

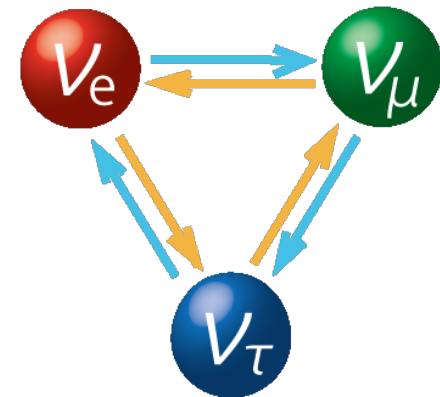
# T2K実験

南野彰宏(京都大学)  
他 T2Kコラボレーション

平成25年度宇宙線研究所共同利用成果発表会

2013年12月20日

# T2K実験



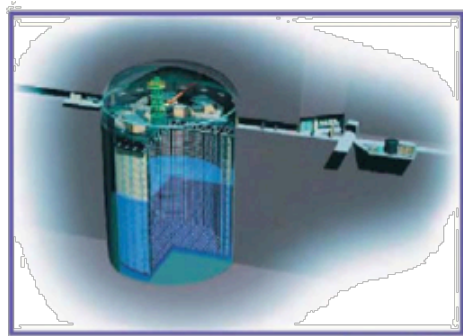
- J-PARCでほぼ純粋な $\nu_\mu$ ビームを生成。
- 生成点直後の前置検出器と295km離れたスーパーカミオカンデでニュートリノを観測。



- ニュートリノ振動の精密測定。

T2K実験における振動モード

1.  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  ( $\nu_e$ 出現モード)
2.  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 以外 ( $\nu_\mu$ 消失モード)



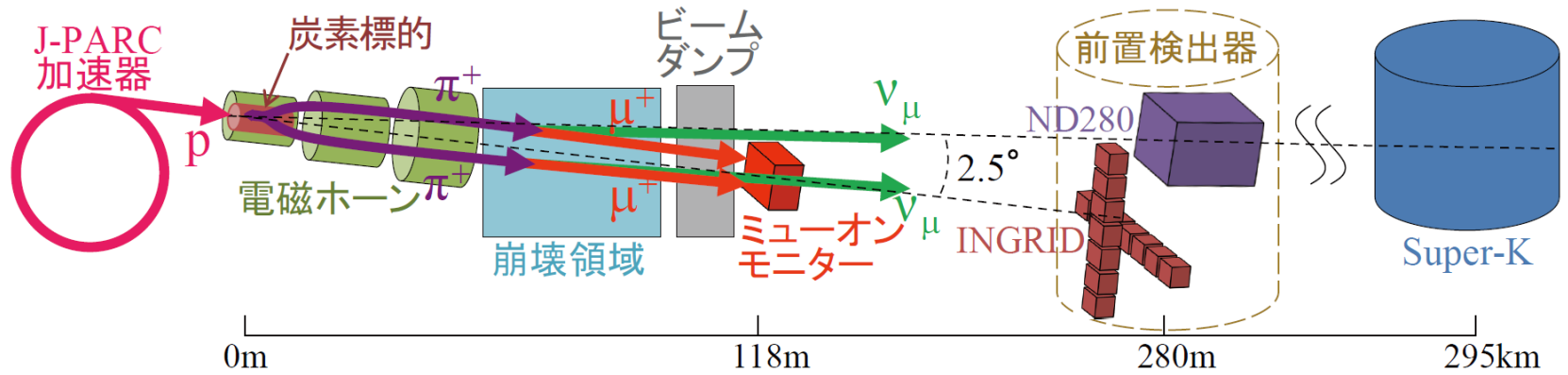
Super-Kamiokande  
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring  
(KEK-JAEA, Tokai)



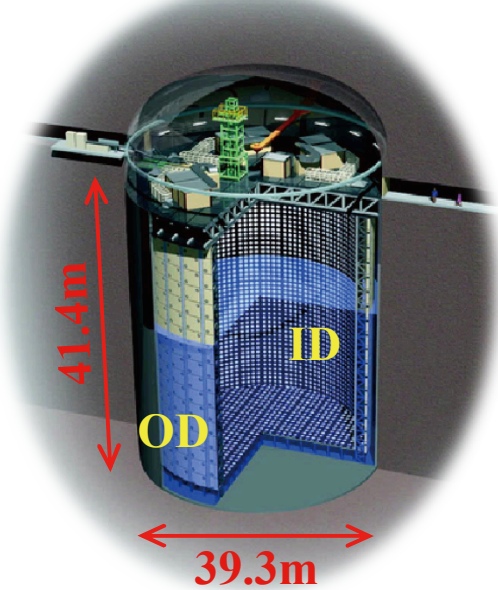
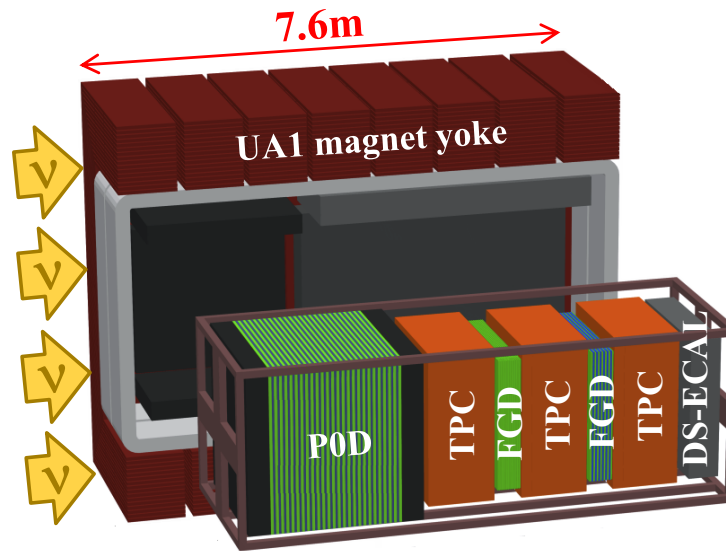
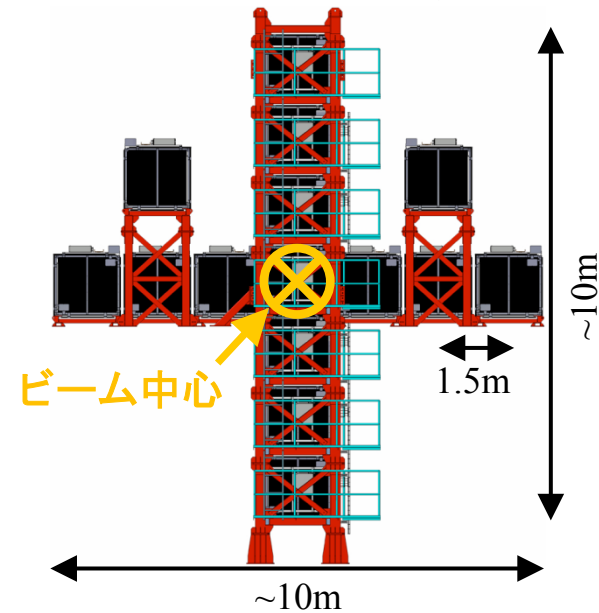
# ニュートリノ検出器



on-axis前置検出器(INGRID)

off-axis前置検出器(ND280)

後置検出器(Super-K)



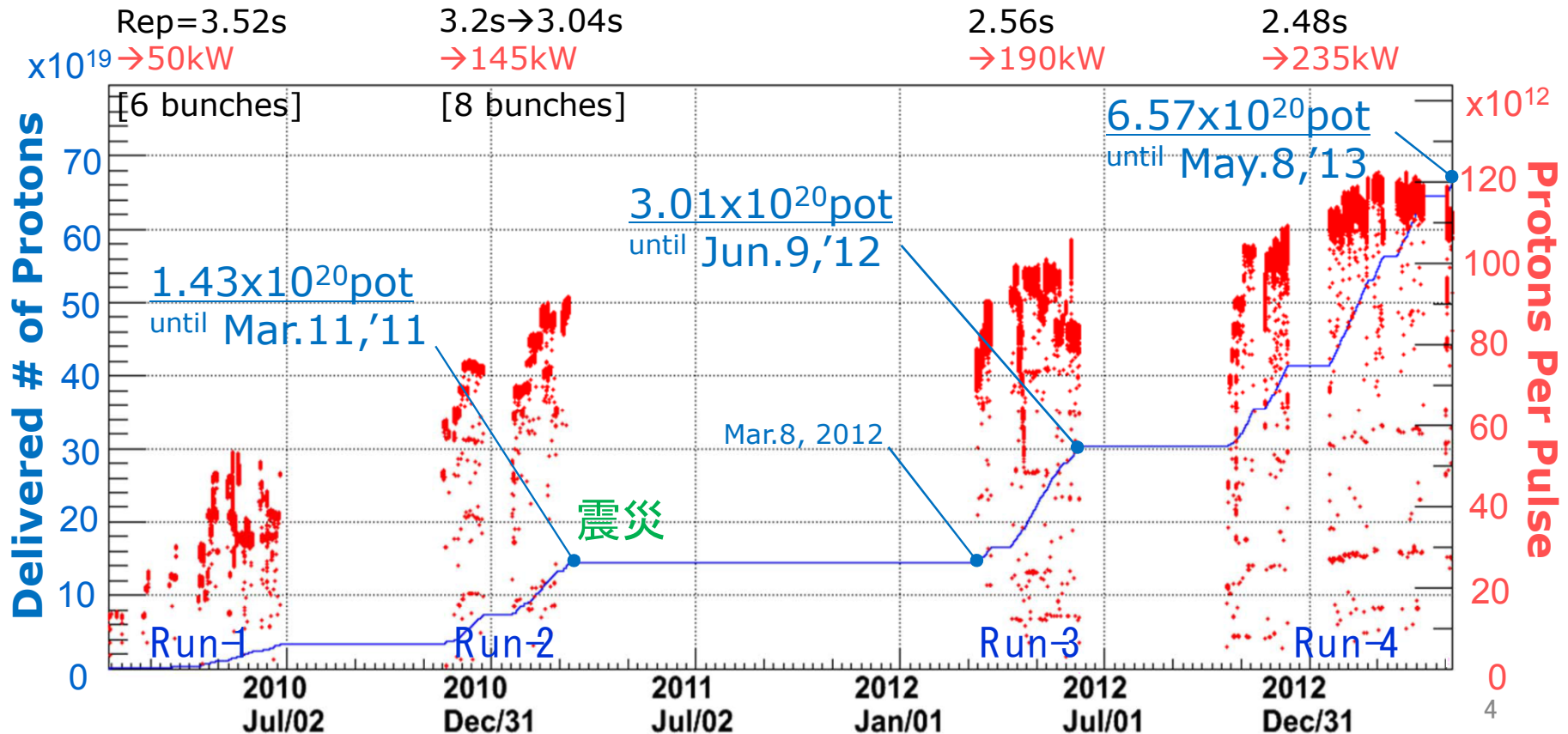
- 16台の同一モジュール
- $\nu$ ビーム方向をモニター

- 複合型検出器(FGD, TPCなど)
- 振動前の $\nu$  flux/spectrumを測定

- 50kt水チェレンコフ検出器

# データ

- $6.57 \times 10^{20}$  POT (Proton On Target)のデータを取得。  
→T2K実験の目標統計の8%
- 最高235kWでのビーム運転を達成。(設計値は750kW)



# ニュートリノ振動解析の流れ

## $\nu$ フラックス予測

- ハドロン生成実験データ (特にNA61@CERN)
- ビームモニター測定
- Geant3ベースのシミュレータ

## $\nu$ 反応断面積

- MiniBooNE等の実験データでモデル構築&誤差見積り (シミュレータ=NEUT)

## ND280の測定

- $\mu$ の運動量と角度分布

## ND280フィット

- SKとND280で相関が強い systematicパラメータの誤差を削減

## SK予測

ND280フィット後のsystematicパラメータとその誤差



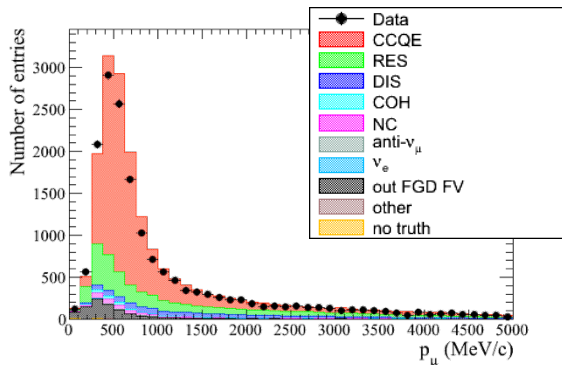
## SK測定

イベント数とエネルギースペクトラム

# ND280の測定とフィット

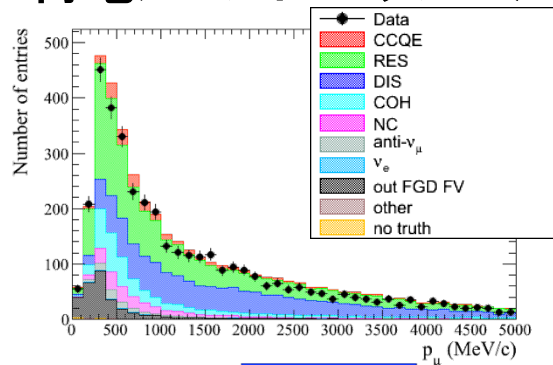
- 各ニュートリノ相互作用を高純度化した3サンプルに分類。
- ミューオンの運動量、角度分布をフィット。
- SKとND280で相関の強いsystematicパラメータとその誤差を導出。

荷電カレント0 $\pi$ サンプル



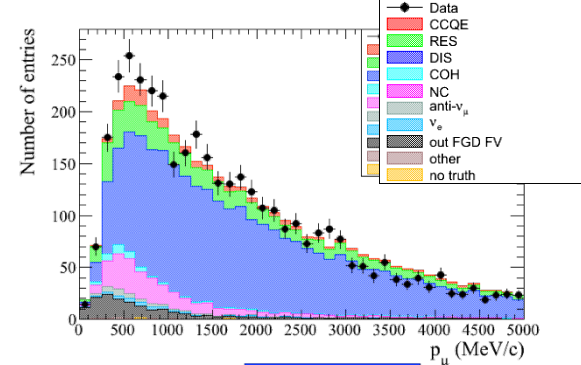
フィット

荷電カレント1 $\pi$ サンプル

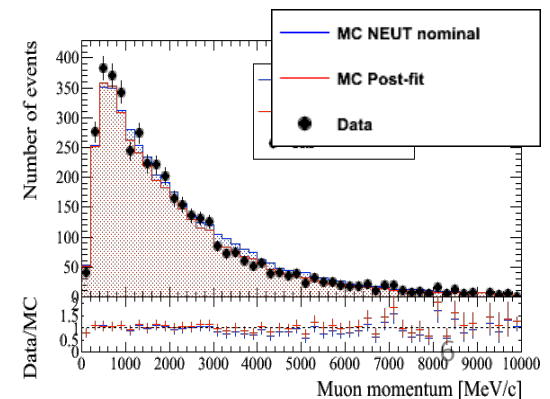
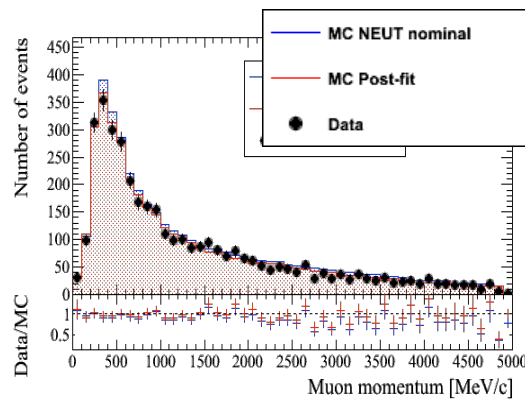
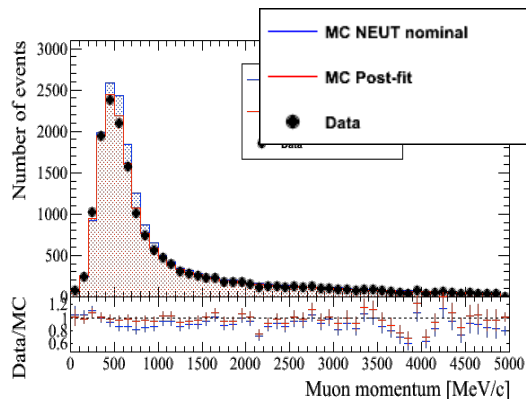


フィット

荷電カレントその他



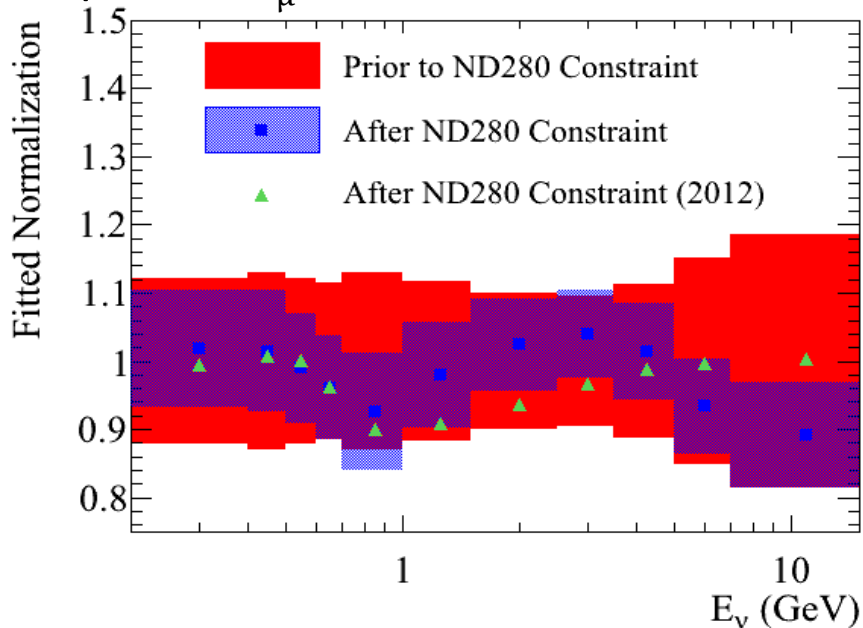
フィット



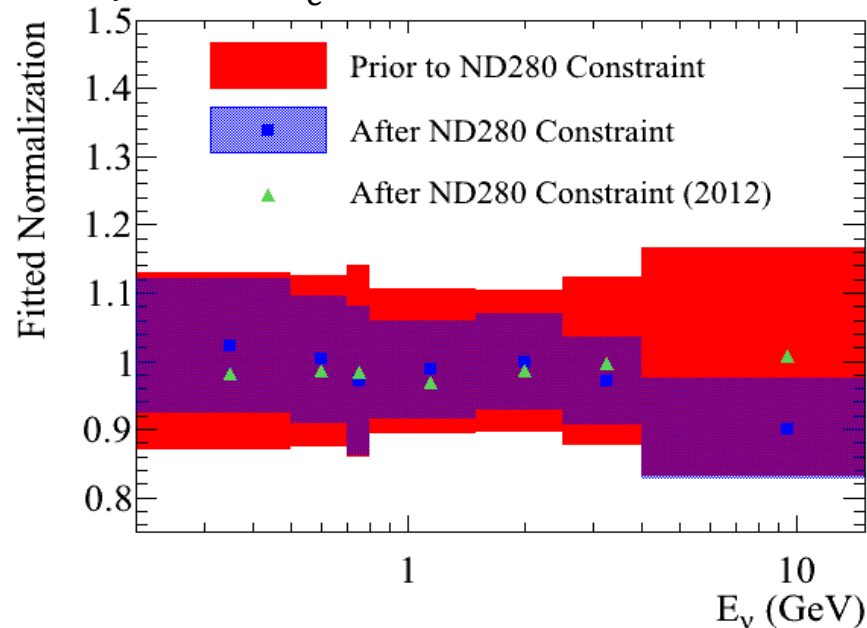
# ND280フィットによる誤差の削減

- $\nu$ フラックスと $\nu$ 反応断面積のsystematicパラメータのうち、Super-KとND280で相関が強いものの誤差を削減。

Super-Kの $\nu_\mu$ フラックスの規格化と誤差



Super-Kの $\nu_e$ フラックスの規格化と誤差



# $\nu_\mu$ 消失モードの解析結果

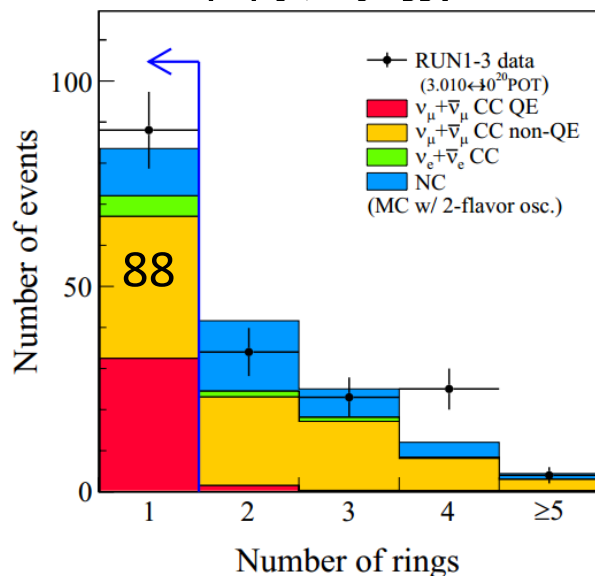
Phys. Rev. Lett. 111, 211803 (2013)

2012年6月までのデータ  
3.01x10<sup>20</sup> POT

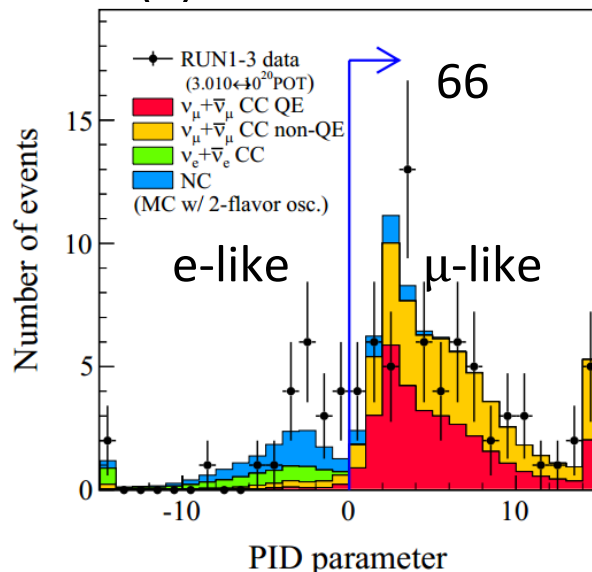


# Super-Kの $\nu_\mu$ イベント選択 ( $3.01 \times 10^{20}$ POT)

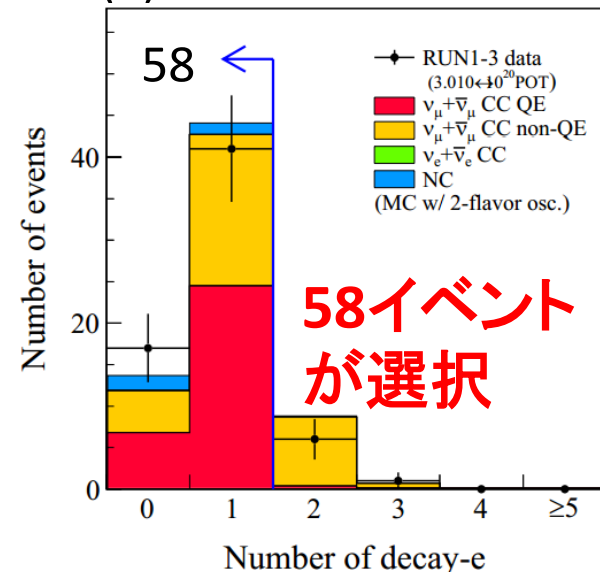
(1) リング数=1



(2) ミューオンライク



(3) 崩壊電子が1個以下



## Super-Kでの $\nu_\mu$ 候補イベント数に対する系統誤差

Systematicパラメータ	ND280フィット前	ND280フィット後
$\nu$ フラックス/反応 (ND280フィット)	21.8%	4.2%
$\nu$ 反応 (ND280フィットしない)	6.3%	
Super-K	10.7%	
Total	25.1%	13.1%

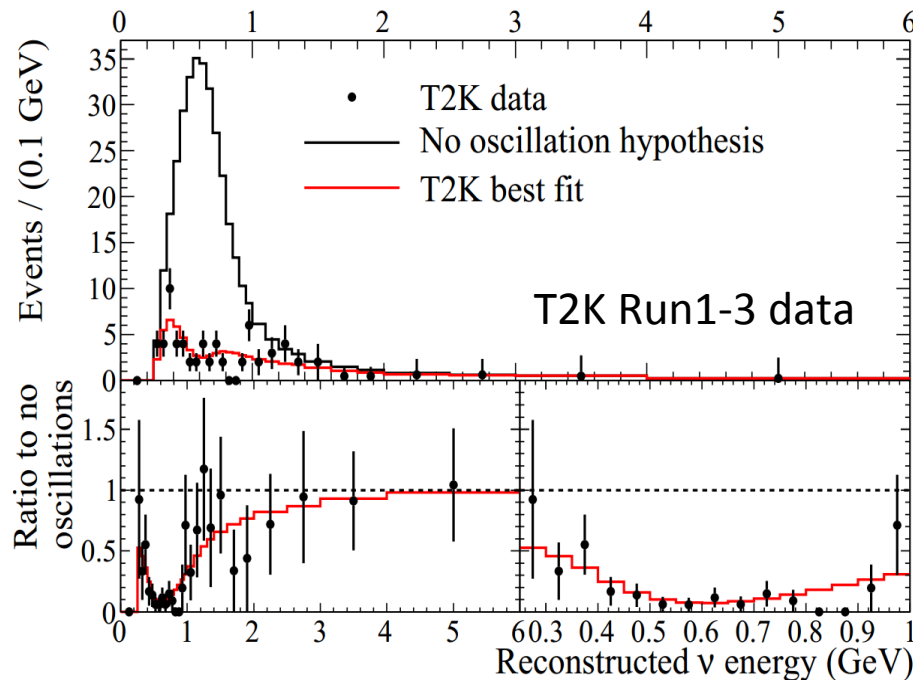
$|\Delta m_{32}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4, \sin^2 2\theta_{23} = 1.0$  の場合

# $\nu_\mu$ 消失モードの解析結果 ( $3.01 \times 10^{20}$ POT)

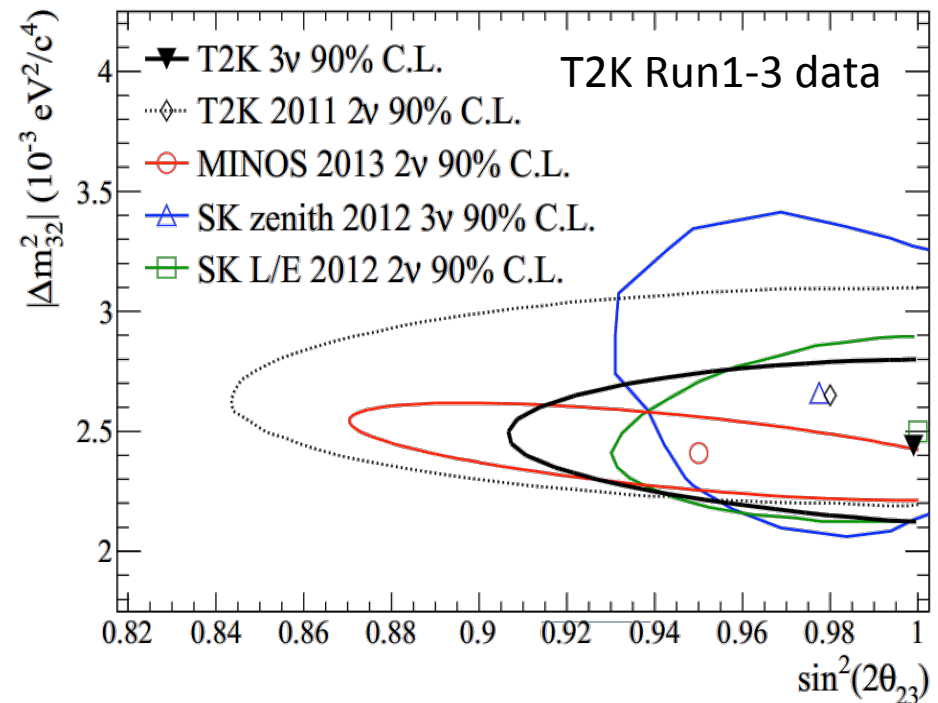
- Super-Kでのエネルギー分布を尤度比を用いてフィット。
- Run1-3のデータで世界最高レベルの精度で測定。

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.514 \pm 0.082, \quad |\Delta m_{32}^2| = 2.44_{-0.15}^{+0.17} \text{ eV}^2/c^4$$

再構成されたエネルギー分布



$\sin^2 2\theta_{23} - |\Delta m_{32}^2|$  の信頼領域



- 2013年5月までのデータの解析結果を近日発表予定。

# $\nu_e$ 出現モードの解析結果

arXiv:1311.4750 [hep-ex]

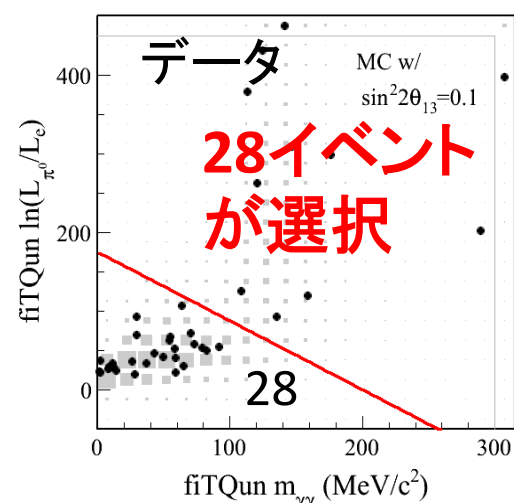
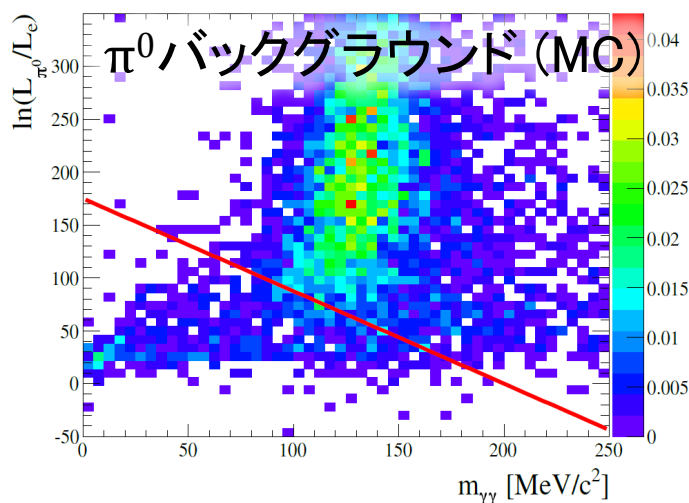
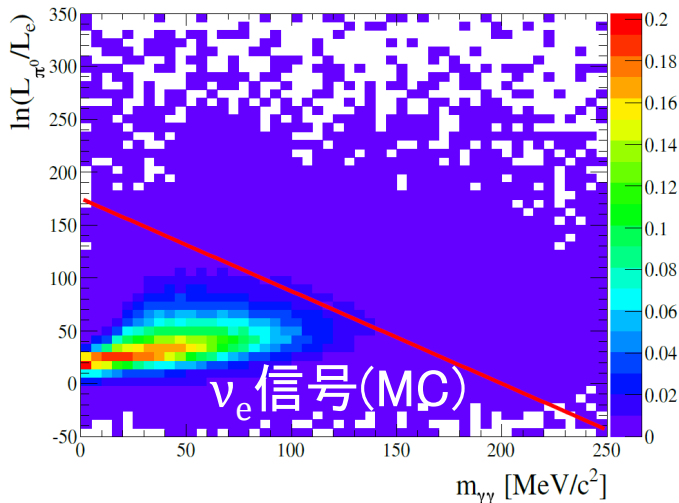
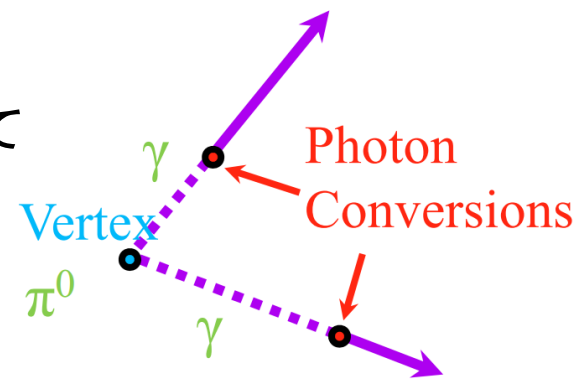
accepted by PRL

2013年5月までのデータ

$6.57 \times 10^{20}$  POT

# Super-Kの $\nu_e$ イベント選択 ( $6.57 \times 10^{20}$ POT)

- イベント再構成アルゴリズム
  - 従来: リングの発光パターンでフィット (POLfit)
  - 今回: 様々な粒子を想定し、時間・電荷を予想して複数の飛跡までフィット (fitQun)
- $\pi^0$ 除去以外のイベント選択: 従来と同じ
- $\pi^0$ 除去
  - 従来: 再構成した $\pi^0$ 質量のみでカット
  - 今回: 再構成した $\pi^0$ 質量と尤度比を用いた2次元カット
- $\nu_e$ イベント数は-2%,  $\pi^0$  B.G.は-70% (従来との比較)



# $\nu_e$ 候補イベント数と系統誤差( $6.57 \times 10^{20}$ POT)

Super-Kでの $\nu_e$ 候補イベント数(ND280フィット後)

データ	28	
MC	$\sin^2 2\theta_{13}=0$	$\sin^2 2\theta_{13}=0.1$
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 信号	0.4	17.3
$\nu_e$ B.G.	3.4	3.1
$\nu_\mu$ B.G.	0.9	0.9
$\bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu$ B.G.	0.2	0.2
MC 合計	<b>4.9</b>	<b>21.6</b>

$\sin^2 2\theta_{23}=1.0$ ,  $\Delta m_{32}^2=3.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$  (Normal hierarchy),  $\delta_{CP}=0$

Super-Kでの $\nu_e$ 候補イベント数に対する系統誤差

Systematicパラメータ	$\sin^2 2\theta_{13}=0$		$\sin^2 2\theta_{13}=0.1$	
	NDフィット前	フィット後	NDフィット前	フィット後
$\nu$ フラックス/反応 (NDフィット)	21.7%	<b>4.8%</b>	25.9%	<b>2.9%</b>
$\nu$ 反応 (NDフィットしない)	6.8%		7.5%	
Super-K	7.3%		3.5%	
合計	24.0%	<b>11.1%</b>	27.2%	<b>8.8%</b>

# $\nu_e$ 出現モードの解析結果(6.57x10<sup>20</sup> POT)

- Super-Kでの電子のp- $\theta$ 分布を最尤法を用いてフィット。
- $\theta_{13}=0$ を7.3 $\sigma$ で棄却し、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を発見。
- $|\Delta m_{32}^2|=2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ ,  $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$ ,  $\delta_{CP}=0$ のとき

Normal hierarchy ( $\Delta m_{32}^2 > 0$ )

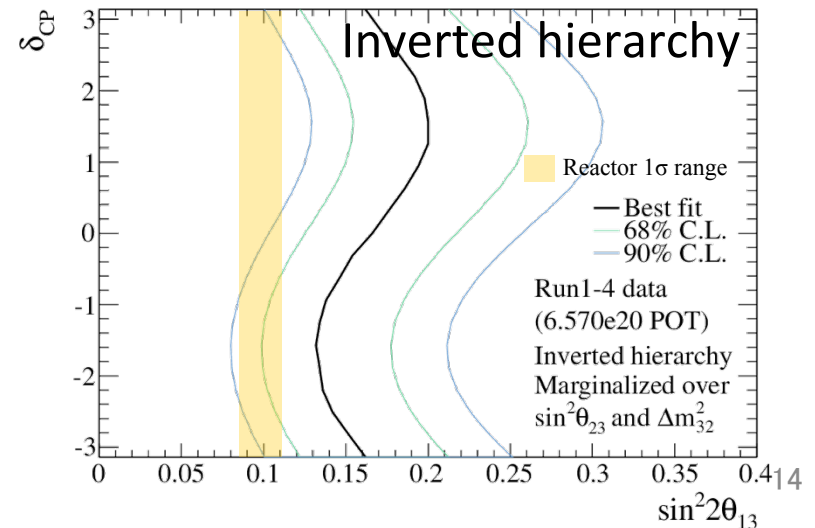
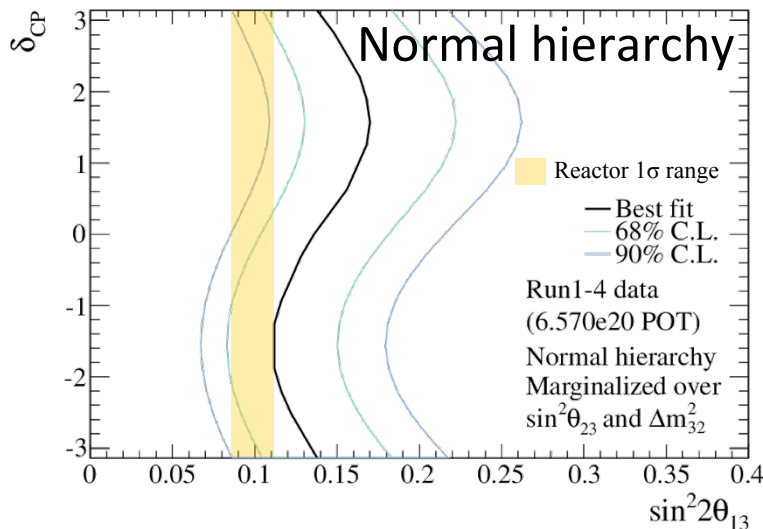
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.140^{+0.038}_{-0.032}$$

Inverted hierarchy ( $\Delta m_{32}^2 < 0$ )

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.170^{+0.045}_{-0.037}$$

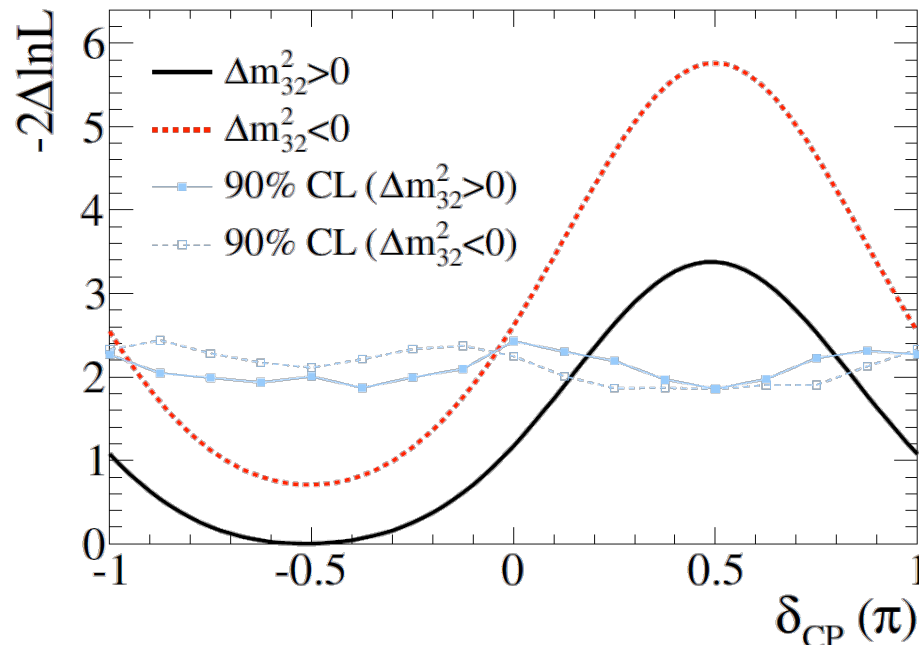
- $\theta_{13}-\delta_{CP}$ の信頼領域

– T2Kの $\nu_\mu$ 消失モードの解析結果( $\theta_{23}$ ,  $|\Delta m_{32}^2|$ への制限)を尤度関数に追加



# $\delta_{CP}$ への制限 ( $6.57 \times 10^{20}$ POT)

- T2Kの測定結果と原子炉ニュートリノによる $\theta_{13}$ の測定結果とを組み合わせて $\delta_{CP}$ への制限を与えた。
- $\delta_{CP} = -\pi/2$ が最も好まれる。
- 以下の領域を90% C.L.で棄却。
  - $0.19\pi < \delta_{CP} < 0.80\pi$  (Normal hierarchy)
  - $-\pi < \delta_{CP} < -0.97\pi, -0.04\pi < \delta_{CP} < \pi$  (Inverted hierarchy)



# 今後の目標と予想感度



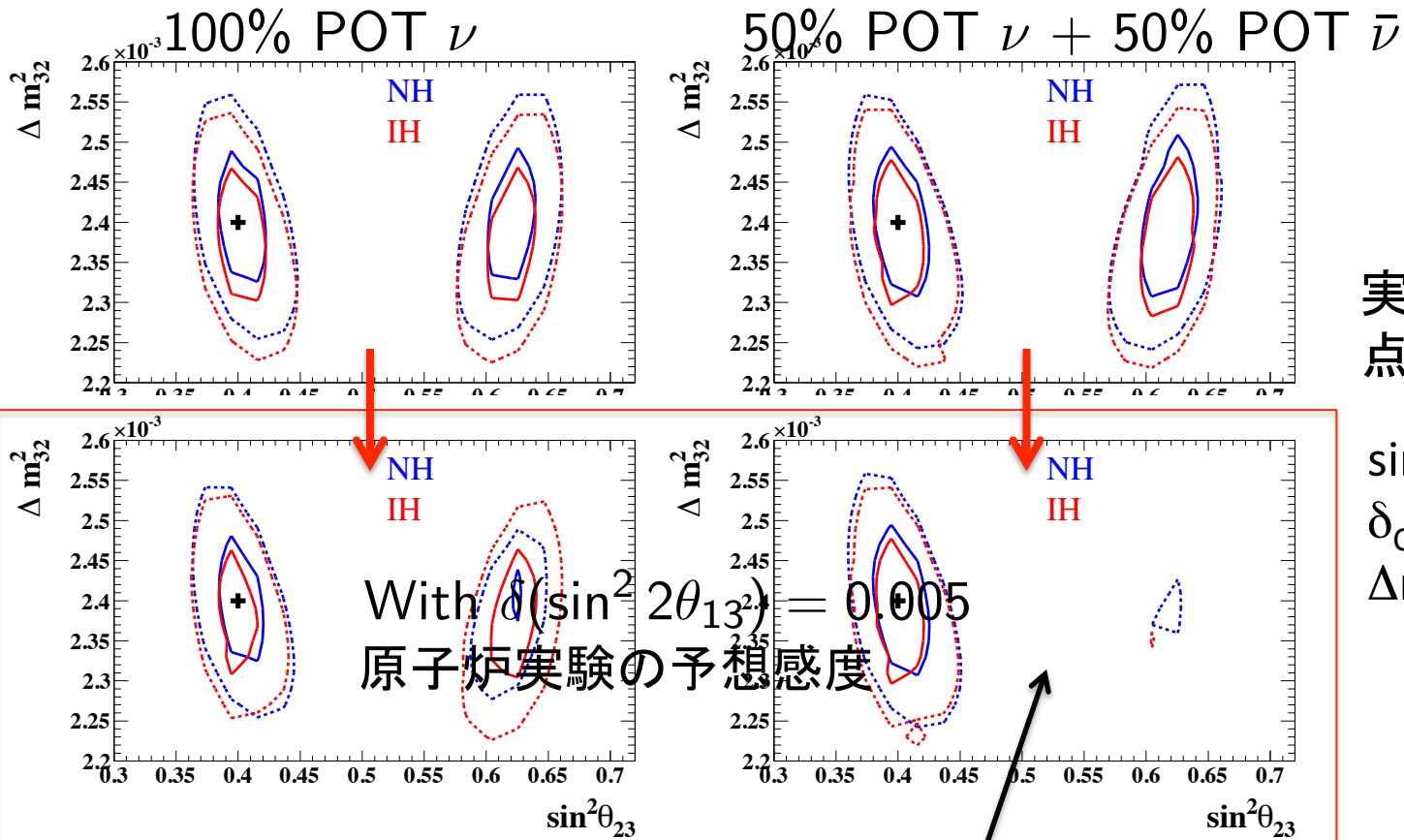
# 今後の目標

- T2Kが $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動を $7.3\sigma$ で発見し、原子炉実験が $\sin^2 2\theta_{13}$ を高精度で測定した。
- T2K実験の今後の目標
  - $\theta_{23}$ と $|\Delta m_{32}^2|$ の精密測定
  - $\delta_{CP}$ 、 $\theta_{23}$  octant、 $\nu$ 質量階層性の測定
- 予想感度study
  - 今回は $\theta_{23}$  octantのみ発表する。 $(\delta_{CP}$ とMHは別の機会に)
  - T2K approved POT =  $7.8 \times 10^{21}$  POT
  - $\nu_e$ 出現モードと $\nu_{\mu}$ 消失モードを同時に解析
  - $\bar{\nu}$ モードでのデータ収集も想定する。

# 予想感度 ( $\theta_{23}$ octant)

Case study:  $\sin^2\theta_{23} = 0.4$ , Normal hierarchyの場合

90% C.L.



実線: 系統誤差なし  
点線: 系統誤差あり

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$   
 $\delta_{CP} = 0$   
 $\Delta m_{32}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$

octantをほぼ決定。

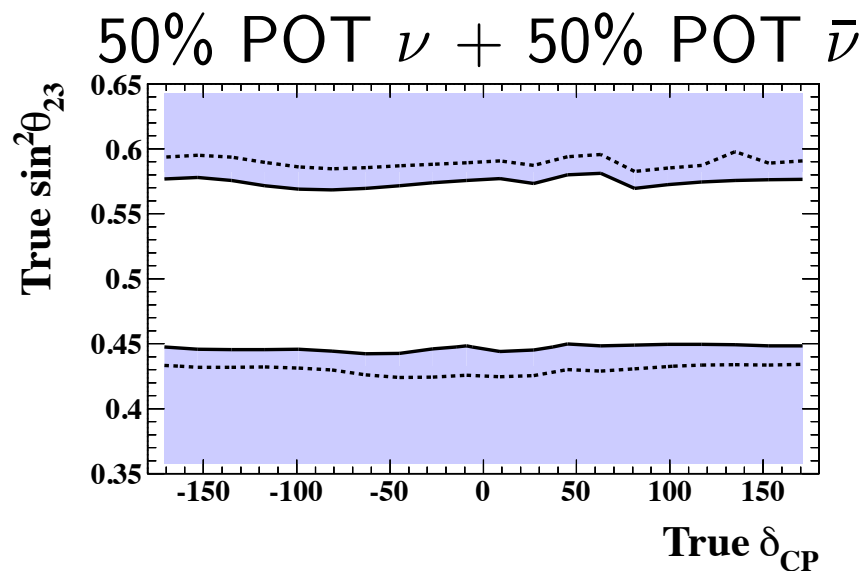
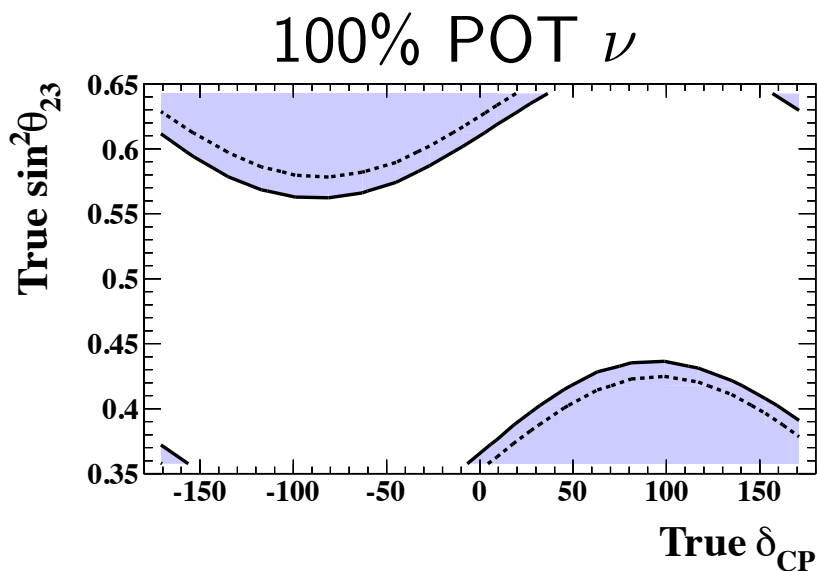
# 予想感度 ( $\theta_{23}$ octant)

90% C.L.の感度

(青色の領域内ならoctantを決定可)

実線: 系統誤差なし

点線: 系統誤差あり



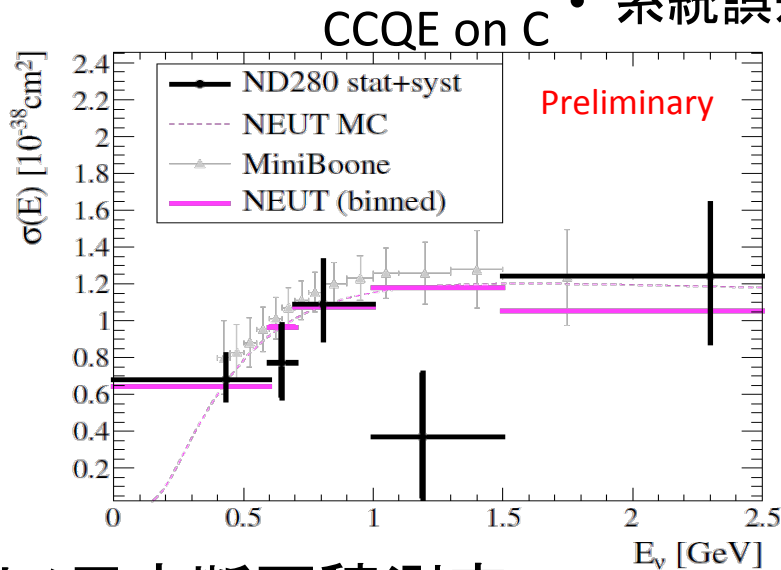
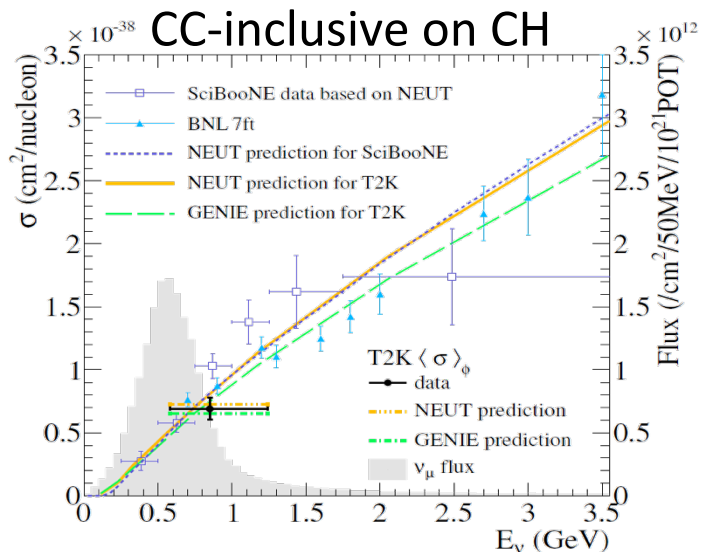
仮定

- $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$
- $\Delta m_{32}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  (Normal hierarchy)
- 原子炉実験の予想感度  $\delta(\sin^2 2\theta_{13}) = 0.005$

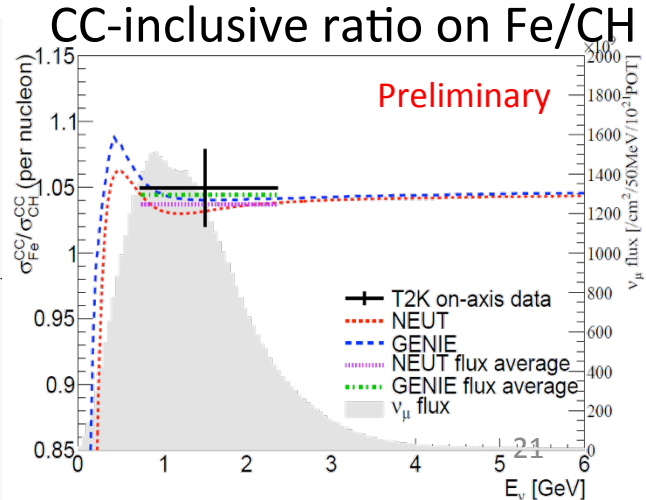
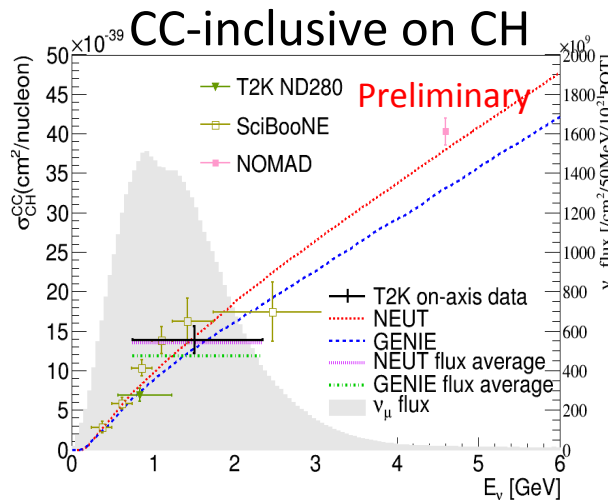
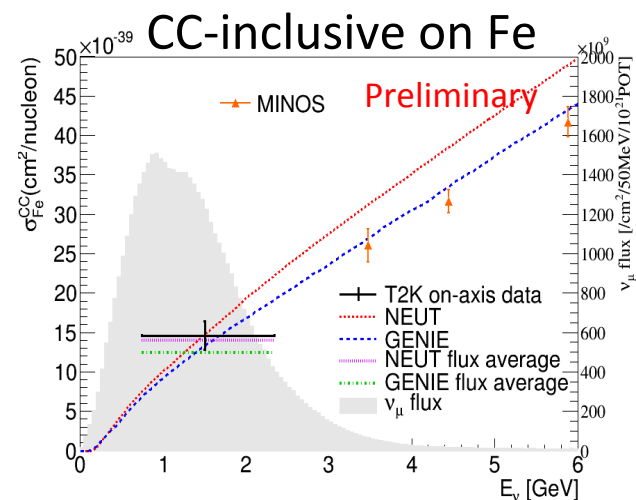
# 振動解析以外

# ニュートリノ反応断面積測定

- ND280によるニュートリノ反応断面積測定
- 様々な測定が進行中。
- 系統誤差の削減に重要。



- INGRIDによるニュートリノ反応断面積測定



# まとめ

- $\nu_e$ 出現モード
  - $\theta_{13}=0$ を $7.3\sigma$ で棄却し、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を発見。
  - T2K実験の結果と原子炉ニュートリノの測定結果とを組み合わせて、 $\delta_{CP}$ への制限を与えた。
- $\nu_\mu$ 消失モード
  - 2012年6月までのデータを使いnm消失モードの解析を行い、世界最高レベルの精度で $\theta_{23}$ と $|\Delta m_{32}^2|$ を測定した。
  - 2013年5月までのデータを使った解析結果を近日公開予定。
- 今後の目標
  - $\theta_{23}$ と $\Delta m_{32}^2$ の精密測定と  $\delta_{CP}$ 、 $\theta_{23}$  octant、 $\nu$ 質量階層性の測定
- 振動解析以外
  - ニュートリノ反応断面積の測定など、さまざまな解析が進行中。