

T2K実験でのCPの破れの 探索の最近の結果と展望

2018/2/24, ニュートリノ研究会
坂下健(J-PARC/KEK) for T2K collaboration

1. Introduction

- どのようにCPVを探索するか

2. 2017年4月までのデータによる結果

3. 今後の展望

ニュートリノ3世代混合について現状と課題

Flavor eigenstate $\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$ Mass eigenstate

3x3 mixing matrix

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

混合行列の形 $\begin{bmatrix} 0.82 & 0.55 & 0.15 \\ -0.5 & 0.7 & 0.7 \\ 0.5 & -0.5 & 0.7 \end{bmatrix}$

ref. NuFit 2.0(2014)
assuming $\delta_{\text{CP}}=0$

まだ誤差大きいが
quarkと大きく異なる

$$\theta_{12} = 33.44^{+0.85}_{-0.78} [\text{deg}]$$

$$\theta_{23} = 45.8 \pm 3.2 [\text{deg}] \text{ 最大混合角?}$$

$$\theta_{13} = 8.50^{+0.20}_{-0.21} [\text{deg}]$$

δ_{CP}

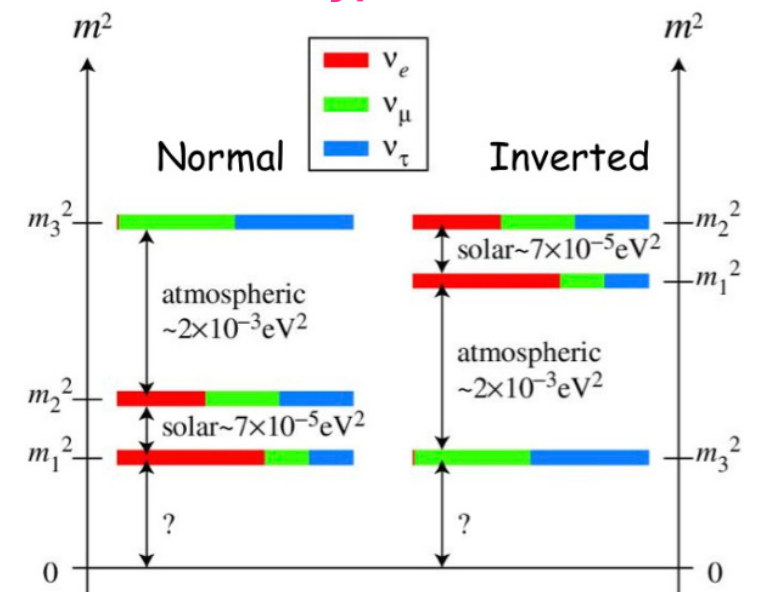
$0, \pi$ is excluded

w/ 90% CL (T2K 2016)

[Phys. Rev. Lett. 118(2017) no15, 151801]

ν でもCP対称性が破れている?

ν_3 が一番重い or 軽い?
(Mass hierarchy)



レプトンのCP対称性の破れ

- ・ 2013年のT2K ν_e appearance 発見によりニュートリノ振動実験で δ_{CP} (3世代 ν 混合に入るDirac位相)の測定が可能に
- ・ 見つければクォークでのCP対称性破れ以外で初
- ・ δ_{CP} によるCP対称性破れは物質優勢宇宙の解明するたの十分なソースになりうる
[Nucl. Phys. B774 (2007) 1など]
- ・ δ_{CP} は軽いニュートリノ質量が示唆する新しい物理に対して重要なヒントになる
[Nucl. Phys. B894 (2015) 733 など]

T2K(Tokai-to-Kamioka) experiment



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



T2K

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

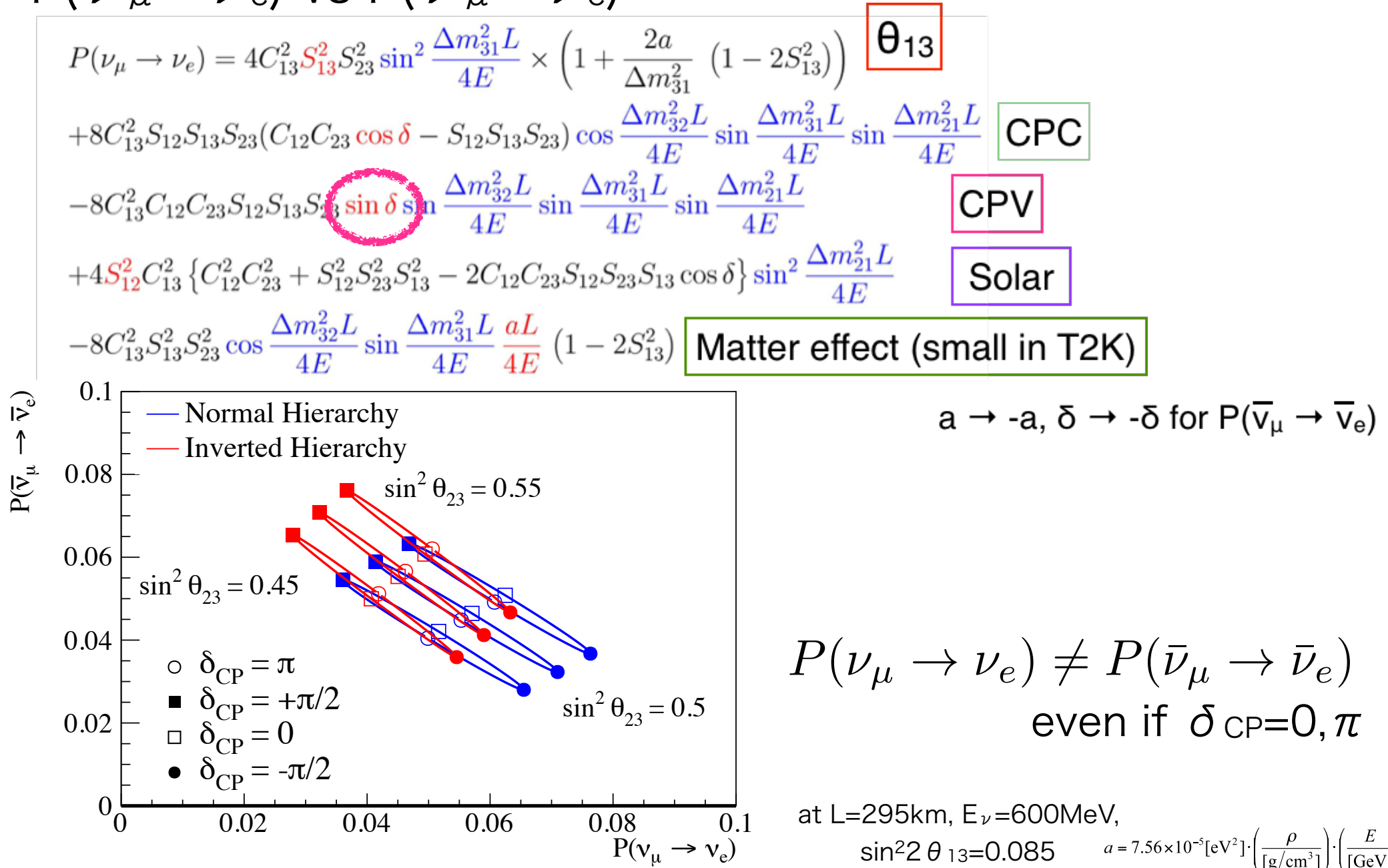


Physics motivation :

- Lepton CPV
- 2-3 mixing angle θ_{23} is maximal or not
- Mass hierarchy ($m_1 < m_3$ or $m_1 > m_3$?)
- Check the 3-flavor mixing framework

How to explore CPV in T2K ?

$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ vs $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$



How to explore CPV in T2K ?

- ・実際に測定するのは後置検出器(FD)での $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 、 $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$ 候補の事象数や分布 (E_{rec} , p-theta)

$$N_{FD}(E_{rec}) = \sum_{E_t} \Phi(E_t) P_{osc}(E_t) \sigma(E_t) \epsilon(E_t, E_{rec})$$

Φ : ν flux, P_{osc} : 振動確率, σ : ν 原子核反応断面積, E_t : true ν energy, ϵ : efficiency

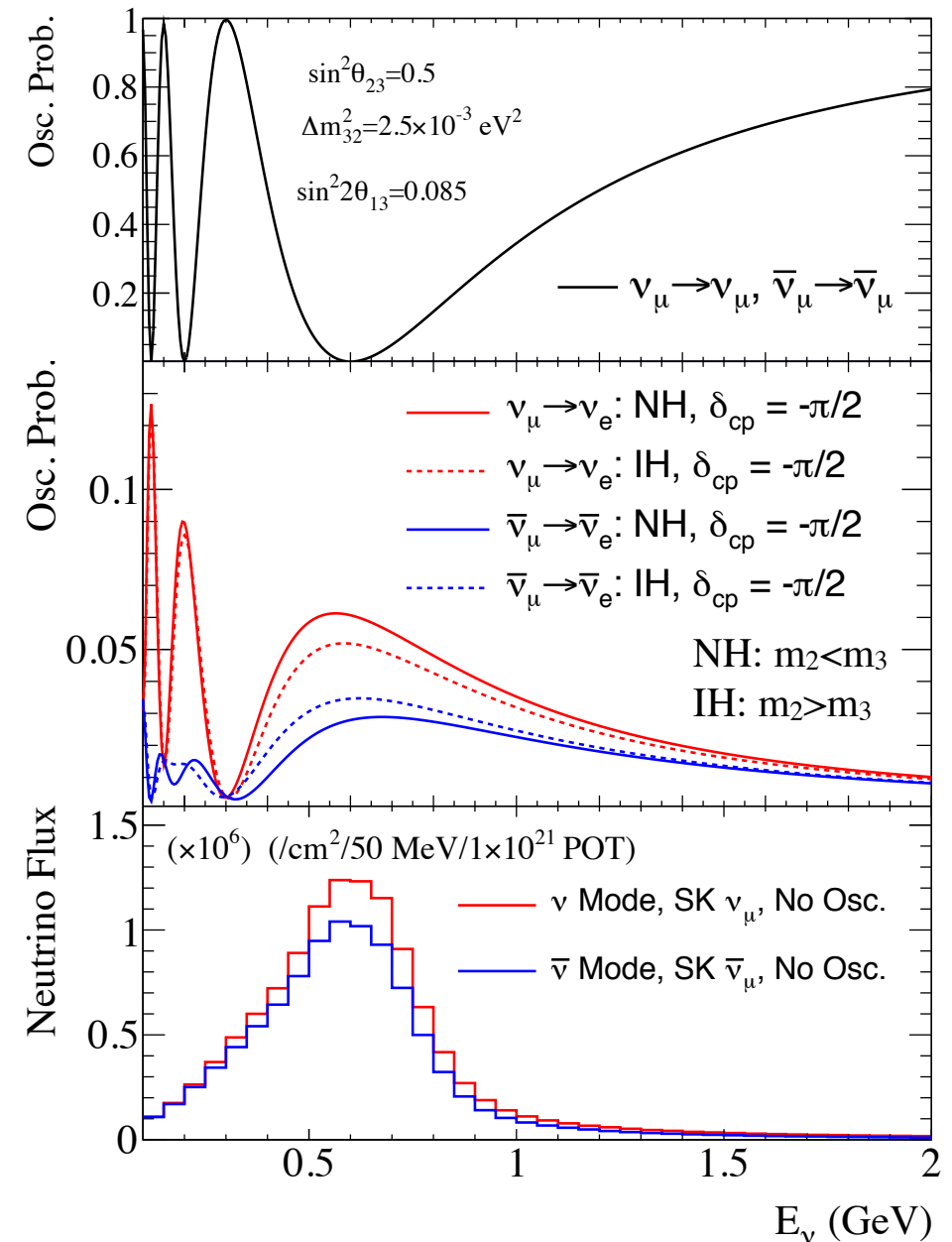
- ・ ν ビーム、 $\bar{\nu}$ ビームと切り替えて実験し、 ν flux、 ν 原子核反応断面積、バックグラウンド等の値それぞれについて ν ビームと $\bar{\nu}$ ビーム間の違いを考慮して、測定した $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 、 $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$ 候補数(分布)を再現する最適な δ_{CP} を求める
- ・もし $\delta_{CP} = 0$ or π でなければ、CP対称性が破れている

ν_e appearance and ν_μ disappearance

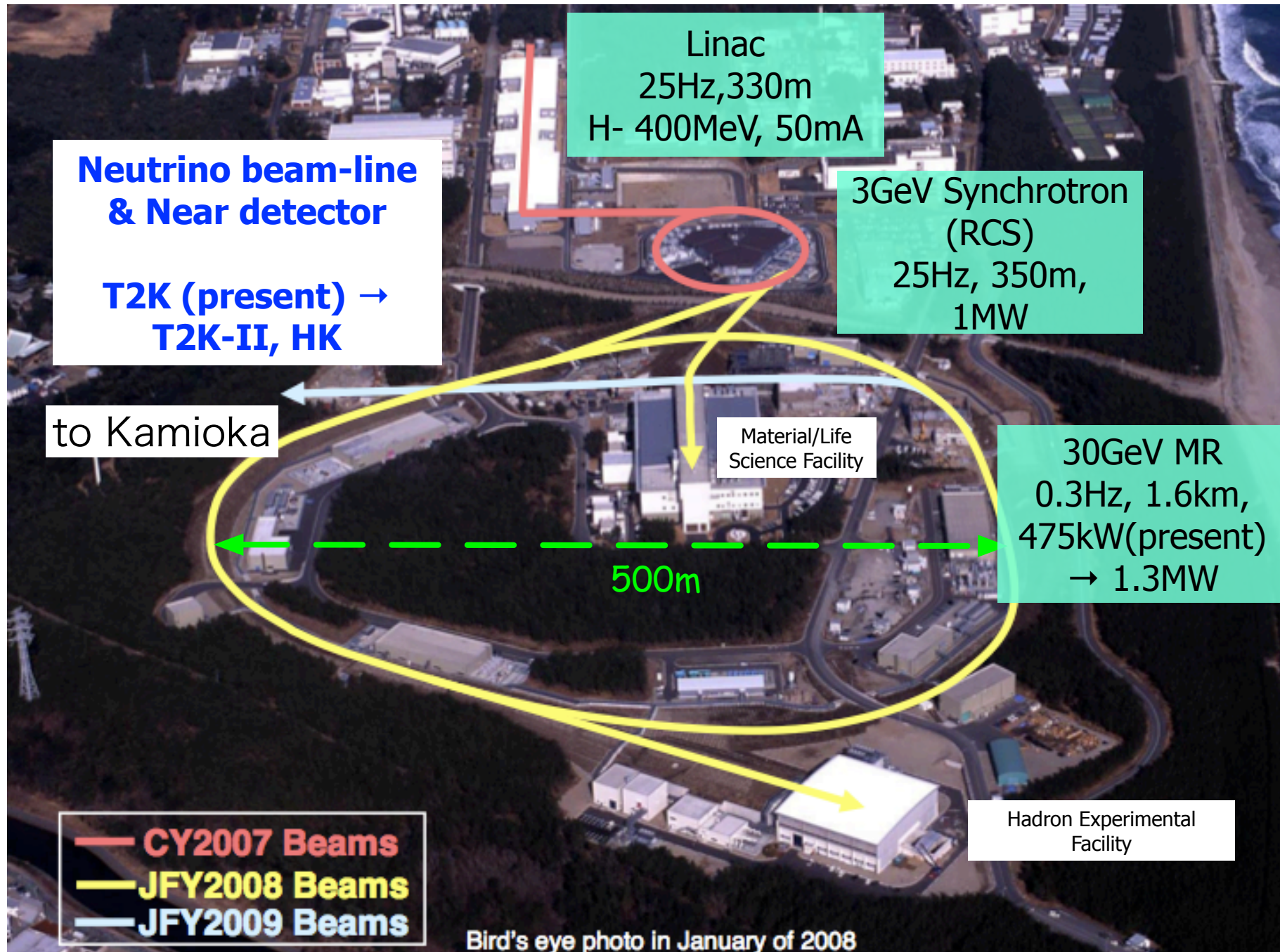
$L=295\text{km}$ 、 $\Delta m^2_{32}=2.5\times 10^{-3}\text{ eV}^2$
→ oscillation peak at $\sim 600\text{MeV}$

295km先で残った $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ のエネルギー分布から $\sin^2 2\theta_{23}$ と Δm^2_{32} を決める

$\nu_e(\bar{\nu}_e)$ の出現事象を用いて $\sin^2 \theta_{23}$,
 $\sin^2 \theta_{13}$, δ_{CP} , Δm^2_{32} の符号を決める

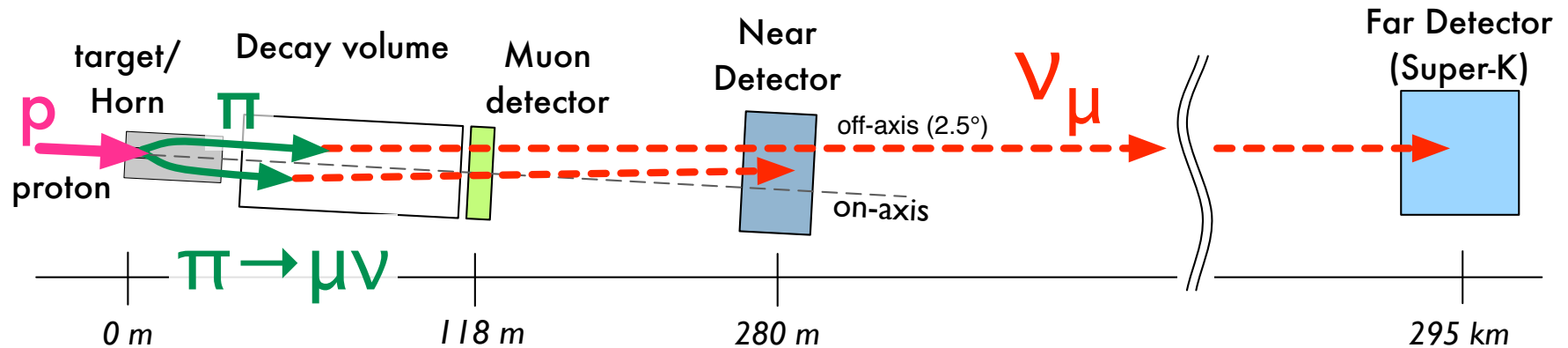


J-PARC & Neutrino beam-line

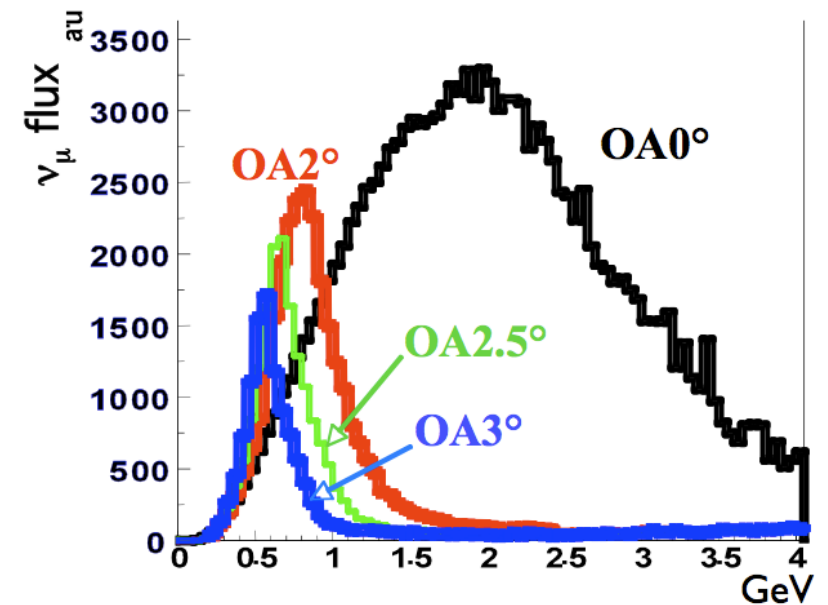


T2K beam

J-PARC
30GeV
大強度
陽子ビーム



- オフアクシス法 (narrow bandビーム)
- small ν_e contamination ($\sim 1\%$)
- Hornの極性を反転して ν -mode (FHC) と $\bar{\nu}$ -mode (RHC) 切り替えが可能



T2K beam :
* OA2.5° ($E_{\text{peak}}=600\text{MeV}$)

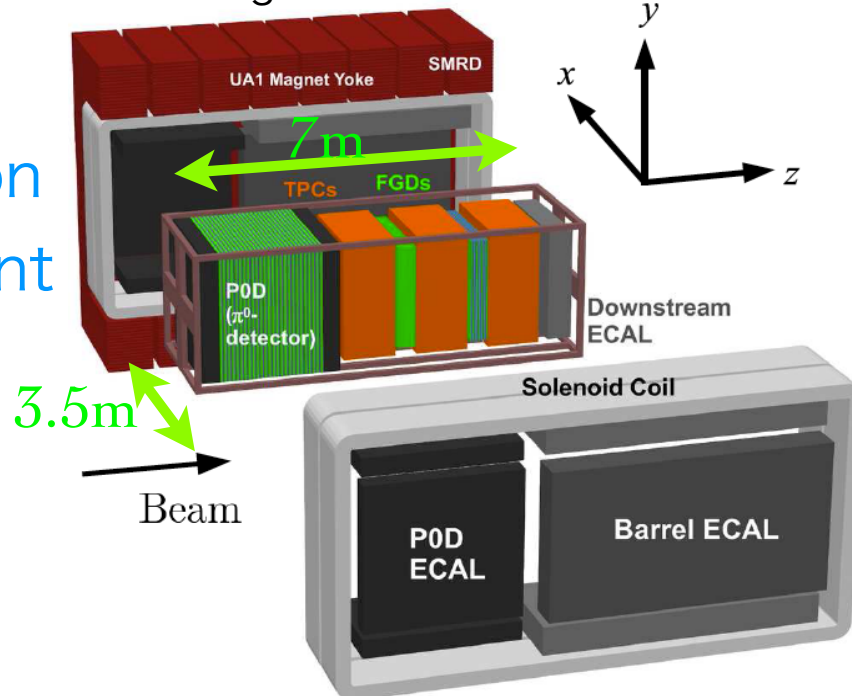
(FHC: forward horn current, RHC: reversed horn current)

前置検出器(ND)

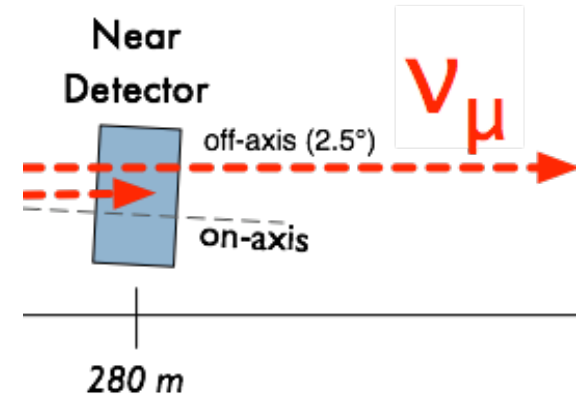
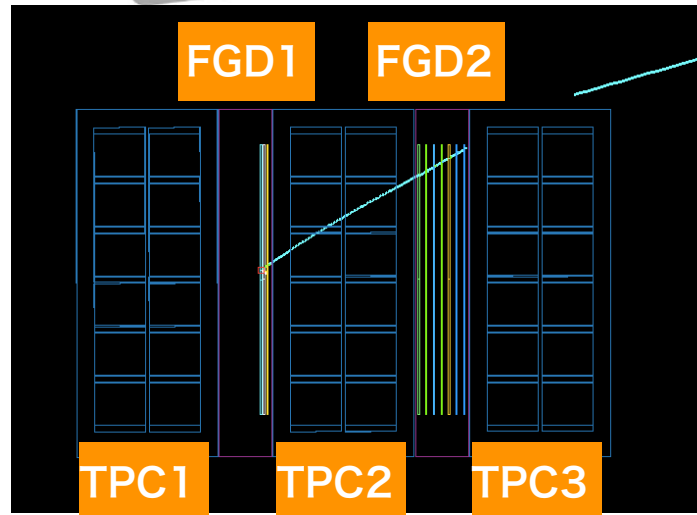
ND280 @ Off-axis

ν flux,
 ν interaction
measurement

0.2T UA1 magnet

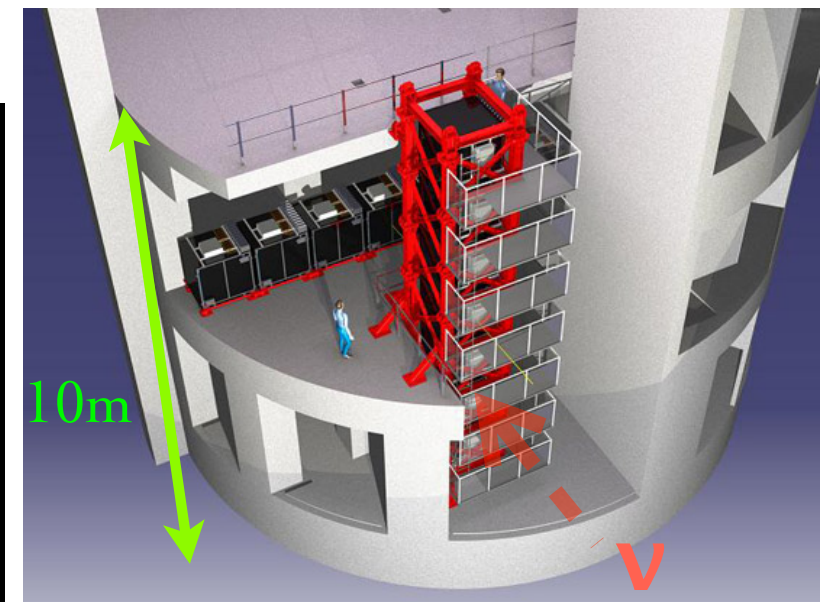


- FGD
 - scintillator bars target (water target in FGD2)
- TPC
 - momentum, dE/dx measurement

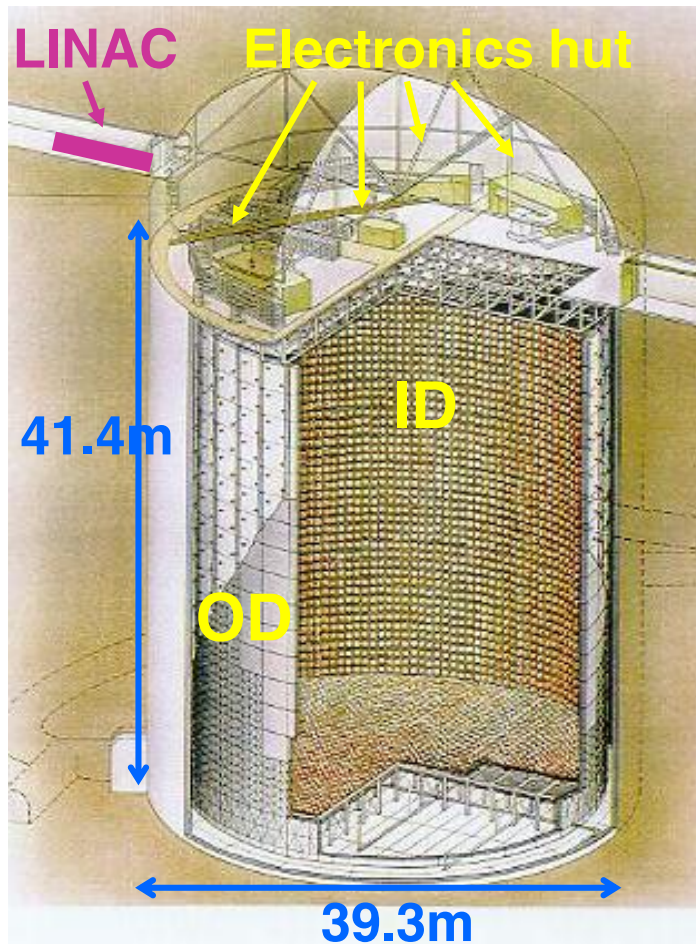


INGRID @ On-axis

ν beam direction,
intensity measurement

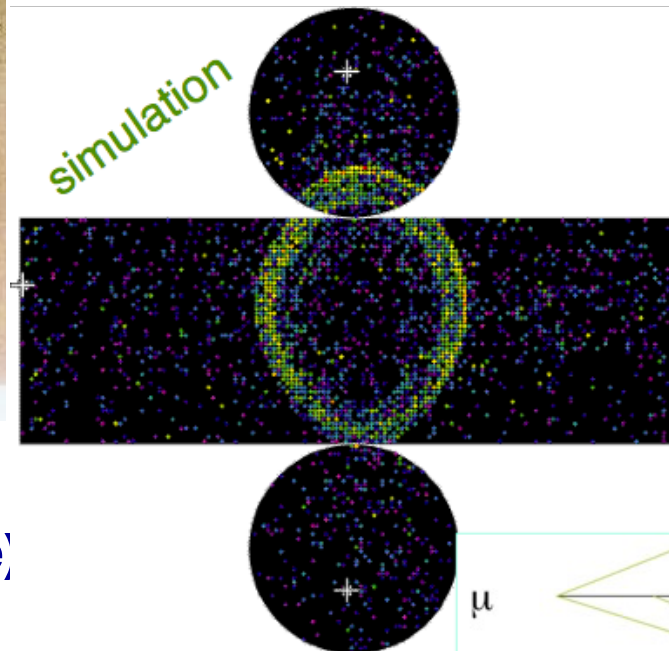


Far detector (Super-K)

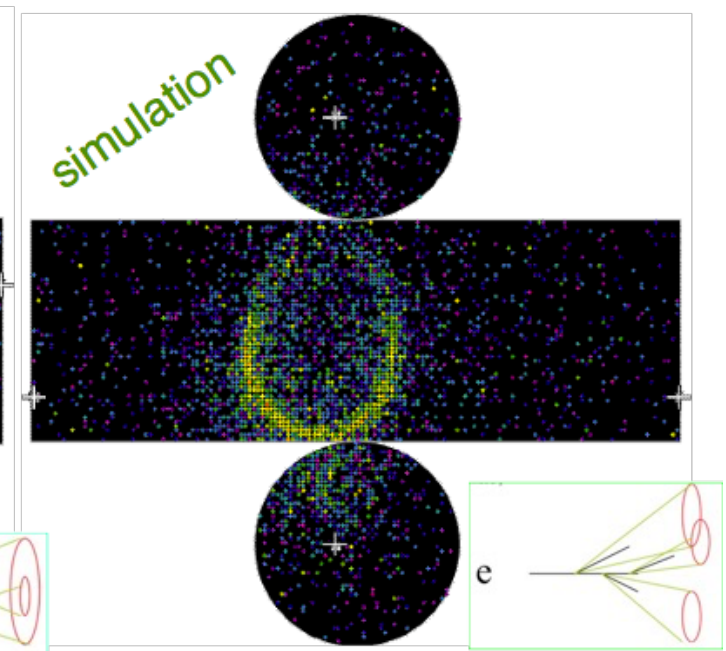


- 50kton water Cherenkov detector
- ID: 約11000本 20inch PMT (光電面被覆率 40%)
- チェレンコフ光のパターンから粒子識別

Single ring μ -like



Single ring e -like



T2K oscillation analysis method

- Far detector(FD)での予想と測定分布を比較して、振動パラメーターを決める

$$N_{FD}(E_{rec}) = \sum_{E_t} \Phi(E_t) P_{osc}(E_t) \sigma(E_t) \epsilon(E_t, E_{rec})$$

E_t : true ν energy, ϵ : efficiency

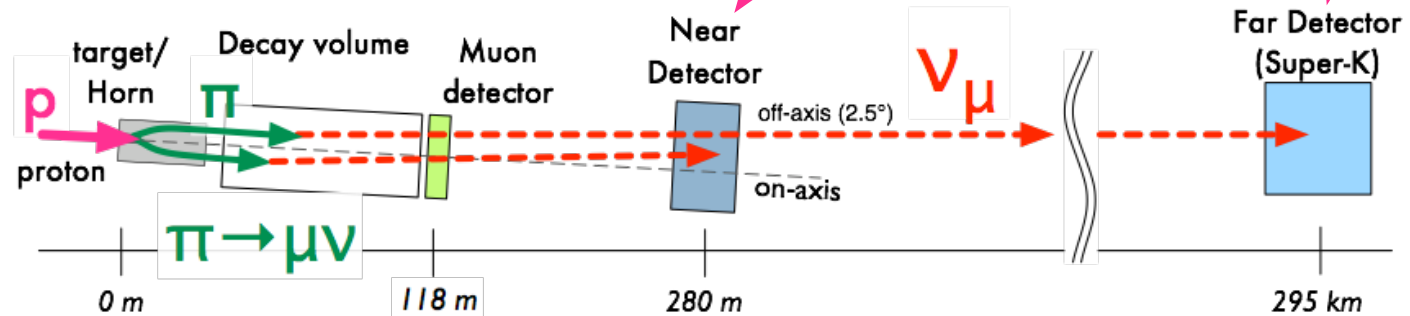
主な不定性: ν flux, ν -N cross section

- 前置検出器(ND)のデータを用いてFDの予想分布の不定性を小さくする。その時に ν flux、 ν -原子核反応の標的(C,O)、アクセプタンスについてNDとFDの間の違いも考慮する

$$N_{ND}(E_{rec}) = \sum_{E_t} \Phi(E_t) \sigma(E_t) \epsilon(E_t, E_{rec})$$

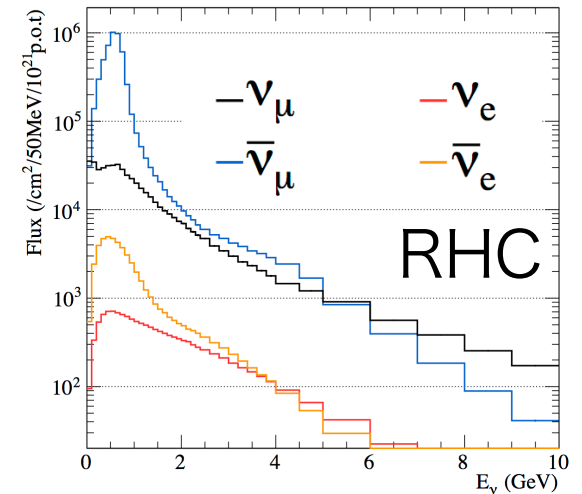
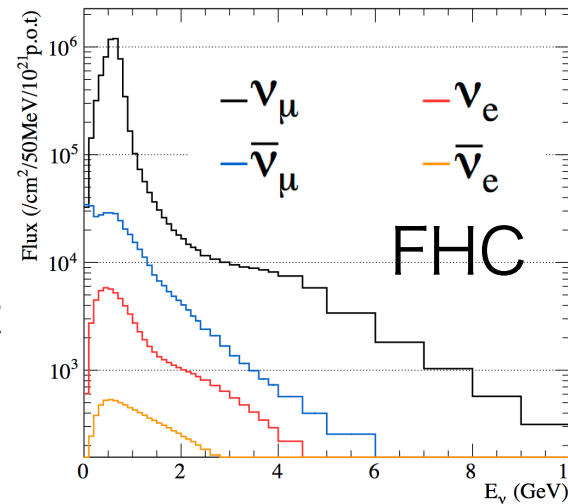
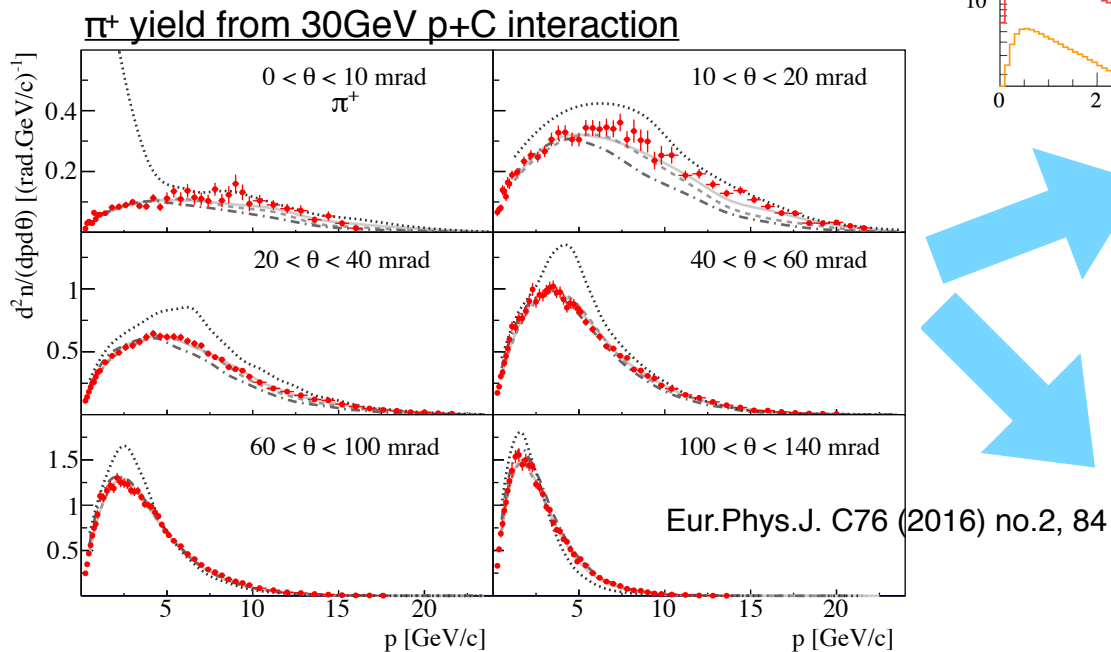
主な標的: C,O
アクセプタンス:
前方が大きい

主な標的: O
アクセプタンス:
 4π



Neutrino flux and its error

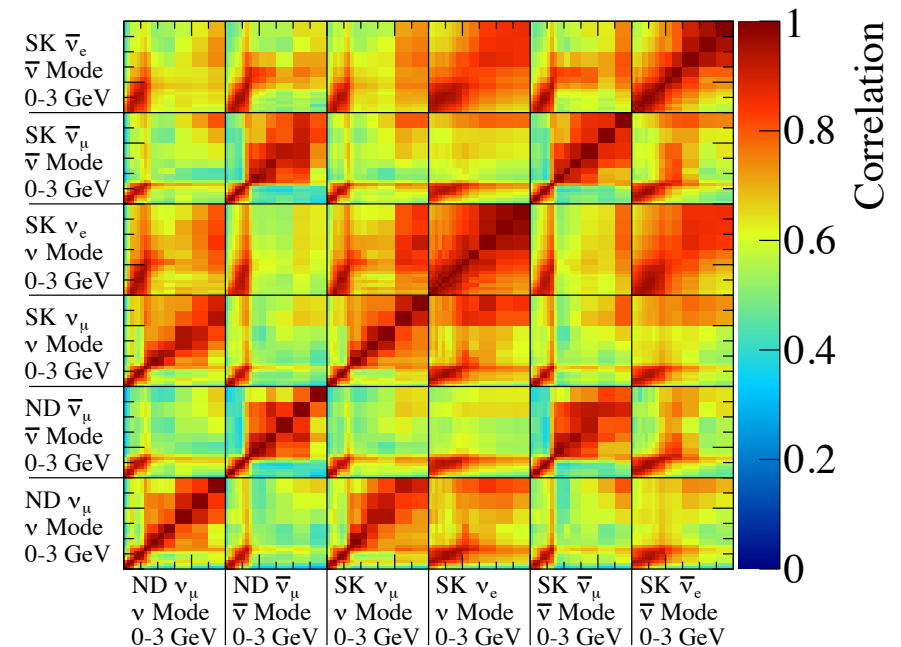
- ν flux is calculated based on
 - actual proton beam profile
 - π^\pm , K^\pm yield measurements by CERN NA61/SHINE experiment



Flux @T2K far detector

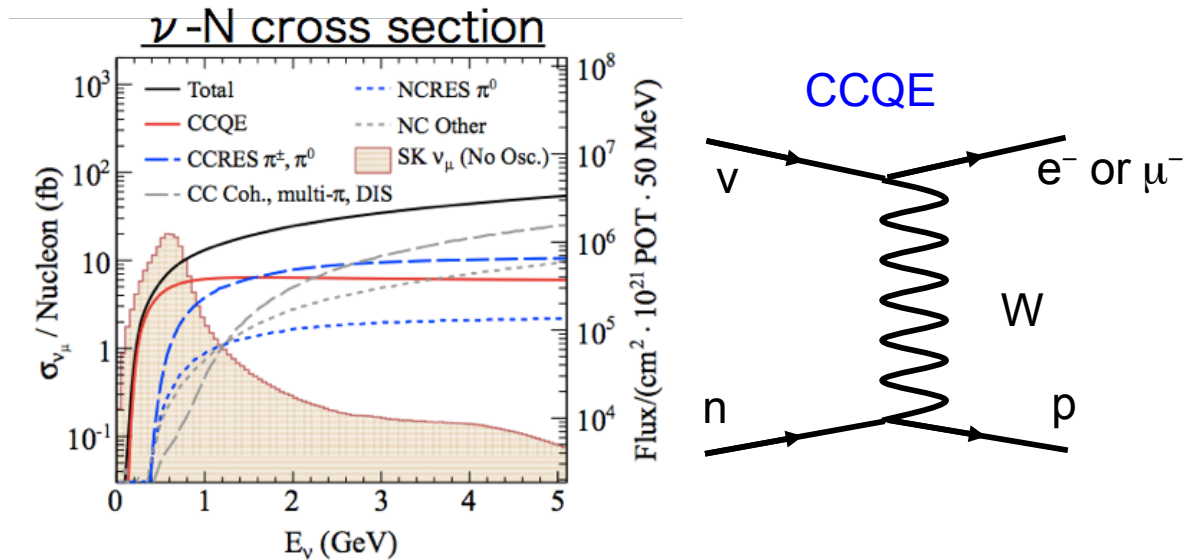
- Total absolute flux uncertainty is $\sim 10\%$ (similar size for anti-nu beam)
- Correlation between ND and FD, ν and $\bar{\nu}$ is calculated

Flux Correlations

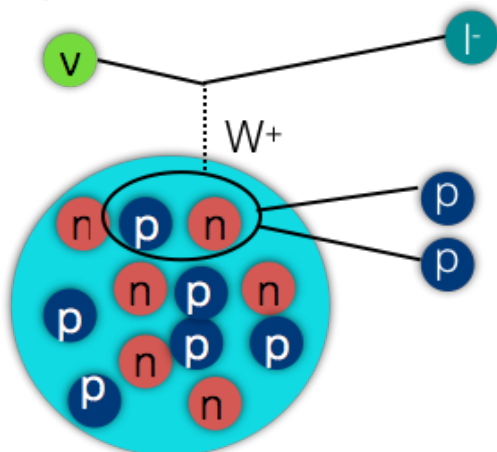


ν -原子核反応モデル

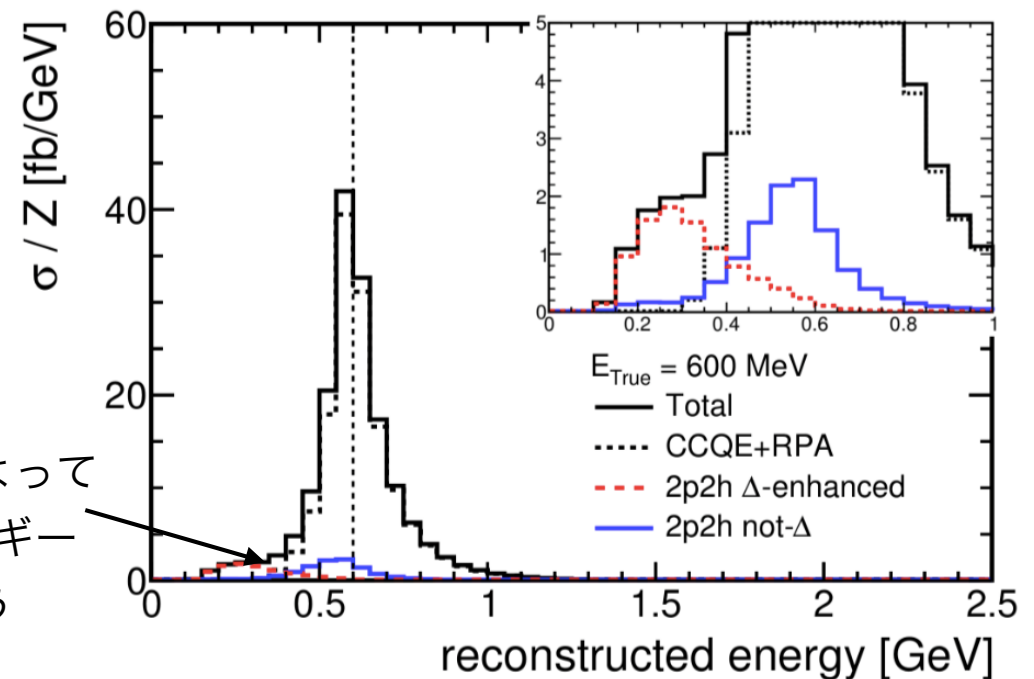
- ニュートリノ原子核反応をモデル化(NEUT)
 - 例えばT2Kで主な信号となるCCQE反応をより正確に見積もれるように、原子核モデルや2つの核子がpairとなって相互作用する2p-2h反応のモデルを構築
 - 標的(O, C)の違い、 ν と $\bar{\nu}$ の違いも考慮してモデル構築
- 各反応の断面積や2次粒子生成分布の不定性を前置検出器や他の実験での測定により評価



2p2h反応



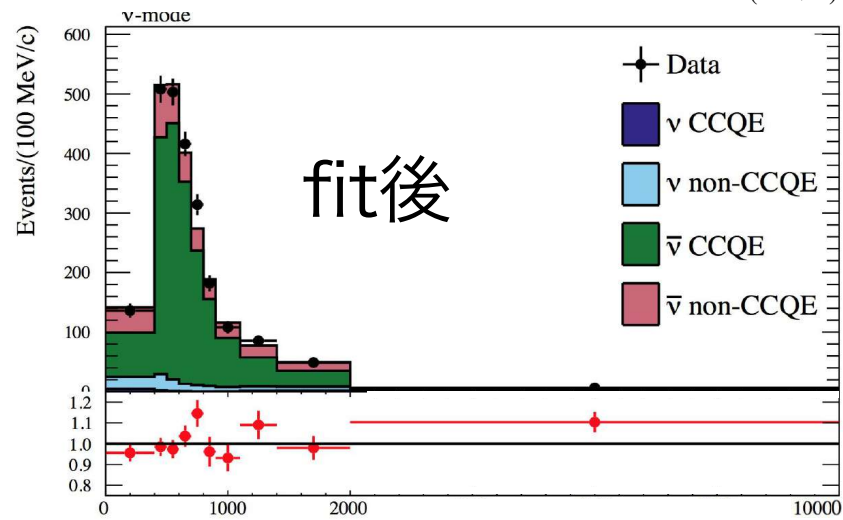
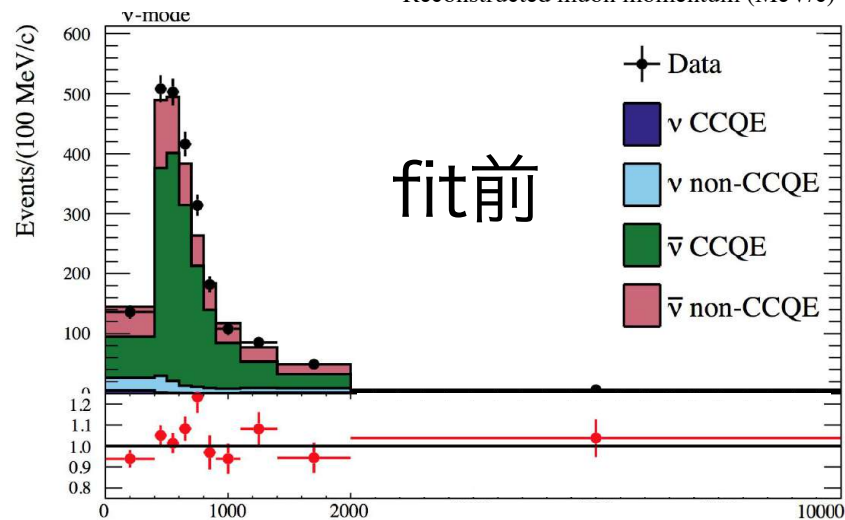
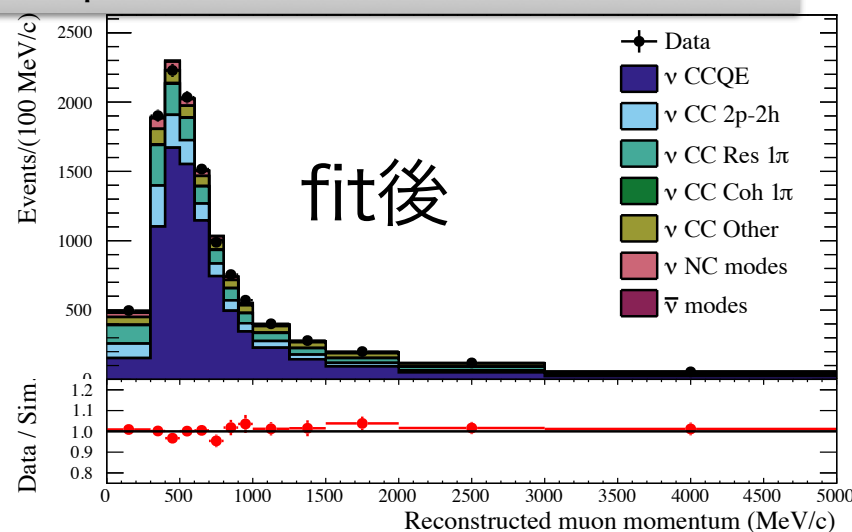
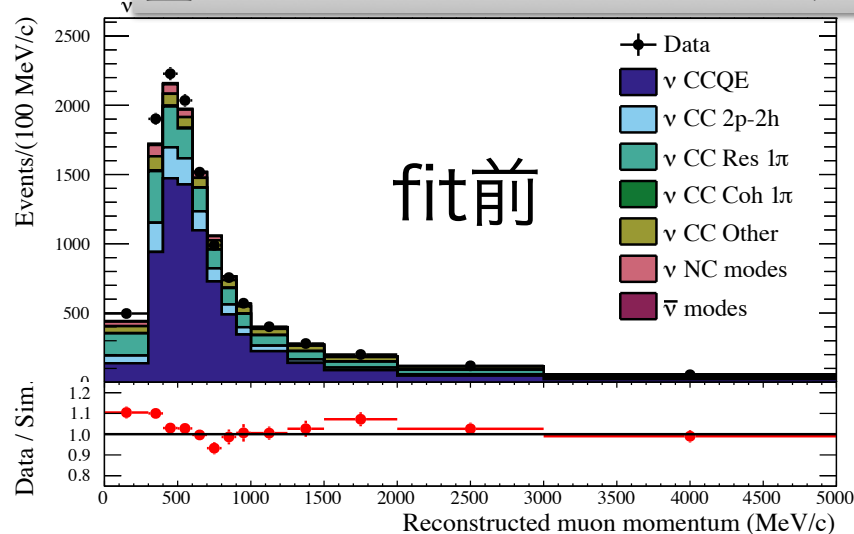
例えば2p-2h反応によって
再構成されたエネルギー
を間違ってしまう



NDデータを用いたモデル制限

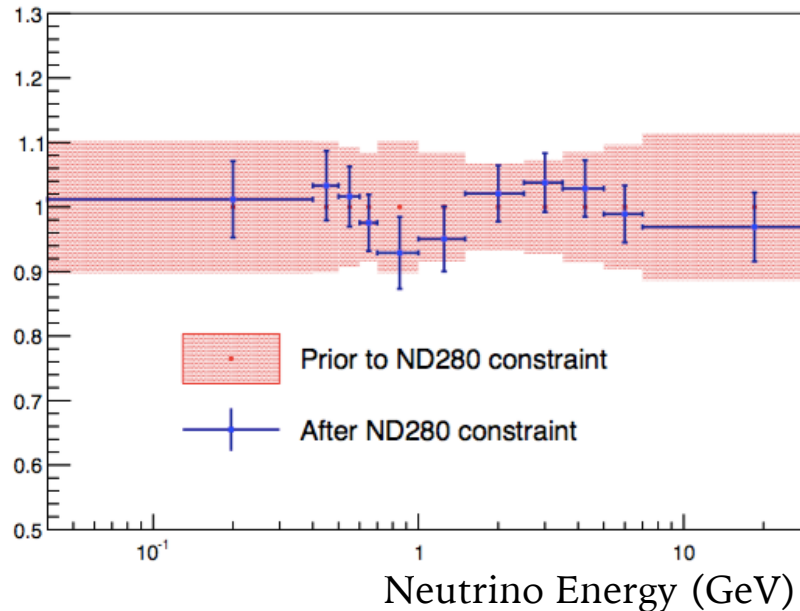
- FGD1, FGD2での ν -mode data (CC-0 π , CC-1 π , CC-other)と $\bar{\nu}$ -mode data(CC-1track, CC-Ntrack) を用いる

上： ν -mode FGD2 CC-0 π サンプル 下： $\bar{\nu}$ -mode FGD2 CC-1track

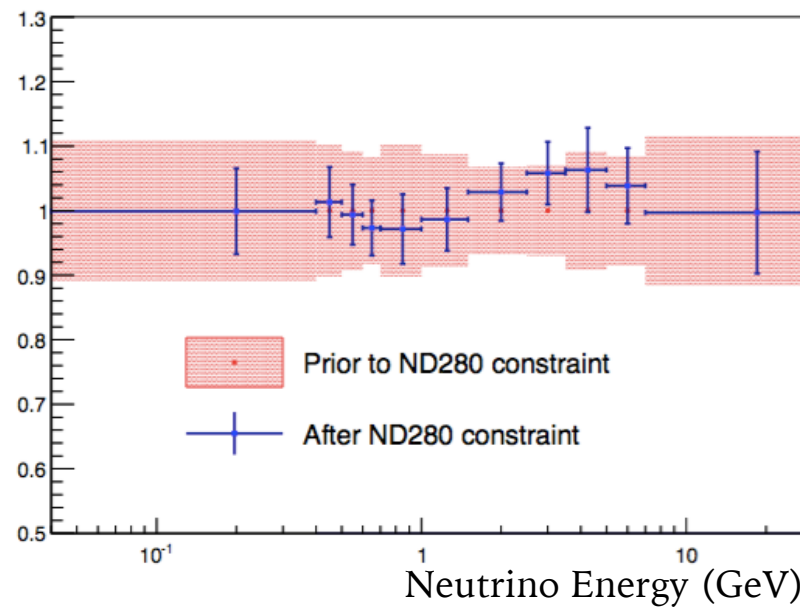


NDデータを用いたモデル制限 (cont.)

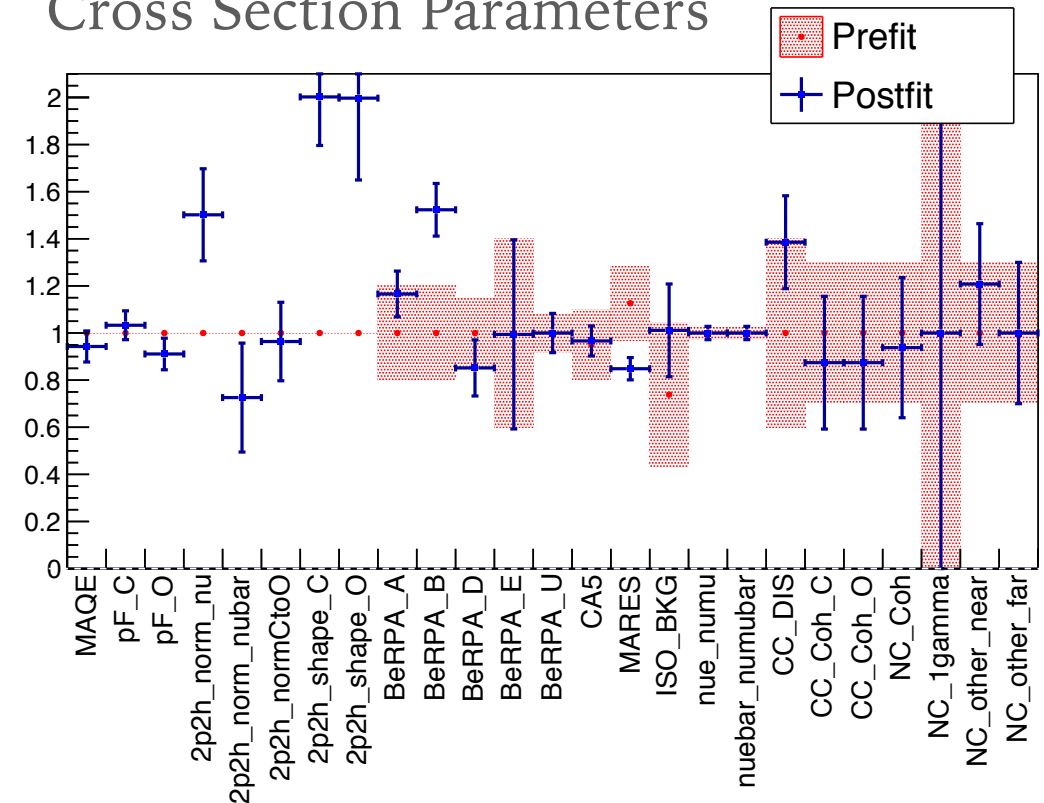
Super-K Neutrino Mode Flux



Super-K Antineutrino Mode Flux



Cross Section Parameters



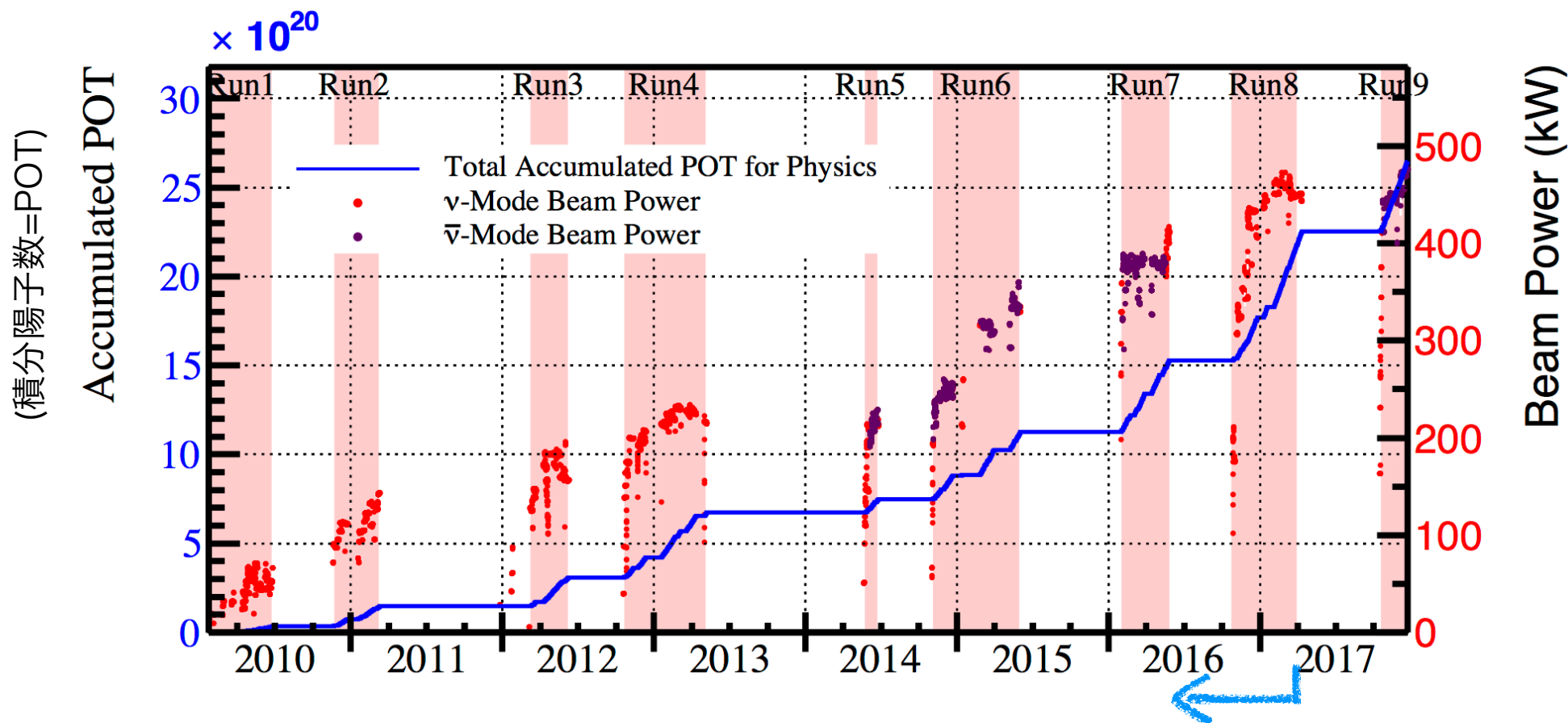
- 青点がNDデータにフィットしたあとの値とそのエラー
- この結果にもとづいて、FD(Super-K)でのイベント数や分布を予測する

FDでの予想数に対する系統誤差 (%)

Error Source	Single ring μ -like		Single ring e-like			
	FHC	RHC	FHC	RHC	FHC CC1 π	FHC/RHC
Flux+Xsec after ND constraint	3.22	2.72	3.22	2.88	4.05	2.50
SK Detector	1.86	1.51	3.03	4.22	16.69	1.60
Final state, Secondary int.	2.20	1.98	3.01	2.31	11.43	1.57
$\sigma(\bar{\nu}_e)/\sigma(\bar{\nu}_\mu)$	0.00	0.00	2.63	1.46	2.62	3.03
NC1 γ	0.00	0.00	1.08	2.59	0.33	1.49
NC Other	0.25	0.25	0.14	0.33	0.98	0.18
Total	4.40	3.76	6.10	6.51	20.94	4.77

- ν フラックス、 ν 反応モデルへの誤差は、NDデータを用いた後で3~4%
- CP対称性測定に寄与するFHCとRHCの比に対する誤差は~5%

2017年4月までのデータによる最新結果



・ 2017年4月までのデータ

ν mode : 14.7×10^{20} POT, $\bar{\nu}$ mode : 7.6×10^{20} POT

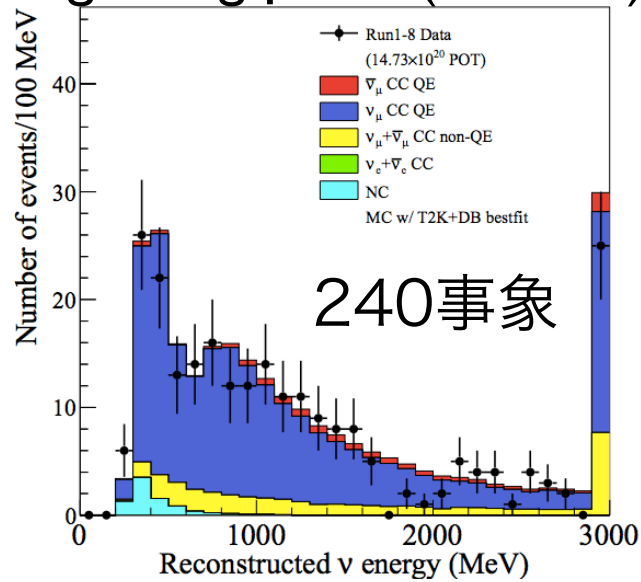
以前の結果(~2016年5月)に比べて ν modeデータ量が倍増

←450~470kW安定運転の実現により6ヶ月間の運転で倍増できた

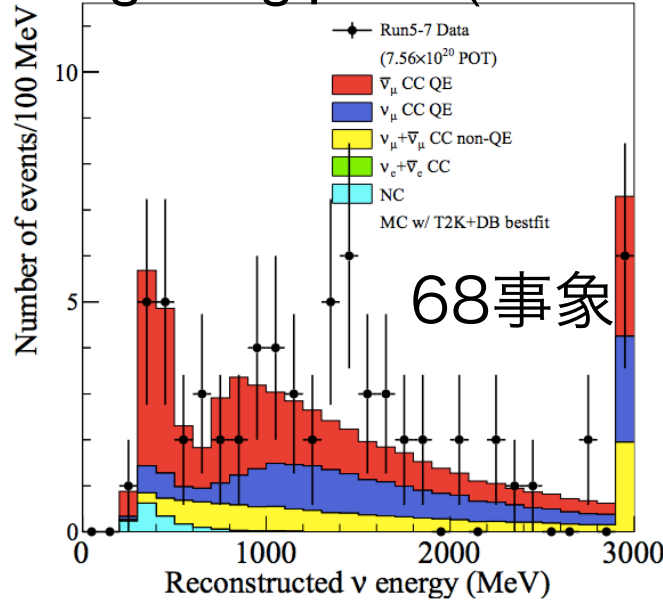
・ 2017年秋~冬には475kWへのパワー増強を実現して、 $\bar{\nu}$ modeのデータを収集

FDでの測定結果(ν エネルギー分布)

Single ring μ -like (ν -mode)



Single ring μ -like ($\bar{\nu}$ -mode)

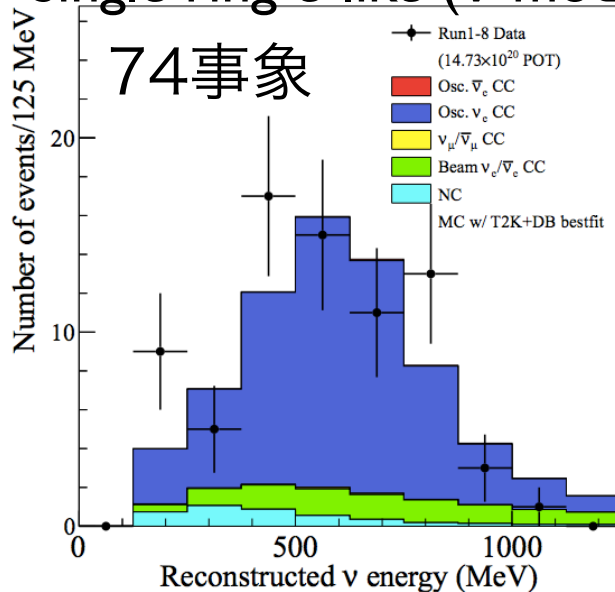


新しいfiducial volume cut
でpurityを維持(or改善)し
ながら統計量を~30%増

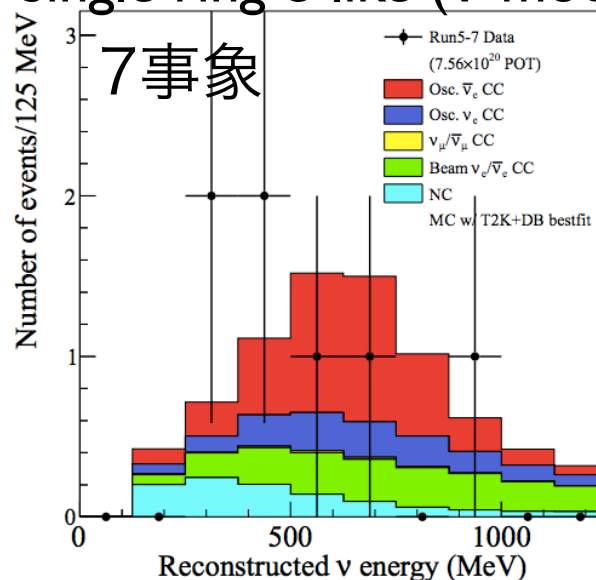
ν -mode (FHC) : 14.7 $\times 10^{20}$ POT
 $\bar{\nu}$ -mode(RHC) : 7.6 $\times 10^{20}$ POT

T2K Preliminary

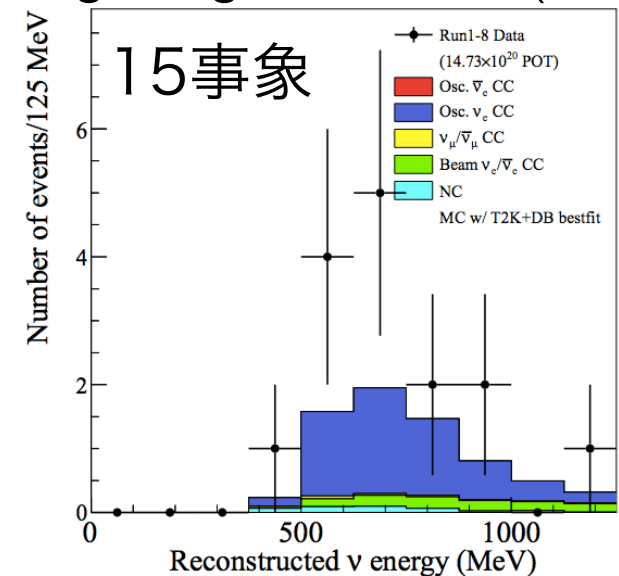
Single ring e-like (ν -mode)



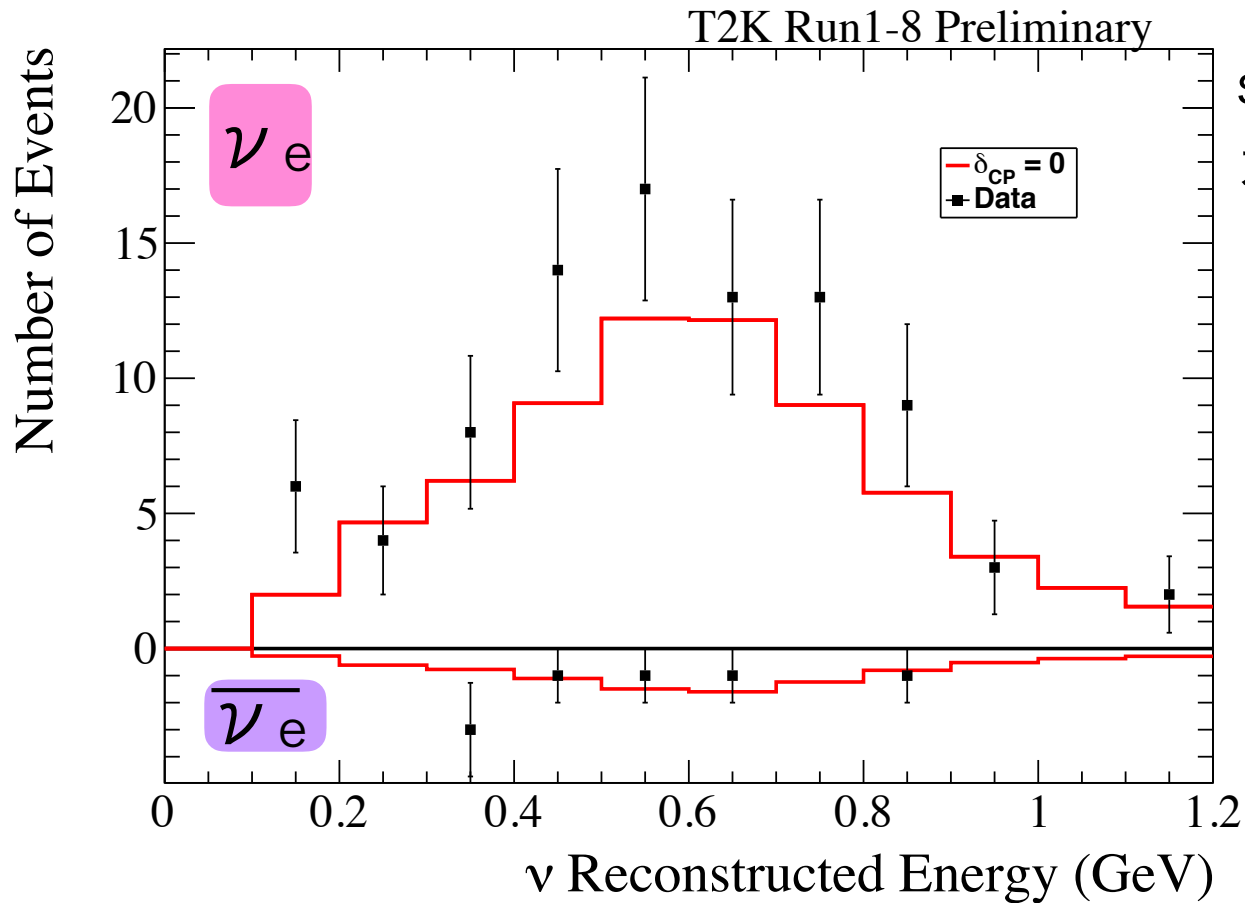
Single ring e-like ($\bar{\nu}$ -mode)



Single ring e-like CC I π (ν -mode)



$\nu_e (\bar{\nu}_e)$ appearance



single ring e-like (CCQE)
カテゴリ事象の比較

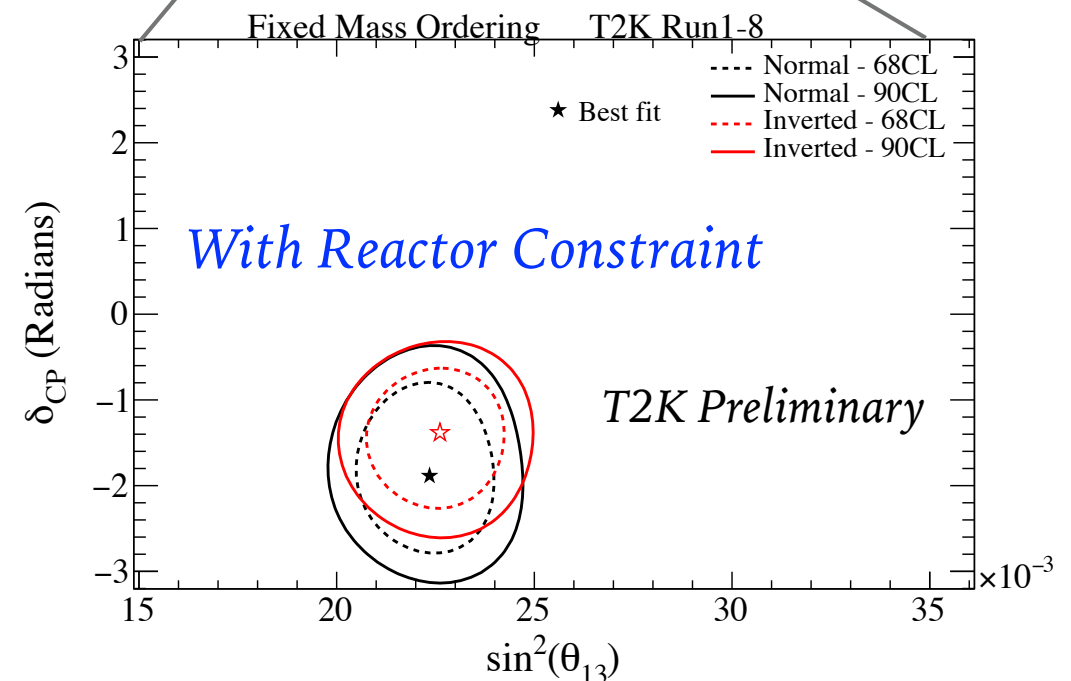
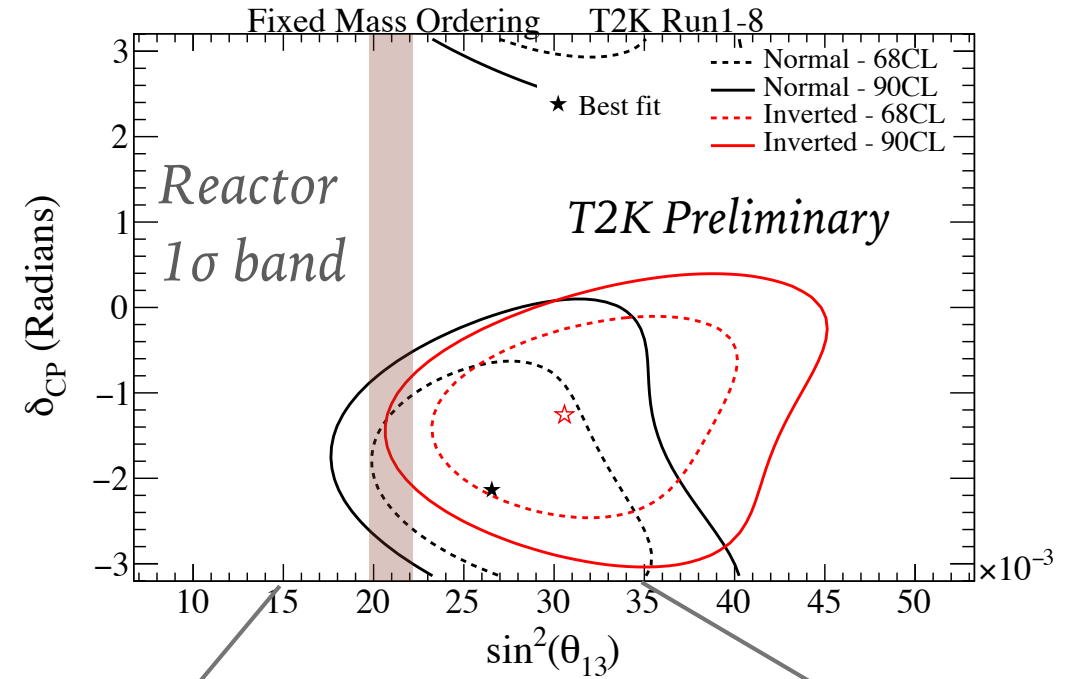
$\delta_{CP}=0$ の予測と比べると
 ν -modeは多く、
 $\bar{\nu}$ -modeは少ない

Sample	$\delta_{CP}=-\pi/2$	$\delta_{CP}=0$	$\delta_{CP}=\pi/2$	$\delta_{CP}=\pi$	Obs.
ν_e	73.5	61.5	49.9	62.0	74
$\bar{\nu}_e$	7.93	9.04	10.04	8.93	7
ν_e CC1 π	6.92	6.01	4.87	5.78	15

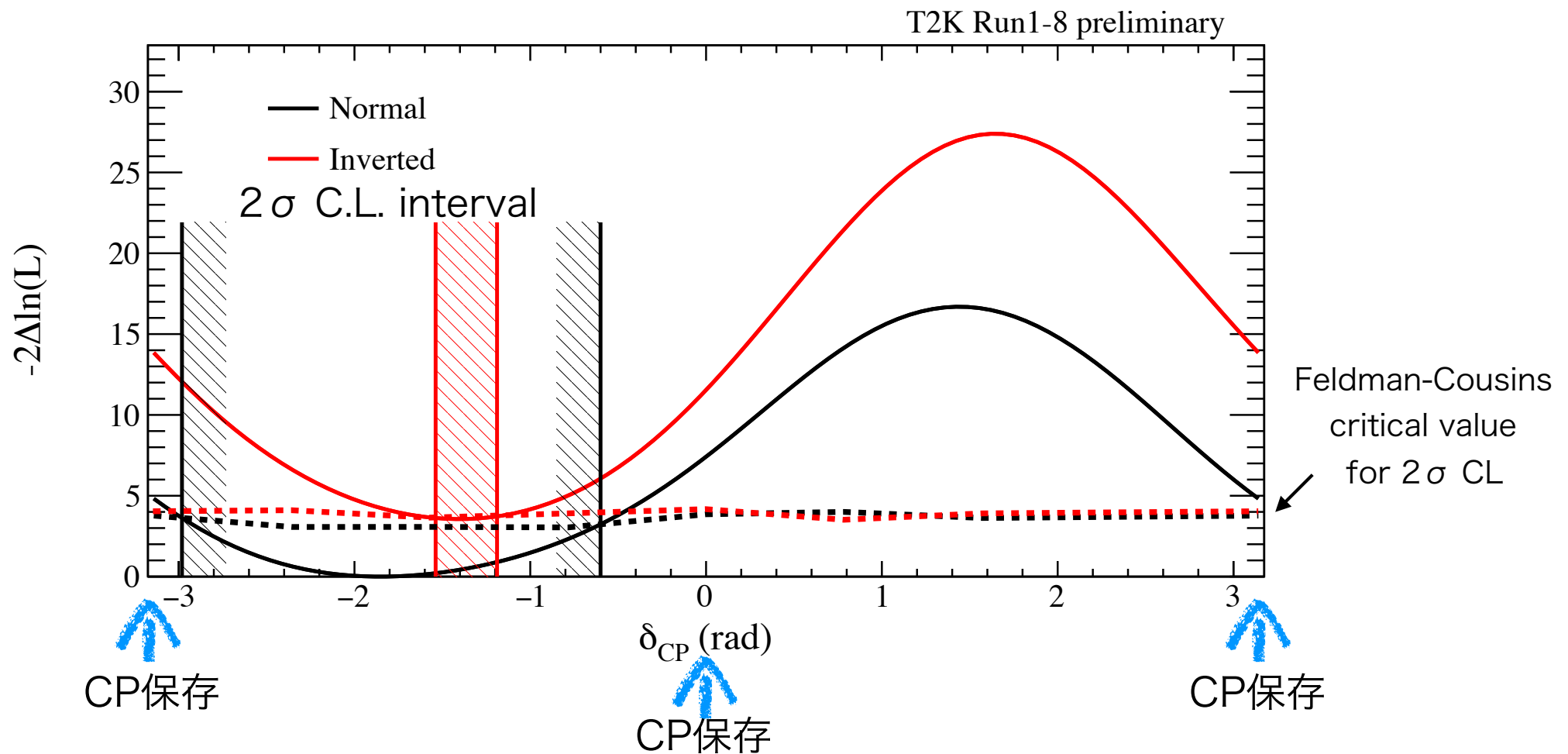
ν 振動パラメータへの制限

5つのカテゴリのデータを同時に
fitして振動パラメータを決める

- T2K実験による $\sin^2 \theta_{13}$ と δ_{CP} の
allowed region
- 原子炉実験(反電子 ν 消失)で精度
よく決められた θ_{13} との比較
- θ_{13} 値を原子炉実験の結果で制限
すると、 δ_{CP} への制限が強くなる



CP phaseへの制限



2 σ C.L. interval Normal hierarchy [-2.98, -0.60] rad.

Inverted hierarchy [-1.54, -1.19] rad.

CP対称性保存となる $\delta_{CP}=0, \pi$ は2 σ C.L. intervalの外

今後の展望

ニュートリノCPが大きく破れている可能性がある

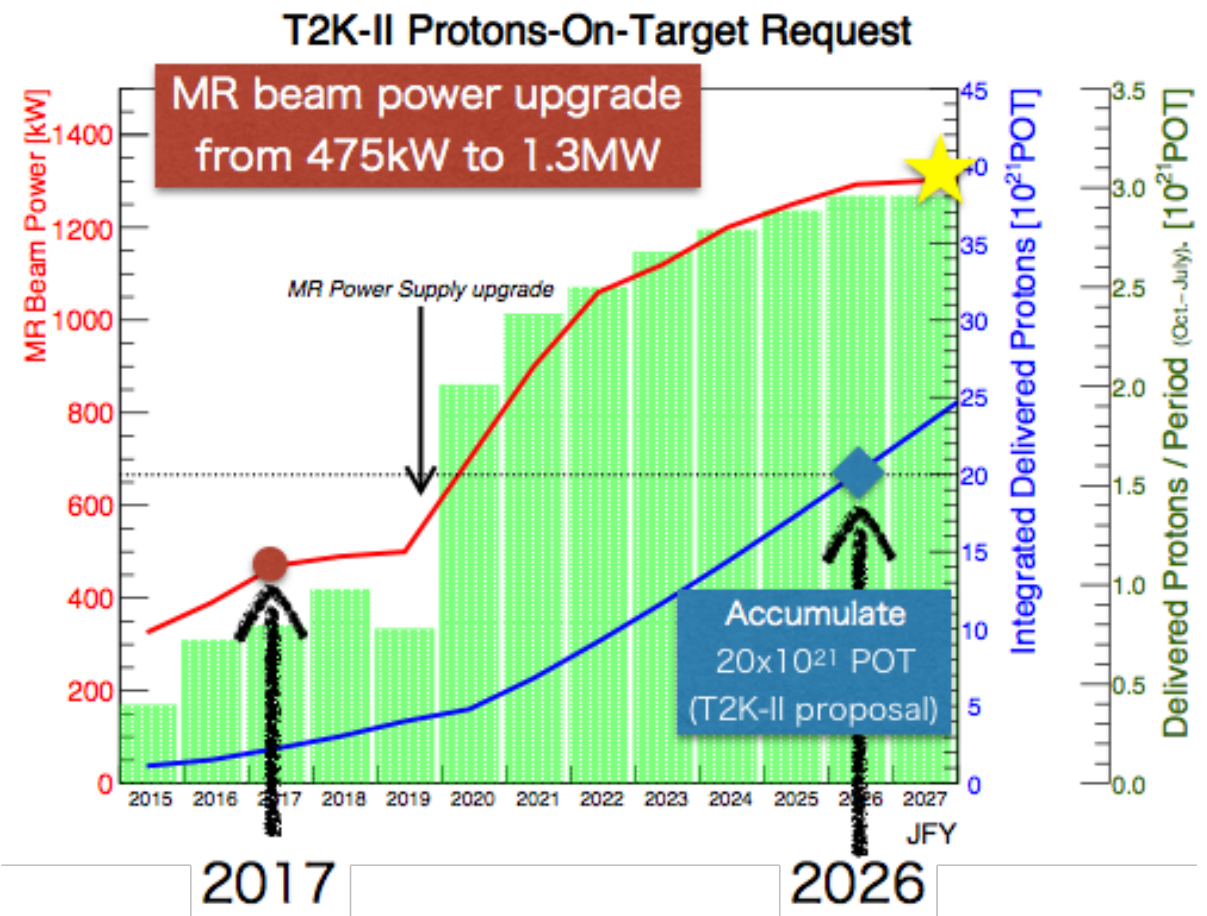
➡ T2K-II 計画：2026年までに 2×10^{22} POT蓄積し、高い感度でCPVや θ_{23} 測定を行う

📍ビームパワー1.3MWへ増強

📍POTあたりの統計量を増やす

- 電磁ホーン 250kA→320kA
- 振動解析に使うサンプルを増やす

📍系統誤差の改善(~6%から4%へ)



ビームパワー1.3MWへ増強

- MRビームパワーを陽子数増強と高繰り返しにして現在の475kWから1.3MWへ増強する

- 高繰り返し：磁石電源を新電源に更新、高勾配RF cavity導入して2.48秒から1.13秒へ
- 陽子数増強：Beam optics/dynamics理解して補正しながらビームロスを減らす。
これまでに~1MW capabilityを確認した。

- 1.3MW運転に向けてニュートリノビームラインのアップグレードも進行中

- 電磁ホーンやDAQの1Hz化、放射化水処理改善、冷却能力改善、ビームモニターアップグレード

	Achieved	Target
Beam power [MW]	0.475	1.3
# of protons per pulse	2.45 x 10 ¹⁴ (*)	3.2 x 10 ¹⁴
Rep. Time [sec]	2.48	1.16

(*) 2.7x10¹⁴ (1MW eq. w/ 1.3sec) was successfully tested

系統誤差の改善(1) : Flux高精度化

現在、前置検出器(ND)のflux errorは10%(at energy peak)

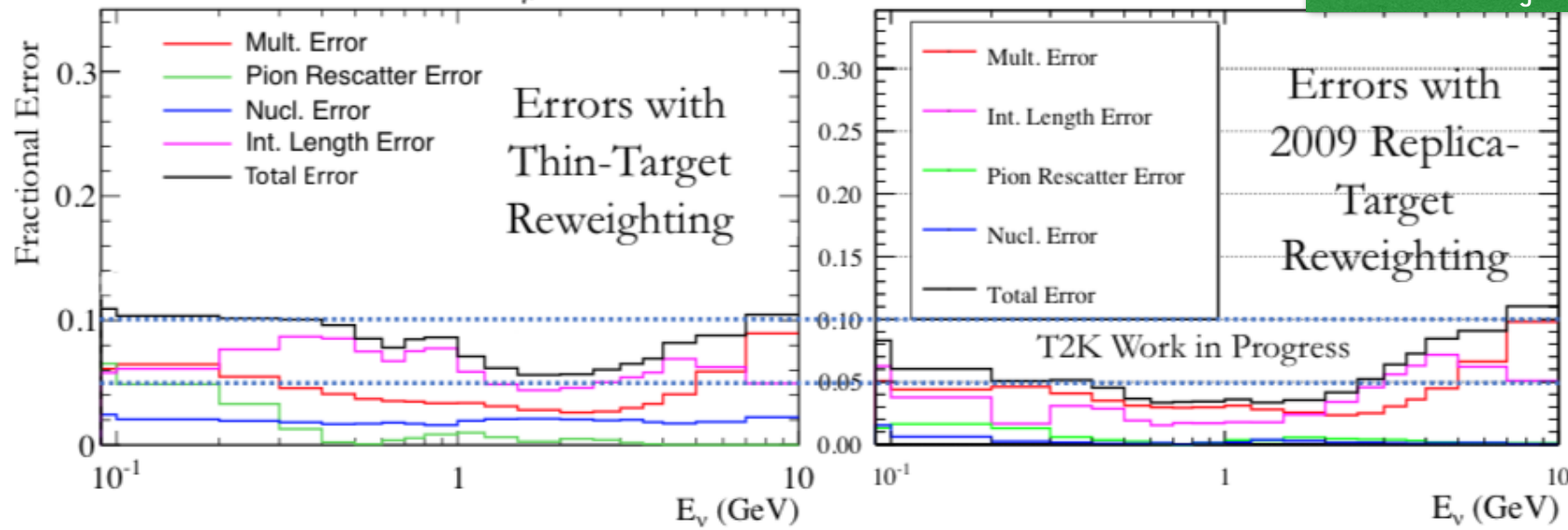
➔ flux errorを小さくしてND dataを用いた ν 原子核反応の詳細なスタディを可能にし、振動測定の系統誤差を小さくする

- NA61/SHINEで測定したレプリカターゲット(90cm)のハドロン生成分布を用いて、5%に改善できる見込み
- さらなる高精度化にむけて新しいハドロン生成分布測定を進めている (CERN NA61/SHINE beyond 2020, FNAL EMPHATIC)

T2K work in Progress

SK: Positive Focussing (ν) Mode, ν_μ

T.Vlandisavljevic(IPMU,Oxford)

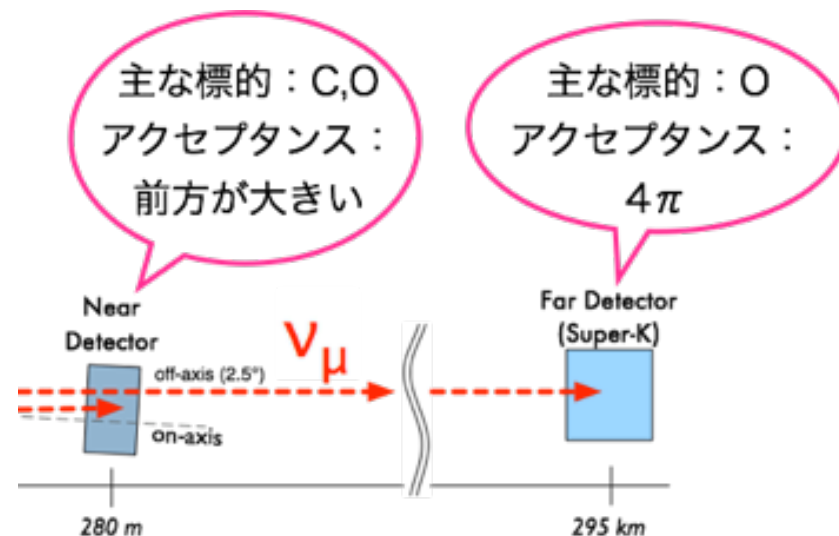
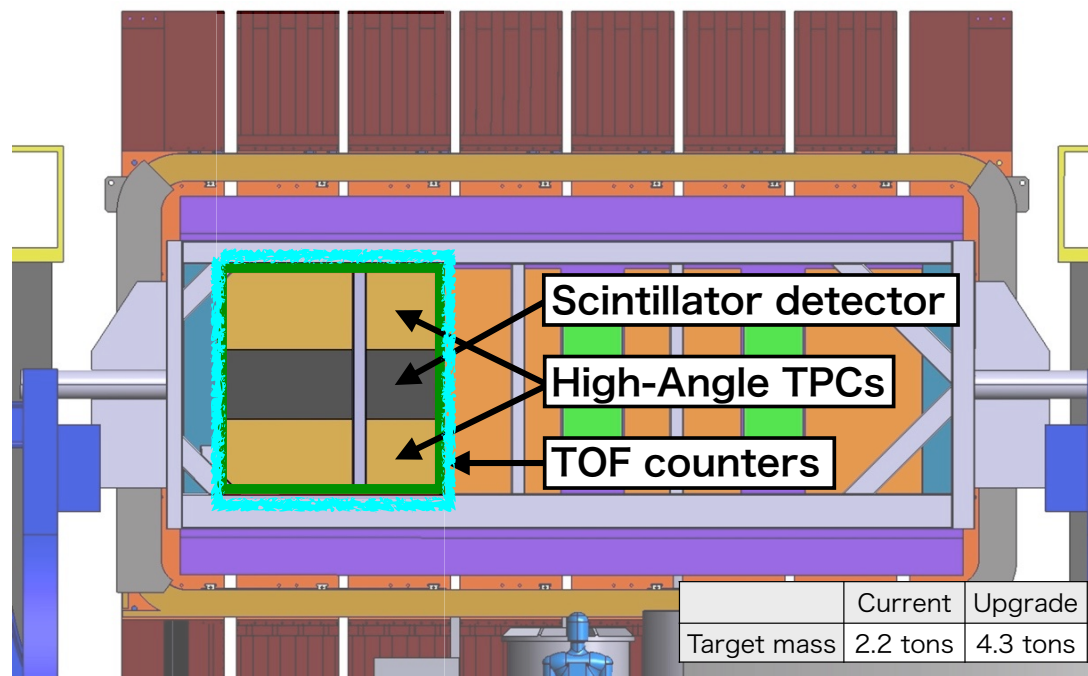
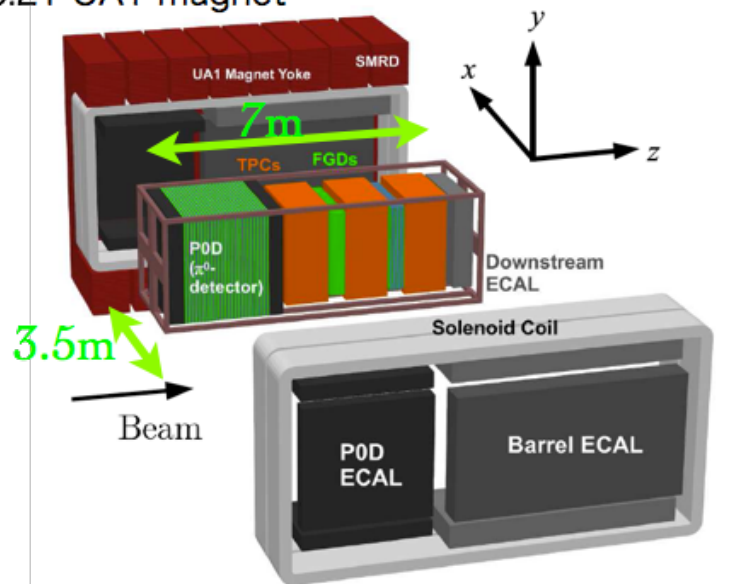


系統誤差の改善(2)： 前置検出器アップグレード

ν 原子核反応の系統誤差改善にむけて検出器をアップグレードして以下の改良を行う

- acceptanceを 4π に
- fine granularity, better PID

0.2T UA1 magnet



主な標的：C,O
アクセプタンス：
前方が大きい

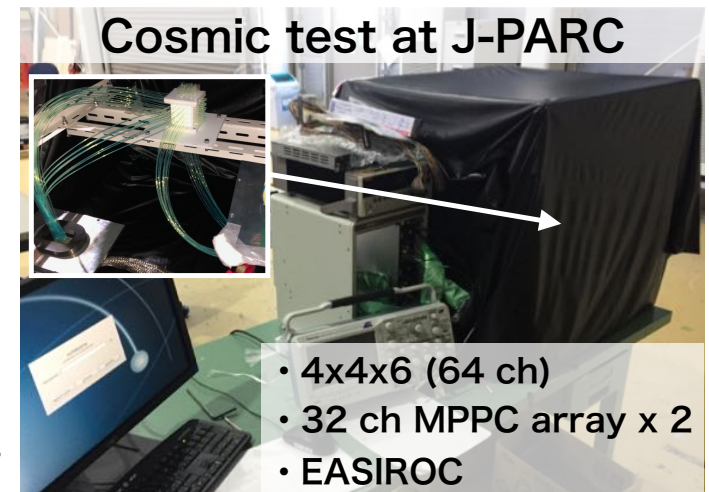
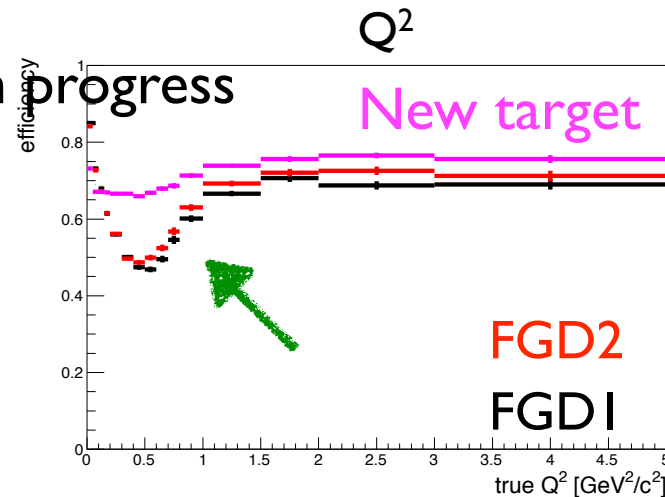
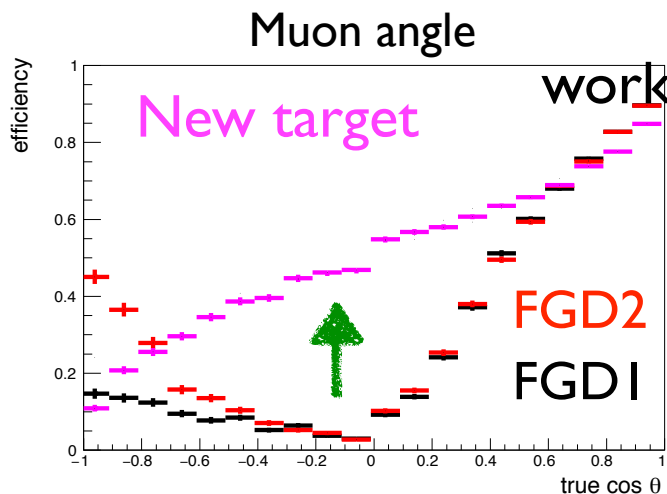
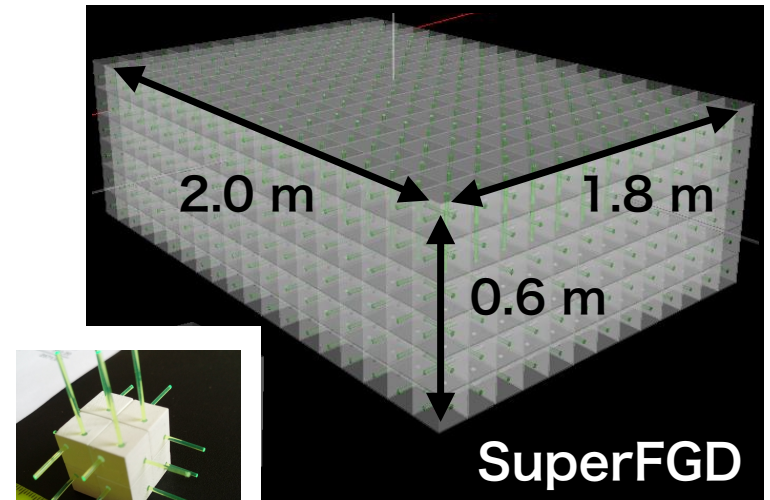
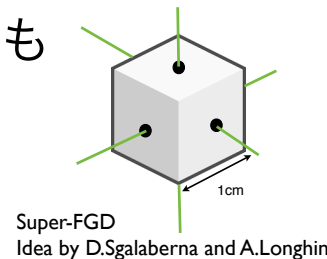
主な標的：O
アクセプタンス：
 4π

	Current	Upgrade
Target mass	2.2 tons	4.3 tons

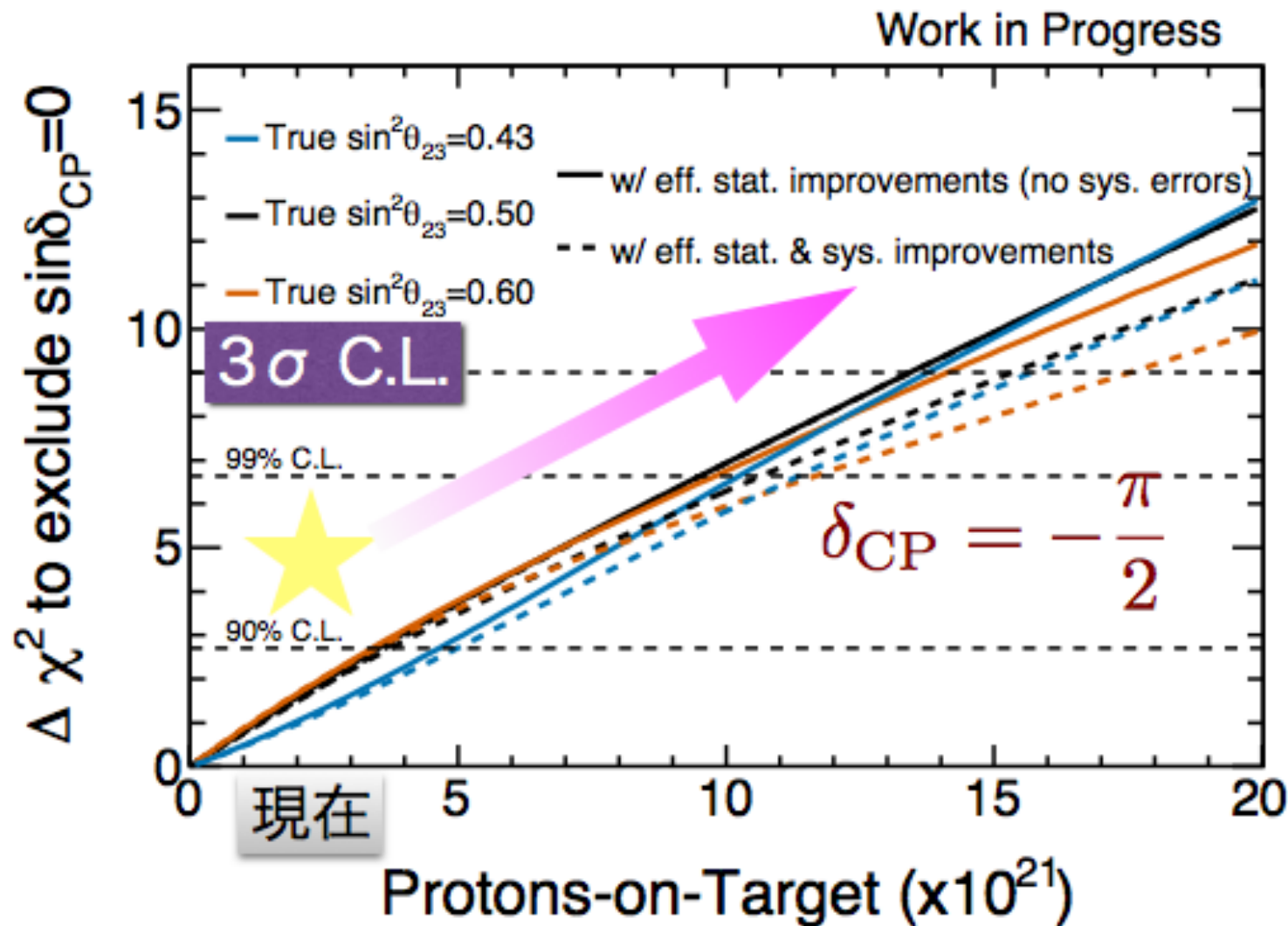
系統誤差の改善(2) : 前置検出器アップグレード

Scintillator detector : SuperFGD

- ~2M scintillator “cube” of 1 cm^3 w/ 3 holes
- ~60k channels readout for 3D views
- 様々なR&Dが進行中 (国内大学やKEKも中心的な開発グループ)



CPV探索の感度



3σ以上の感度で
CP対称性破れを
決定できる

まとめ

- ・ T2K実験の2017年4月までのデータからニュートリノ CPが破れていることを示唆する結果（CP保存を 2σ で排除）
- ・ また θ_{23} も最大混合角を示唆している
- ・ 今後、ビームパワー増強や系統誤差の改善、解析の改善などを行い、CPの破れを 3σ 以上の感度で探索する