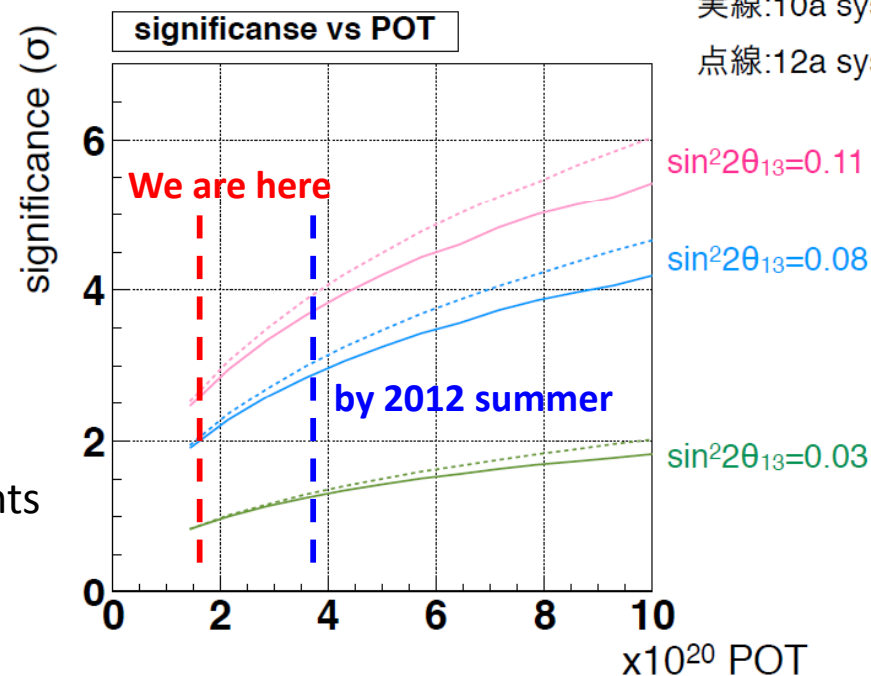


- 2012年夏までに
 - 統計を2倍以上 => Significance > 3σ を目指す。
 - ν_e APPEARANCEによる $\theta_{13} \neq 0$ の確立
- 2013年夏までに
 - 1×10^{21} POT以上を達成し、 $\sim 5\sigma$ levelを目指す。
- T2Kが目指す物理
 - ν_e APPEARANCEの精密測定 $\Leftrightarrow$ Reactor measurements
 - $\theta_{13}-\delta$ の關係に、よりtightなconstraint
 - CP violation & mass hierarchyへのhint
 - ν_μ disappearance
 - $\theta_{23}, \Delta m_{23}^2$ の精密測定
 - Maximal mixing or not?
 - Anti-neutrino measurement
 - CP violation search

KEK 関口(27aBA4)

2012年3月27日

日本物理学会 第67回年次

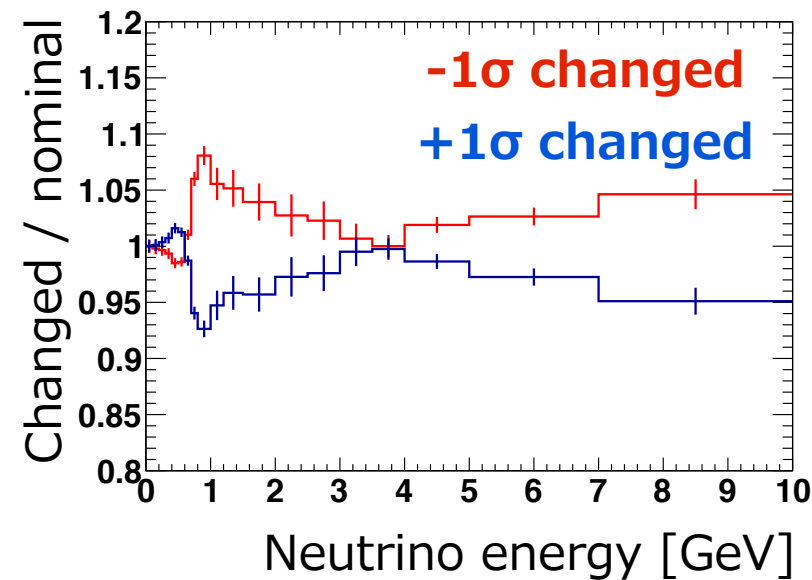


Covarianceの計算(フラックス)

- フラックスが1変数に依存(例: Off-axis角度)

- ソースを 1σ 変化させた際のフラックスの変化($\Delta\Phi$)からcovarianceを計算

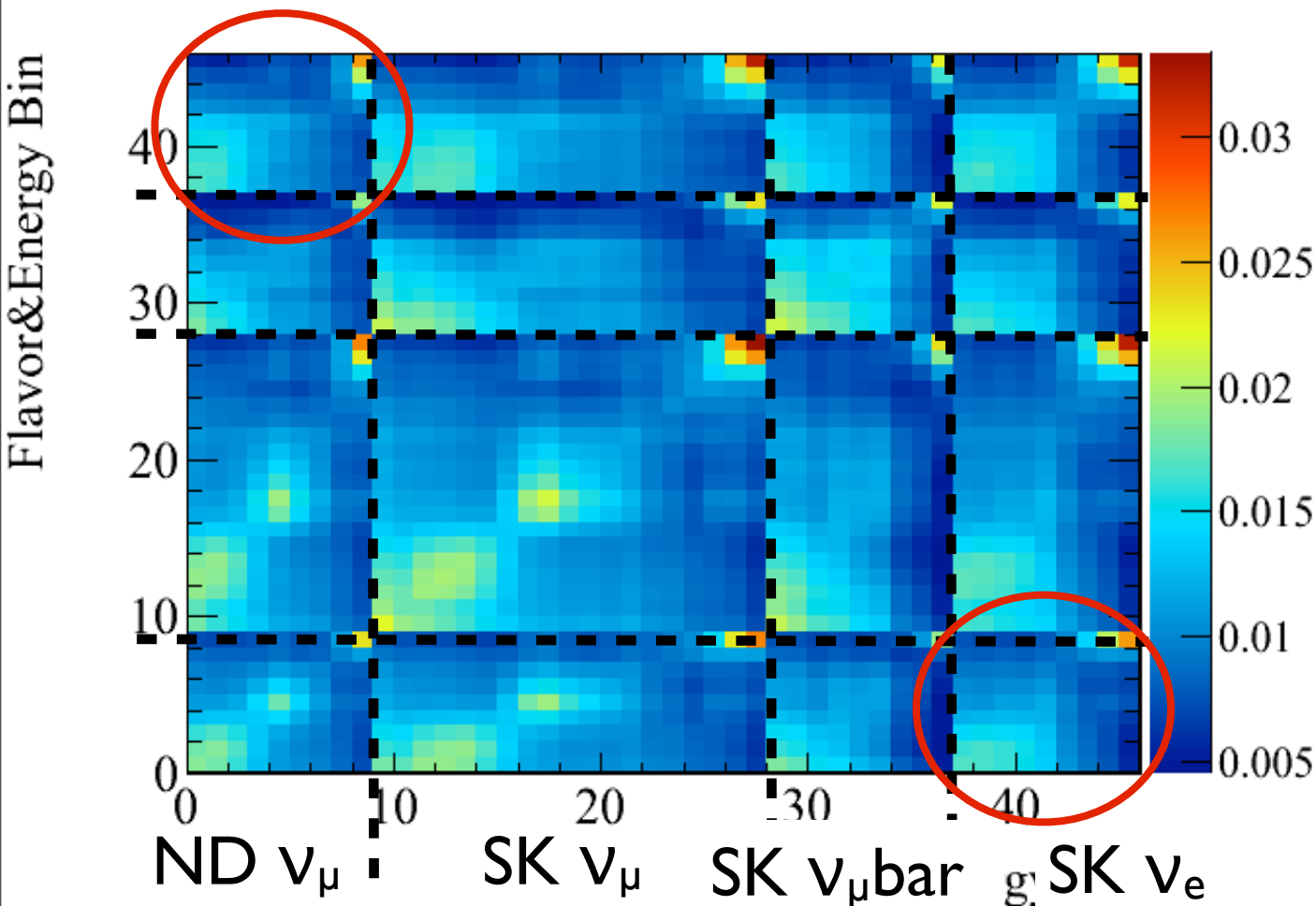
$$V_{i,j} = \frac{\Delta\phi_i^{+1\sigma} \Delta\phi_j^{+1\sigma} + \Delta\phi_i^{-1\sigma} \Delta\phi_j^{-1\sigma}}{2}$$



- フラックスが複数の変数に依存(例: パイオンの p - θ)
- 変数間の相関関係に従って複数の変数を変化させたフラックスサンプルを大量に作成. それらを用いてcovarianceを計算

$$V_{i,j} = \frac{1}{N-1} \frac{\sum_{k=1}^N (\phi_i^{nom} - \phi_i^k)(\phi_j^{nom} - \phi_j^k)}{\phi_i^{nom} \phi_j^{nom}}$$

Covariance matrix(フラックス)



ND(ν_μ)とSK(ν_e)の間に相関関係
 → ND部分でのフィットにより
 SKでの ν_e の誤差が減少する.

