

# ミューオンニュートリノから 電子ニュートリノへの振動発見

西村 康宏

東京大学 宇宙線研究所   
宇宙ニュートリノ観測情報融合センター

ニュートリノフロンティア 研究会  
2013/8/30 (土)

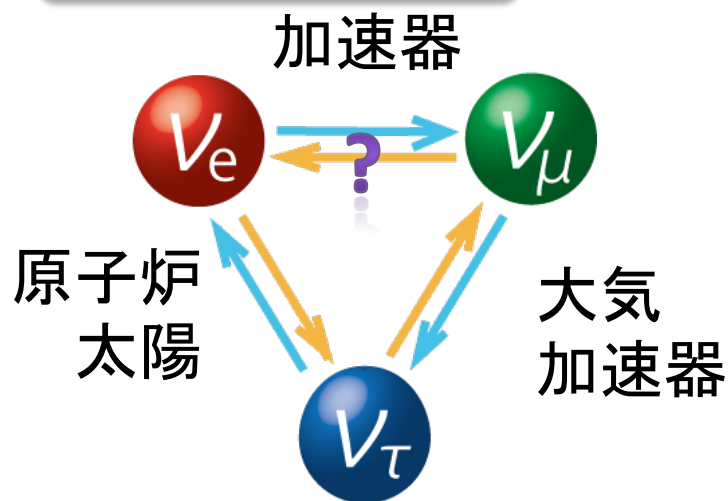
# $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動と T2K

- T2K実験による  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  発見まで
  - $\nu_{\mu}$  ビームから長基線飛来中に出現する  $\nu_e$  を見つける

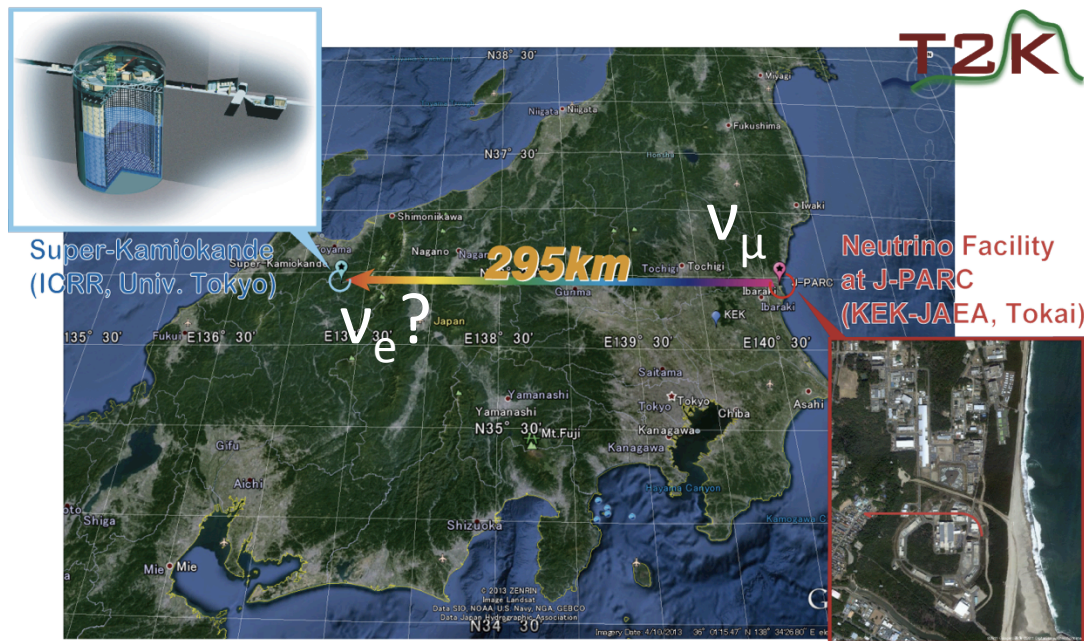
Tokai to Kamioka (T2K) 実験

## T2Kの主目的

### 1. $\nu_e$ 出現の発見



### 2. $\nu_{\mu}$ 消失精密測定



T2Kの第一目標を達成!

EPS Jul. 2013

# ニュートリノ振動解明へ向けて

フレーバー  
固有状態

MNS行列

レプトンCP 位相?

質量  
固有状態

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\theta_{23} = 45^\circ \pm 6^\circ$$

$$\theta_{12} = 33.6^\circ \pm 1.0^\circ$$

$\theta_{23}$  octant (<45° or >45°?)

$$\theta_{13} < 11^\circ, > 0^\circ?$$

2011年から、T2Kをはじめ  
 $\theta_{13}$  測定値が報告された

ニュートリノ質量階層性

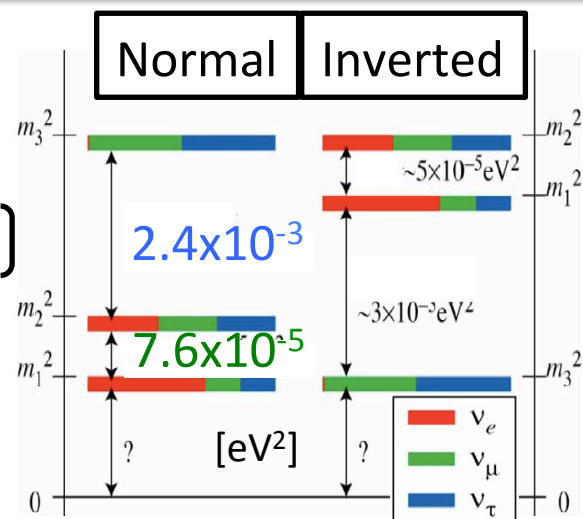
今回使用するデフォルト値

$\Delta m_{12}^2$	$7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
$\Delta m_{32}^2$	$2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
$\sin^2 2\theta_{23}$	1.0
$\sin^2 2\theta_{12}$	0.8495
$\sin^2 2\theta_{13}$	0.1 (or 0)
$\delta_{CP}$	0 degree

$$\theta_{13} = 9.1^\circ \pm 0.6^\circ$$

[Daya Bay  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.090^{+0.008}_{-0.009}$ ]

T2Kでは $\theta_{13}$ の測定に  
これら全て( $\theta_{23}$ 、 $\delta_{CP}$ 、 $\Delta m_{32}^2$ )が関わる



# $\theta_{13}$ と $\nu_e$ の出現・消失チャンネル

## ● 原子炉からの反 $\nu_e$ 消失

Double CHOOZ, Daya Bay, RENO 実験

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m_{31}^2 L [m]}{E_\nu [MeV]} \right)$$

$\theta_{13}$  を精度良く測定可能

## ● 加速器 $\nu_\mu$ からの $\nu_e$ 出現

T2K 実験

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m_{31}^2 L [km]}{E_\nu [GeV]} \right)$$

他パラメータとも相関

$$+ 8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos \delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cdot \cos \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21} \quad \text{CP保存項}$$

$$- 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin \delta \cdot \sin \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21} \quad \text{CP非保存項}$$

$$+ 4S_{12}^2 C_{13}^2 (C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{23}^2 S_{13}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{23} S_{13} \cos \delta) \cdot \sin^2 \Delta_{21} \quad \text{太陽項}$$

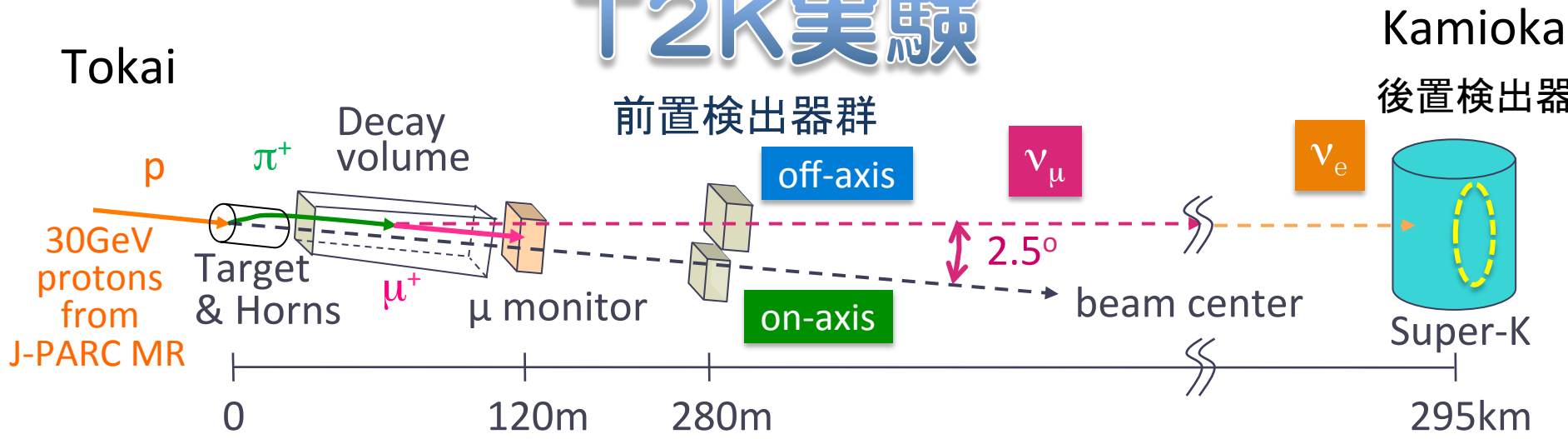
$$- 8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \cdot \frac{aL}{4E_\nu} (1 - 2S_{13}^2) \cdot \cos \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \quad \text{Matter effect (a)}$$

$$+ 8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \frac{a}{\Delta m_{31}^2} (1 - 2S_{13}^2) \cdot \sin^2 \Delta_{31}, \quad \delta \rightarrow -\delta \text{ and } a \rightarrow -a \text{ by } \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$

## ○ 原子炉 $\nu$ 実験の $\theta_{13}$ 精密測定 と 加速器 $\nu$ 実験 は補完的

▶ T2Kでは $\theta_{13}$ 測定だけでなく、 $\delta_{CP}$ や他パラメータも制限

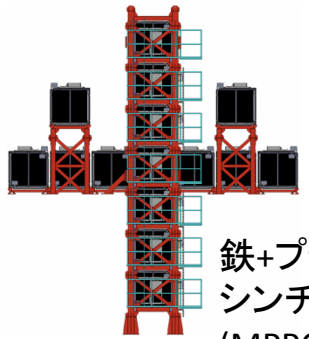
# T2K実験



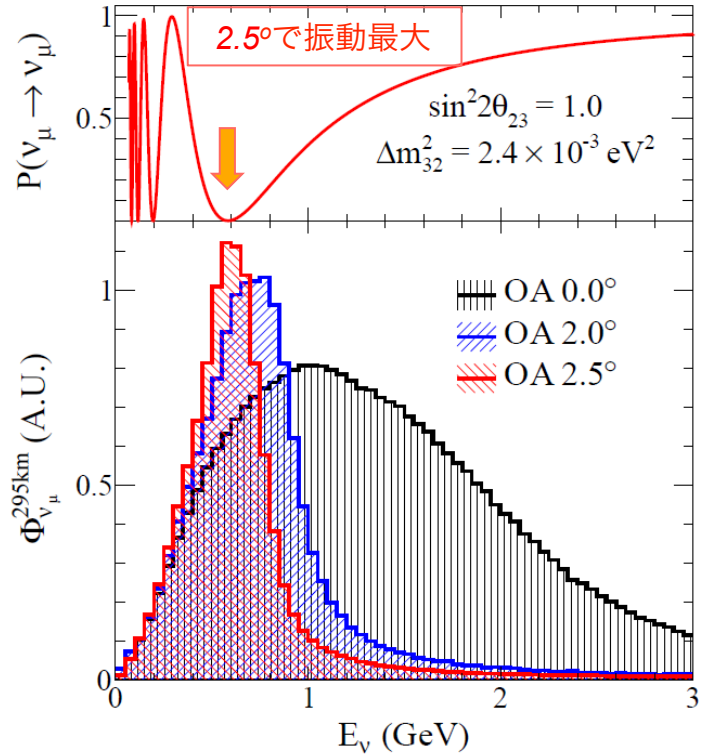
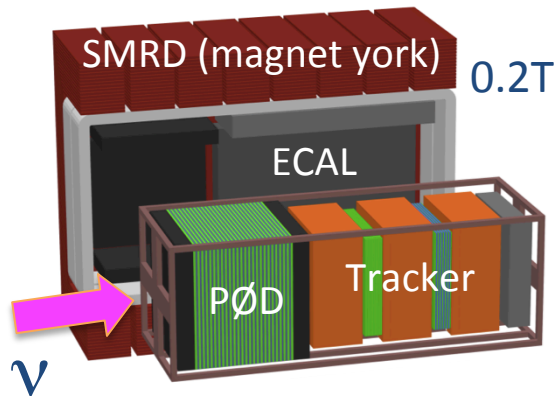
- 30GeV陽子から $\nu_\mu$ ビーム生成
  - Off-axis法で $2.5^\circ$ ずらし、振動が最大となる600MeVに鋭いピークを持つ

On-axis検出器 (INGRID)    Off-axis検出器(ND280)

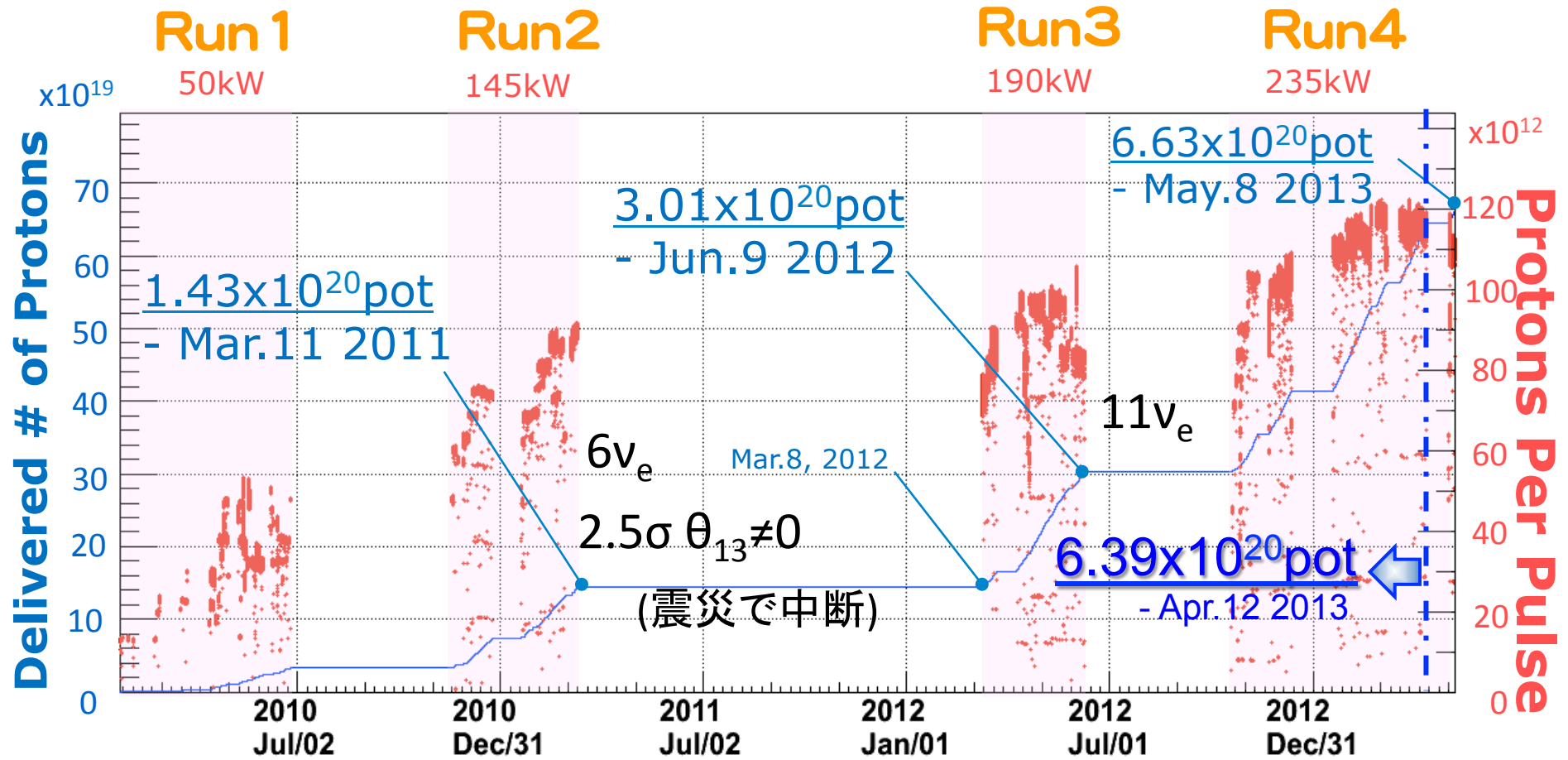
1mrad以下の $\nu$ 方向モニタ



鉄+プラスチック  
シンチレータアレイ  
(MPPC読み出し)



# 累積陽子数 (pot = Protons On Target)

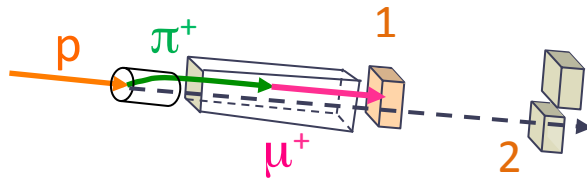


● Run 1-3 : 3.01×10<sup>20</sup>pot 前回(2012)、3.1σでθ<sub>13</sub>=0を排除

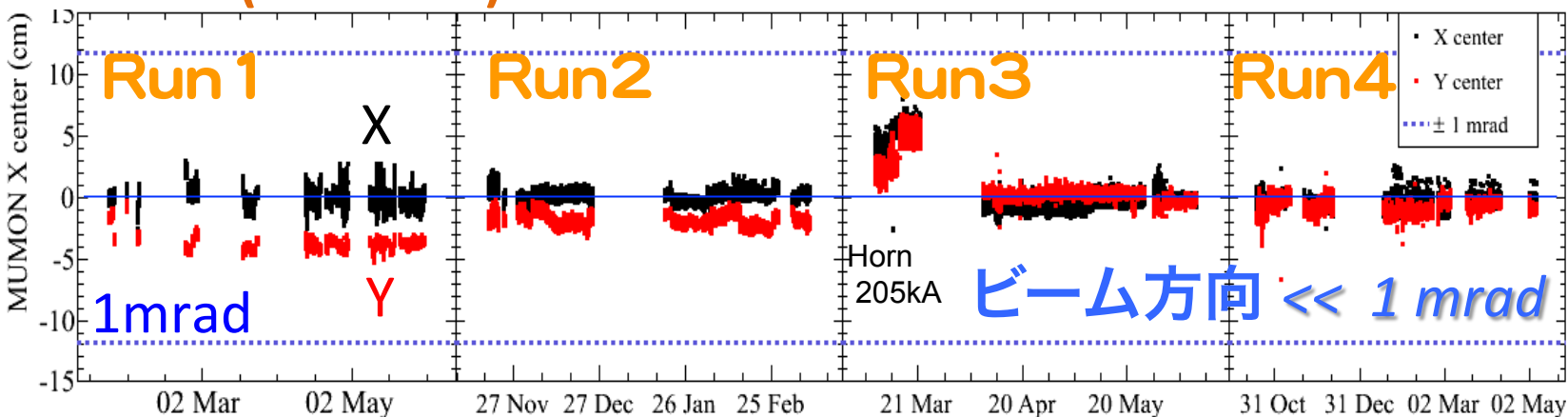
● Run 1-4 (2013/4/12まで) : **6.39×10<sup>20</sup>pot** ← 今回のデータセット

○ 6.63×10<sup>20</sup>pot (2013/5/8) へ結果をアップデート予定

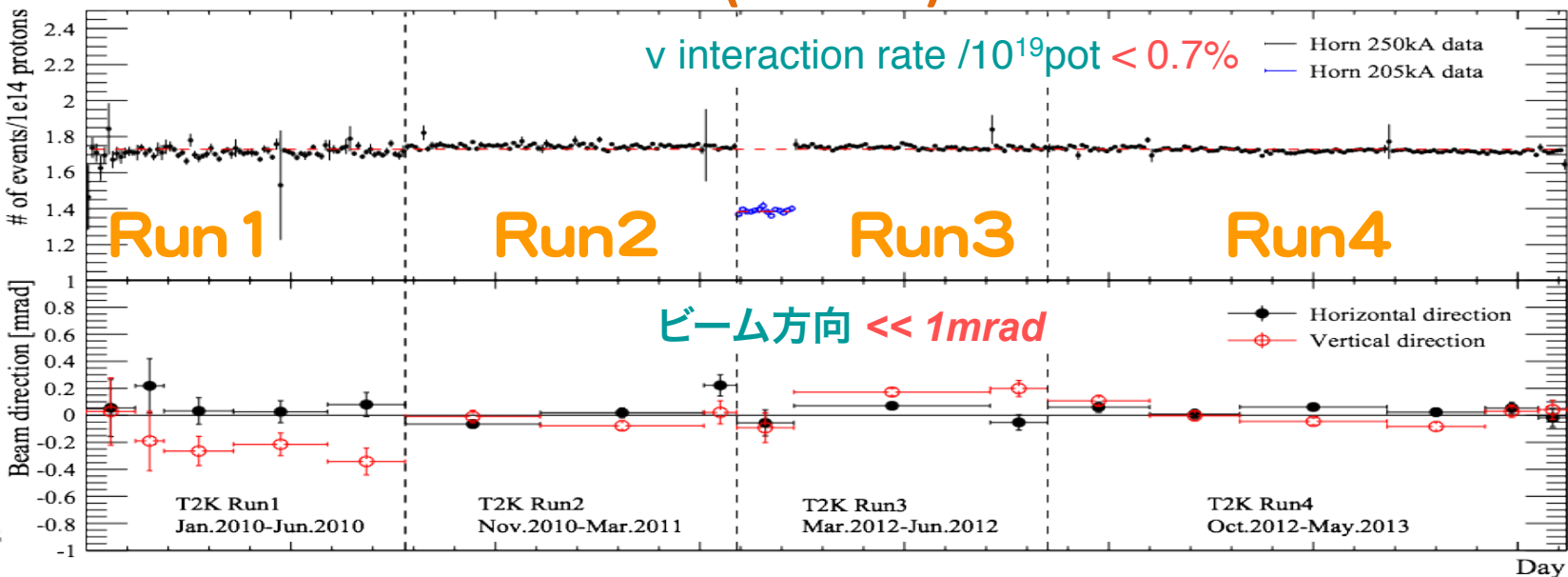
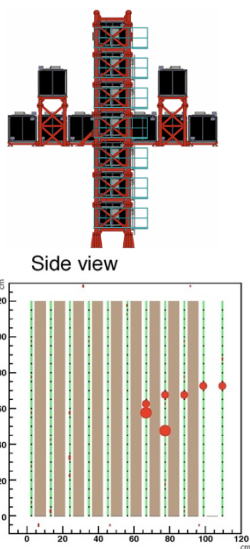
# ビーム安定性



## 1. Muon Monitor (MUMON)



## 2. On-axis Interactive Neutrino GRID (INGRID)



# 解析の流れ

$\nu$  flux

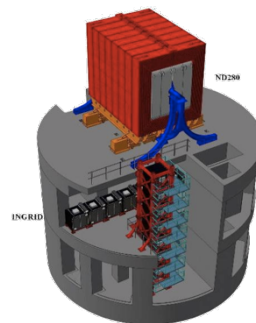
$\nu$  断面積

NEUT( $\nu$ 相互作用計算) + 外部実験からの誤差

FLUKAシミュレーション +  $\pi, K$  生成測定実験(CERN NA61)等

$\nu$ 振動パラメータ

前置検出器  
測定による制限  
(規格化・誤差)



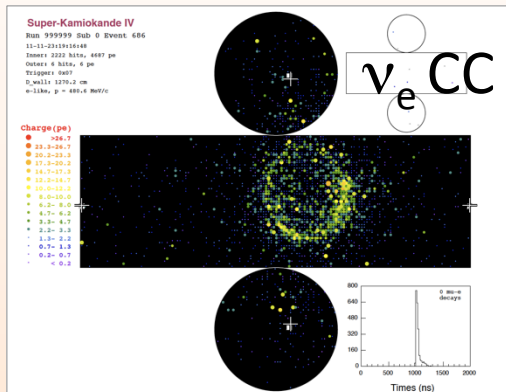
## Super-Kでの期待値



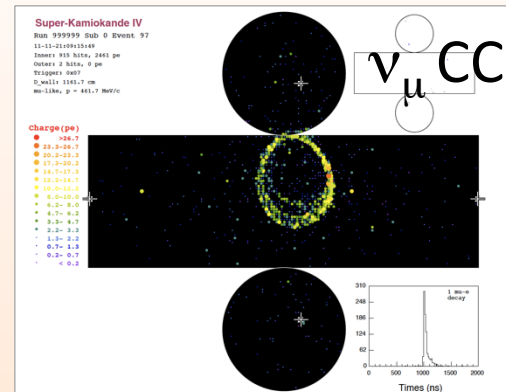
22.5kトン  
有効体積

リング形状で  
粒子識別

水チェレンコフ検出器



→ $\nu_e$ 出現解析



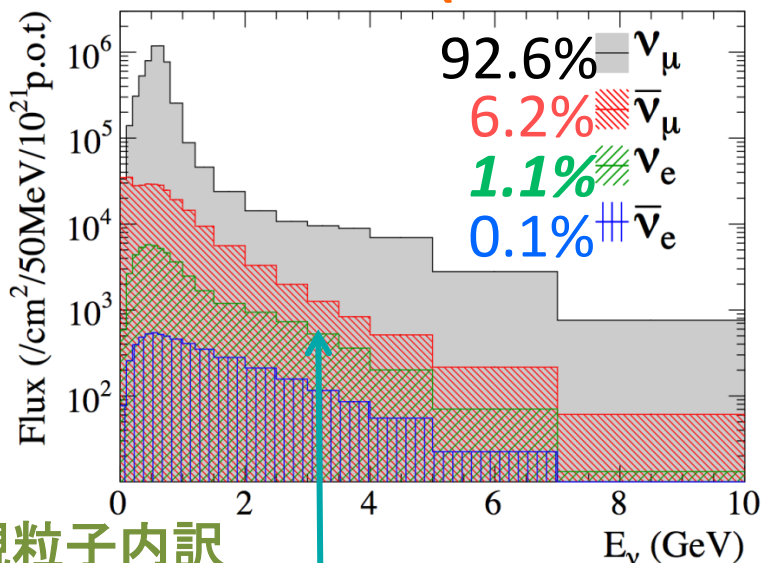
→ $\nu_\mu$ 消失解析

→  $\nu_e$ 出現事象候補を選出し、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動解析

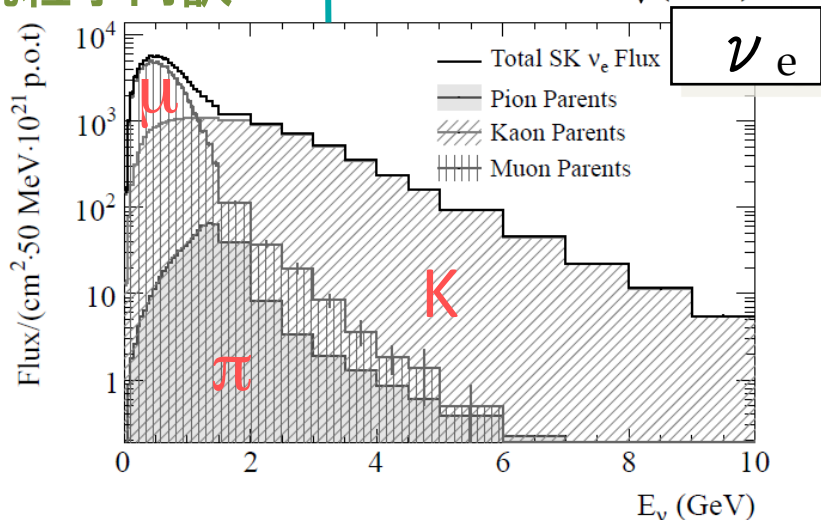


# T2K $\nu$ ビームフラックス

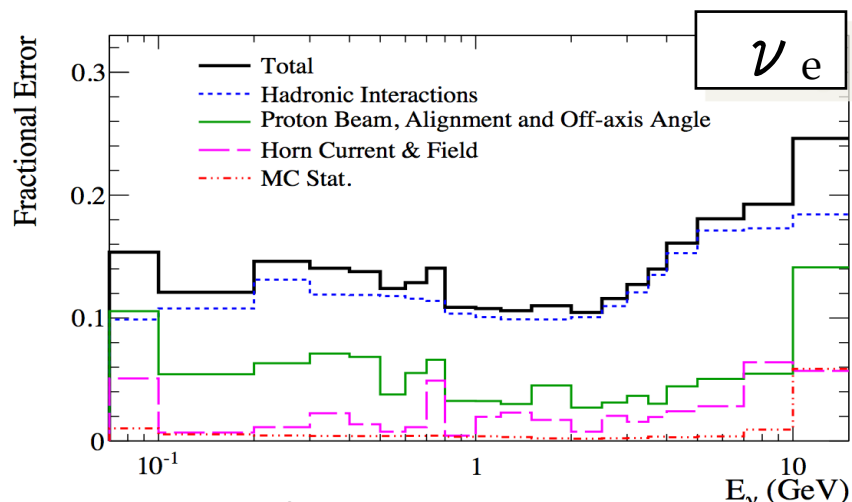
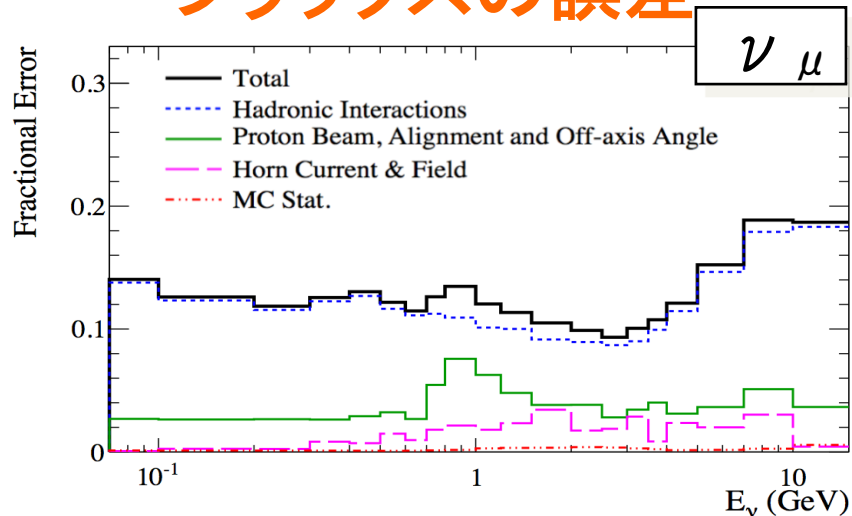
## $\nu$ フラックス (SK- $\nu$ 振動無)



## 親粒子内訳

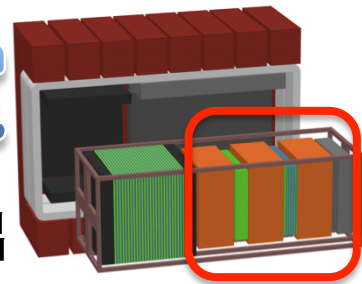


## フラックスの誤差



Total error 10~15%

# 前置検出器ND280での測定



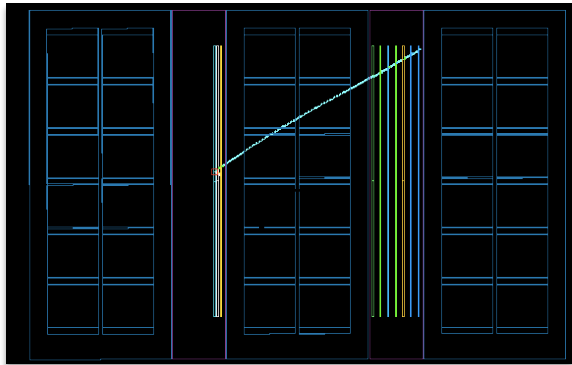
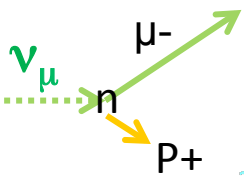
- 相互作用ごとの高純度サンプルから規格化・誤差導出

FGD(Fine Grained Detector)x2: トラッカー&ターゲット CCnonQE (2012)

TPC(Time Projection Chamber)x3 : 運動量測定、粒子識別 ⇩ ⇩ 前回より細分化

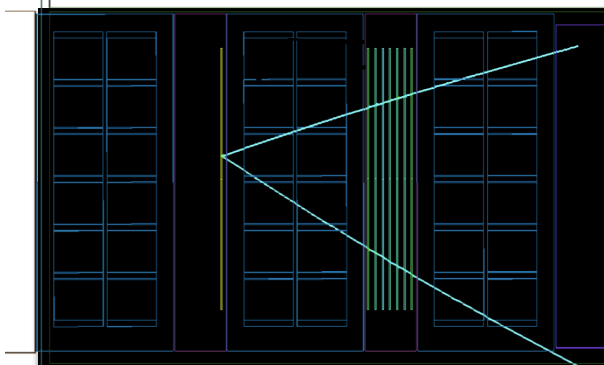
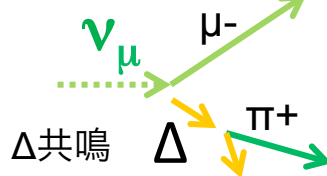
CC0 $\pi$

荷電準弾性散乱  
(CCQE)

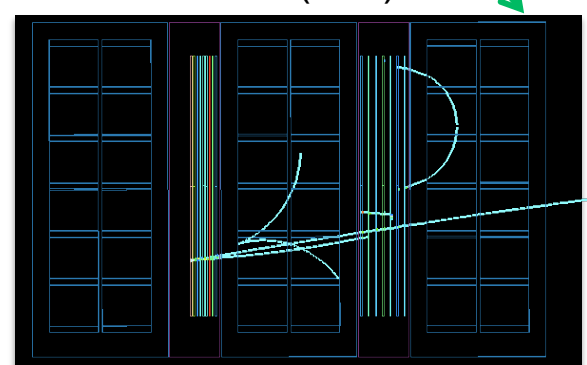
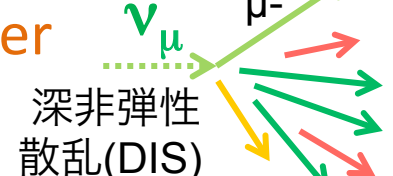


TPC FGD TPC FGD TPC

CC1 $\pi^+$



CCother



内訳

CCQE	63.5 %
Resonant	20.2 %
DIS	7.5 %
Coherent	1.4 %
Other	7.4 %

CCQE	5.3 %
Resonant	39.5 %
DIS	31.3 %
Coherent	10.6 %
Other	13.3 %

CCQE	3.9 %
Resonant	14.3 %
DIS	67.8 %
Coherent	1.4 %
Other	12.6 %

# 前置検出器データのフィット

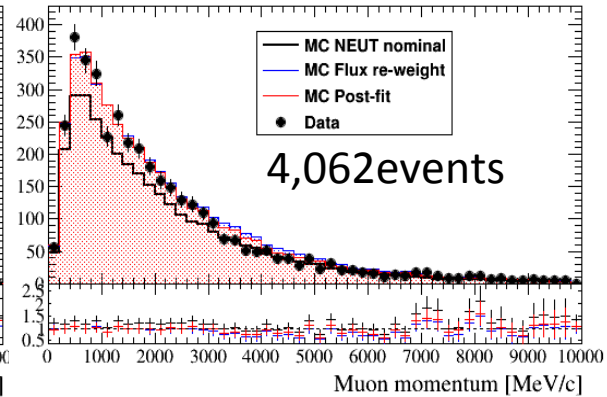
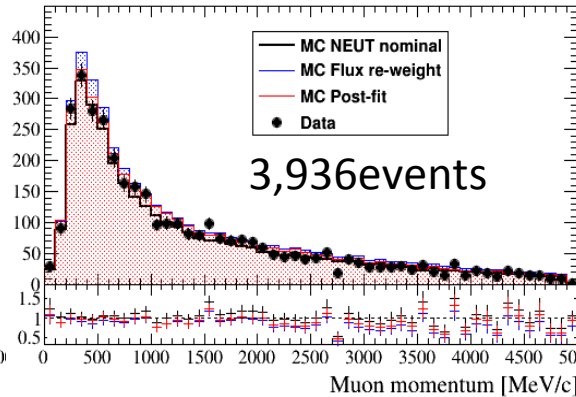
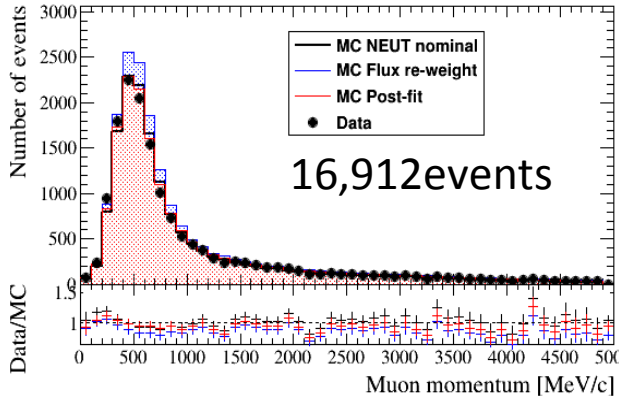
前回結果より細かいビン ● データ  
— フィット後

CC0 $\pi$

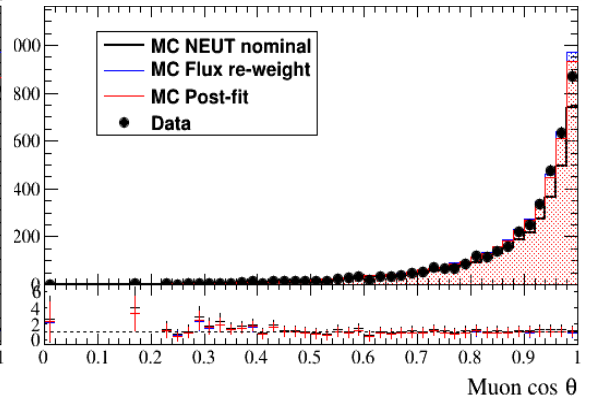
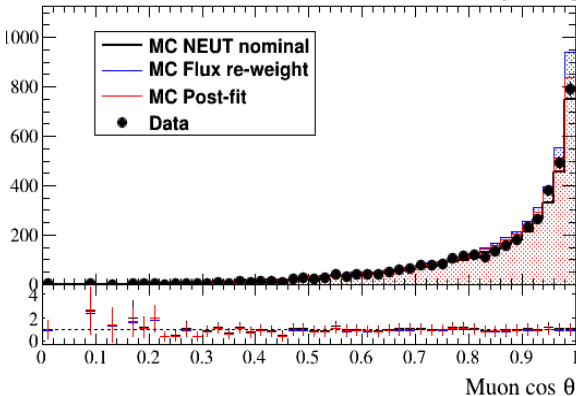
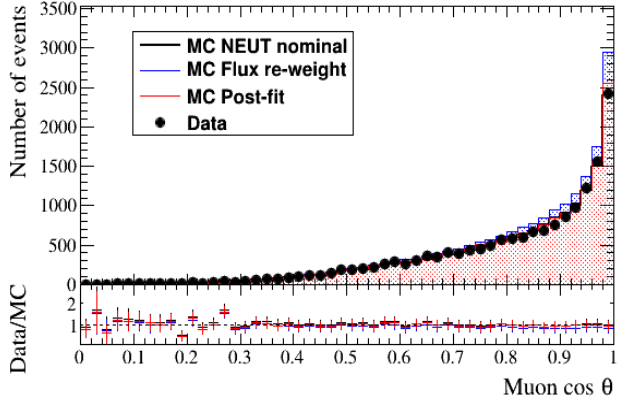
CC1 $\pi^+$

CCother

運動量



放出角

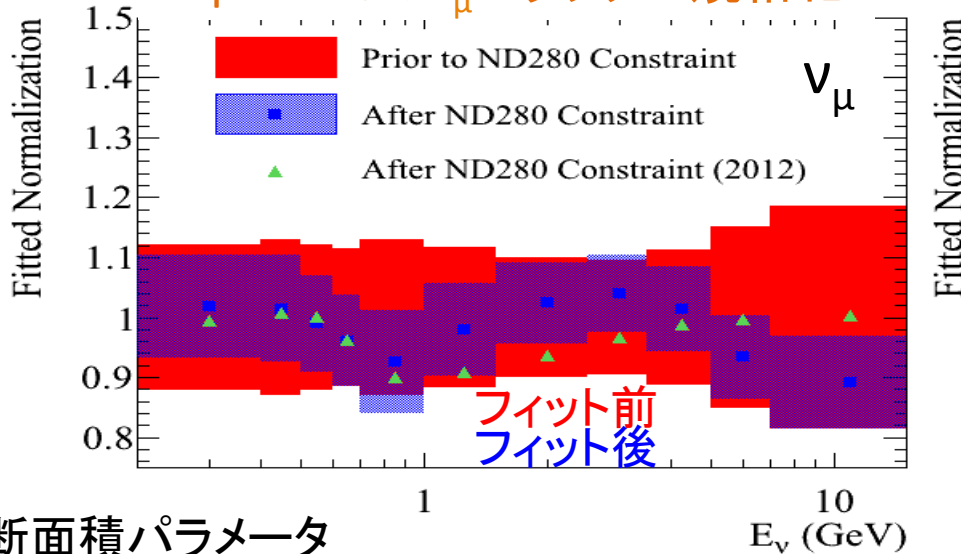


●  $\nu_e$ 振動解析ビンパラメータによる分布をフィット

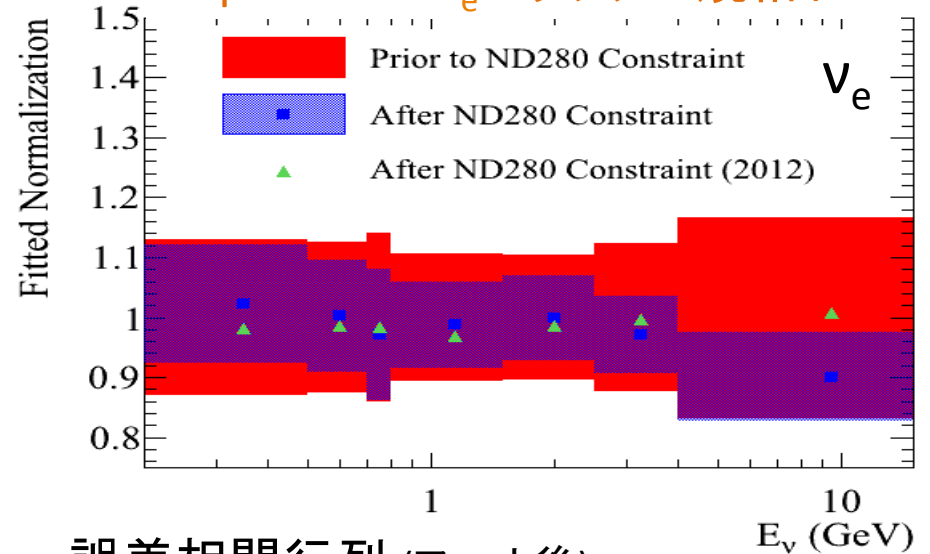
# 前置 $\nu_\mu$ 測定による誤差制限 結果

- $\nu$  フラックスとその誤差を、前置検出器データのフィットで制限

Super-Kでの $\nu_\mu$ フラックス規格化



Super-Kでの $\nu_e$ フラックス規格化

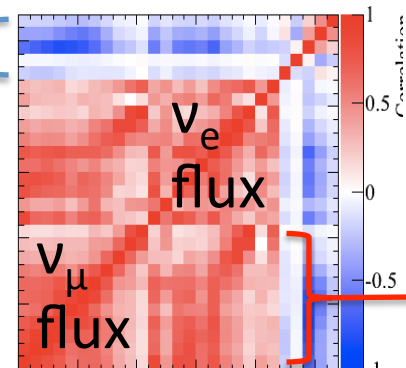


断面積パラメータ

Parameter	制限前	制限後
$M_A^{QE}$ (GeV)	$1.21 \pm 0.45$	$1.22 \pm 0.07$
$M_A^{RES}$ (GeV)	$1.41 \pm 0.22$	$0.96 \pm 0.06$
CCQE norm.	$1.00 \pm 0.11$	$0.96 \pm 0.08$
CC1 $\pi$ norm.	$1.15 \pm 0.32$	$1.22 \pm 0.16$

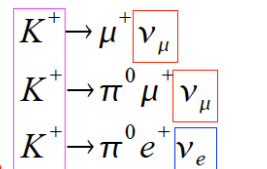
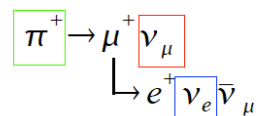
誤差を制限

誤差相関行列 (フィット後)

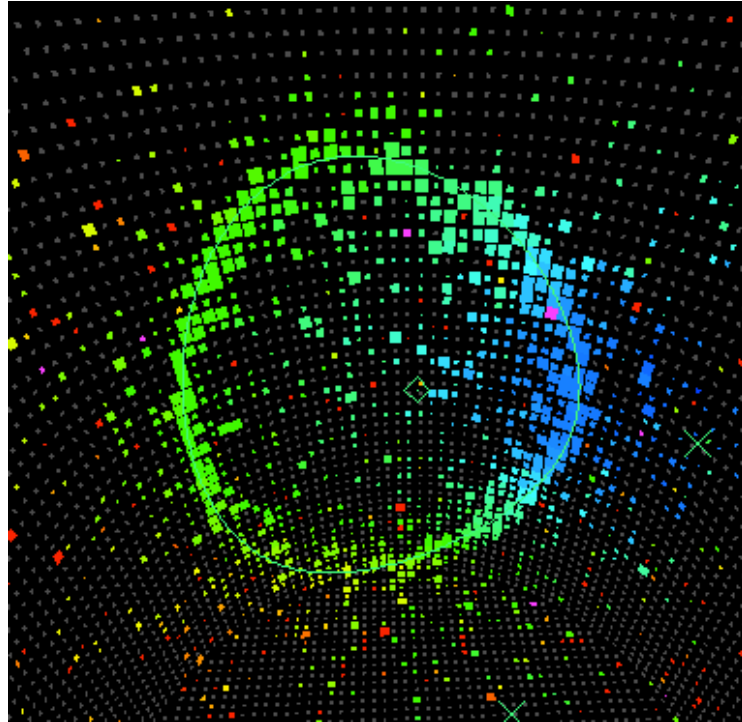


→ 振動解析で使用

元々の相関



+フィットによる相関

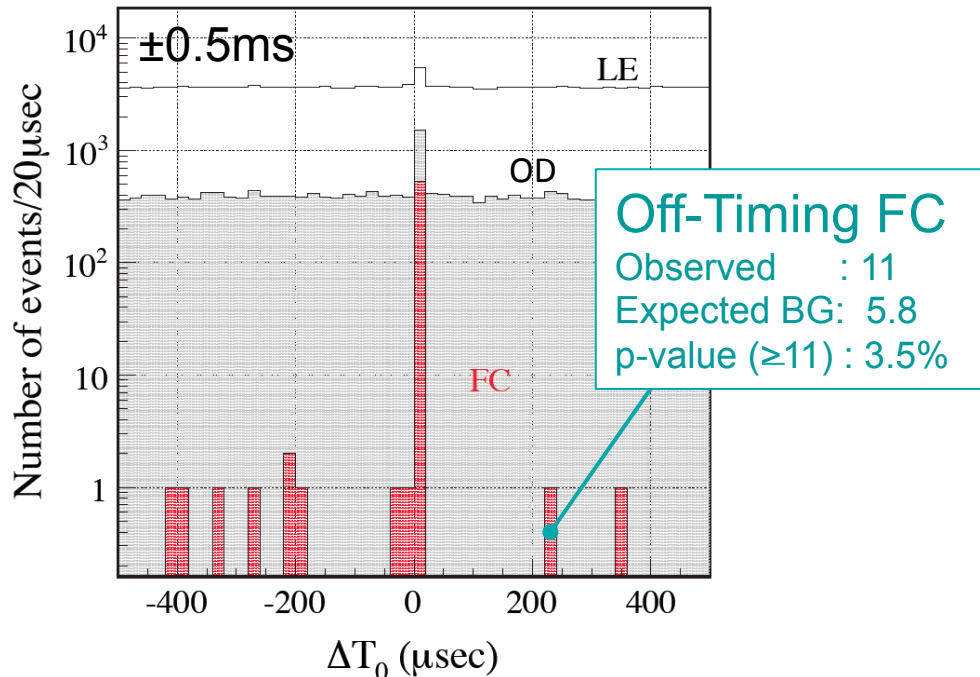


スーパーカミオカンデ(SK)の  
✓事象観測から振動解析まで

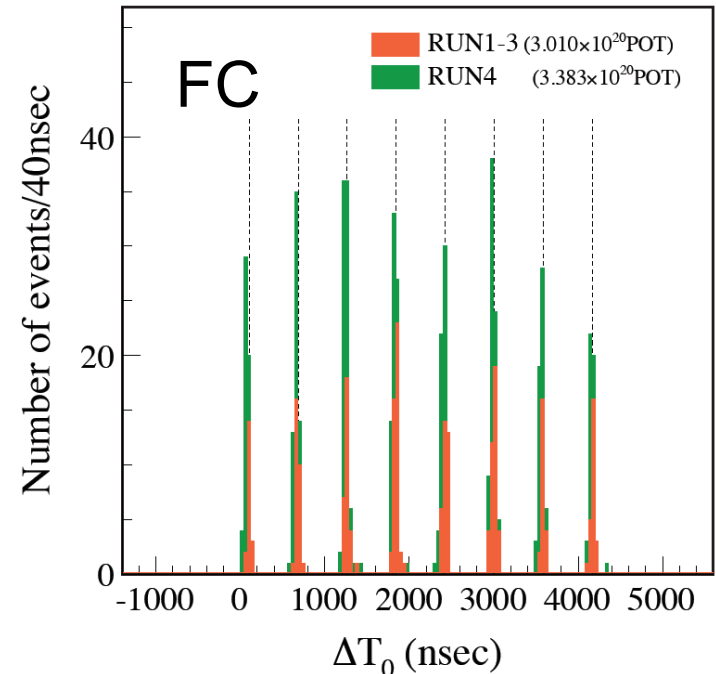
# T2K ν事象

- J-PARC側とSuper-K側でGPSによる時間同期で選別

○  $\Delta T_0 = T_{SK} - T_{J-PARC} - TOF$



Super-Kで見た  
ビームの8バンチ構造



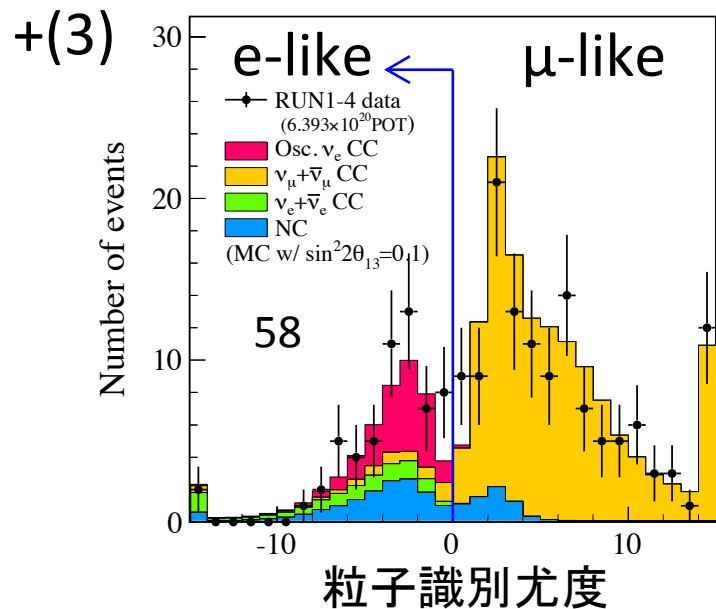
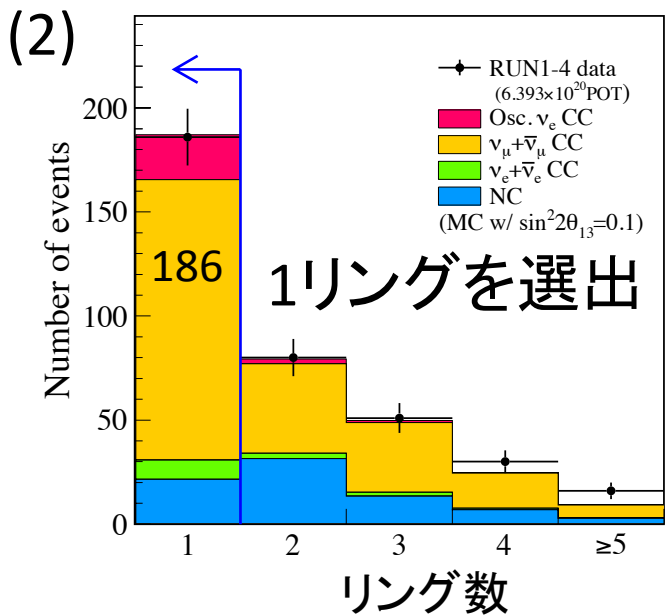
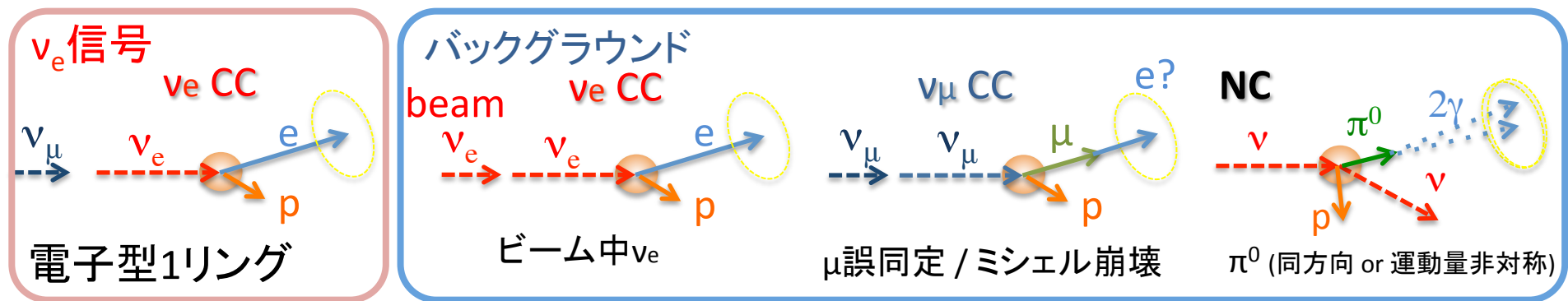
(1) Super-Kで532事象観測、有効体積(FV)カットで363事象  
(Fully Contained, FC) (FCFV)

# $\nu_e$ 選出

- $\nu_e$ 観測事象で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を解析

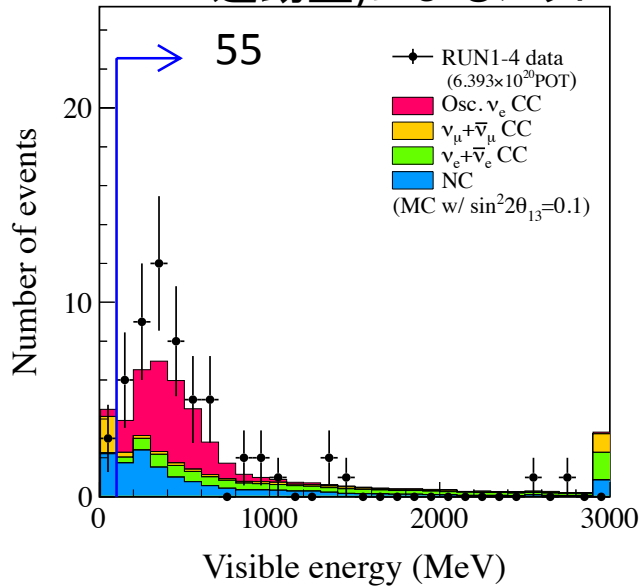
(期待値は $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$ を仮定)

- Super-Kで $\nu_e$ 信号を高純度・高効率で選出する



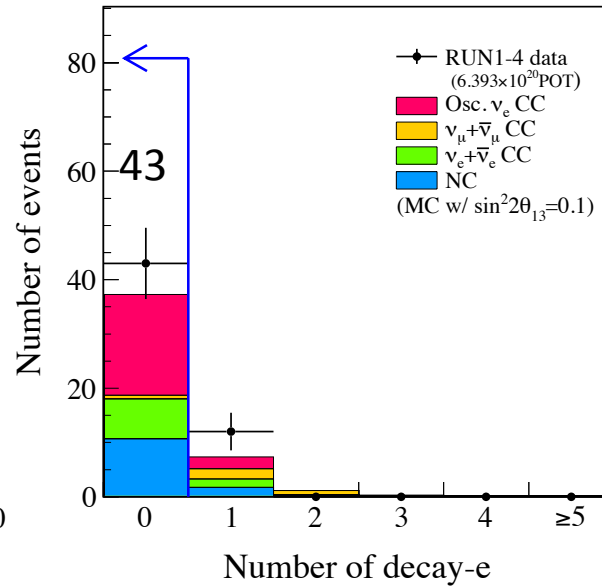
# バックグラウンド除去

+ (4)  $E_{vis} > 100 \text{ MeV}$   
Visible Energy (電子換算運動量)によるカット

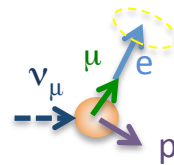


NC,  $\mu$  排除

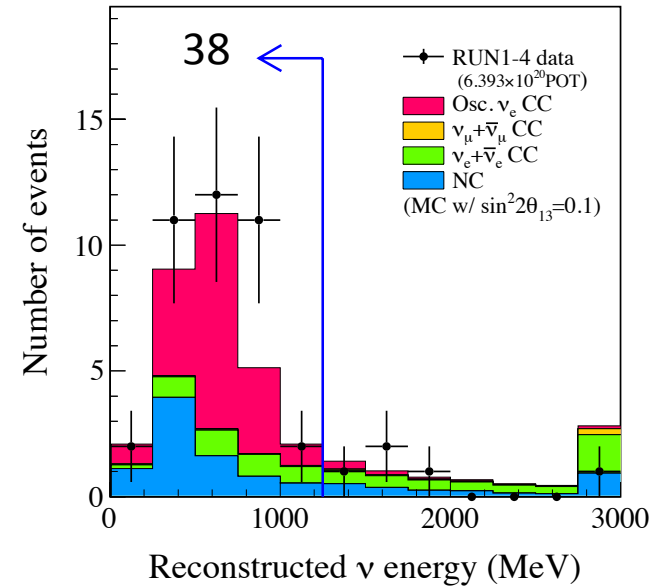
+ (5)  $\mu$ の崩壊電子無し  
 $\nu_\mu$ のミシエル崩壊(e放出)をカット



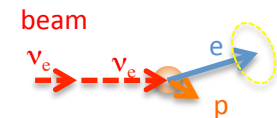
$\pi, \mu$ 崩壊 排除



+ (6)  $E_{rec} > 1250 \text{ MeV}$   
( $E_{rec}$ : ビーム方向・CCQEを仮定し再構築したエネルギー)

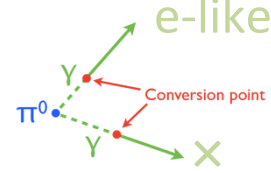


ビーム起源 $\nu_e$ の除去  
( $K^+, \pi$ からの $\mu$ 崩壊)





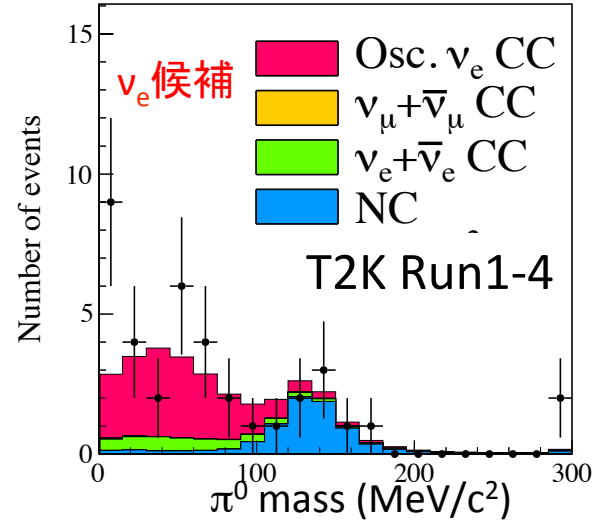
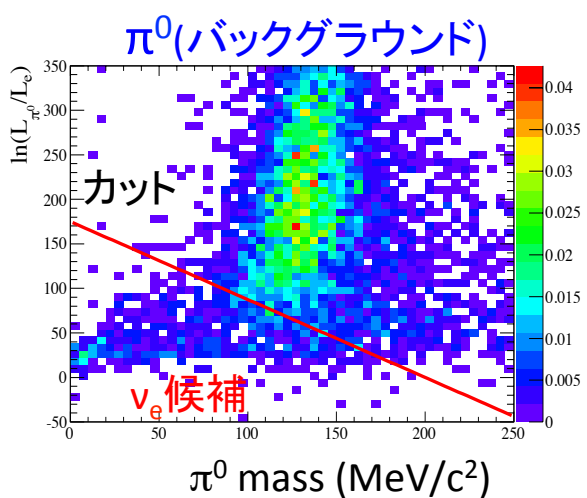
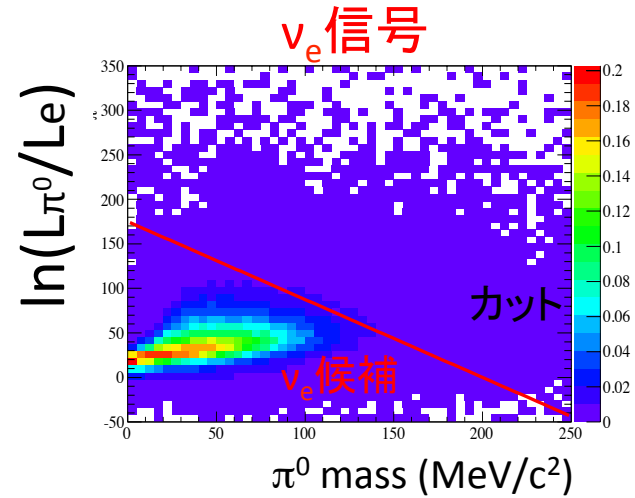
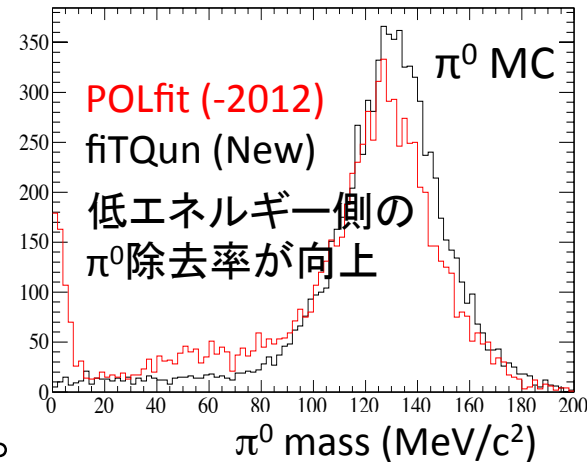
# π<sup>0</sup>バックグラウンド除去



- (π<sup>0</sup>→)2γを仮定、見逃した他方のリングを探してπ<sup>0</sup>不変質量を構築
- 新しいSK事象再構築アルゴリズムを開発

*Old* POLfit : リングの発光パターンでフィット

*New* fiTQun : 様々な粒子を想定し、PMTの時間・電荷を予想して複数トラックまでフィット。Vertex・運動量などを求める汎用のフィッターで、π<sup>0</sup>に関わる部分を用いる。



+ (7) π<sup>0</sup>質量と尤度比(Lπ<sup>0</sup>/Le)を使った2次元カット

(以前は質量のみ)

以前の4割量までBG削減 (信号の選出効率ほぼ同じ)



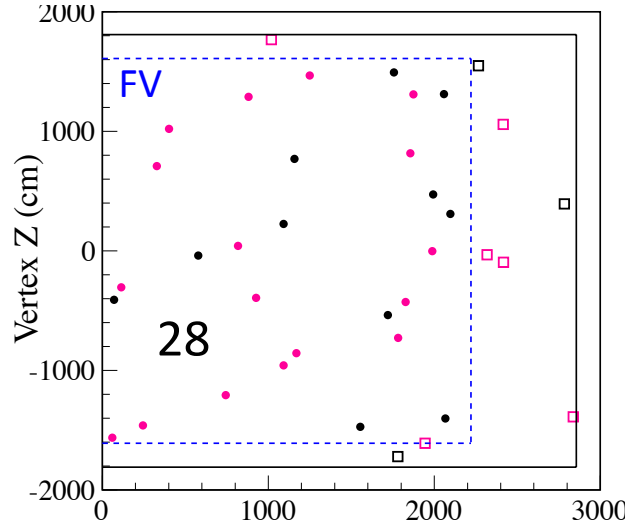
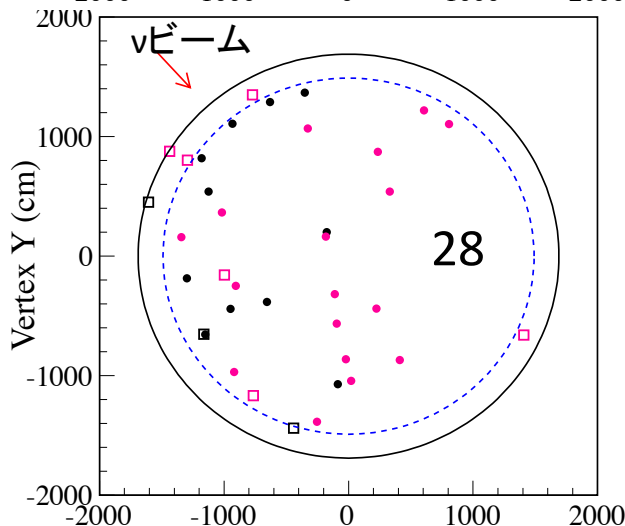
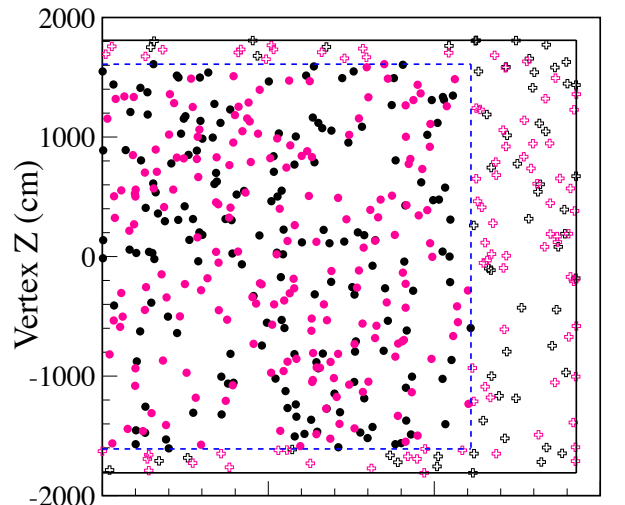
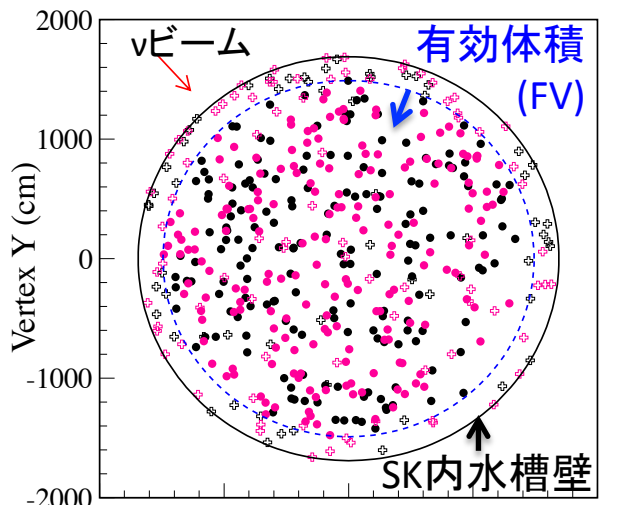
ν<sub>e</sub>出現候補

# $\nu_e$ 事象発生点分布

$\nu_e$  cut

T2K  $\nu$  事象

$\nu_e$  出現事象候補



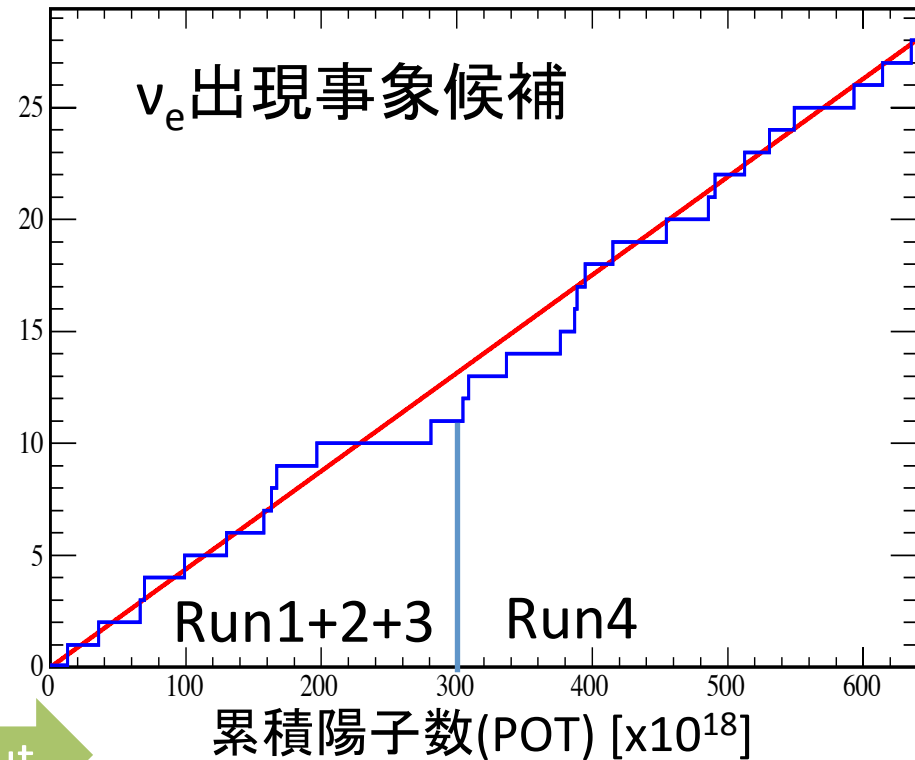
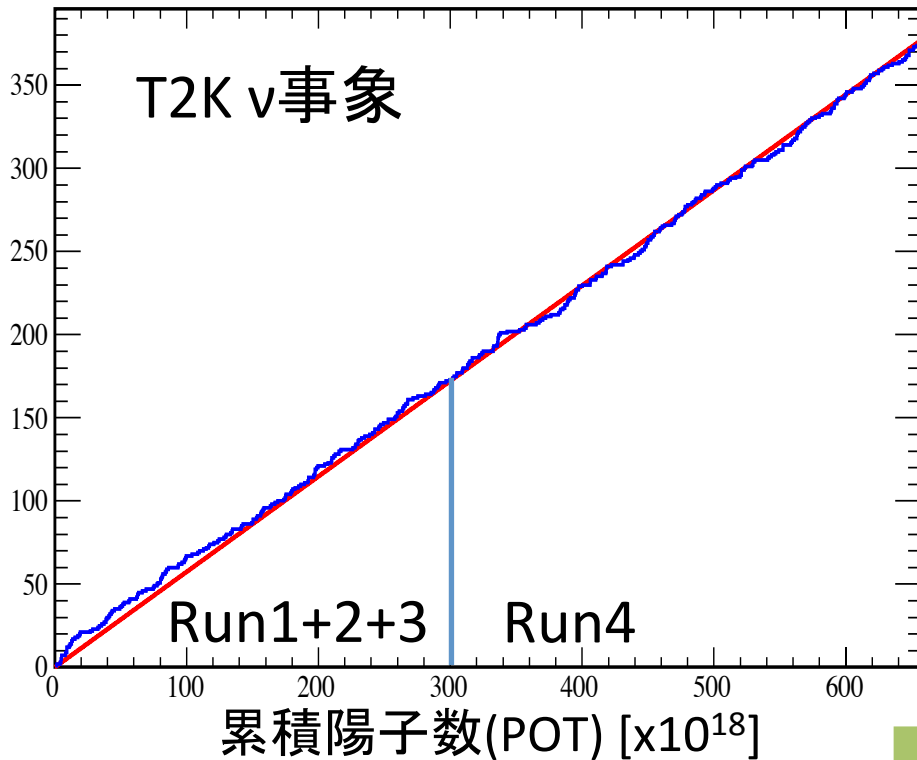
Run1+2+3,  
Run4



観測数  
532  
(363)

観測数  
28  
期待値  
( $\sin^2 2\theta_{13}=0$ )  
 $4.64 \pm 0.52$   
( $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$ )  
 $20.44 \pm 1.80$

# Super-K 観測数 推移



- 安定したデータ取得を達成
- 28  $\nu_e$ 事象 /  $6.4 \times 10^{20}$  pot (2010/1/23 - 2013/4/12)

# $\nu_e$ 選出 効率・純度

$\sin^2 2\theta_{13}=0.1$		$\nu_\mu$ CC	$\nu_e$ CC	NC	BG all	Sig. $\nu_e$	Data
	True FV	308	15.0	272	594	25.6	—
(1)	FCFV	234	14.4	76.5	325	24.8	363
(2)	1 ring	135	9.2	21.6	166	21.5	186
(3)	e-like	5.3	9.1	14.9	29.3	21.2	58
(4)	$E_{\text{vis}} > 100\text{MeV}$	3.5	9.1	12.7	25.2	20.9	55
(5)	No decay-e	0.7	7.4	10.6	18.7	18.6	43
(6)	$E_{\nu}^{\text{rec}} < 1.25\text{GeV}$	0.2	3.5	8.0	11.8	17.9	38

(7)	fitQun $\pi^0$ cut	0.06	3.1	0.9	4.0	16.4	28
	Efficiency	< 0.1%	20%	0.3%	0.7%	64%	—

*New*

(7)	POLfit $\pi^0$ cut	0.12	3.2	2.3	5.6	16.8	31
	Efficiency	< 0.1%	21%	0.8%	0.9%	66%	—

2012年までの  
選出法

NC( $\pi^0$ )除去率が向上



選出効率はほぼ同じ

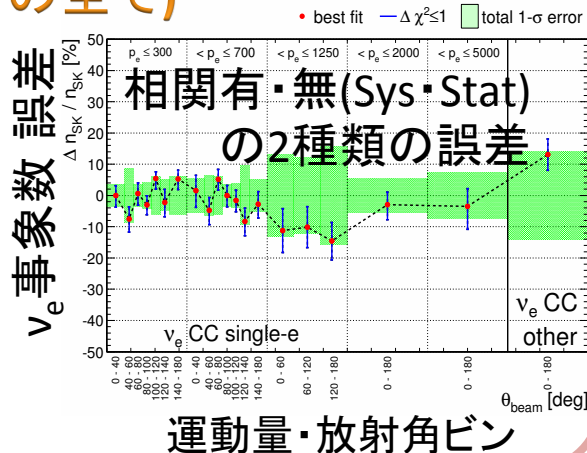


# $\nu_e$ 選出 Super-K 系統誤差

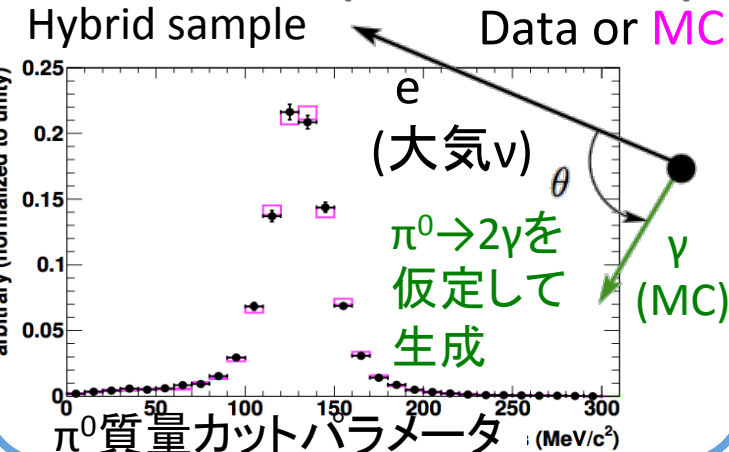
- 「1-Ring + e-like +  $\pi^0$ 除去」の系統誤差見積もりには、SKで常に取得されている「大気ニュートリノデータ」を用いる

## $\nu_e$ CC の誤差 ( $\nu_e$ 信号の全て)

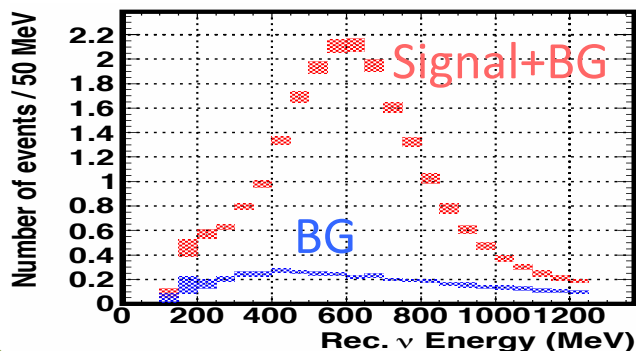
大気 $\nu$ から、「 $\nu_e$ 選出サンプル」、「3つのカット各々で排除されたサンプル」を定義し、Data・MC数をLikelihoodフィットして、カットによるズレを見る



## $\pi^0$ を含む誤差 (NC BKG の99%)



## エネルギースペクトルと各ビンの誤差



## Super-Kカット系統誤差

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$	(2012)	New
$\nu_e$ 信号	2.6 %	1.6 %
バックグラウンド	9.4 %	7.3 %
Total	3.3 %	2.1 %

SK MCの改良、大気 $\nu$ 倍量が寄与

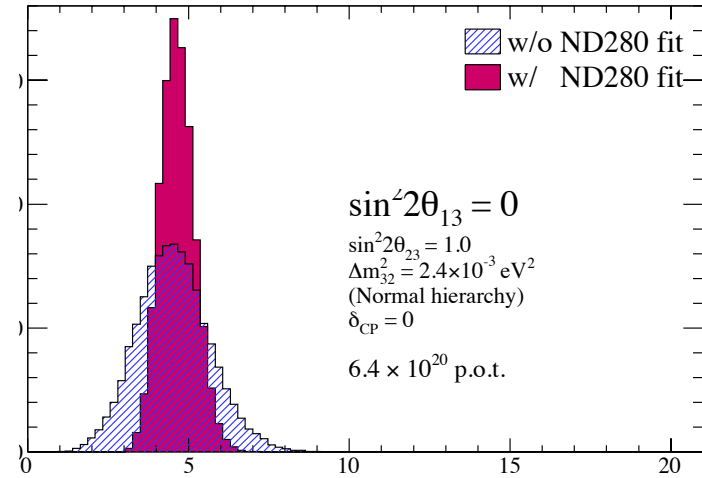
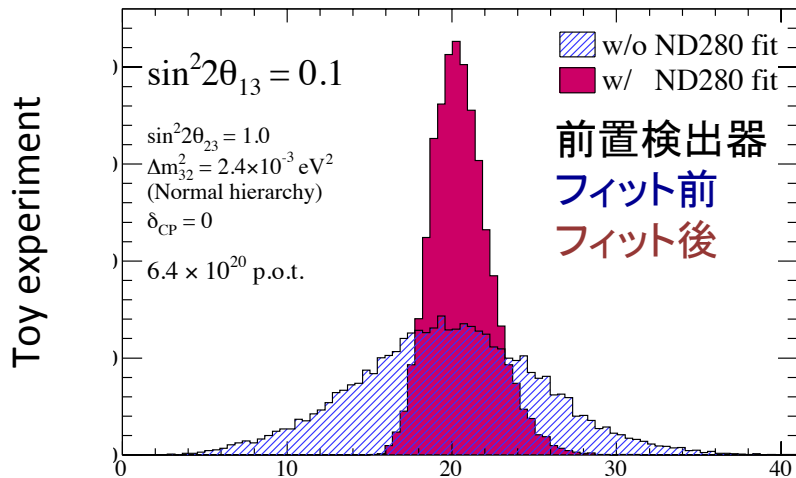
Toy MCで  
まとめて  
T2K誤差へ

# $\nu_e$ 系統誤差

$\nu_e$  出現事象 誤差の広がり

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$

$\sin^2 2\theta_{13} = 0$



Source	$\sin^2 2\theta_{13} = 0$	$= 0.1$
Flux + $\nu$ int. (ND 測定)	4.9 %	3.0 %
$\nu$ int. (外部実験から)	6.7 %	7.5 %
Super-K (+SKでの相互作用)	7.3 %	3.5 %
<b>Total</b>	<b>11.1 %</b>	<b>8.8 %</b>
<b>Total (2012)</b>	<b>13.0 %</b>	<b>9.9 %</b>

# $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動解析

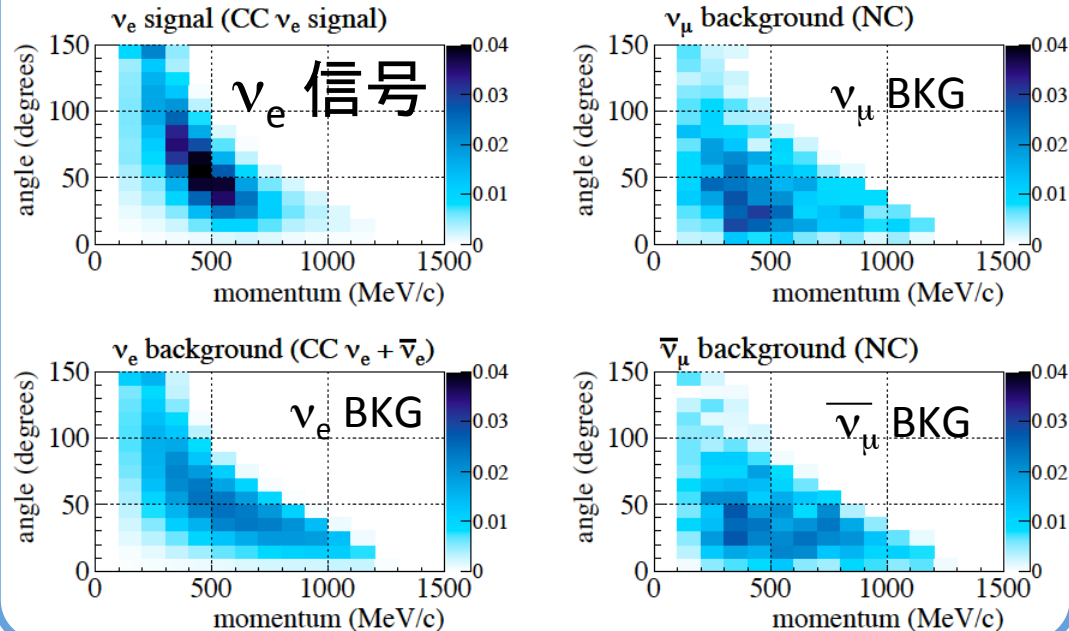
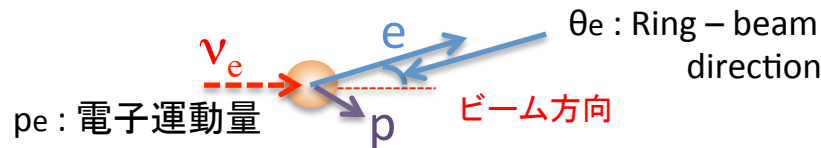
$$\mathcal{L}(N_{obs.}, \mathbf{x}; \mathbf{o}, \mathbf{f}) = \mathcal{L}_{norm}(N_{obs.}; \mathbf{o}, \mathbf{f}) \times \mathcal{L}_{shape}(\mathbf{x}; \mathbf{o}, \mathbf{f}) \times \mathcal{L}_{syst.}(\mathbf{f})$$

(測定値;自由度)      Poisson      PDF      Systematic

$N_{obs}$  :  $\nu_e$  candidate events  
 $\mathbf{x}$  : bins of shape parameters  
 $\mathbf{o}$  : oscillation parameters  
 $\mathbf{f}$  : systematic uncertainties

異なるbinningで、独立な2種類の解析を行い、整合性を確認

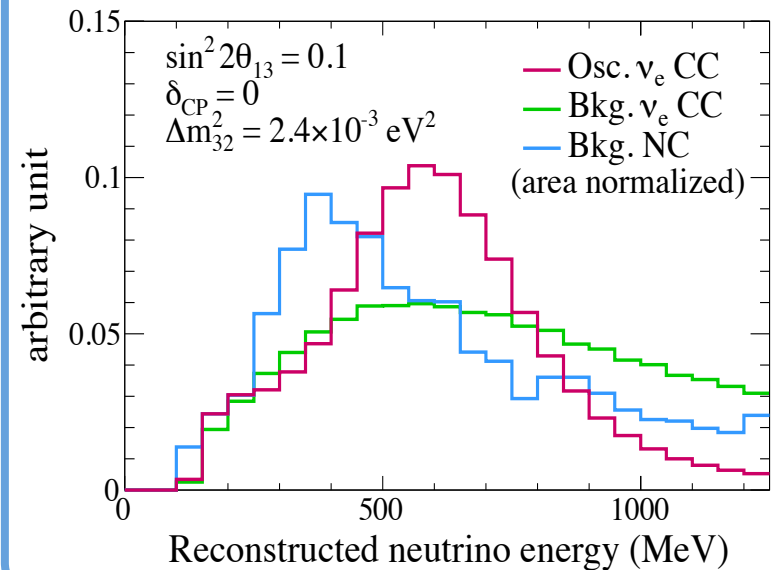
## 解析A (運動量-散乱角によるビン)



## 解析B (再構築エネルギービン)

$$E^{rec} = \frac{m_p^2 - (m_n - E_b)^2 - m_e^2 + 2(m_n - E_b)E_e}{2(m_n - E_b - E_e + p_e \cos \theta_e)}$$

(CCQEを仮定)



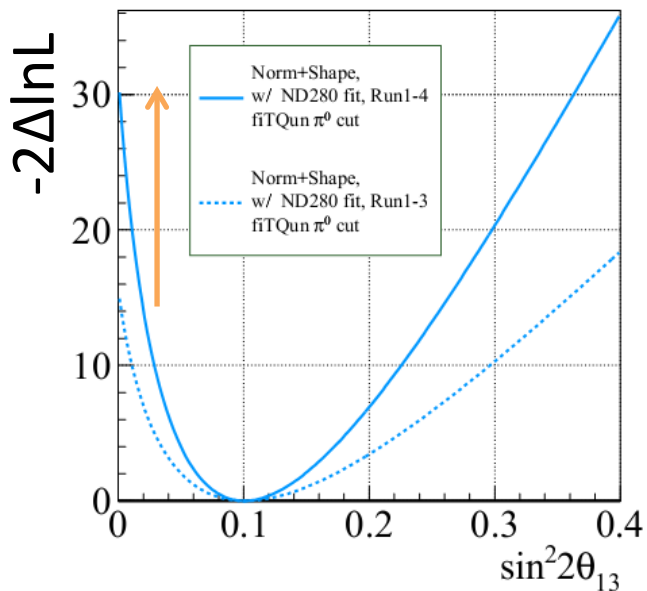
# 感度向上

Toy MC による likelihood 平均曲線

( $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$ ,  $\delta_{CP}=0$ ,  $\sin^2 \theta_{23}=0.5$ , normal hierarchy を仮定)

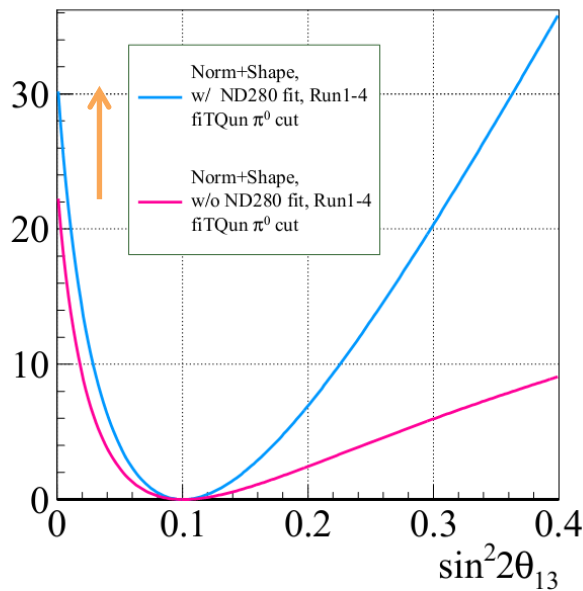
- $\theta_{13} \neq 0$  の有意性を  $\sqrt{-2\Delta \ln L(\theta_{13} = 0)}$  で計算

Run1-3 → Run1-4  
統計量2倍



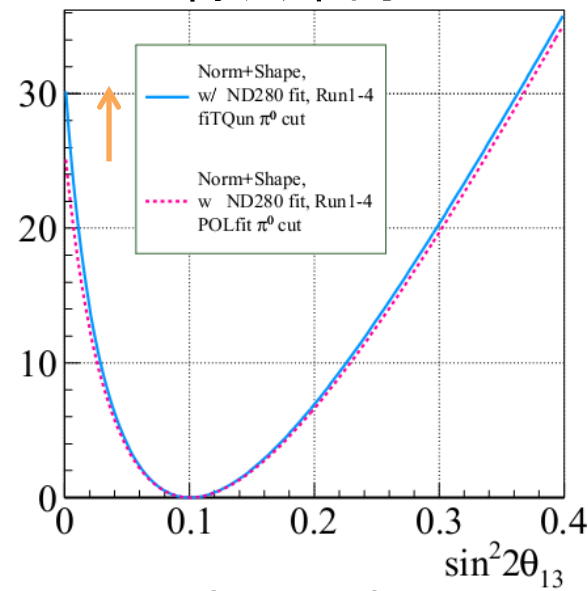
RUN1-4 POT :  $5.5\sigma$  ↑  
RUN1-3 POT :  $3.9\sigma$  ↑

前置測定結果を  
系統誤差へ反映



w/ ND result :  $5.5\sigma$  ↑  
w/o ND result :  $4.7\sigma$  ↑

SK  $\pi^0$ バックグラウンド  
除去率向上



New (fitQun) :  $5.5\sigma$  ↑  
Old (POLfit) :  $5.0\sigma$  ↑

- $5\sigma$  以上を予想、Run1-4 のデータ解析へ

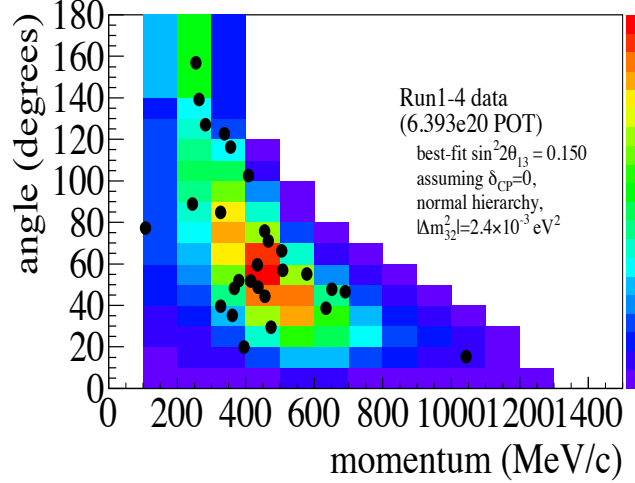
▶ 上記の他に、SK MC改良・SK誤差見積り改善・ $\nu$ 反応モデル改善、等多々の寄与



# $\theta_{13}$ ベストフィット結果

## 解析A (運動量-散乱角ビン)

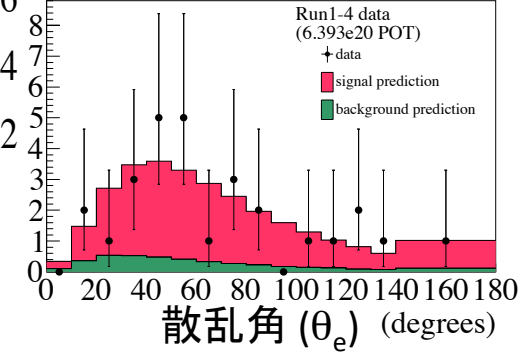
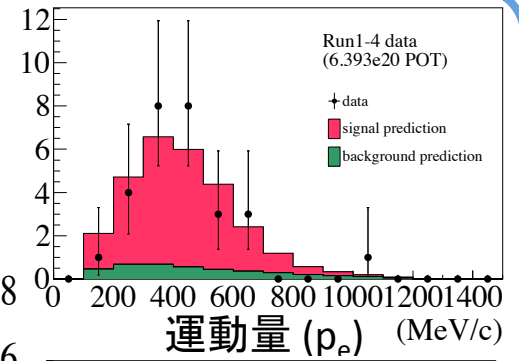
Assuming  $\delta_{CP}=0$ , normal hierarchy,  
 $|\Delta m_{32}^2|=2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{23}=1$



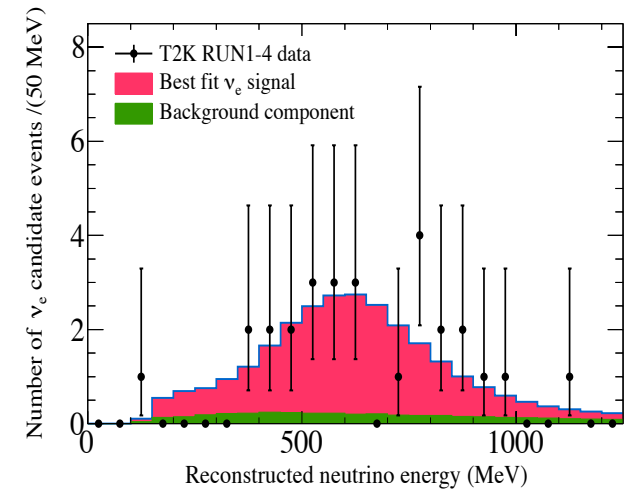
Best fit  $\pm 68\% \text{ CL}$

Normal hierarchy  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.150^{+0.039}_{-0.034}$

Inverted hierarchy  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.182^{+0.046}_{-0.040}$



## 解析B (再構築エネルギービン)



$\sin^2 2\theta_{13} = 0.152^{+0.041}_{-0.034}$

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.184^{+0.046}_{-0.041}$

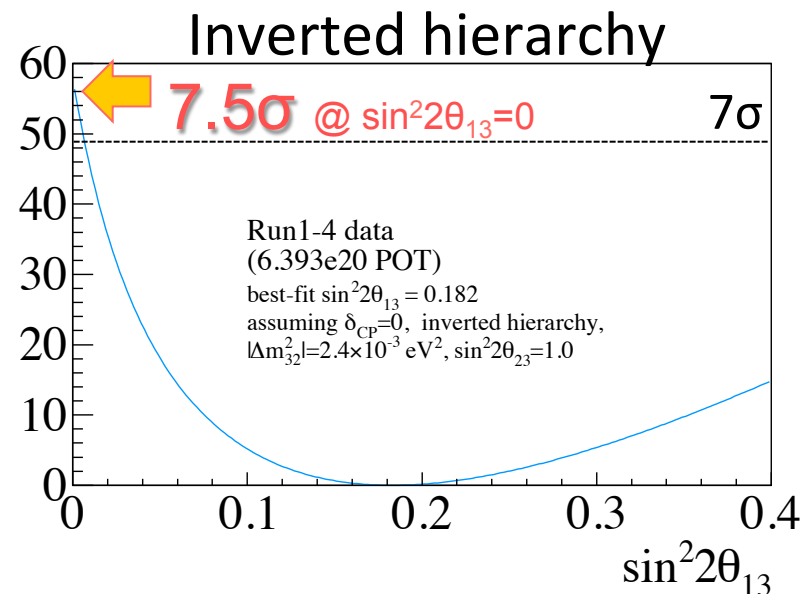
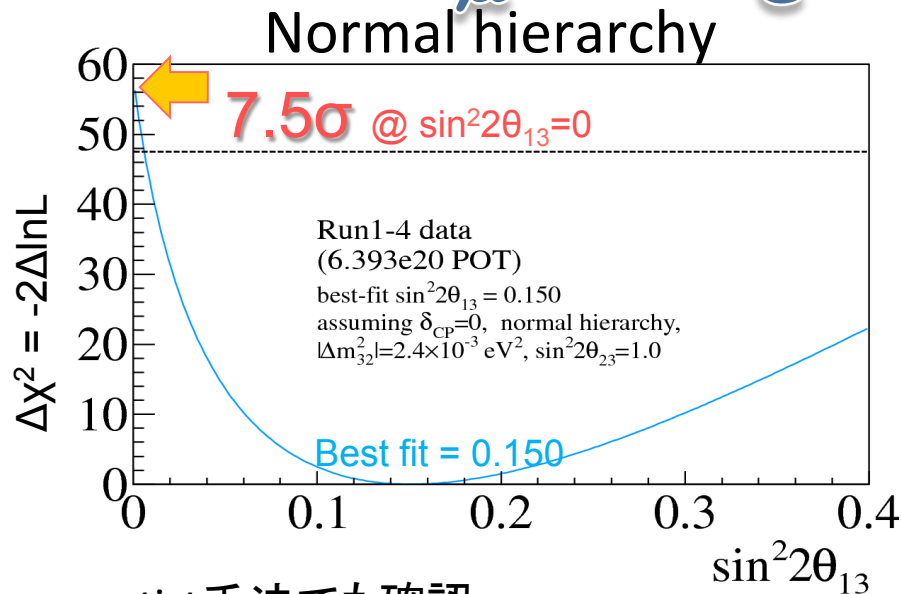
前回(2012)の結果

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.097^{+0.053}_{-0.041}$$

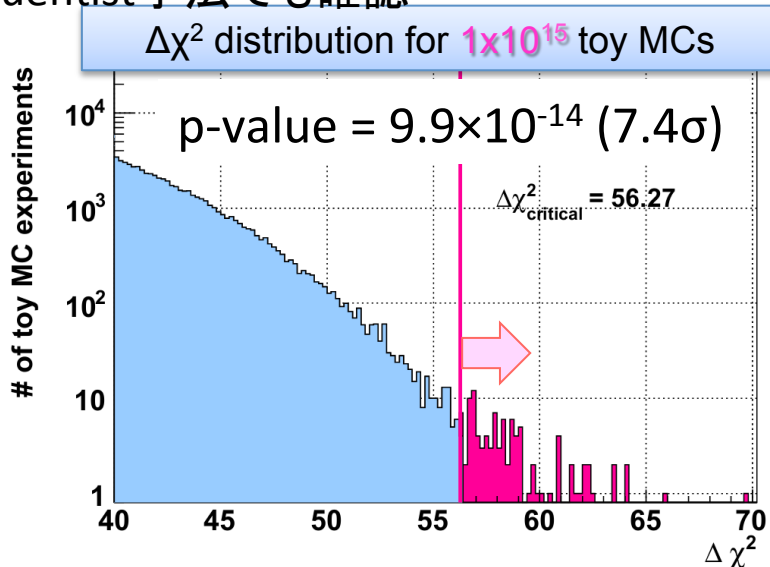
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.123^{+0.065}_{-0.051}$$

- 両解析で整合良い結果
- 前回から大幅な精度向上

# $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の有意性



Frequentist手法でも確認



前回(2012) p-value = 0.0009 (3.1 $\sigma$ )  
 → **New** p-value =  $3.2 \times 10^{-14}$  (7.5 $\sigma$ )  
 10桁低減

- $\theta_{13} \neq 0$  は 7.5 $\sigma$ 、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  振動を発見
  - 正・逆階層、 $\theta_{23}$ 、 $\delta_{CP}$ によらず 7 $\sigma$  以上
  - ビン分けしない場合( $\nu_e$ 数のみ)で 6.8 $\sigma$ 
    - ▶ PDFによる信号分別の効果
  - Daya Bay (2013)で  $\theta_{13} \neq 0$  は 7.7 $\sigma$

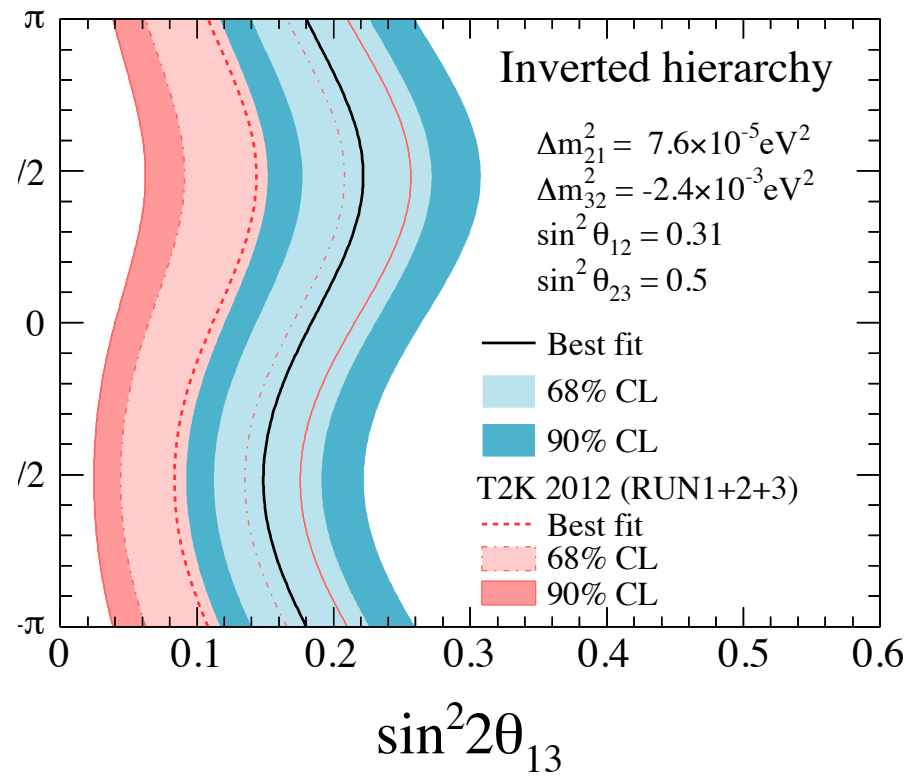
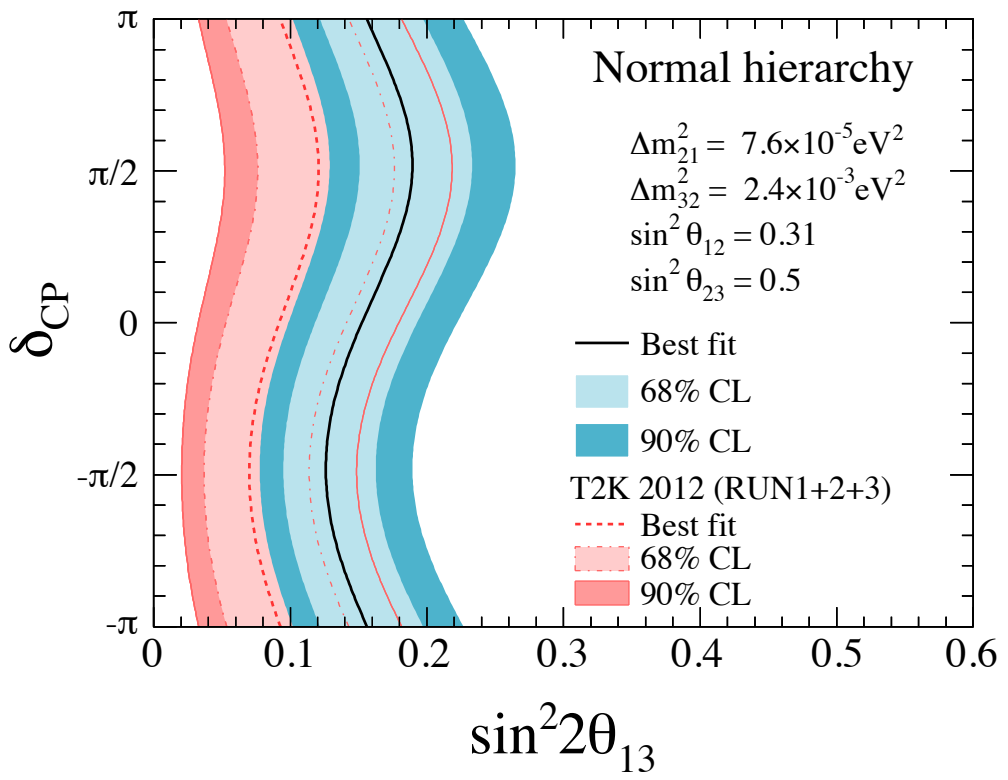
# $\theta_{13}$ 信頼領域 — $\delta_{CP}$

各 $\delta_{CP}$ に対する $\theta_{13}$  C.L. 分布

Run1-3 (2012) → Run1-4 (2013)

Normal hierarchy

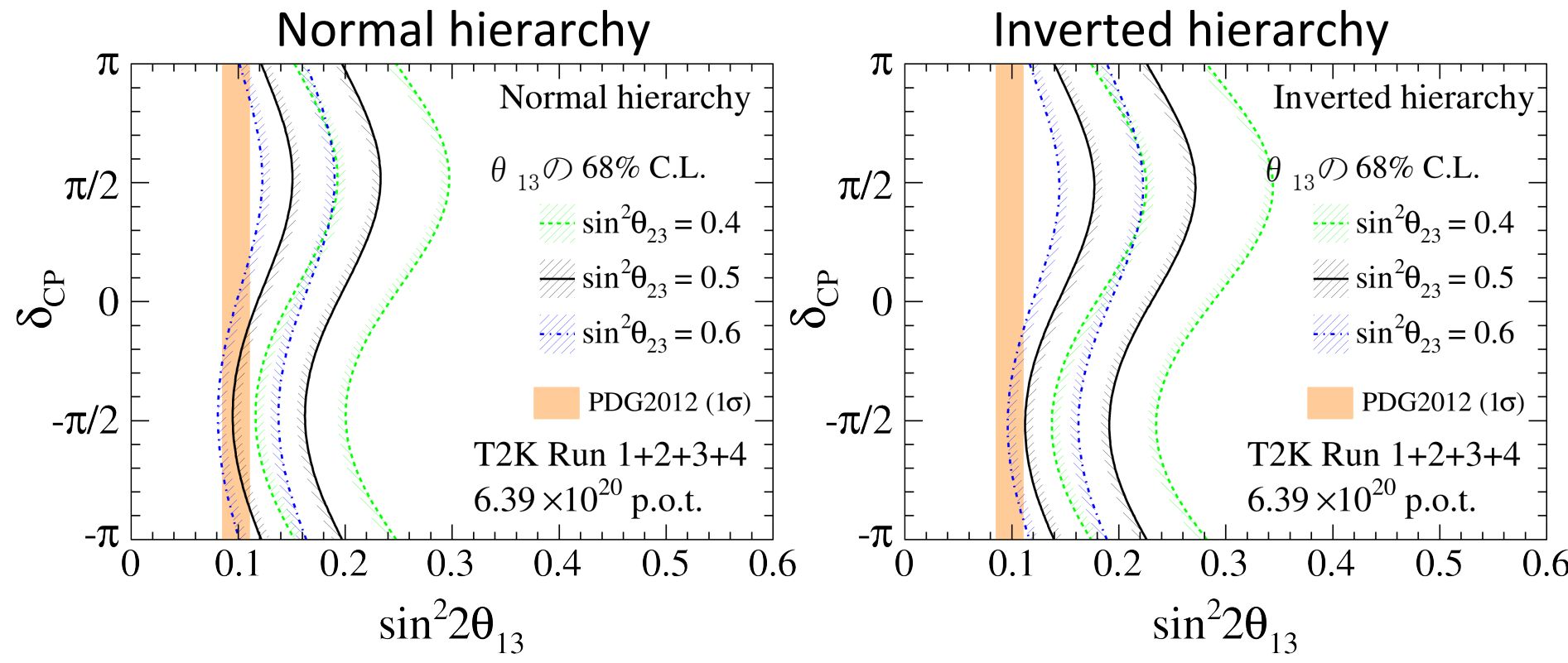
Inverted hierarchy



# $\theta_{13}$ 信頼領域の $\delta_{CP}$ ・ $\theta_{23}$ 依存

各 $\delta_{CP}$ に対する $\theta_{13}$  C.L. 分布

- 各 $\delta_{CP}$ 、 $\sin^2\theta_{23}$ の値で、 $\theta_{13}$ の信頼領域を見積もり



- $\delta_{CP}$ 、 $\sin^2\theta_{23}$ は固定 $\rightarrow\theta_{13}$ 測定精度向上 $\delta_{CP}$ 、 $\theta_{23}$ の影響が無視できない
- $\delta_{CP}$ 、 $\theta_{23}$ の影響・原子炉実験による $\theta_{13}$ 制限を考慮した結果も検討中

# T2Kの今後 (感度見積もり)

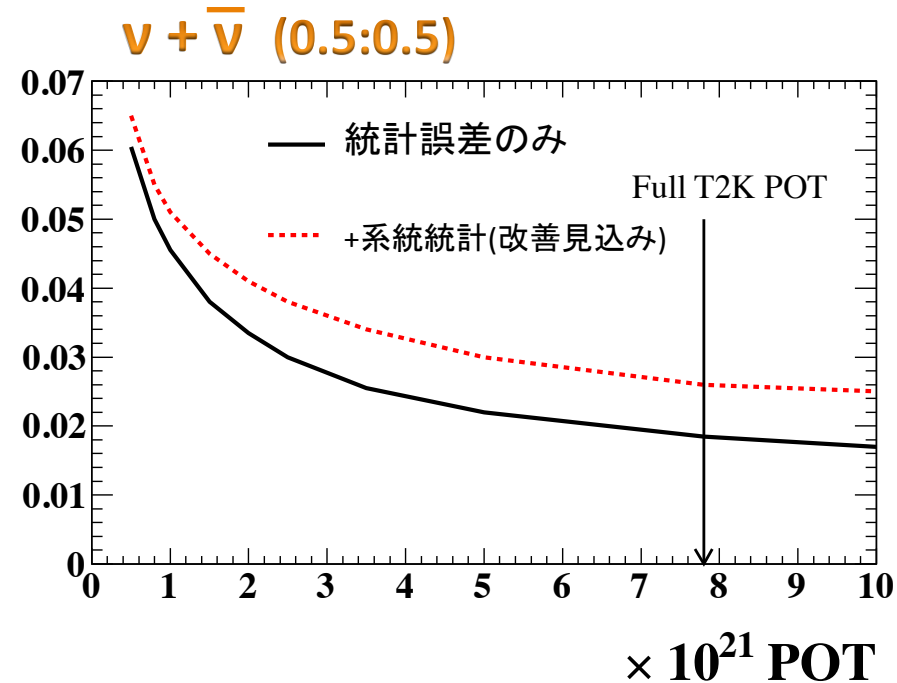
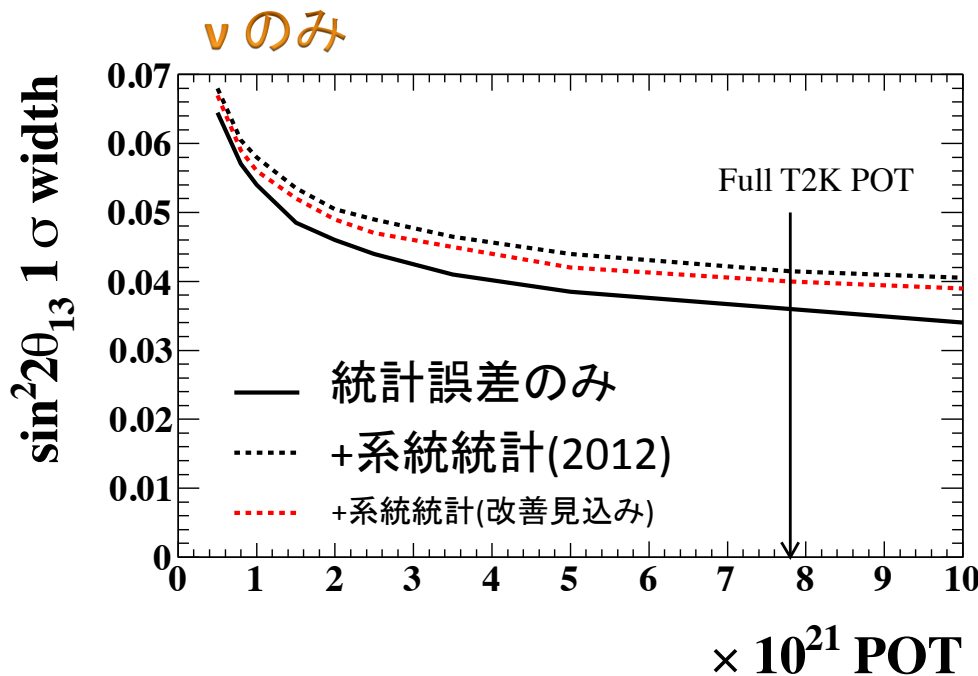
$\nu_e$ 出現+ $\nu_\mu$ 消失を合わせた3世代間解析、 $E^{\text{rec}}$ ビン

# 今後のT2K ~T2K $\theta_{13}$ 測定・反 $\nu$ ビーム~

## ● POTによる $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定精度

○  $0.64 \times 10^{21}$  から  $7.8 \times 10^{21}$  POT へ

True :  $\delta_{CP} = 0^\circ$   
 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$   
 $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$   
 Normal Hierarchy



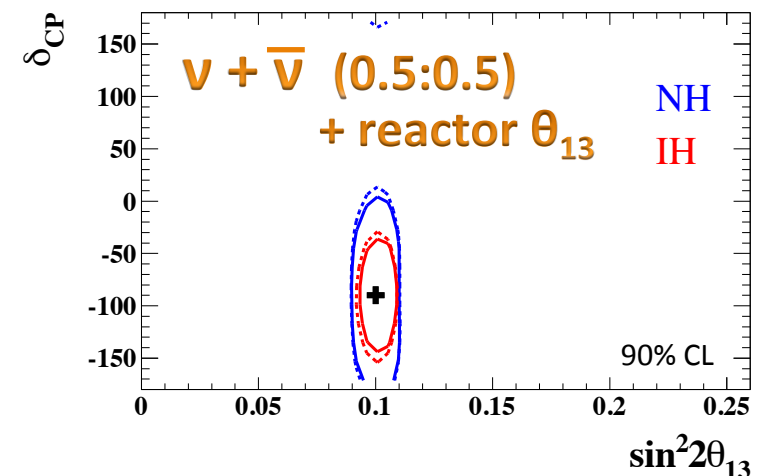
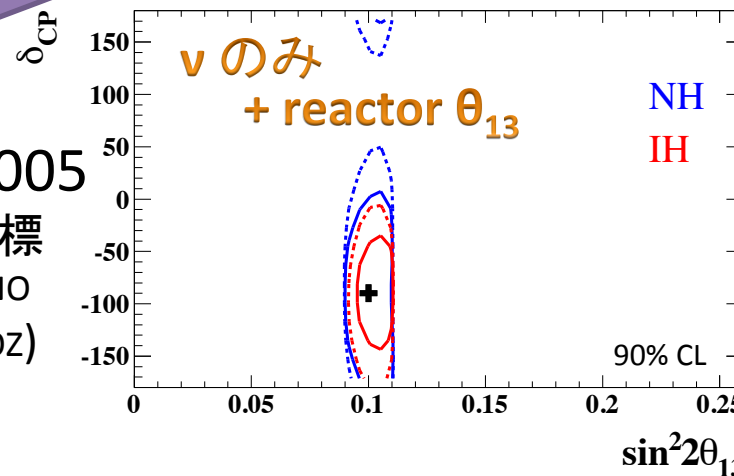
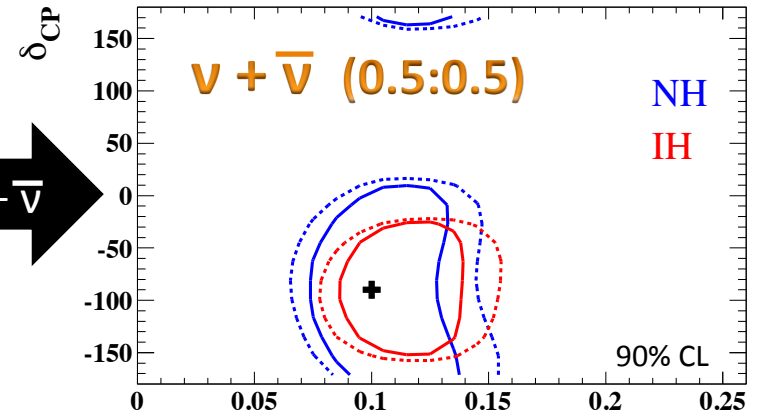
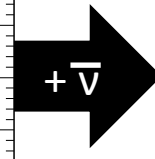
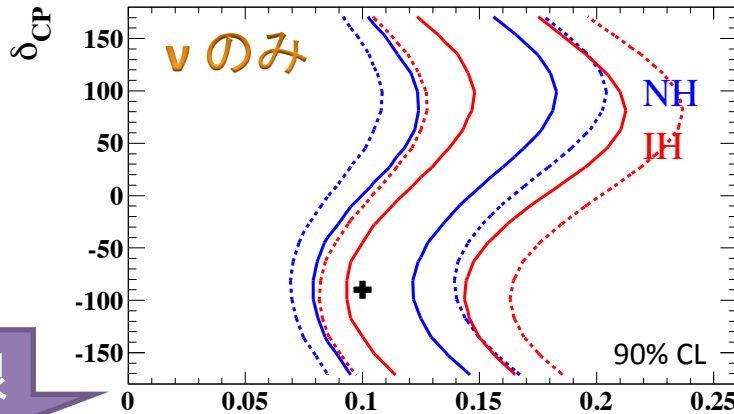
○  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  発見から、 $\theta_{13}$  精密測定へ

# 今後のT2K ~ T2K反ν・原子炉νとδ<sub>CP</sub>~

7.8x10<sup>21</sup>POT (T2K目標)  
感度見積もり

90% CL contour  
実線 (統計誤差のみ)  
点線 (+系統誤差2012)

True : δ<sub>CP</sub> = -90°  
sin<sup>2</sup>2θ<sub>13</sub> = 0.1  
Normal Hierarchy



θ<sub>13</sub>制限

sin<sup>2</sup>2θ<sub>13</sub>  
= 0.1 ± 0.005  
(原子炉ν目標  
Daya Bay + RENO  
+ Double CHOOZ)

● NOvAを合わせ、δ<sub>CP</sub>、θ<sub>23</sub>、質量階層性を制限できる可能性もある

# まとめ

- 2013年4月12日までの $6.4 \times 10^{20}$ potで $\nu_e$ 出現を解析
  - T2K最終目標の8%量
  - 前結果より系統誤差改善・高純度の $\nu_e$ 信号選出
    - ▶ 前置検出器ND280の見積もり改善・高統計で誤差低減
    - ▶ 後置検出器SKで、 $\pi^0$ の除去率改善、誤差低減
- $\sin^2 2\theta_{13} = 0.15, 0.116 - 0.189$  (68%CL),  $0.097 - 0.218$  (90%CL)(NH)
  - $\theta_{13}=0$  は  $7.5\sigma$  で排除
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ が発見され、 $\theta_{13}$ が精度良く測られる時代  
今後は・・・
  - $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の3世代間振動を同時解析
  - 反 $\nu_\mu$ ビームと合わせた $\delta_{CP}$ 探索
  - 原子炉実験・将来のNOvAとのグローバル解析

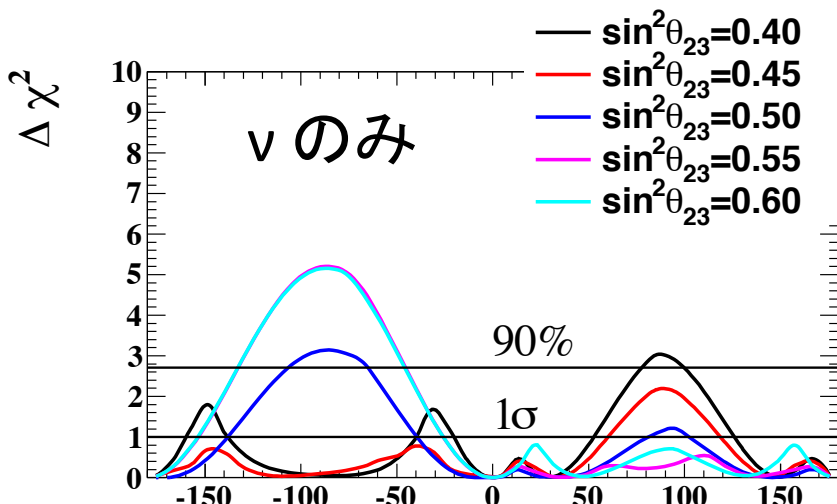




# 今後のT2K ~反νを加えたδ<sub>CP</sub>測定~

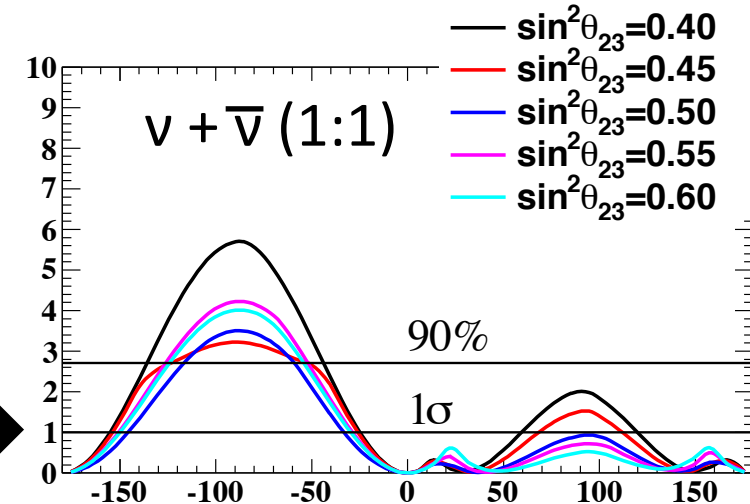
7.8x10<sup>21</sup>POT (T2K目標), δ<sub>CP</sub>=0, sin<sup>2</sup>2θ<sub>13</sub>=0.1 ± 0.005 (Reactor目標), Normal H

統計誤差のみ

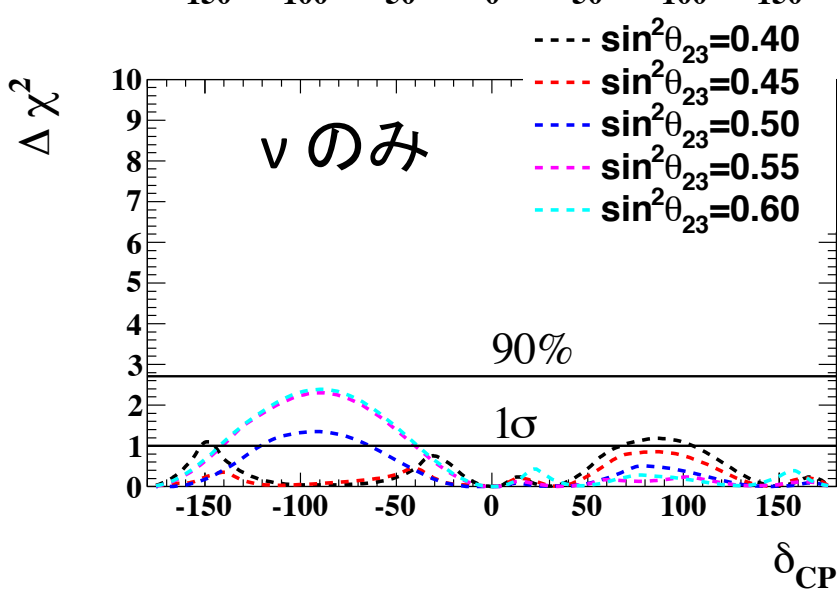


Δχ²

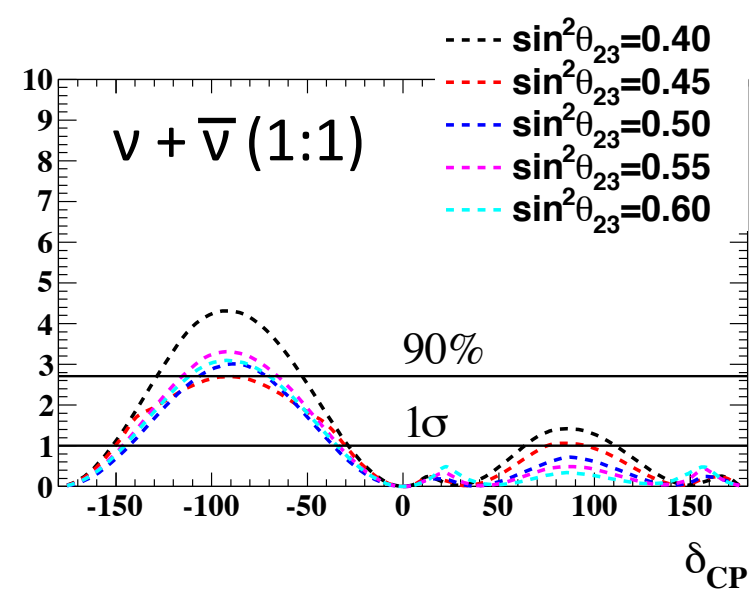
+ν̄



+系統誤差(2012)



Δχ²



δ<sub>CP</sub>

δ<sub>CP</sub>