

T2K 実験

電子ニュートリノ出現現象解析

西村 康宏

東京大学宇宙線研究所(神岡)



2012/2/22 (Wed)

- T2K (Tokai-to-Kamioka) 長期線ニュートリノ振動実験
- J-PARCからSuper-Kamiokande(SK)までの
295kmで ν_μ からの振動を測定
- 目的
 - ν_μ 消失現象の詳細測定
 - θ_{13} 測定 (ν_e 出現事象発見) ← 今回のお話
 - CPの破れ(δ)探索
- 2011年3月までのデータ(目標の2%量)を使用
- 主に後置検出器(Super-Kamiokande)での解析

- θ_{13} を測る方法

- ν_e 消失: 原子炉 ν_e を数km先(/ \sim MeV)で測る

- Double CHOOZ, Daya Bay, RENO

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) \cong 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2}{4E(\text{GeV})} L(\text{km}) \right)$$

- ν_e 出現: 加速器 ν_μ からの長基線(数百km/ \sim GeV)

- T2K, MINOS, NOvA

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \cong \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{23}^2}{E(\text{GeV})} L(\text{km}) \right)$$

- これまでの上限値はCHOOZ実験による

$$\sin^2 2\theta_{13} < 0.15 \text{ (90\%C.L.)}$$

2011年 θ_{13} 観測の経過報告

- 2011年6月15日 T2K が ν_e 出現の兆候発表
 - $0.03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28$ (90% C.L.)
 - 99.3%で $\theta_{13} \neq 0$
- 2011年6月29日 MINOS
 - $\sin^2 2\theta_{13} < 0.12$ (90% C.L.)
 - 89%で $\theta_{13} \neq 0$
- 2011年11月9日 DOUBLE CHOOZ
 - 93%で $\theta_{13} \neq 0$
- 有限の振動確率はT2K実験が今の段階で最も強く示唆

T2K SKでのニュートリノ事象

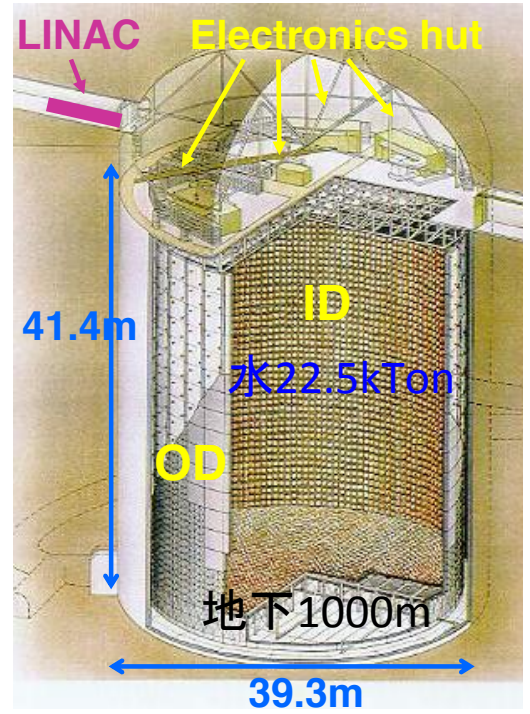
J-PARC

Super-Kamiokande

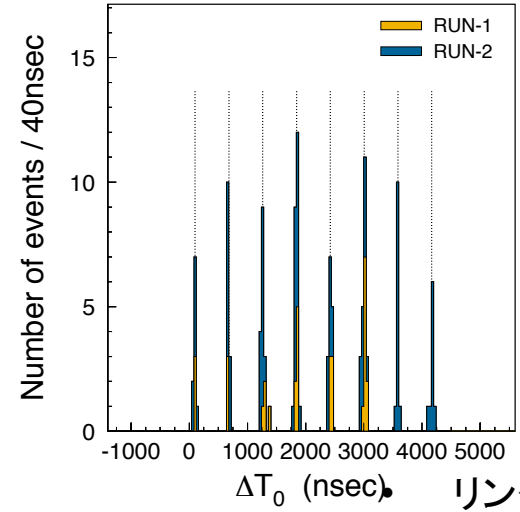
後置検出器

295km

前置検出器



ビームに同期したSKでの観測数



← 8バッチのビーム構造

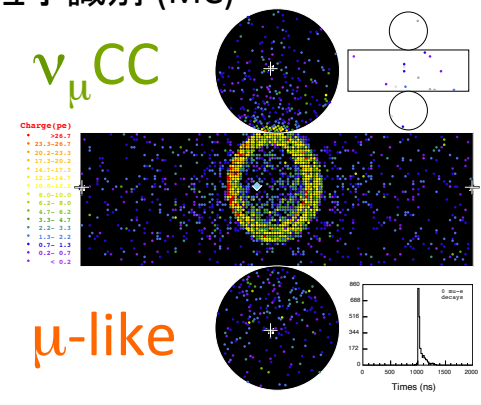
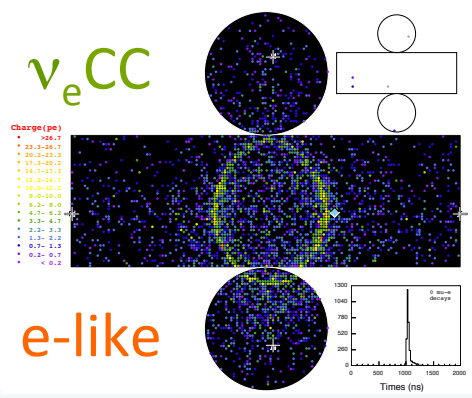


$\rho \rightarrow \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

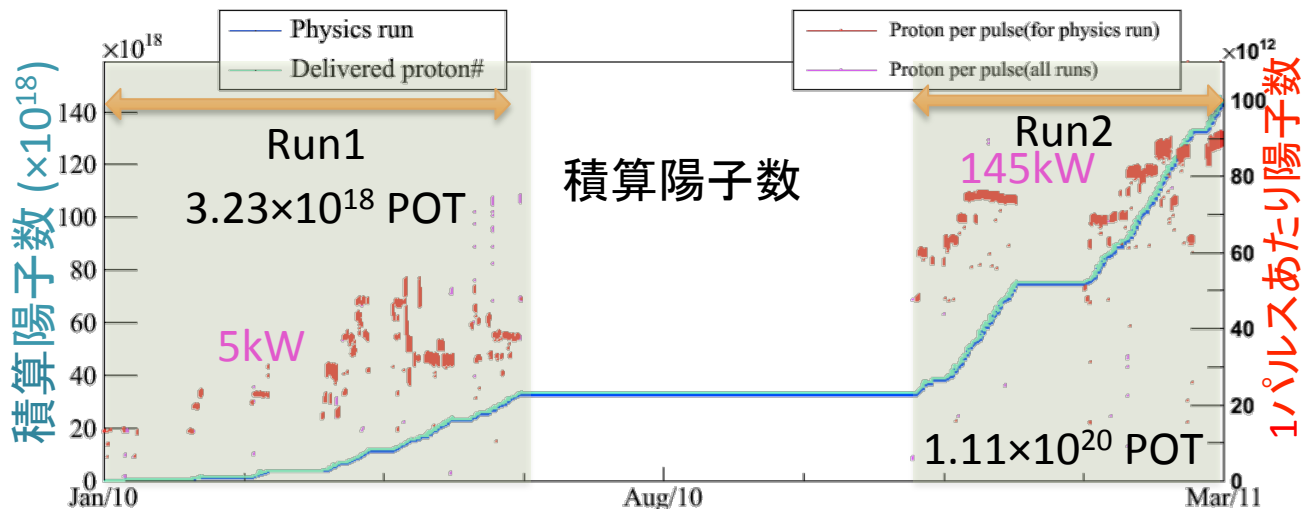
- T2Kと同時に大気ニュートリノデータも常時取得
- GPS時間同期でT2Kデータを選出

- 20inch-PMT 約11000本でチェレンコフリング検出
- 光量・粒子識別・リング数でイベント再構築
- 99%で粒子識別

リング形状により粒子識別 (MC)

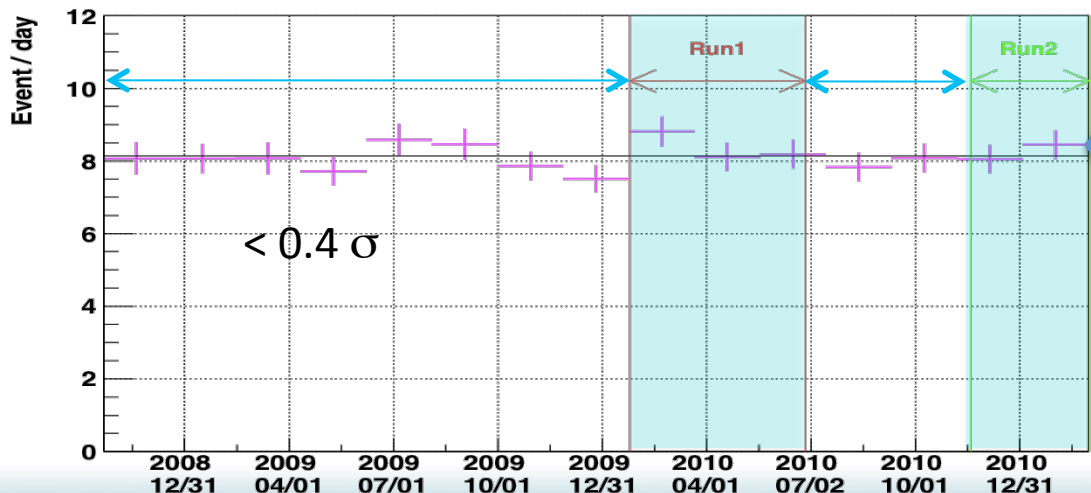


- J-PARC側



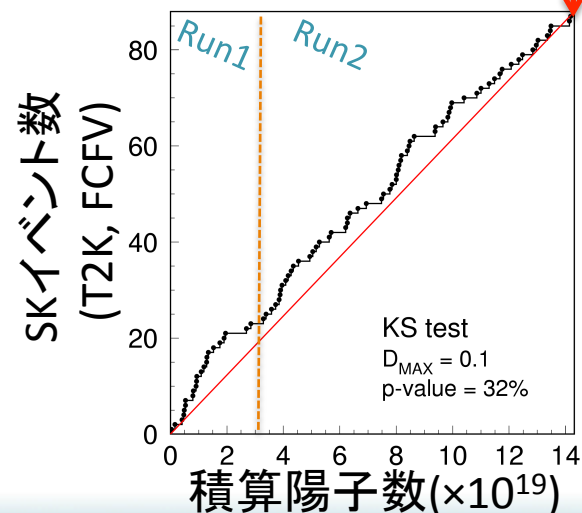
- Super-K側

T2Kと並行取得されている
大気ニュートリノデータで見たSK安定性



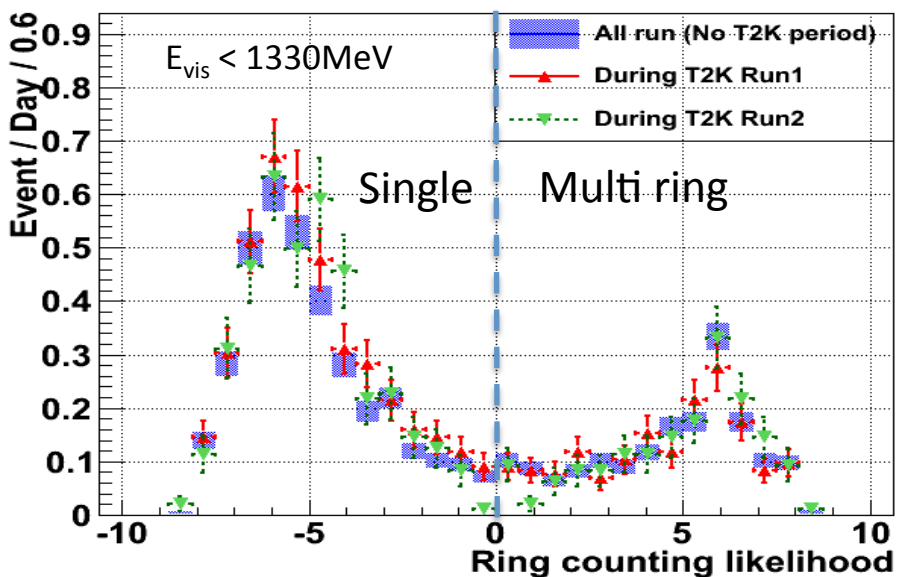
Total : 1.43 × 10²⁰ - 88

T2Kイベントで見たSK安定性

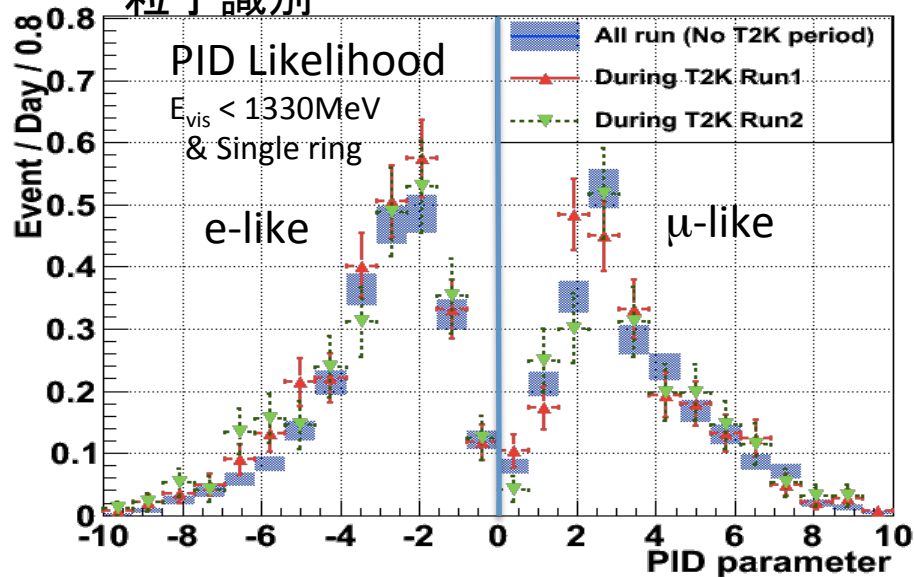


- 大気ニュートリノデータで性能・安定性を実証
 - T2Kデータと並行してSKで常時取得される独立したデータ

リング判別に用いる Likelihood



粒子識別



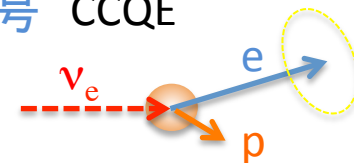
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 信号事象

- ν_e の荷電カレント(CC)準弾性(QE)散乱

- $\nu_e + n \rightarrow e + p$
 - ▶ 単一電子生成

単リング
& e 識別

信号 CCQE



バックグラウンド

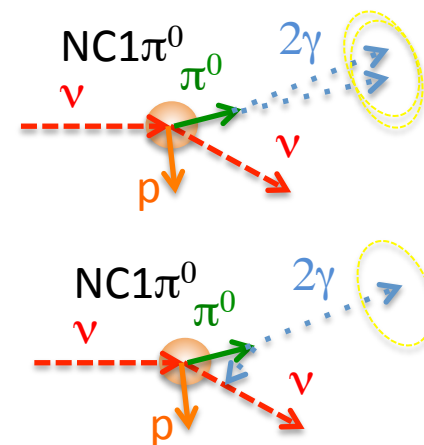
- ビーム中の微量 ν_e

- $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_\mu + \nu_e$

- ν_μ の中性カレント(NC)単一 π^0 生成

- $\nu_\mu + n(p) \rightarrow \nu_\mu + n(p) + \pi^0$
 - ▶ 2γ のパイルアップ
 - ▶ γ の1つだけが見えた場合

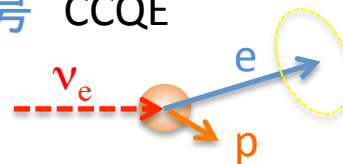
Background



- Super-Kで単リング & e-like事象を探す

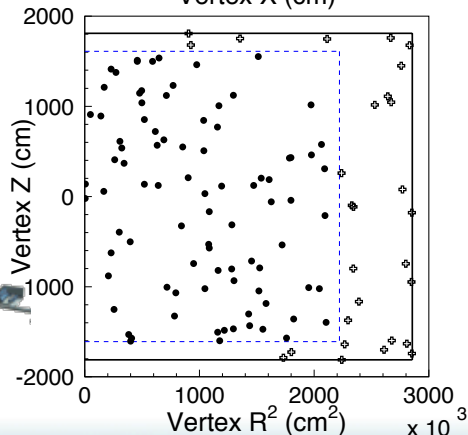
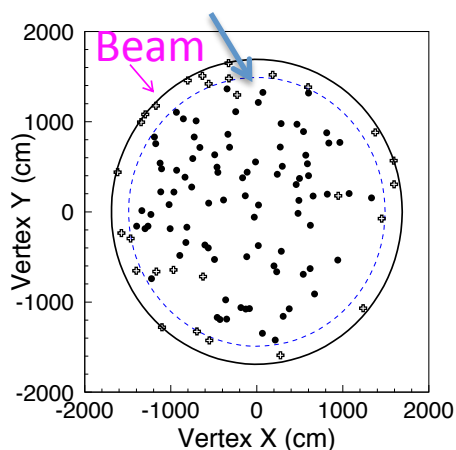
- SK内で ν_e 起源の事象を効率良く集めるカット

信号 CCQE

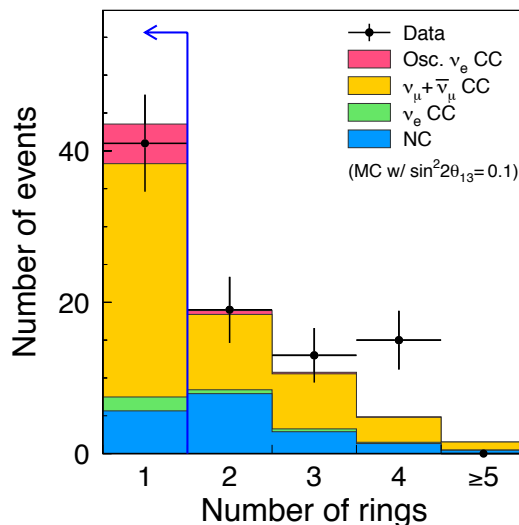


単リング
& e 識別

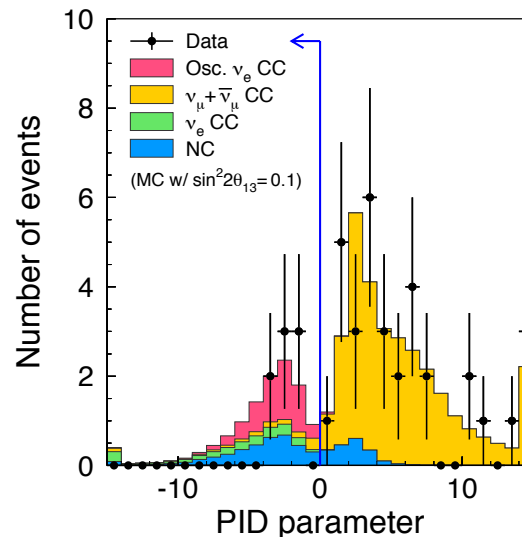
- FV: 壁から2m以上離れた事象



- 1リング

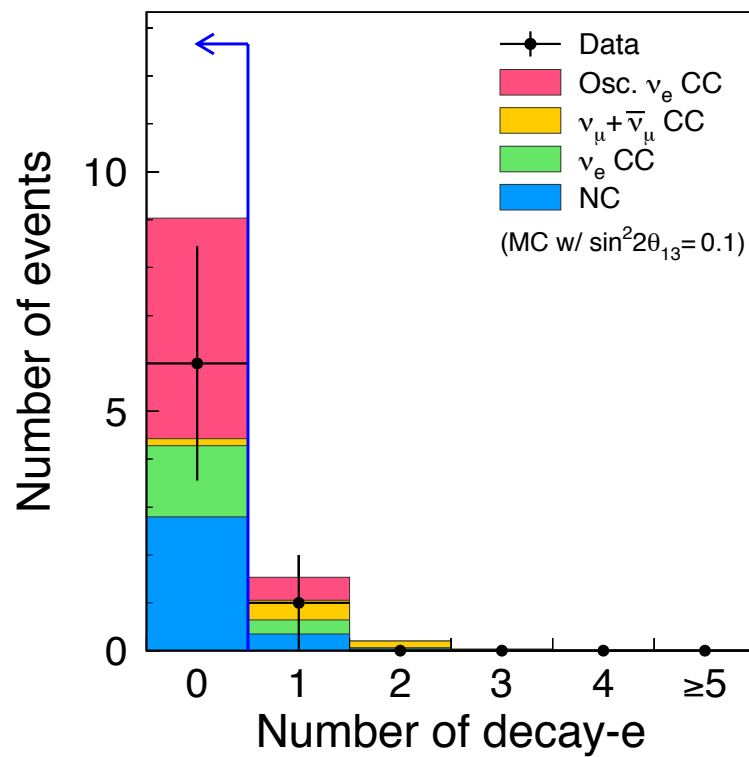
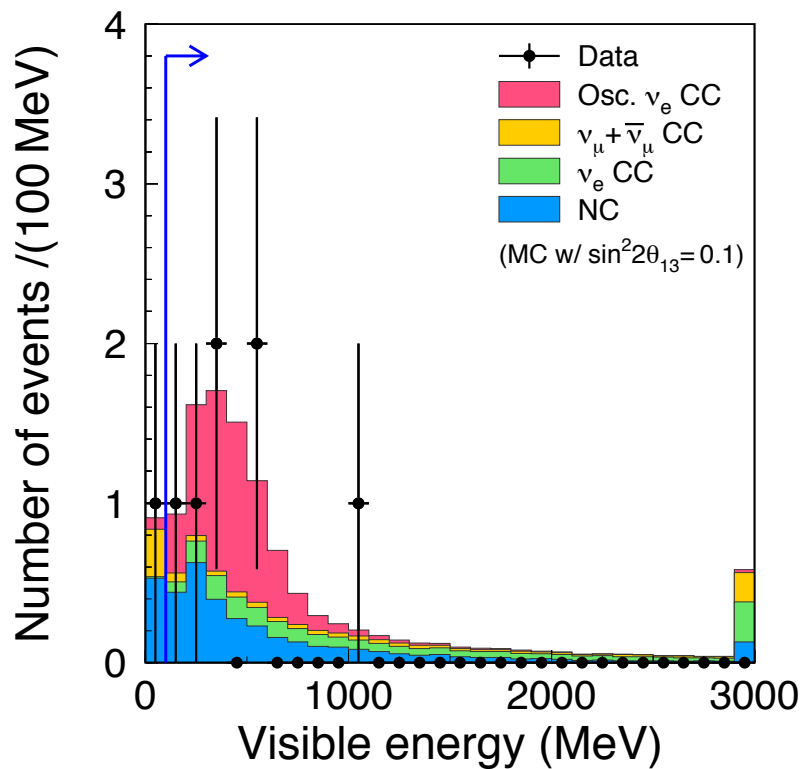


- e-likeリング



- さらにバックグラウンドを落とす

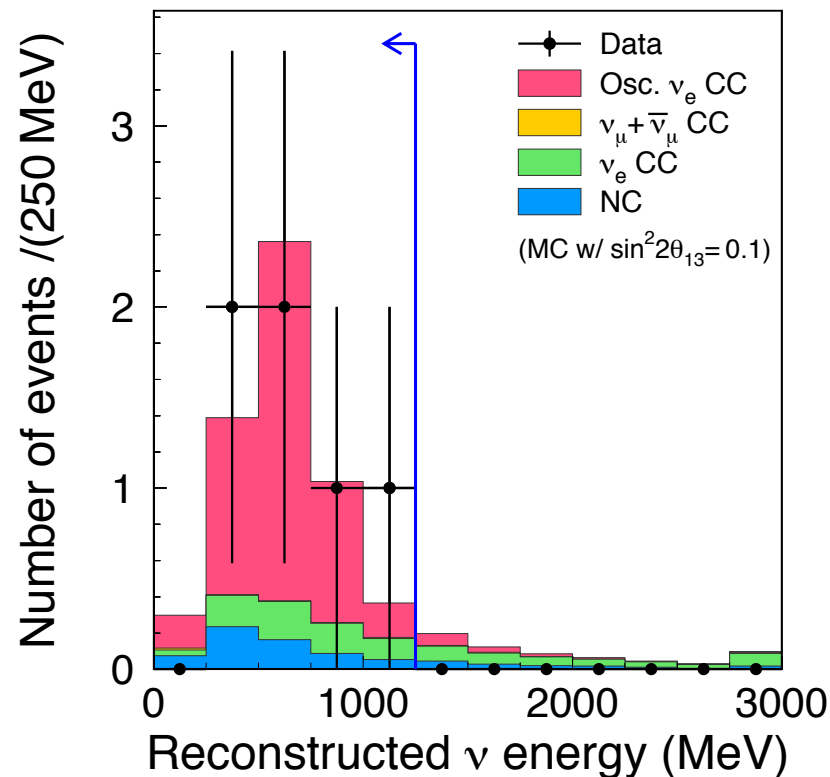
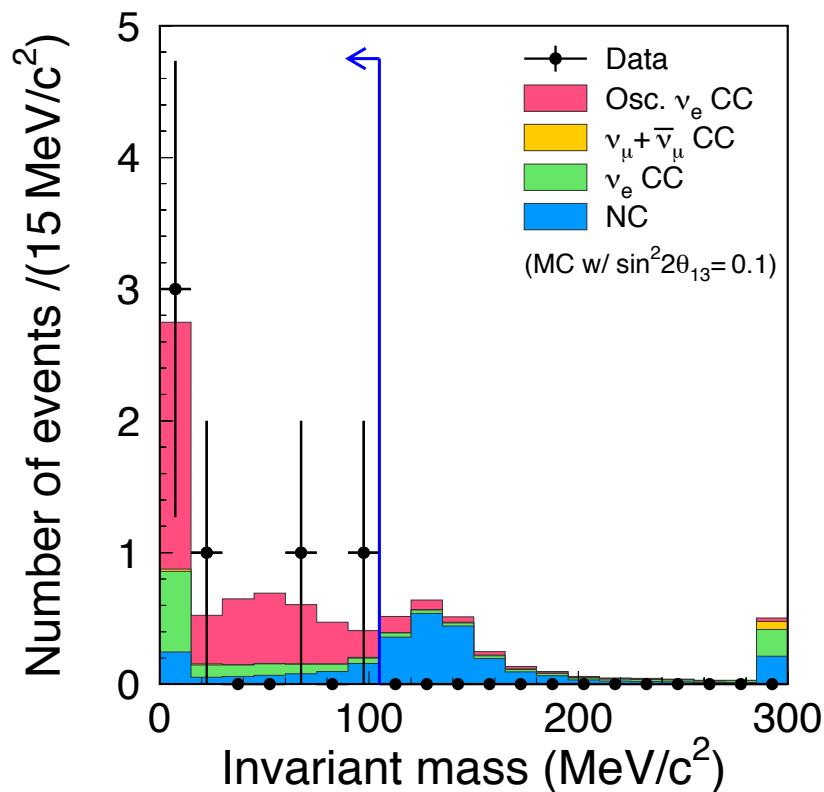
- Visible energy $> 100\text{MeV}$
 - 光量から求めたエネルギー
- NC事象、 μ 崩壊を排除
- 二次生成の崩壊 $e(\mu \rightarrow e\nu\nu)$ 等) = 0
 - e出現までの時間差ピークから
- リングが見えない(チェレンコフ閾値以下の) π や μ を排除



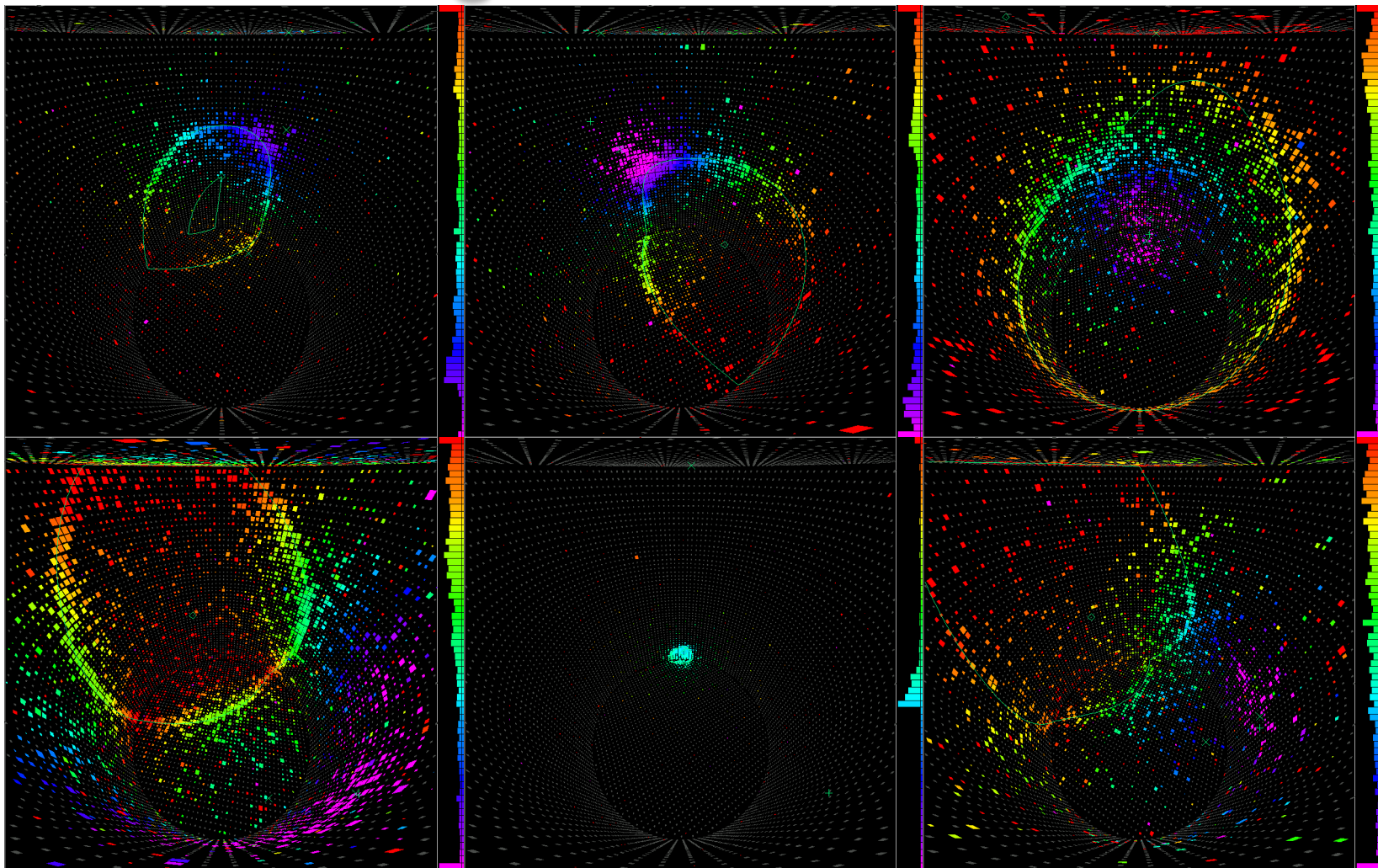
ν_e 事象候補の選別

- 不変質量 $< 105 \text{ MeV}/c^2$
 - 2γ を仮定した再構築
- NC π^0 バックグラウンドを排除

- エネルギー $E_\nu < 1250 \text{ MeV}$
 - CC QE 散乱を仮定し再構築
- ビーム中 ν_e (K崩壊から) の高エネルギーバックグラウンドを排除



Super-K内での ν_e 起因らしい
チエレンコフリング光量分布

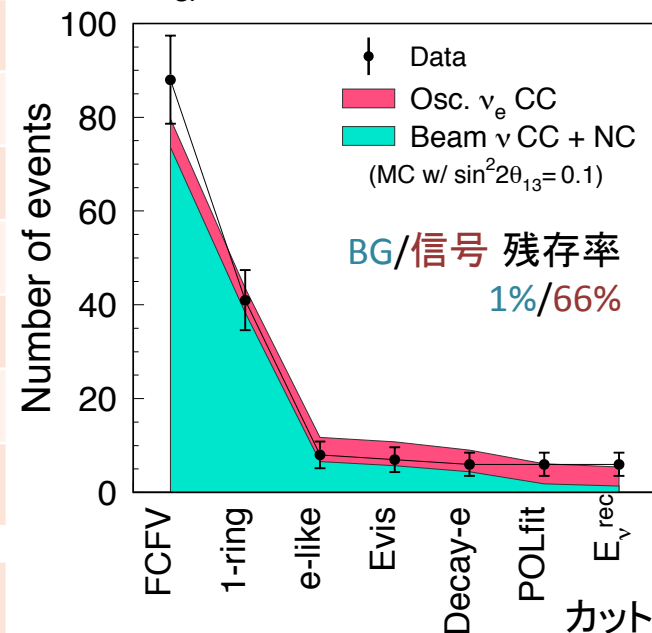


- Super-K で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 候補を 6 事象観測

事象選別ごとの期待値

カット／期待値 ($\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$)	Data	MCバックグラウンド期待値				$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 期待値
		Total	ν_μ CC	ν_e CC	NC	
Interaction in FV	-	141.3	67.2	3.1	71.0	6.2
FC FV	88	73.6	52.4	2.9	18.3	6.0
Single-ring	41	38.3	30.8	1.8	5.7	5.2
e-like	8	6.6	1.0	1.8	3.7	5.2
$E_{vis} > 100$ MeV	7	5.7	0.7	1.8	3.2	5.1
No decay-e	6	4.4	0.1	1.5	2.8	4.6
$M_{inv} < 105$ MeV/ c^2	6	1.9	0.04	1.1	0.8	4.2
$E_\nu^{rec} < 1250$ MeV	6	1.3	0.03	0.7	0.6	4.1
残存率	-	1%	<0.1%	23%	1%	66%

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1,$
 $|\Delta m_{23}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2,$
 $\sin^2 2\theta_{23} = 1,$
 $\delta_{CP} = 0$



↑振動ありの場合 ($\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$) $5.4 \pm 1.0(\text{syst.})$ イベント
 ↓振動なしの場合 ($\sin^2 2\theta_{13} = 0$) $1.5 \pm 0.3(\text{syst.})$ イベント

観測数 6

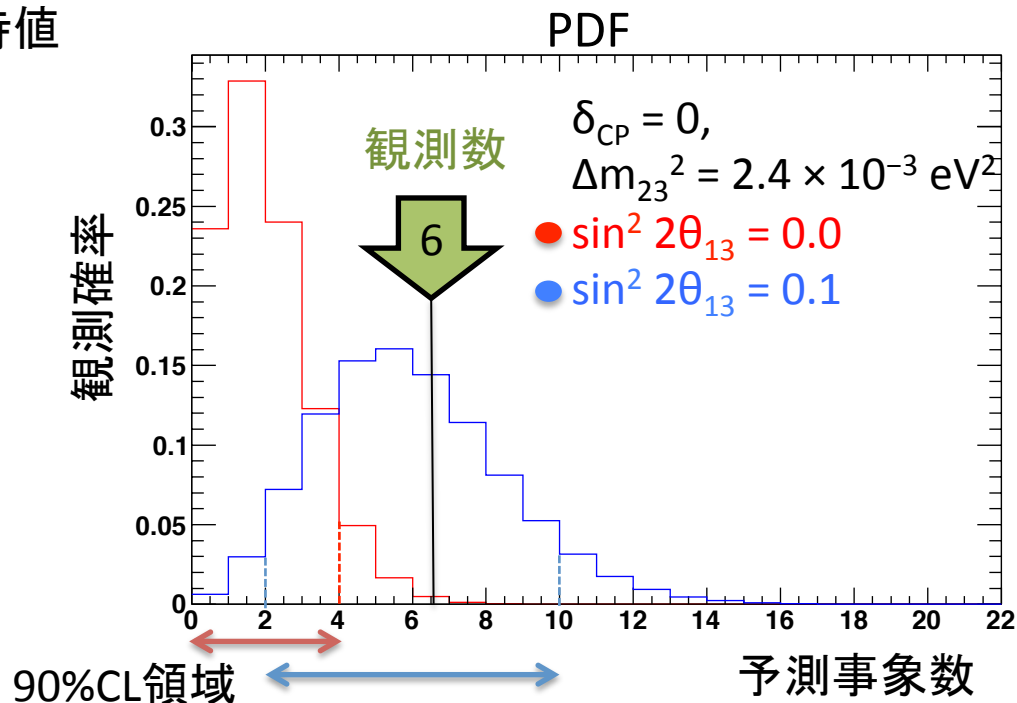
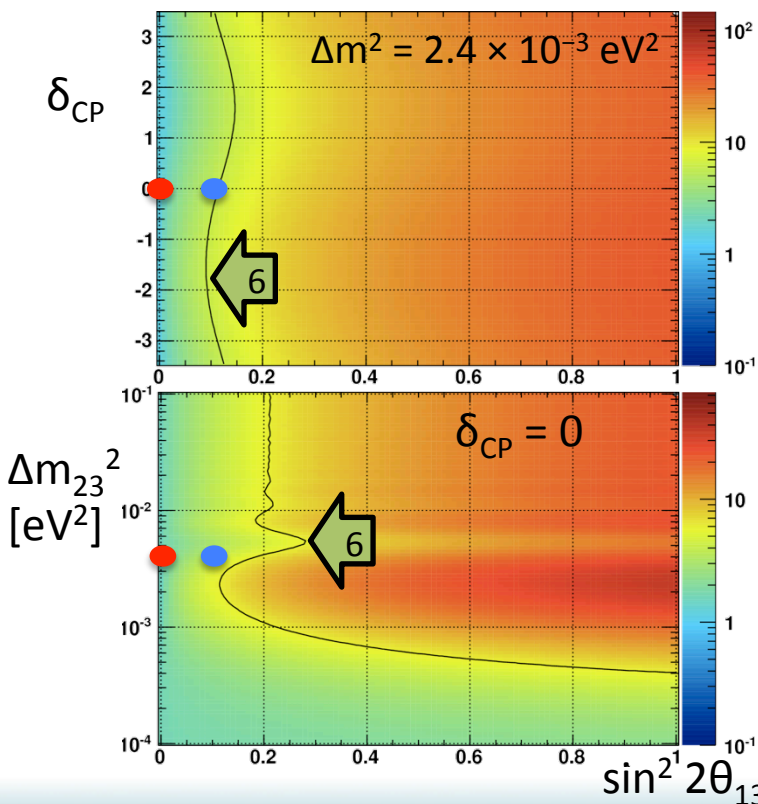
BG ($\sin^2 2\theta_{13} = 0$)	1.4	0.03	0.8	0.6	0.09
--	------------	------	-----	-----	------

事象数90%信頼度(CL)範囲

Toy MC

- PDF : ある振動パラメータで、全T2K系統誤差を考慮した ν_e 観測事象数(信号+BG)の確率密度分布(PDF)を構築
- Feldman-Cousins手法 : PDF の 90% C.L. 領域を決定

各振動パラメータでの観測事象数期待値



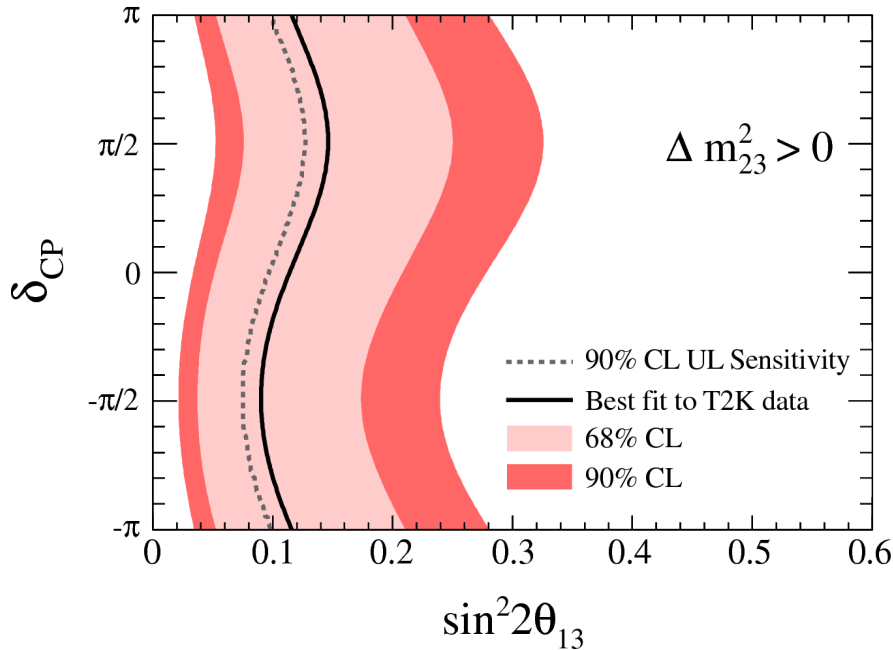
Toy MCにより6事象が90%領域に収まる
振動パラメータ領域を決定

θ_{13} 測定結果 (90%CL)

- 3種のニュートリノ質量順によって2つの解

$$|\Delta m_{23}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, \quad \sin^2 2\theta_{23} = 1$$

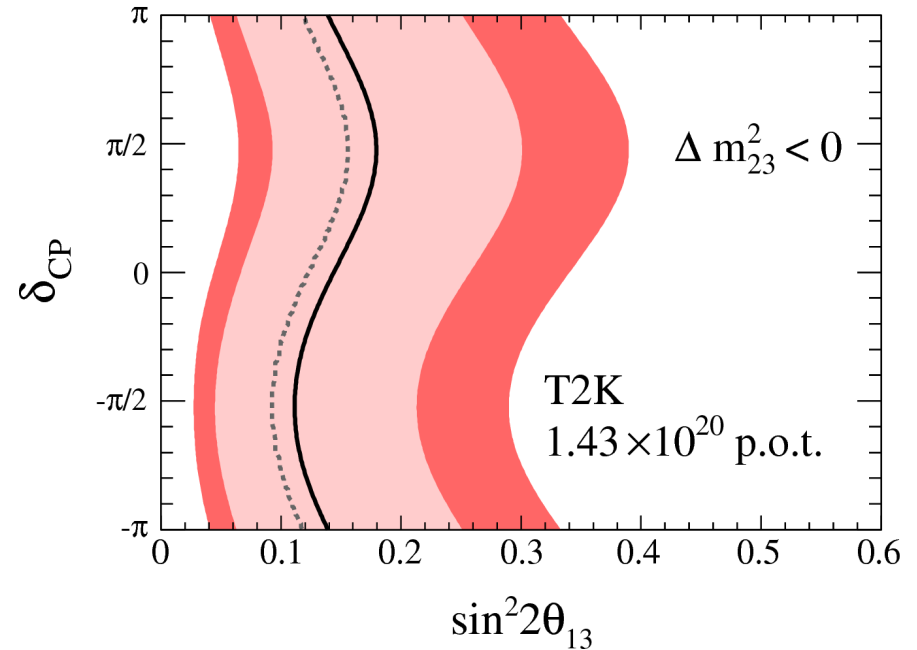
正常階層 ($m_3 \gg m_1, m_2$)



$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.11$$

$$0.03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28$$

逆階層 ($m_3 \ll m_1, m_2$)

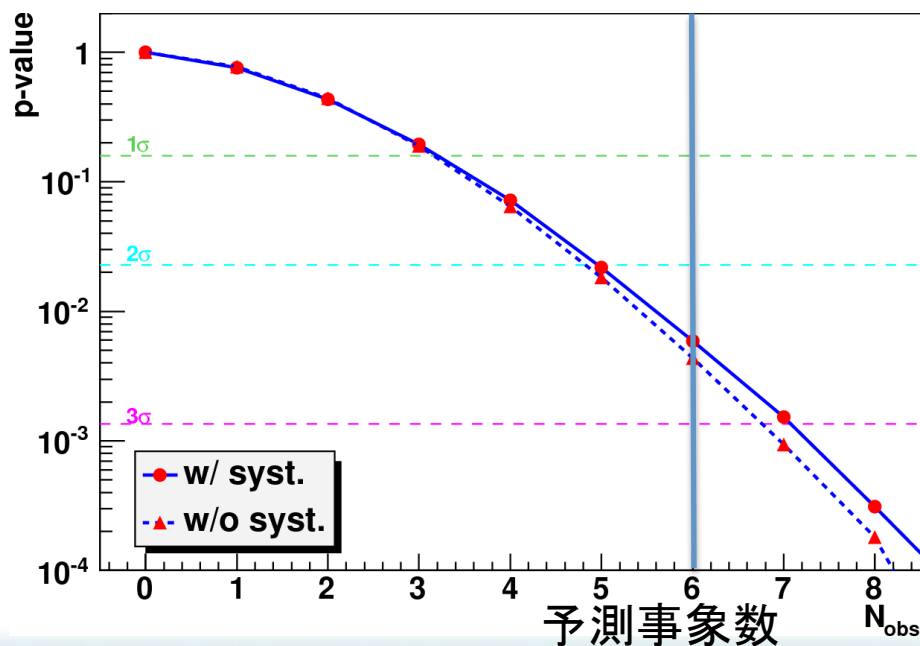
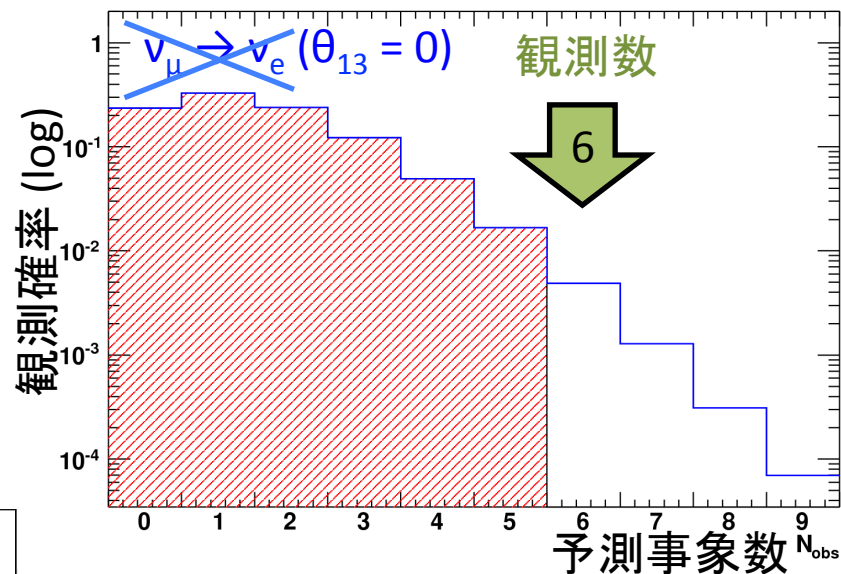


$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.14$$

$$0.04 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.34$$

- θ_{13} 振動無し予測事象数分布からの観測数=6の有意性

$$\begin{aligned} \sin^2 2\theta_{13} &= 0, \\ |\Delta m_{23}^2| &= 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, \\ \sin^2 2\theta_{23} &= 1, \\ \delta_{CP} &= 0 \end{aligned}$$



- 99.4%, 2.5σ で θ_{13} は non-zero
- 観測された6事象は $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ の兆候

- 2011年3月11日から震災を受け停止
- 2011年中にJ-PARCの復旧作業がほぼ終了



- 2011年末にビーム再開・試験ラン
- 2012年3月からラン再開予定
- 系統誤差・振動解析の見直し・改善を進行中

- T2KのRUN-1(Jan. '10 – June '10)+RUN-2(Nov. '10 – Mar. '11)= 1.43×10^{20} POTからの結果を報告
- ν_e 出現事象の候補を6事象観測した
 - θ_{13} 振動なしの期待値は1.5事象
- 目標の2%量データにより、 2.5σ で $\theta_{13} > 0$ を示唆
 - 統計量が感度を抑えている
- 3月からデータ取得を本格的に再開
- 新たなデータ、系統誤差の改善、 ν 振動解析の改良により、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動発見を目指す