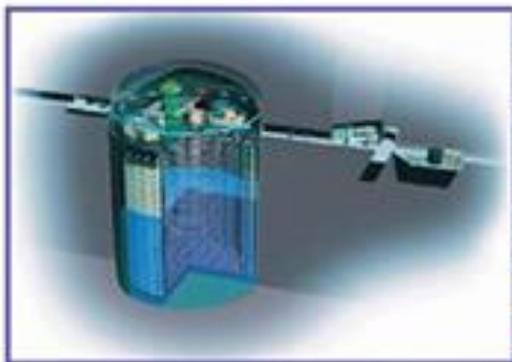


T2K実験によるニュートリノセクターのCPV測定

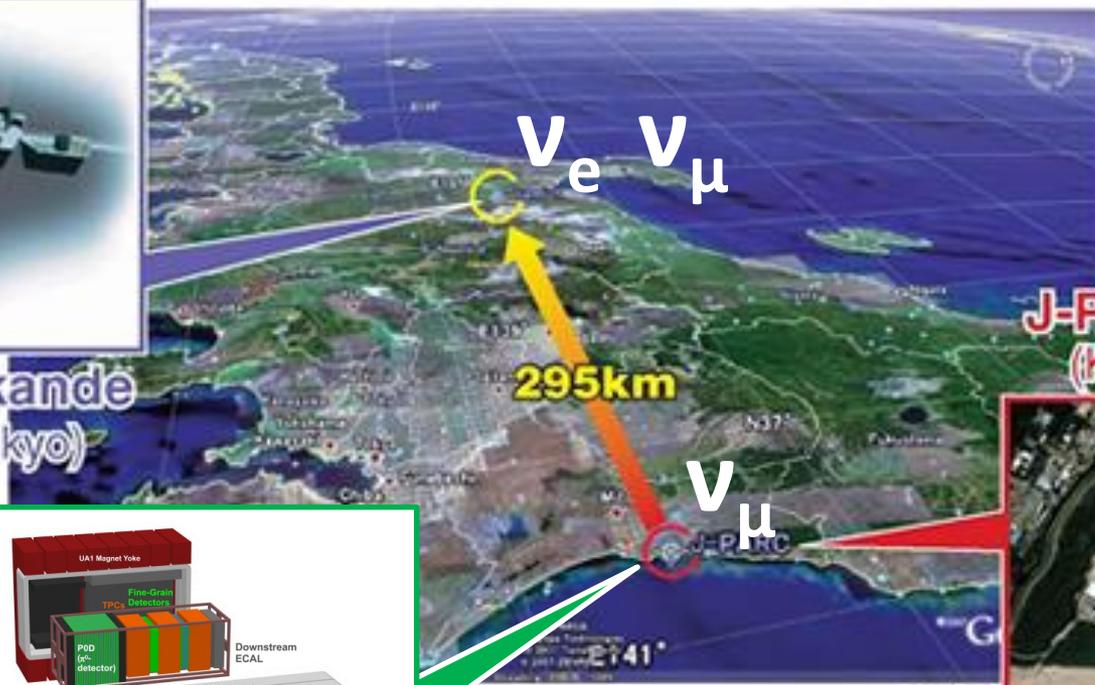
KEK

古賀太一郎

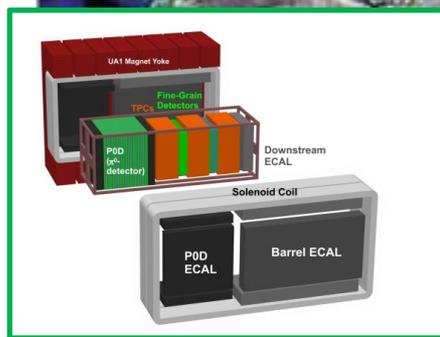
T2K(Tokai to Kamioka)実験



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



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



前置検出器(ND280)



-T2K:長基線加速器ニュートリノ振動実験

-4つのニュートリノ振動確率を測定: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$

-J-PARCで大強度 ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$)ビームを作る

-ND280で振動前、スーパーカミオカンデで振動後のニュートリノを観測

レプトンセクターにおけるフレーバー混合の解明

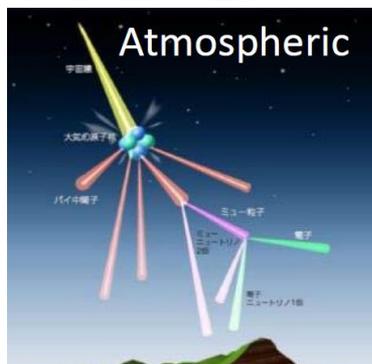
-フレーバーと質量の固有状態の混合

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \begin{matrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{matrix}$$

質量階層性
 $m_1 > m_3$ or $m_3 > m_1$?

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +c_{23} & +s_{23} \\ 0 & -s_{23} & +c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{13} & 0 & +s_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta} & 0 & +c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{12} & +s_{12} & 0 \\ -s_{12} & +c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad s_{ij} = \sin\theta_{ij}, c_{ij} = \cos\theta_{ij}$$

θ_{23}



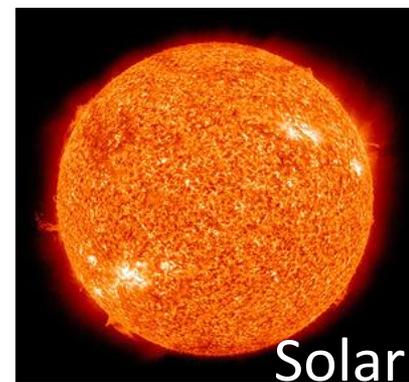
θ_{23}, θ_{13}



θ_{12}, θ_{13}



θ_{12}, θ_{13}



現在の測定状況

$$\begin{cases} -\theta_{12} = 33^\circ \pm 1^\circ \\ -\theta_{23} = 46^\circ \pm 3^\circ \\ -\theta_{13} = 8.9^\circ \pm 0.4^\circ \\ -\delta_{CP} \neq 0 \text{ か不明} \end{cases}$$

← クォークに比べて大きな混合
測定精度も悪い
← CPの破れ 測りたい

T2K ニュートリノ振動確率

L: 飛行距離 295km

E: ニュートリノエネルギー ~600MeV

$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \nu_\mu$: θ_{23} , Δm_{32}^2 を測定

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \propto \sin^2 2\theta_{23} \times \sin^2(\Delta m_{32}^2 L/4E) + \dots \quad \sim 100\%$$

振幅

周期

$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \nu_e$: θ_{13} , δ_{CP} , 質量階層性を測定

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \propto \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \times \sin^2(\Delta m_{32}^2 L/4E) \quad \sim 5\%$$

振幅

$$\pm \dots \times \sin \delta_{CP}$$

~1.3%

振幅 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ で符号が逆

$$+ \text{matter effect term} + \dots$$

~0.5%

振幅 質量階層性で大きさが変わる

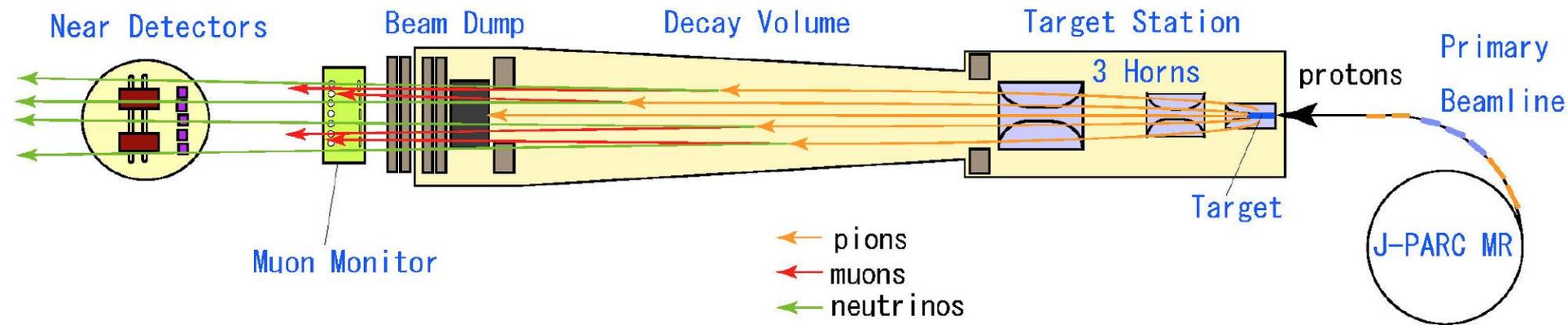
-T2Kの目標:

-レプトンにおけるCPの破れの観測 ($\delta_{CP} \neq 0$ を 3σ)

-質量階層性の決定

$-\theta_{23}, \theta_{13}, |\Delta m_{32}^2| (= |m_3^2 - m_2^2|)$ のさらなる精密測定

J-PARC ニュートリノビームライン



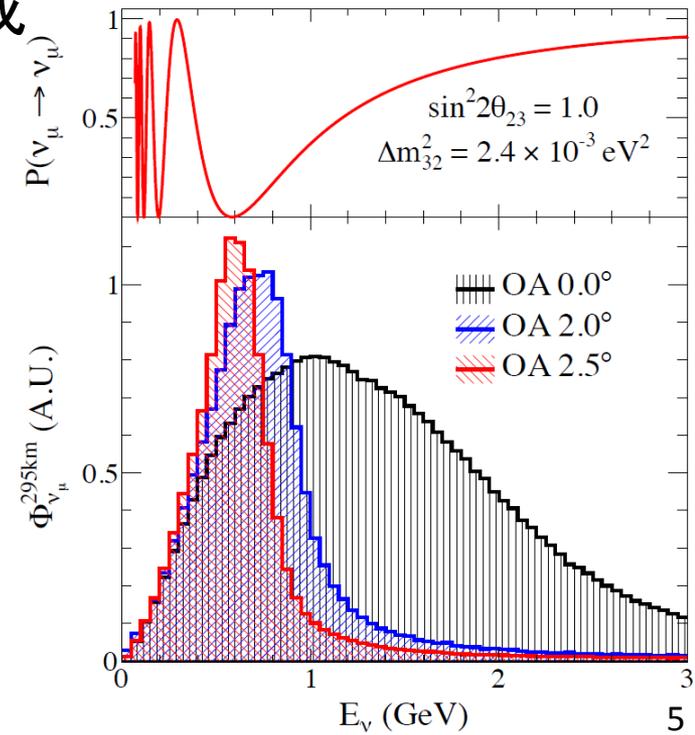
-30 GeV 陽子を炭素標的に照射、 $\pi^+(\pi^-)$ を生成

-電磁ホーンで磁場を生成 π^+ を前方に収束
 - ν_μ ビームの場合は逆電流を流して π^- 収束

-崩壊 $\pi^+ \rightarrow \mu + \nu_\mu$ でビーム生成

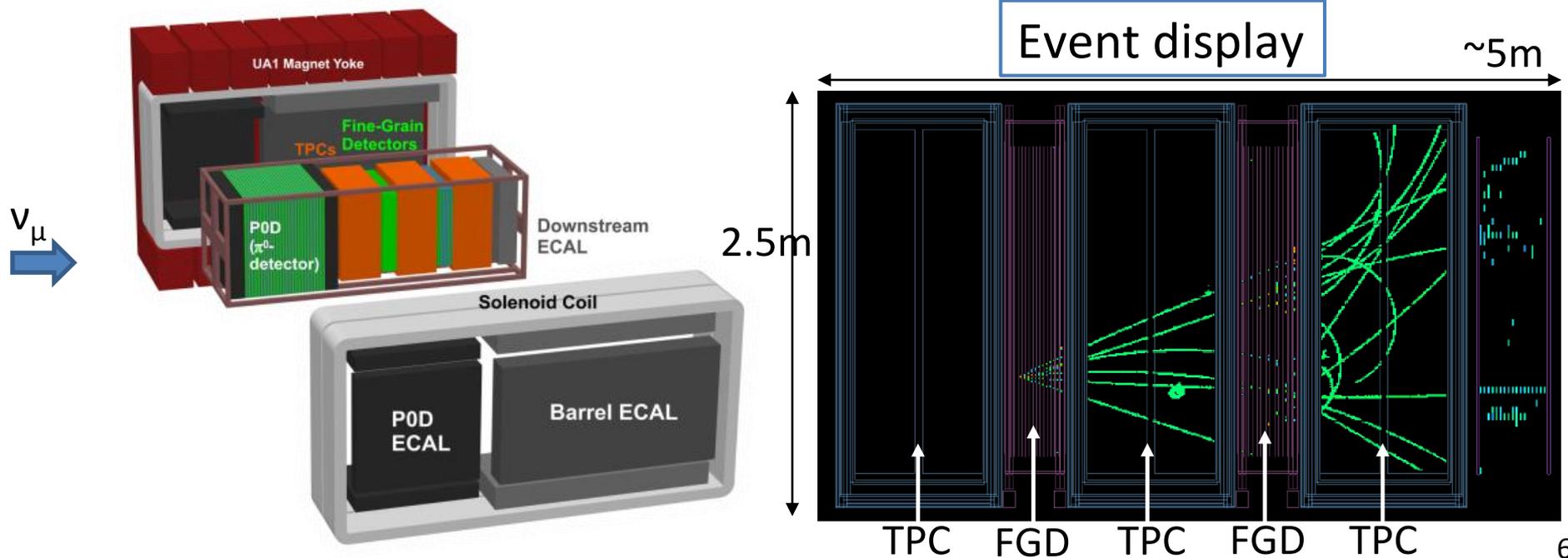
-Off-axis法:

- ビーム軸を 2.5° 検出器からずらす
- Peak 600 MeV (ニュートリノ振動確率最大)の鋭いスペクトル



前置検出器(ND280)

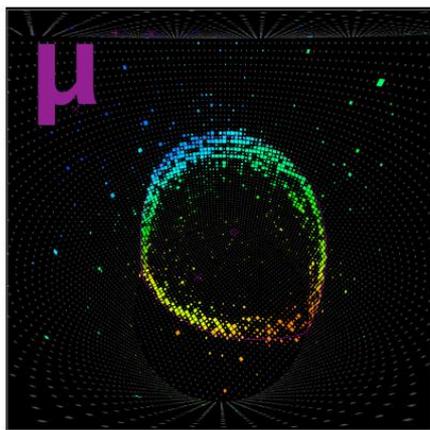
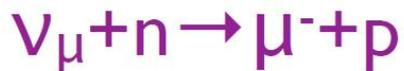
- 振動前の ν_μ を測定する複合検出器 ビーム下流280m、 2.5° off-axis
- 1.5Tソレノイド磁石
- プラスチックシンチレータ検出器(FGD)でニュートリノを反応させる
- TPCで2次粒子の電荷・PID(μ, π, p, e)・運動量(<10%)を測定
- 荷電カレント反応 $\nu_\mu + n \rightarrow \mu + p$ で生成される μ より ν_μ を識別



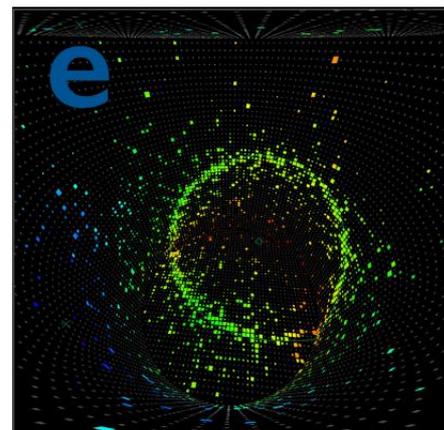
後置検出器(スーパーカミオカンデ,SK)

-50kton 水チェレンコフ検出器

-リングパターンで μ と e 識別(~99%)



signal for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$



signal for $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$

-レプトンのkinematicsで E_{ν} を測る(2体反応)

$$E_{\nu} = \frac{m_N E_{\mu} - m_{\mu}^2 / 2}{m_N - E_{\mu} + p_{\mu} \cos \theta_{\mu}}$$

ビームデータ取得状況

-取得統計数 (2017末まで)

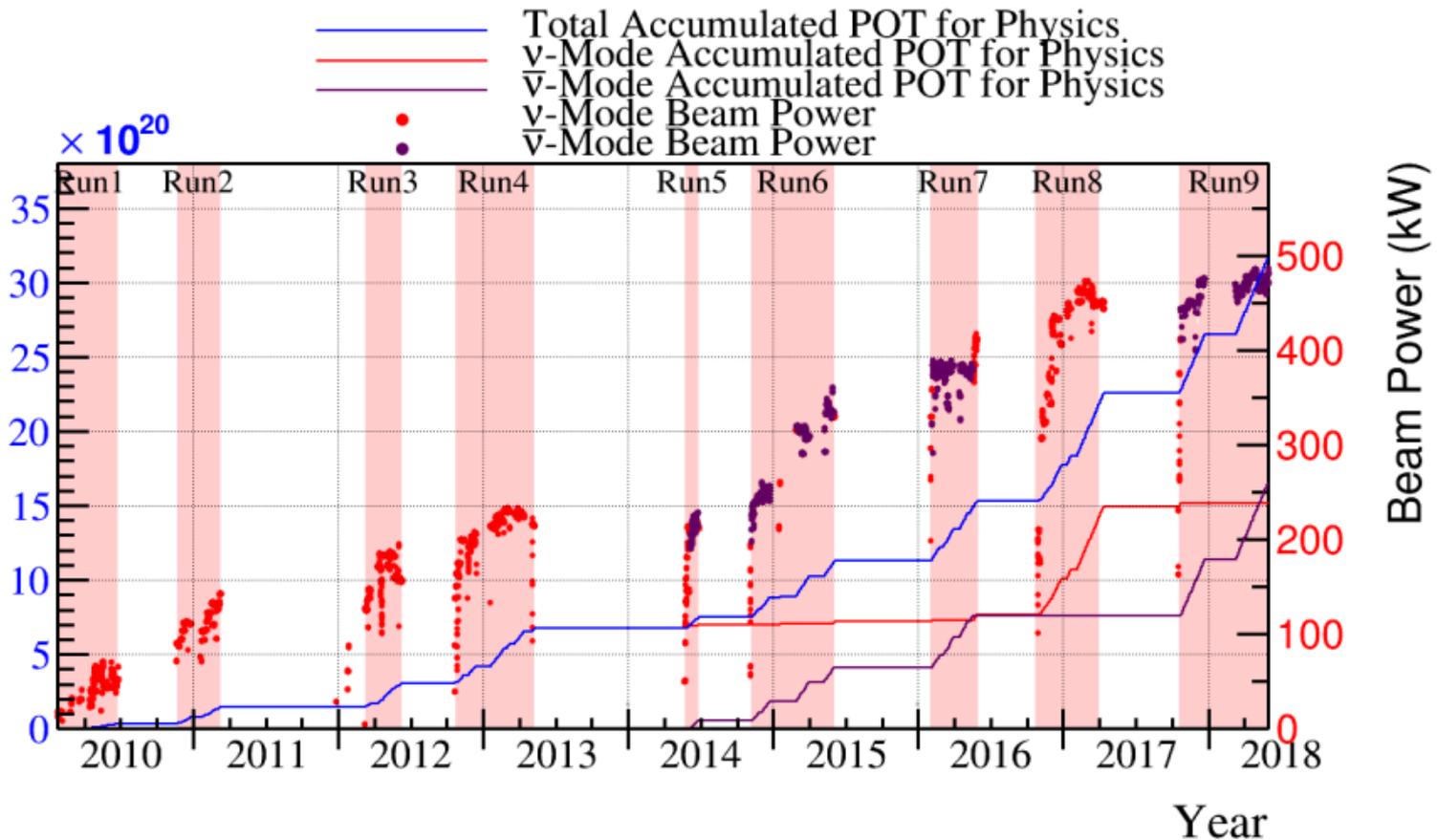
- ν_{μ} beam: $14.94(7.00 + 7.94) \times 10^{20}$ Proton on target (POT)

- $\bar{\nu}_{\mu}$ beam: $11.24(7.47 + 3.77) \times 10^{20}$ POT

2016/11-2018/12

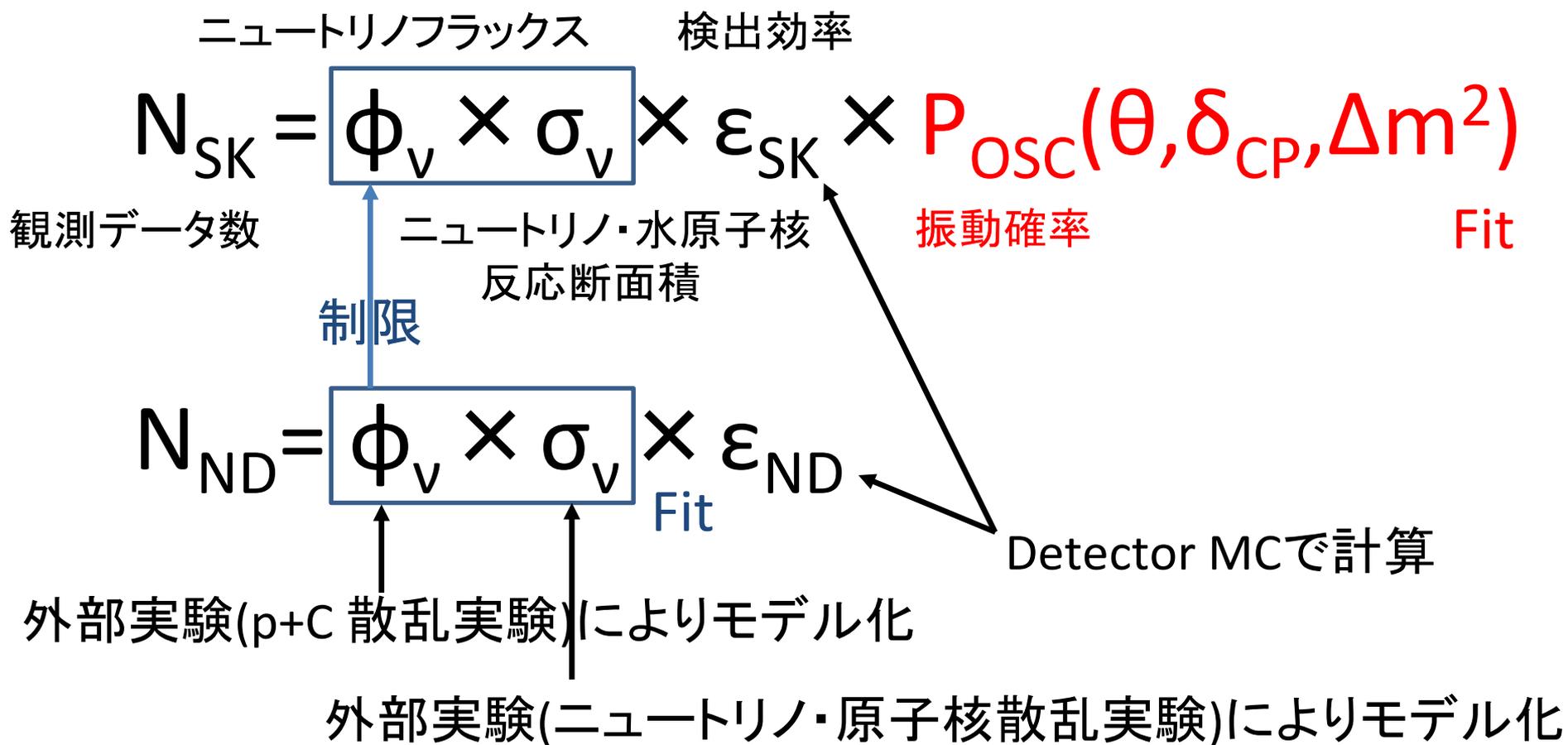
ここ2年で統計~2倍!!

-T2K目標(78×10^{20})の33%



解析手法

- SKで観測された ν_μ 、 ν_e 、 $\bar{\nu}_\mu$ 、 $\bar{\nu}_e$ 事象をフィットして振動パラメータを求める
- ニュートリノフラックスとニュートリノ・原子核反応断面積を前置検出器で測定する (測定なしだとそれぞれ~10%の不定性)



解析手法(ND280)

-ニュートリノ・原子核反応にはいくつかの反応モードがある

-CCQE: $\nu_\mu + n \rightarrow \mu + p$ (SKのシグナル)

-CC1 π : $\nu_\mu + N \rightarrow \mu + N' + \pi$ (SKのBG)

-CCDIS: $\nu_\mu + N \rightarrow \mu + N' + m\pi$ (SKのBG)

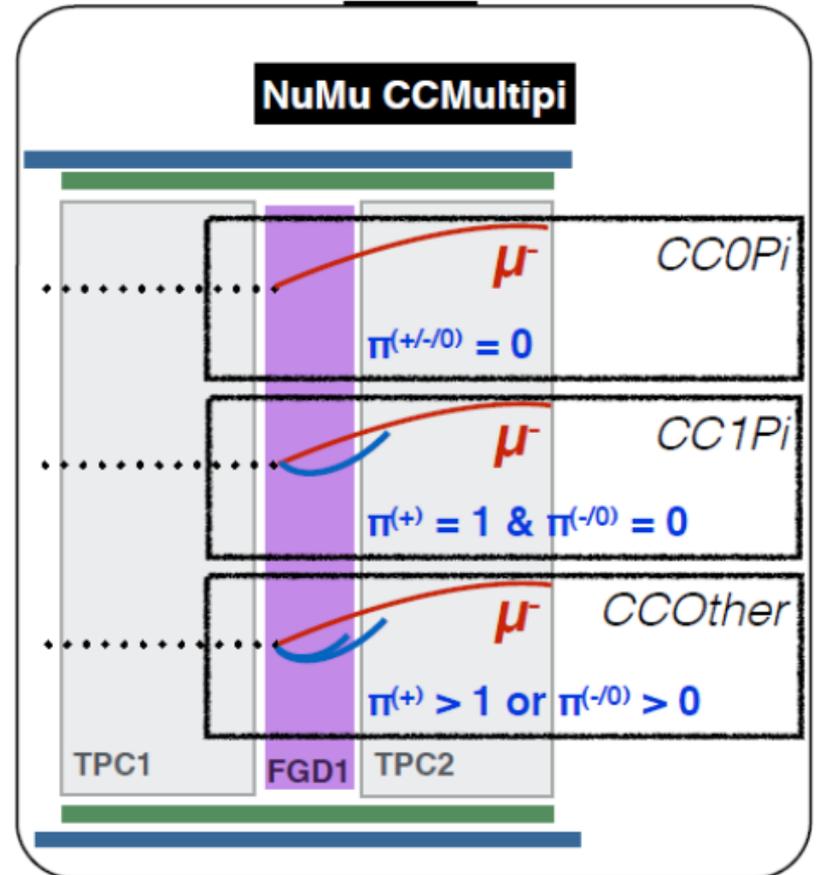
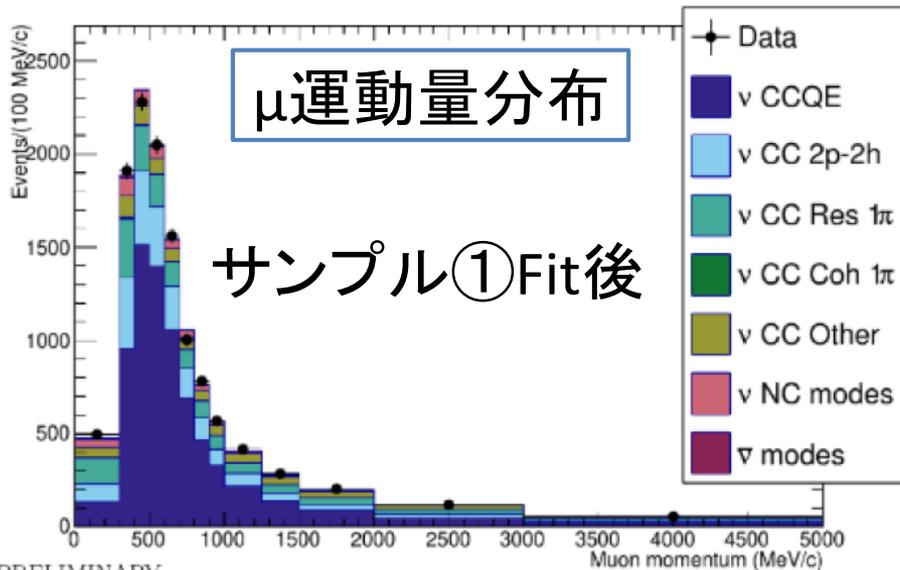
-それぞれの反応断面積の情報を得るためデータを3つに分けてFitする

① $\mu + \text{no } \pi$ (CCQEをおさえる)

② $\mu + 1\pi$ (CC1 π をおさえる)

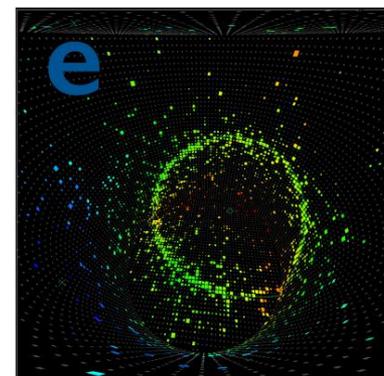
③ $\mu + >1\pi$ (CCDISをおさえる)

-フラックス × 断面積の不定性を5%で制限



解析手法(SK)

信号事象の例



- CCQE反応($\nu_{\mu/e} + n \rightarrow \mu/e + p$)を選択
- ミューオンまたは電子のリング1つだけ
- 反応点が検出器中心(22.5kton)
- (ν_e については、CC1 π 反応も選択)

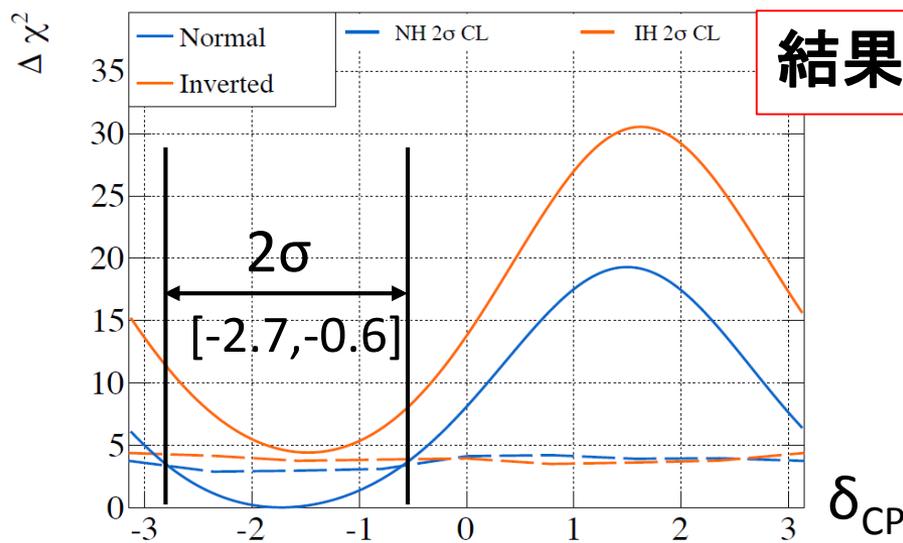
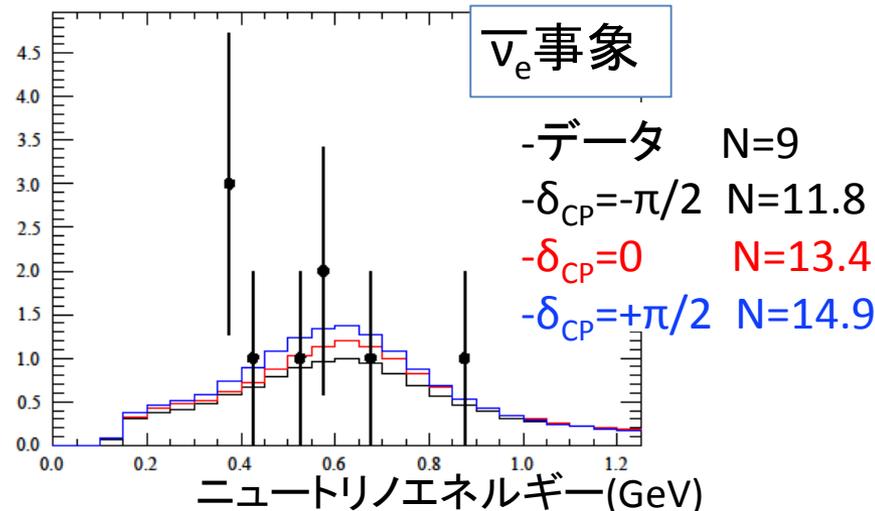
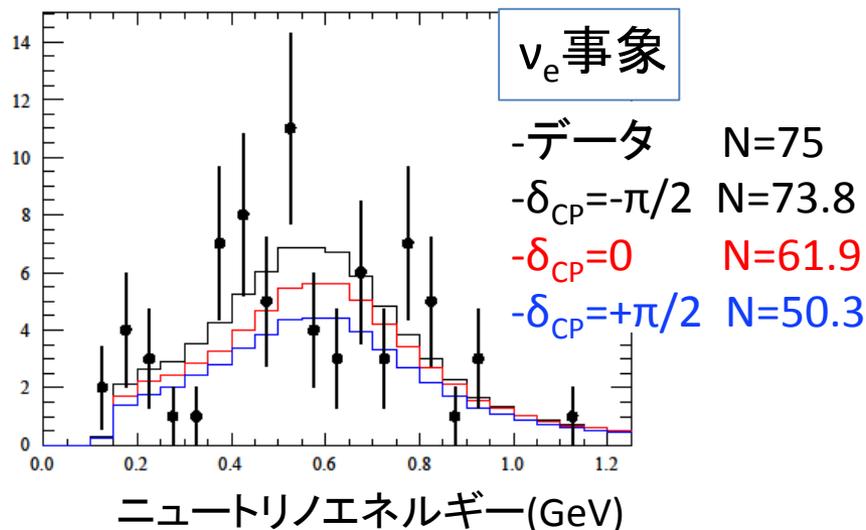
- セレクション後のイベント数と誤差まとめ
- purity of ν_{μ}, ν_e is $\sim 80\%$ ($\bar{\nu}_{\mu}, \bar{\nu}_e \sim 60\%$)

	$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$	$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$	$\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu}$	$\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$
イベント数 (統計誤差)	243(6.4%)	75(12%)	102(9.9%)	9(33%)
系統誤差 (ND280あり)	4.9%	9.6%	4.3%	7.9%
系統誤差 (ND280なし)	14.5%	17.1%	12.2%	14.6%

- $\nu_{\mu}, \nu_e, \bar{\nu}_{\mu}, \bar{\nu}_e$ 、すべての事象をまとめてFitして振動パラメータを測定

δ_{CP} 測定結果

- $-\delta_{CP}$: **-CPの保存($\delta_{CP}=0$ or π)を世界で初めて 2σ 以上で排除**
- $-\pi/2$ が好まれる (もっともCPの破れが大きい点)**

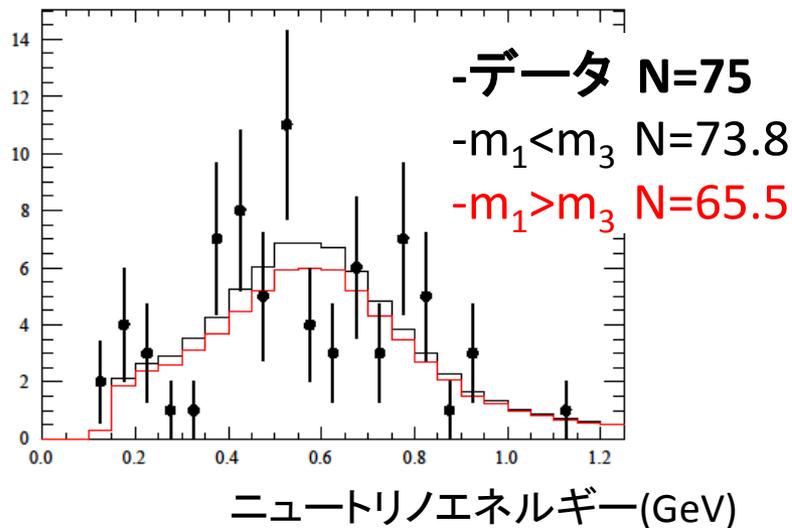


※原子炉の結果
 (θ_{13}) を使っている

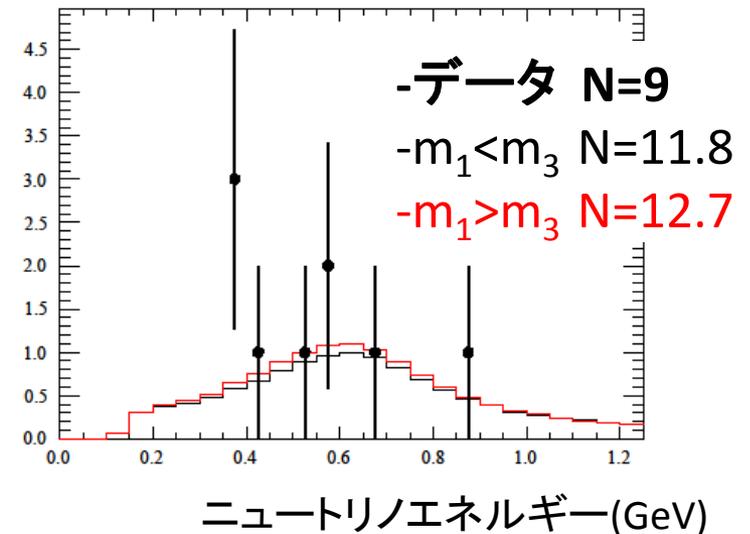
質量階層性 測定結果

- 質量階層性: -normal hierarchy ($m_1 < m_3$)と inverted hierarchy ($m_1 > m_3$)
2つのモデルの事後確率を計算
- Bayes factor 10.49 normal hierarchyが好まれる
- SKやNOvAと無矛盾

ν_e 事象



$\bar{\nu}_e$ 事象



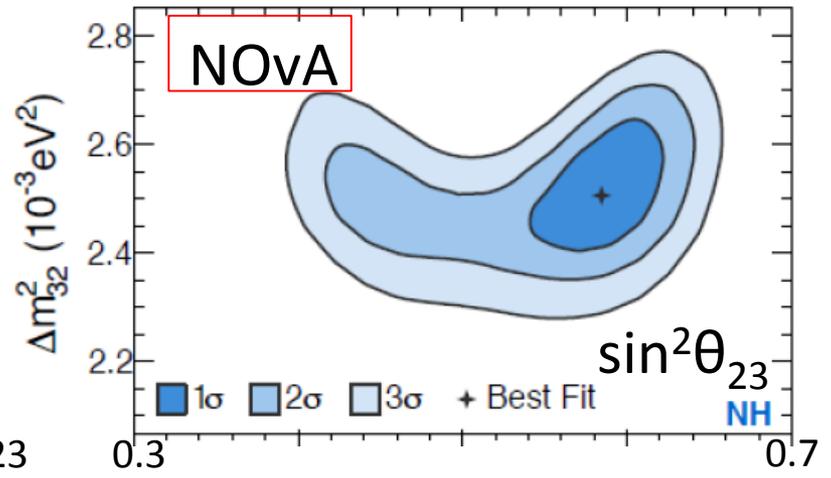
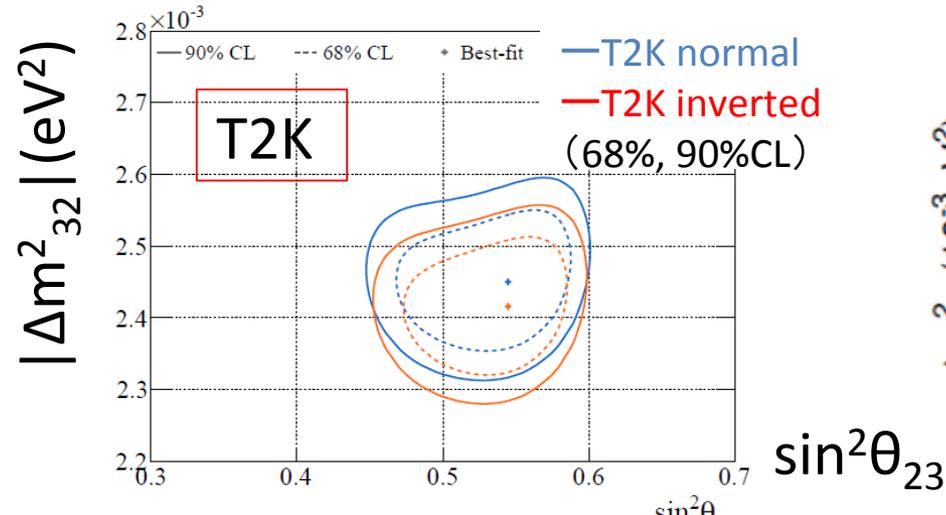
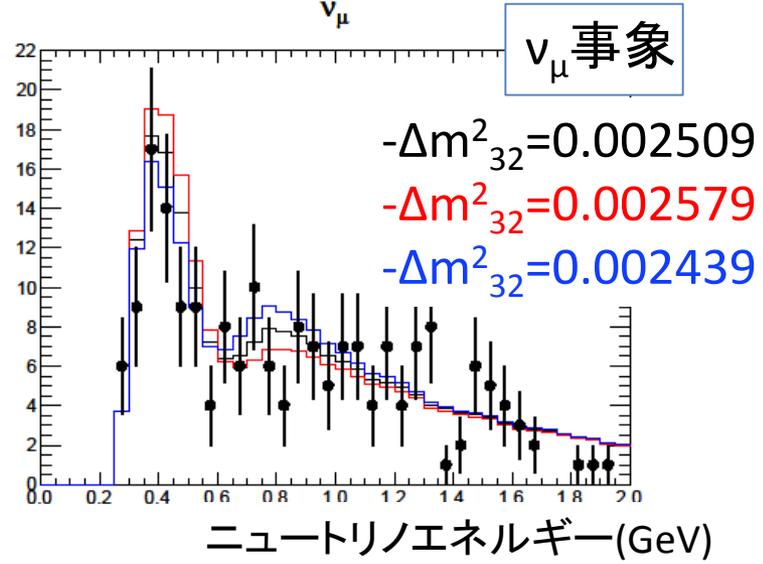
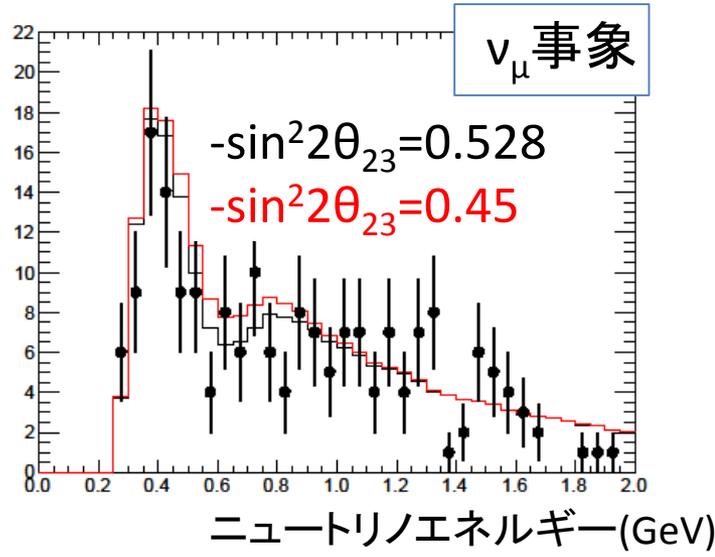
事後確率	NH($m_1 < m_3$)	IH($m_1 > m_3$)	NH/IH比
Without reactor	0.792	0.208	3.81
With reactor	0.913	0.087	10.49

$\theta_{23}, \Delta m^2_{32}$ 測定結果

$-\sin^2\theta_{23}, |\Delta m^2_{32}|$: -2016より~10%誤差が改善

-Maximal mixing ($\theta_{23}=45^\circ$)と無矛盾

-外部実験(大気ニュートリノ、NOvA)の結果と無矛盾



Summary

-T2K:長基線加速器ニュートリノ振動実験

-4つのニュートリノ振動確率を測定: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu, \nu_\mu \rightarrow \nu_e, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$

-2017年末までのデータを解析

- δ_{CP} : CPの保存($\delta_{CP}=0$ or π)を世界で初めて 2σ 以上で排除
- $\pi/2$ が好まれる (もともとCPの破れが大きい点)

-質量階層性: Bayes factor 10.49 normal hierarchyが好まれる

- $\sin^2\theta_{23}, |\Delta m^2_{32}|$: 2016より~10%誤差が改善 世界最高精度
他のニュートリノ振動実験とコンシステント

-引き続きデータを取得し、さらなる精密測定を目指す

Backup
