

加速器ニュートリノ振動実験の 現状と展望



東京大学 理学系研究科 物理学専攻
次世代ニュートリノ科学連携研究機構
カブリ数物連携宇宙研究機構



横山 将志



第24回ICEPPシンポジウム

16年ぶり3回目のICEPPシンポです

前回はD3のとき

Observation of Large CP Violation
in the Neutral B Meson System

(中性 B 中間子系における CP 対称性の破れの発見)

東京大学 横山将志
(For Belle Collaboration)

第8回ICEPPシンポジウム@白馬

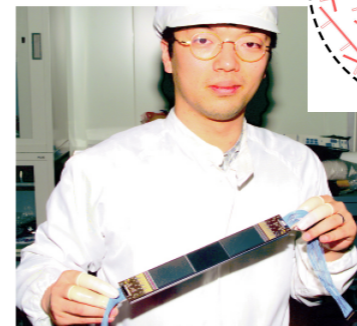
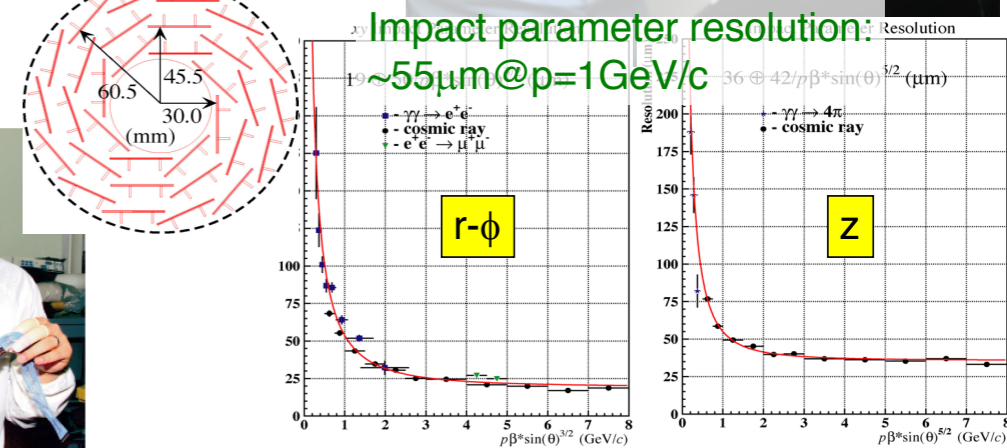
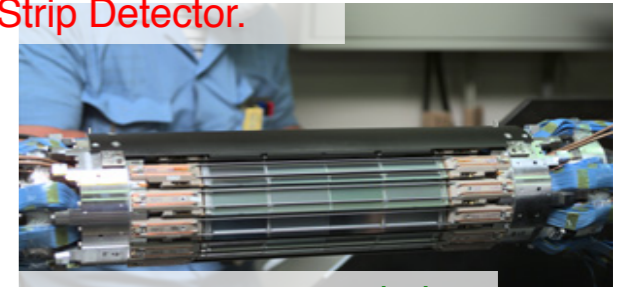
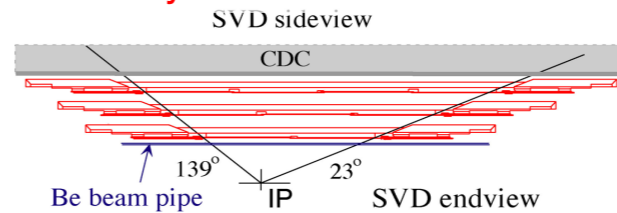
PRL 87, 091802 (2001)
Full-paper submitted to PRD
(hep-ex/0202027)



Silicon Vertex Detector

ICEPP symposium
Jan. 17-20 2002
Hakuba

Three layers of Double-sided Silicon Strip Detector.

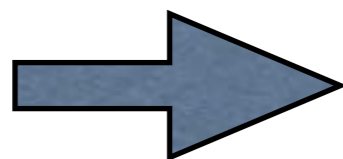


Observation of Large CP Violation in the Neutral B Meson System

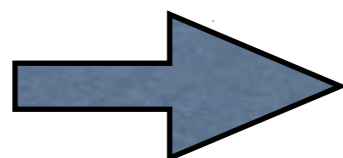
Belleでシリコンバーテックス検出器を5回作ったり、
CP非対称性を測ったりした

日程	時間	講演者	題目	講演時間
17	17:00	川崎 雅裕	講義:Qボールと物質・反物質の起源(1)	60
			座長:堀江 圭都	
	18:00	山本 将博	JLC用偏極電子源の開発状況	25
	18:25	渡川 和晃	理研自由電子レーザー計画と低エミッタンス電子銃	25
	18:50	田中 純一	D0-D0bar mixing in Belle	25
	19:15	三橋 利也	Meg実験の現状と展望	25
18	9:00	川崎 雅裕	講義:Qボールと物質・反物質の起源(2)	60
			休憩	15
	10:15	諸井 建夫	講義:Particle Cosmology — Basics and Some Applications — (1)	120
			座長:野崎 光昭	
	17:00	守永 光利	TAのシュミレーション or Geant4 の validation study	25
	17:25	眞子 直弘	望遠鏡アレイ計画におけるフロントエンド処理とエネルギーキャリブレーション	25
	17:50	大和 一洋	南極周回気球観測(BESS-Polar)にむけたDAQシステムの開発	25
	18:15	長谷川 豪志	KEK/ATFにおけるPhoto Cathode RF Gunを用いた実験結果について	25
	18:40	柿崎 充	Proton Decay from Planck Scale	25
			座長:石田 康明	
	22:00	山本 真平 長谷川 雅也	K2K実験の現状と展望1 K2K実験の現状と展望2	40
19	9:00	諸井 建夫	講義:Particle Cosmology — Basics and Some Applications — (2)	120
			座長:堀江 圭都	
	11:00	山内 正則	SUPER B ファクトリー	25
	11:25	石塚 正基	スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの研究	25
	11:50	丸藤 祐仁	スーパーカミオカンデにおける太陽ニュートリノの観測および反ニュートリノの扱	25
			座長:野崎 光昭	
	17:00	身内 賢太郎	LiFボロメータを用いた神岡地下実験室での暗黒物質探索実験	40
		関谷 洋之	暗黒物質検出のための方向感度をもった検出器の開発	
	17:40	梅原 さおり	二重ベータ崩壊測定について	25
	18:05	勝木 厚成	暗黒物質探索について	25
	18:30	山下 雅樹	XMASS実験—Xe検出器による暗黒物質探策	25
	18:55	隅田 土詞	KL → $\pi^0 \nu \nu$ 探索実験	25
	22:00	高橋 仁	Study of S=-2 Nuclei with Hybrid-Emulsion Method	25
22:25	後藤 雄二	BNL/RHIC における最初の偏極陽子衝突	25	
		座長:石田 康明		
20	9:00	坂本 宏	LHC-ATLAS実験日本担当部の現在の進行状況	25
	9:25	内田 佐知子	B → J/ψ η, J/ψ π, J/ψ ρ 崩壊の観測	25
	9:50	田端 岳彦	Belle ACC アップグレードのためのシリカエアロジェルRICHの研究開発	25
	10:15	空 剛史	Avalanche photodiodeを用いたScintillating Fiber detectorの開発	25
	10:40	松永 浩之	CDF Run2 の現状および展望(1)	40
		鈴木 隆史	CDF Run2 の現状および展望(2)	40
	11:05	横山 将志	中性B中間子系におけるCP対称性の破れの発見	25

坂本さん



横山



ニュートリノ振動の状況(2002年)

スーパーカミオカンデ (石塚)

K2K (山本, 長谷川)

まとめ

➤ 2世代振動解析

$$\Delta m^2 = 1.6 \sim 3.6 \times 10^{-3} \text{eV}^2, 0.9 < \sin^2 2\theta$$

$$\text{best fit } (\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2, \sin^2 2\theta = 1.0)$$

➤ 3世代振動解析

pure $\nu_\mu - \nu_\tau$ oscillation と Consistent

$$\sin^2 \theta_{13} < 0.25$$

➤ スーパーカミオカンデによるL/Eの研究 (MC)

最初の振動ピークが観測可能

Best fit parameter を仮定した場合、4年間の観測により

Decoherence と Oscillation のあいだで

$$\Delta\chi^2 = 8.74 \text{ が期待される}$$

Summary

ICEPP Symposium 2002 @ Hakuba

June 1999 - July 2001 data:

- Accumulated 5.6×10^{19} POT
- FC events in SK fiducial volume (4.8×10^{19} POT)

Observed: 56

Expected with null oscillation: $80.6^{+7.3}_{-8.0}$ ==> a sign of neutrino oscillation !!

- Energy Spectrum Analysis:

==> underway

(more statistics & reduce sys. error --> preparing for new detector)

- Continue data taking in 1-2 more year.

K2K established long baseline experiment method.

S. Yamamoto, Kyoto

「振動」であることの確認

大気ニュートリノの追試
長基線実験の有効性を確立

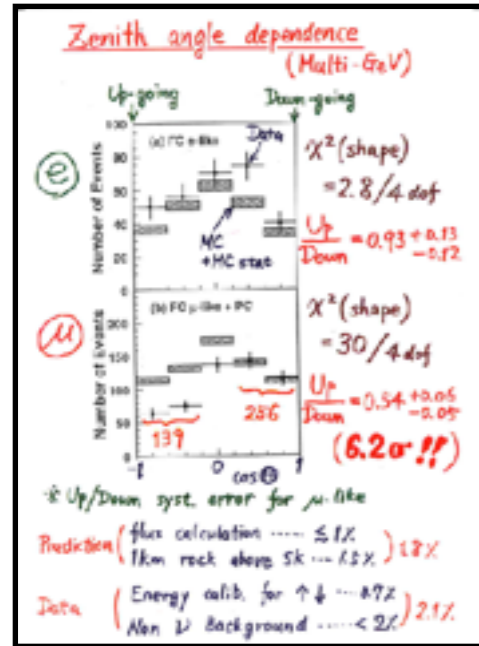
SKは、事故の直後。2002年末にPMT半分で再開

太陽ニュートリノ：SNO+SKの最初の結果が2001年

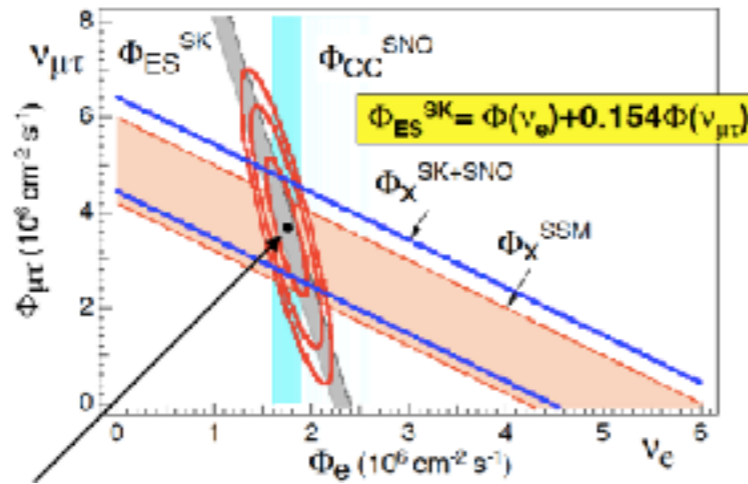
その前後, 数年

20周年

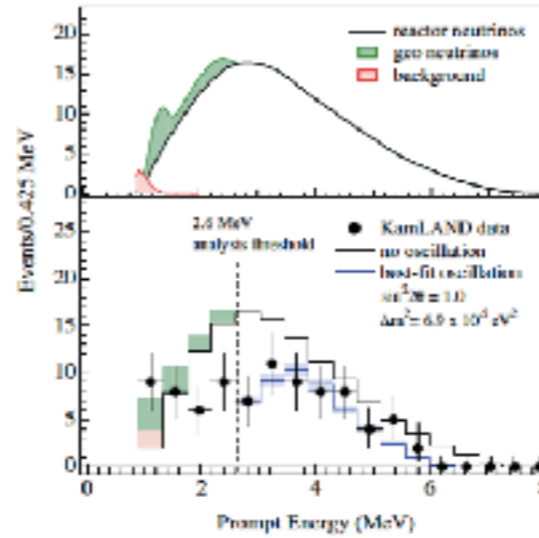
1998



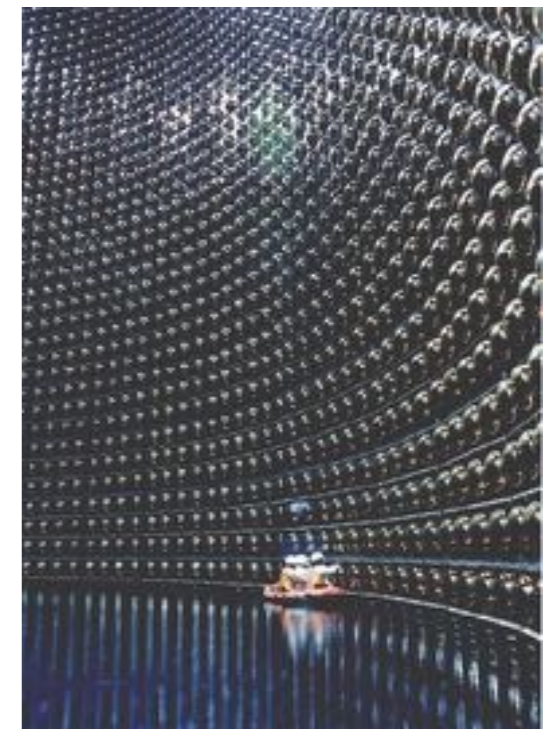
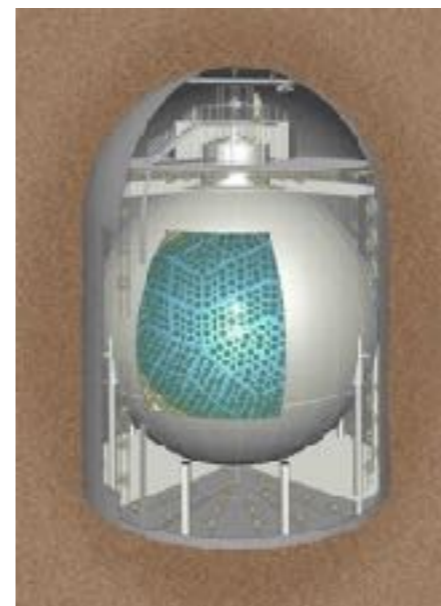
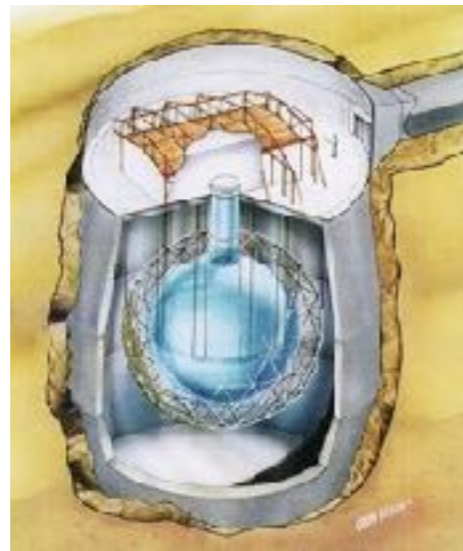
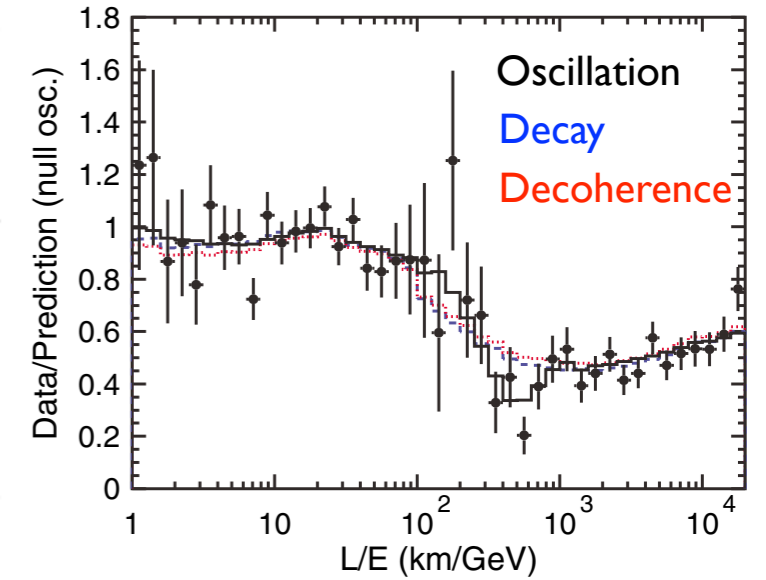
2001



2002



2004



大気ニュートリノ

太陽ニュートリノ

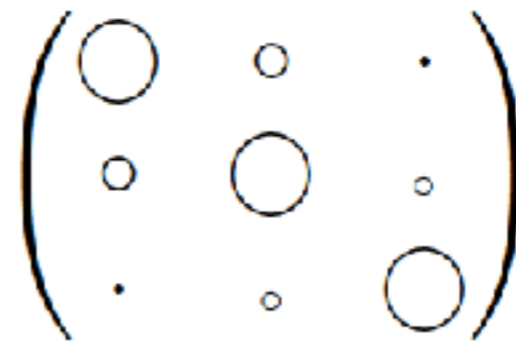
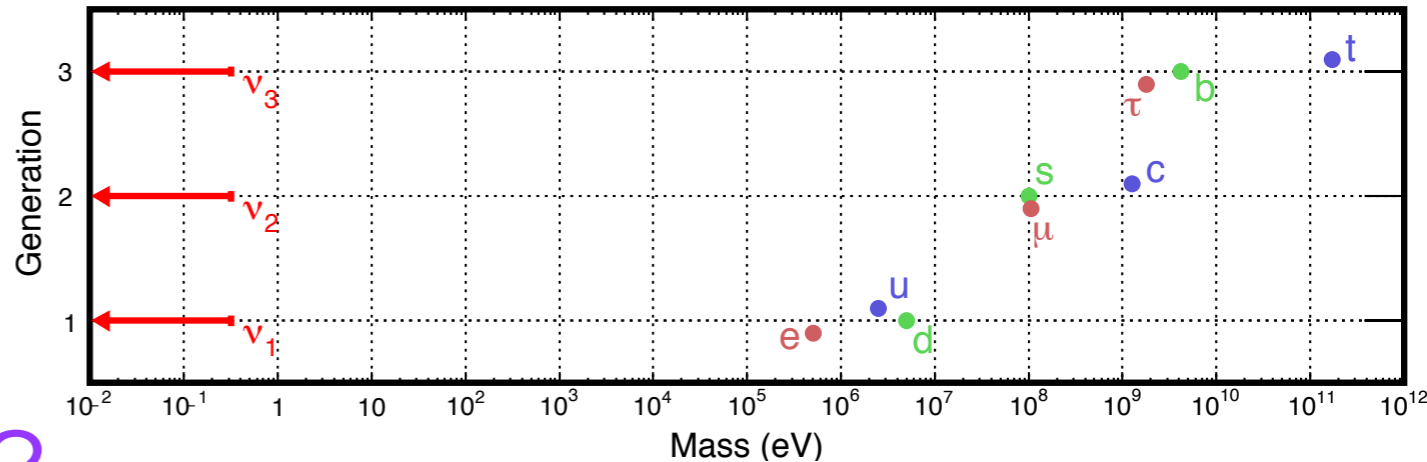
原子炉反ニュートリノ

大気ニュートリノ

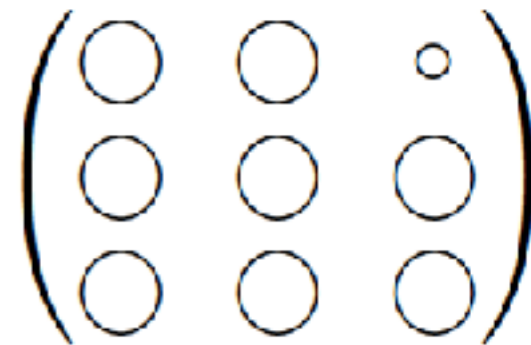
唯一確立した New Physics

ニュートリノ質量の起源は？

- マヨラナ質量？
- マヨラナ粒子の存在
- 純粹にディラック質量？
- マヨラナ項を禁じる対称性
- 極端に小さい湯川結合
- 右巻きニュートリノの存在



CKM



MNS

クォークと大きく違う混合行列！

- そもそも、世代って？ (*who ordered that?*)

ニュートリノ混合研究の現状

三世代混合

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

$s_{ij} = \sin\theta_{ij}$, $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$

過去10数年の進展

大気 ν ・ 加速器 ν

$\theta_{23} \doteq 45^\circ$, $|\Delta m_{32}^2| \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$

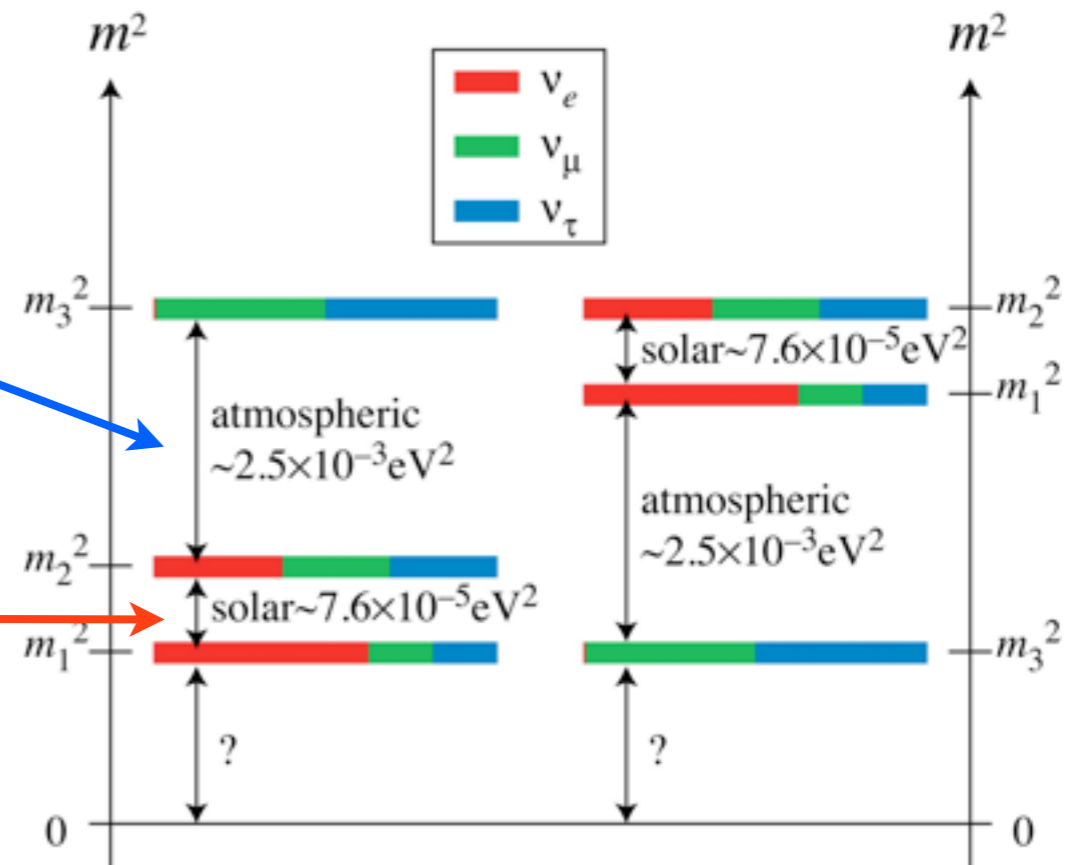
太陽 ν ・ 長基線原子炉 ν

$\theta_{12} \doteq 34^\circ$, $\Delta m_{21}^2 \sim 7.6 \times 10^{-5} \text{eV}^2$

加速器 ν ・ 短基線原子炉 ν

$\theta_{13} \doteq 9^\circ$

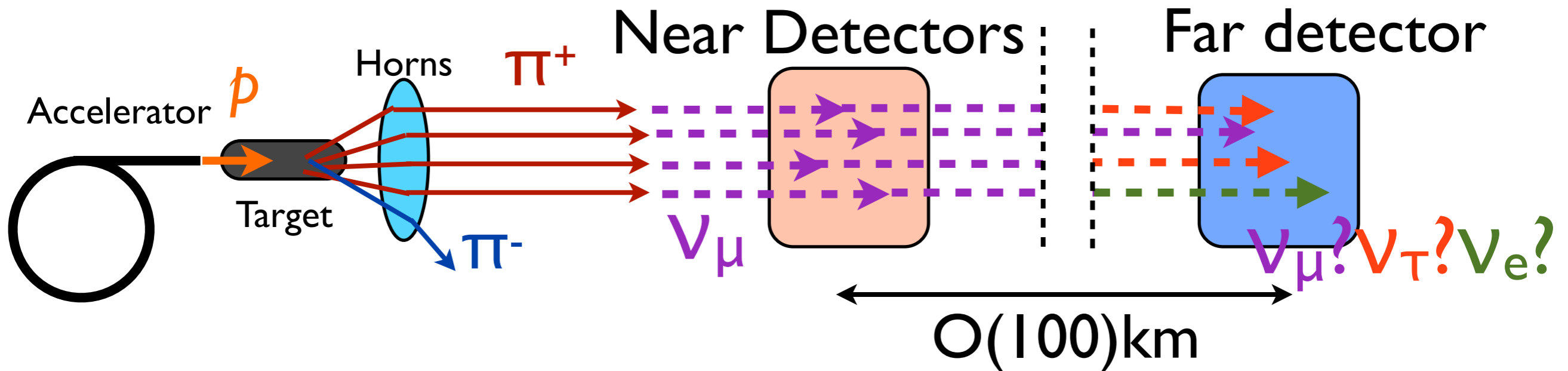
残る謎



• CP どうなってるか

- 質量階層パターン (Δm_{32}^2 の符号)
- $(\theta_{23} - \pi/4) = 0? +? -?$ (octant)
- 3世代混合で閉じているか?

長基線ニュートリノ振動実験



- 人工ビームで，距離，方向，エネルギーを制御可能
- 大強度ビームと，巨大な検出器が必要
- 系統誤差を抑える数々の工夫
 - 大強度陽子ビームの制御
 - π 生成測定実験 (ex. NA61@CERN)
 - 前置検出器によるin situ測定

長基線ニュートリノ振動実験

T2K(2009-)
電子ニュートリノ出現の発見
CP非対称性のヒント

$\Delta m^2_{\text{atm}} = 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$
 $L \sim 500 \text{km}$ for $E = 1 \text{GeV}$

K2K(1999-2004)
世界初の長基線振動実験
大気ニュートリノ振動の確認

日本

OPERA(2006-2012)
タウニュートリノ出現の確認

ICARUS(2010-2012)

ヨーロッパ

MINOS(2005-2012)
K2Kの追試

MINOS+(2013-)

NOvA(2014-)
T2Kの追試
質量階層

アメリカ

大型・高性能
検出器

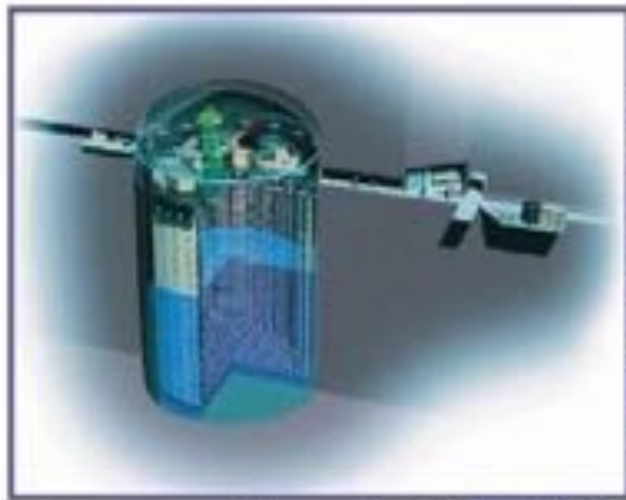
T2K実験

<https://youtu.be/kQkS5jnr63g>

Tokai-to-Kamioka

高強度 ν_μ ビーム
 $E_\nu \sim 0.6 \text{ GeV}$

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



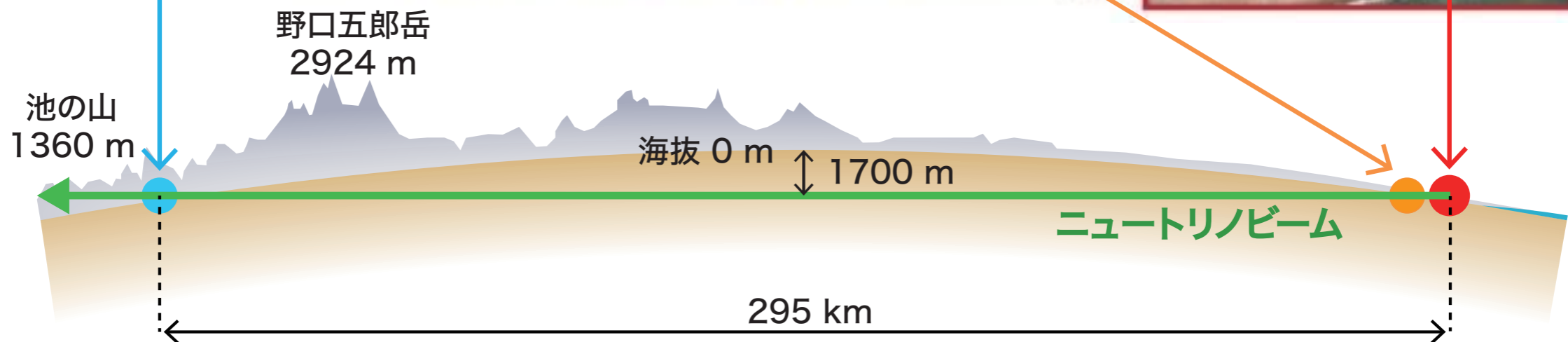
Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



スーパーカミオカンデ

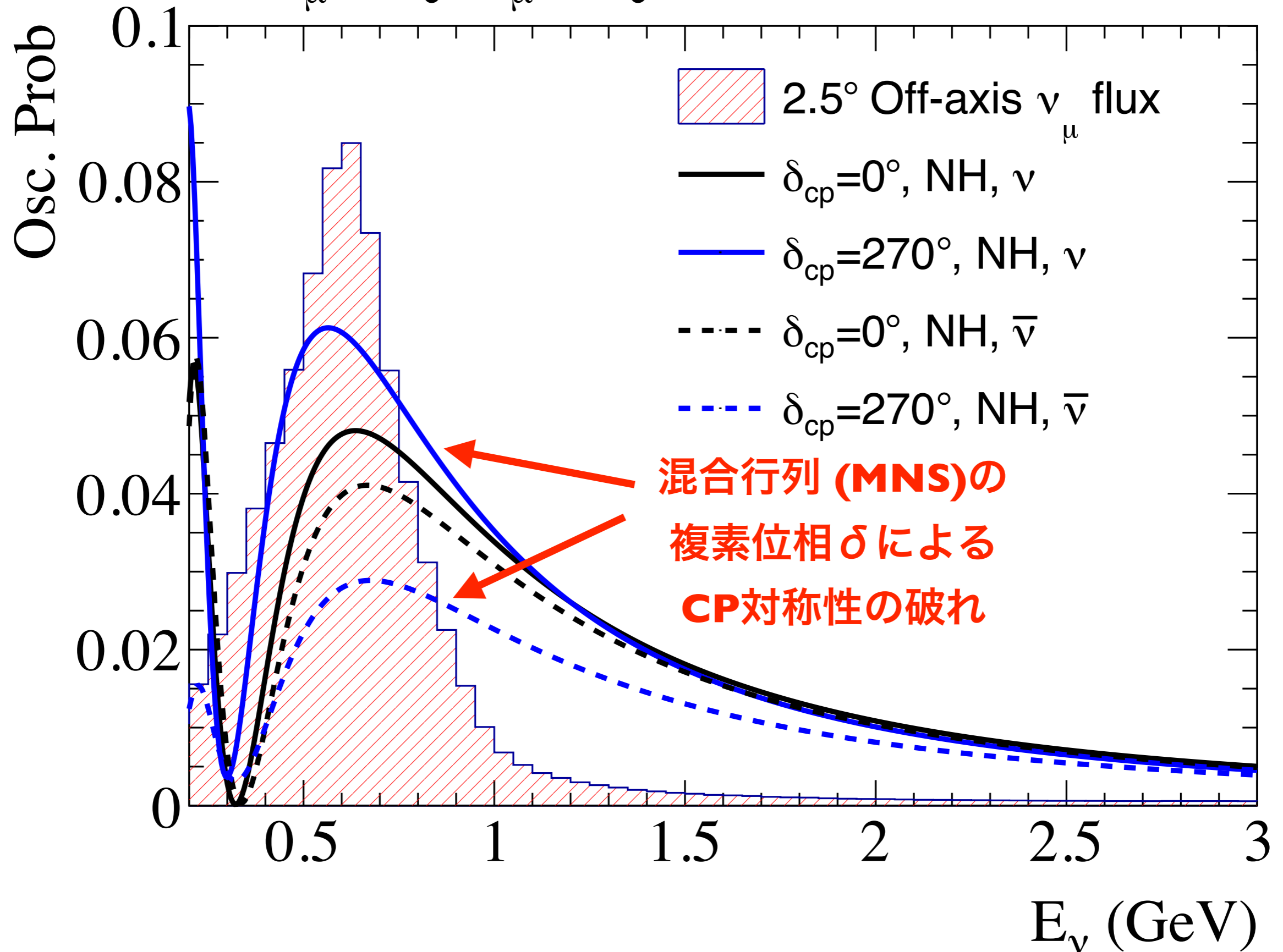
前置検出器

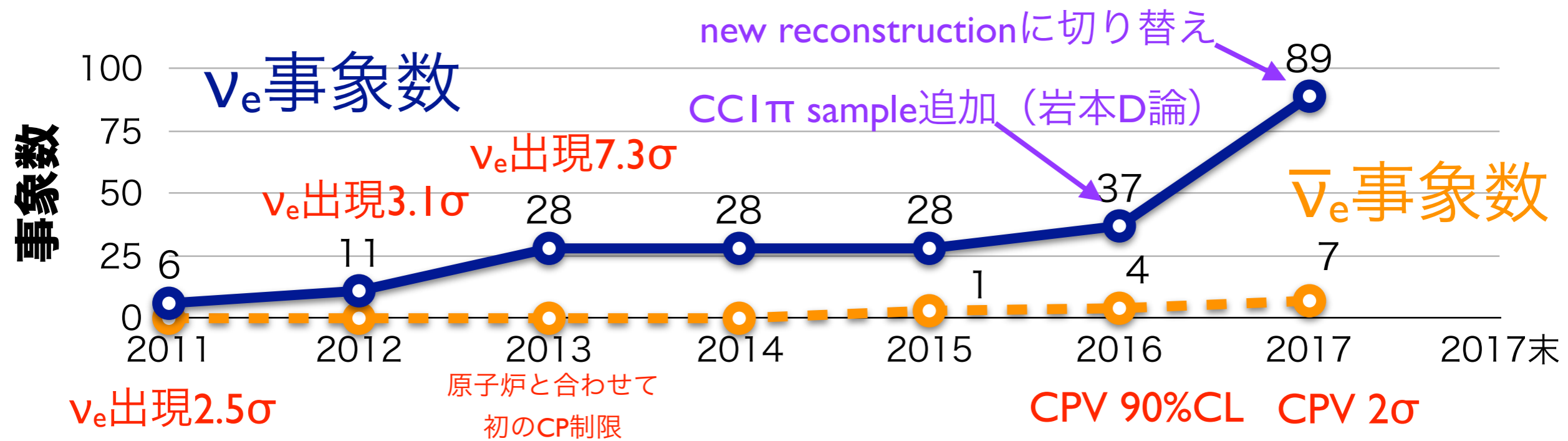
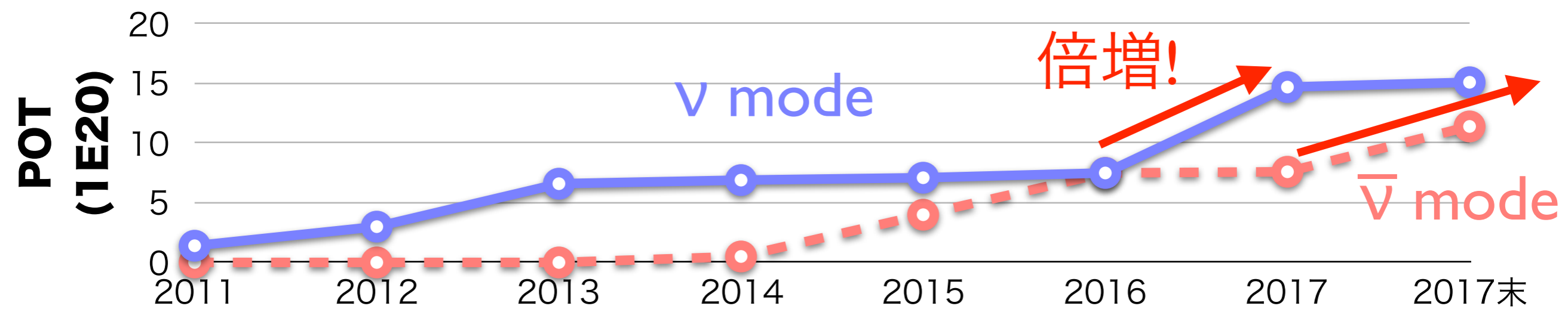
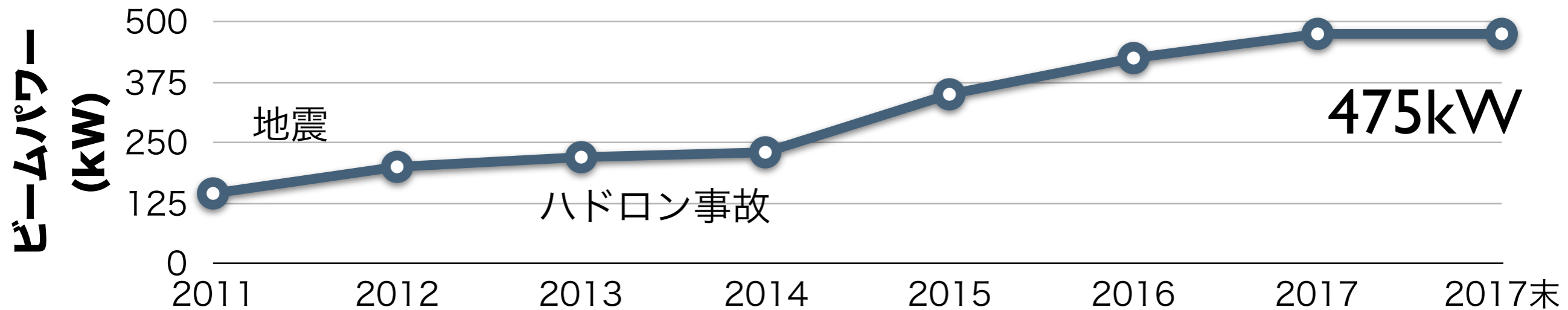
J-PARC



- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の探索 (θ_{13}) → CP の測定へ
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ の精密測定 (θ_{23})
- その他サプライズ?

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e, \bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$$





系統誤差の削減

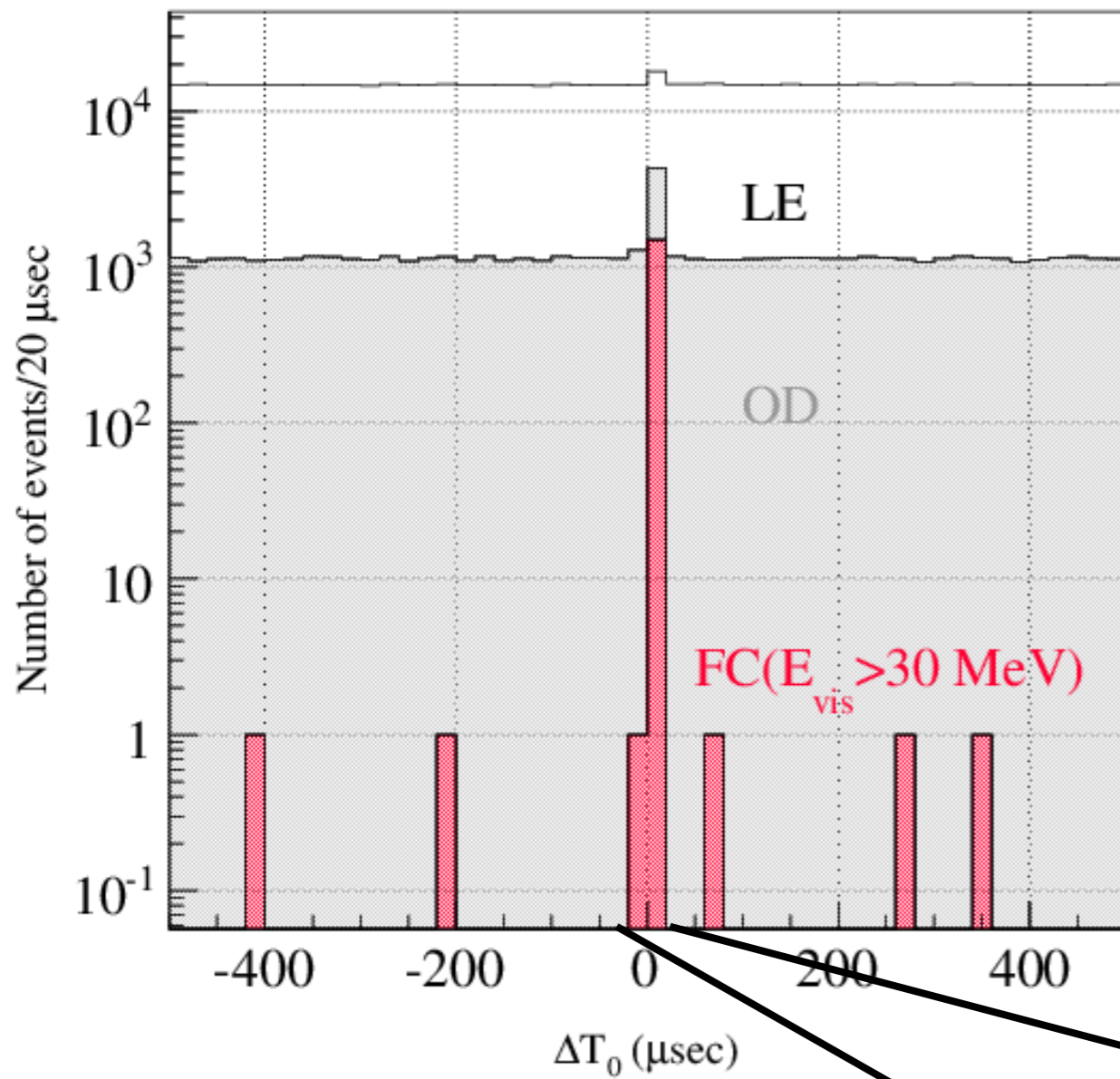
SKでの予想 ν_e 事象数に対する系統誤差(%)

	2012	2013	2014	2016
前置検出器での フラックス×断面積	5.0	2.9	3.2	2.9
前置検出器で制限できない ニュートリノ反応	7.6	7.5	4.7	3.0
SK検出器	3.0	3.5	2.7	2.4
終状態／二次ハドロン反応	2.3		2.5	2.5
合計	9.9	8.8	6.8	5.4

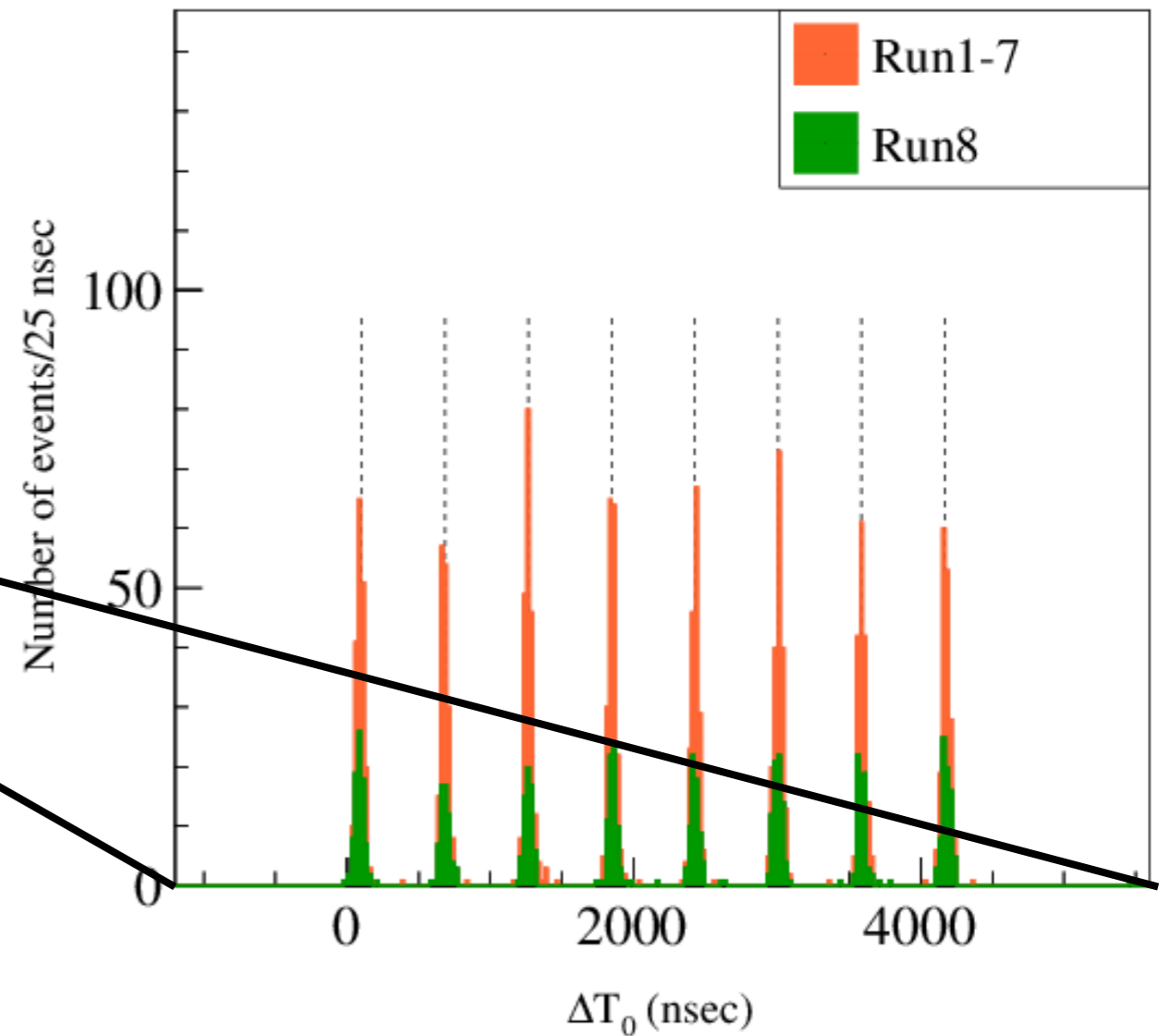
cf. 実験前の設計目標：<10%

T2K-IIでの目標：~4% (→岩本講演)

GPSで同期して
時間分布でJ-PARCからの
ニュートリノ事象を選択



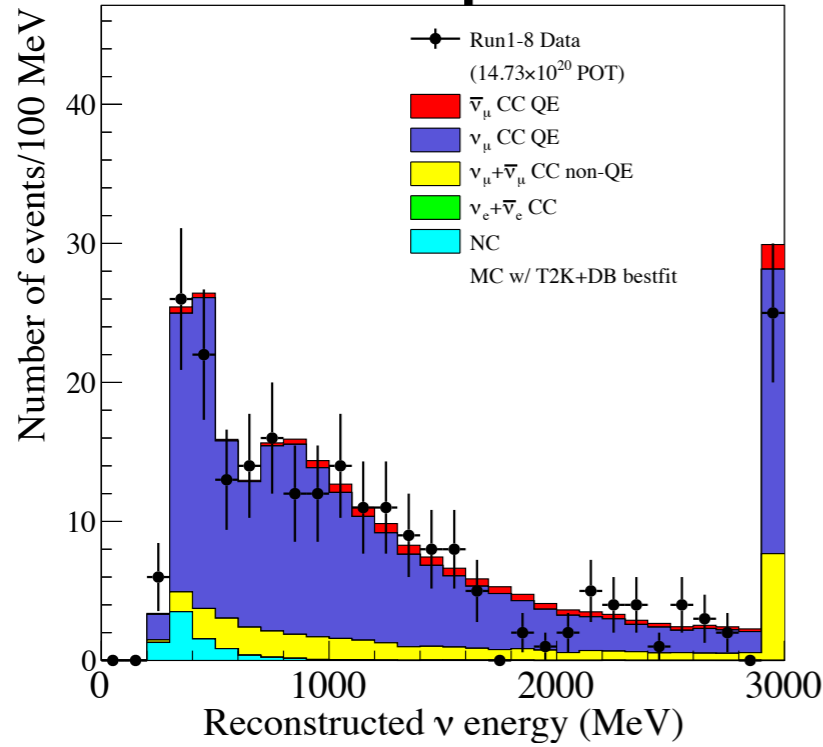
大気ニュートリノ
~10⁻³事象



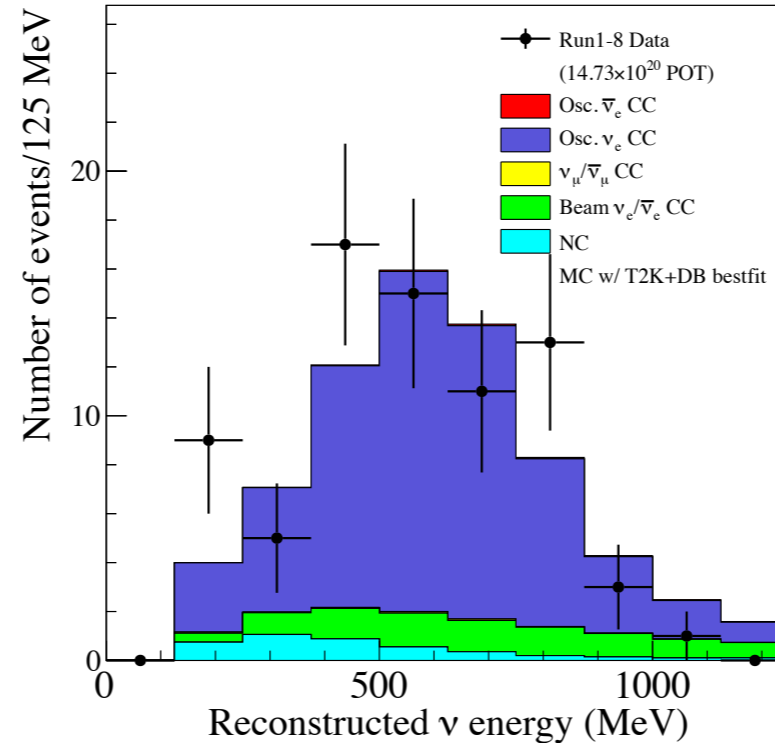
Fermilabのビームは10 μ sの間だらだらと出るなので、NOvAでは宇宙線(μ)
を落とすのに苦勞。最終サンプルにも5%くらい入ってる

観測事象のエネルギースペクトル

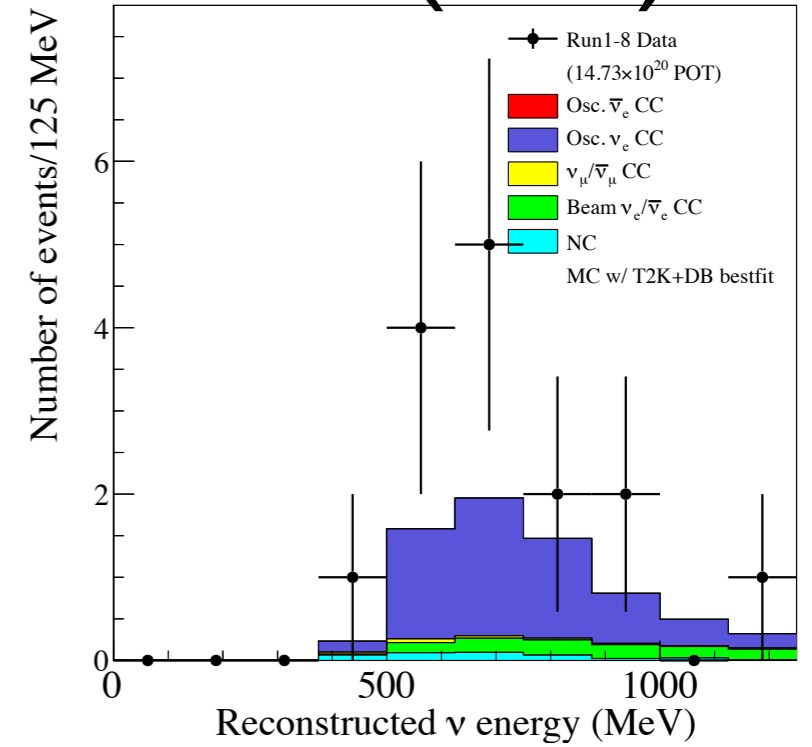
ν_μ



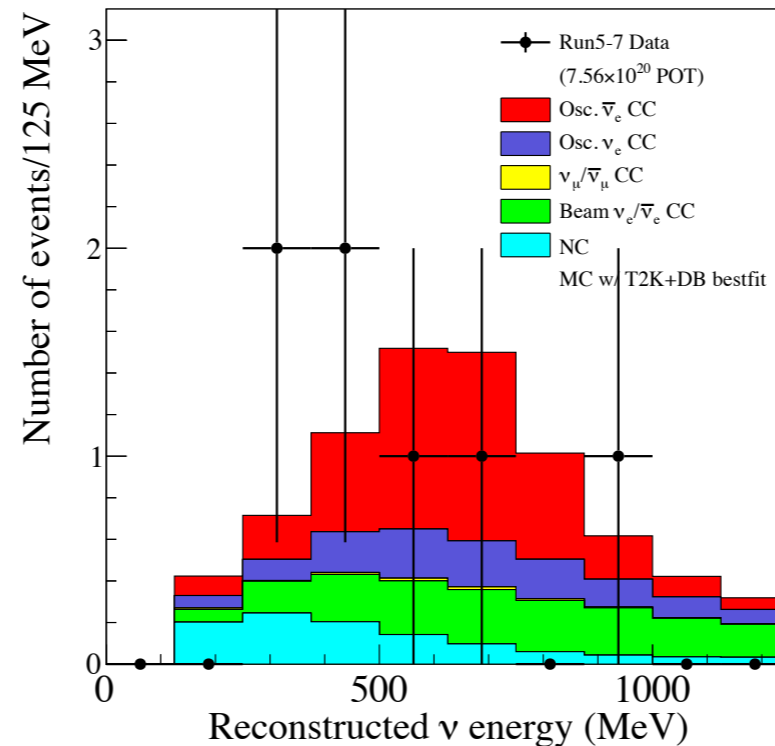
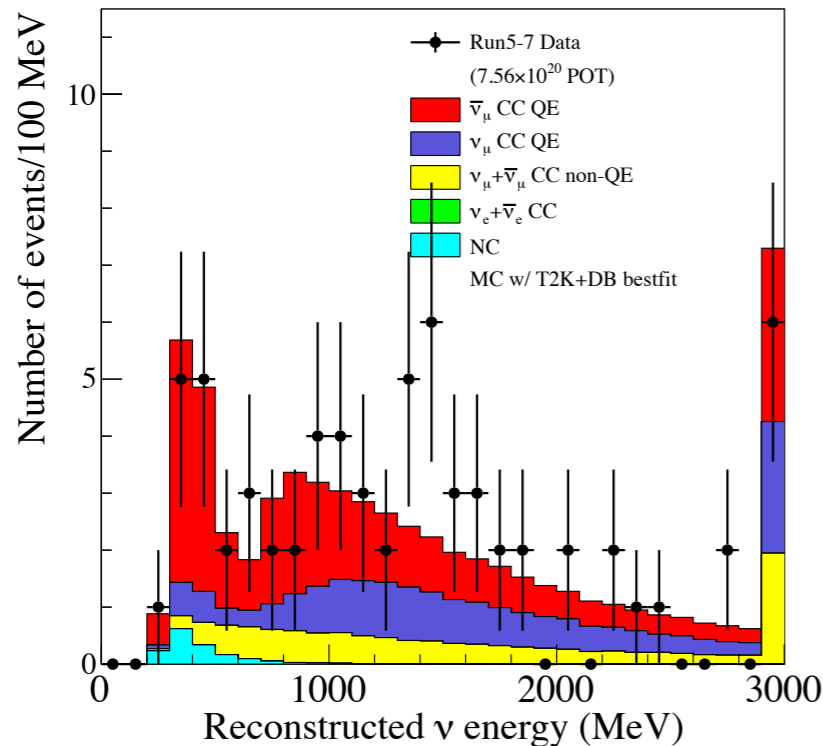
ν_e



$\nu_e (1\pi)$



ν



ν

2017年夏に
再構成アルゴリズム
刷新で
事象数 **~30%増!**

観測事象数

		MC予想			データ
		$\delta=0$	$\delta=\pi/2$	$\delta=-\pi/2$	
e-like	$\nu, 0\pi$	61.5	49.9	73.5	74
	$\nu, 1\pi$	6.01	4.87	6.92	15
	$\bar{\nu}$	9.04	10.04	7.93	7
μ -like	ν	267.4	267.7	267.8	240
	$\bar{\nu}$	62.9	63.1	63.1	68

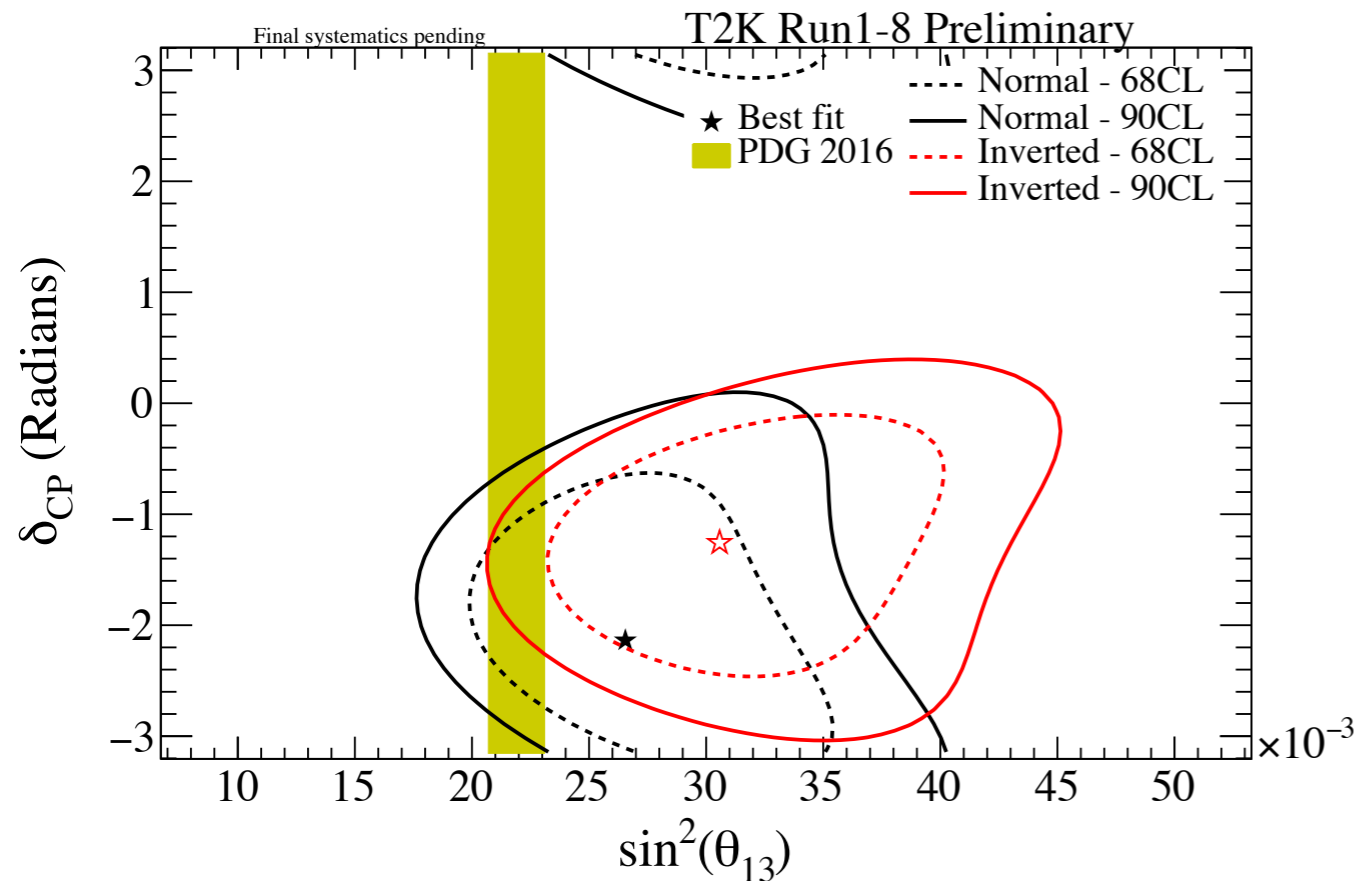
(normal hierarchy, $\theta_{23}=45^\circ$)

- νe 事象はCPが大きく破れていることを示唆
- $\nu\mu$ 事象は θ_{23} 最大混合とコンシステント

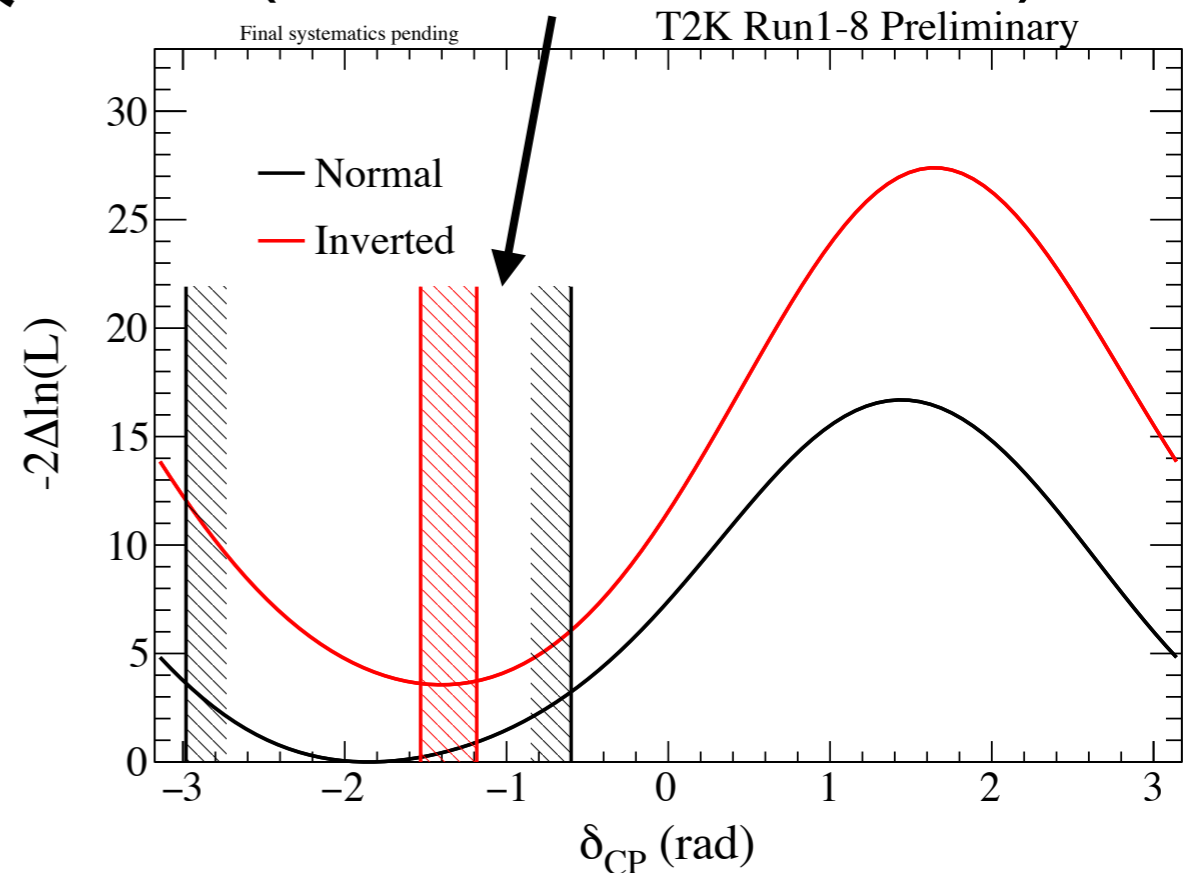
2017年夏の結果

手持ちのデータ全部解析

原子炉実験での θ_{13} との比較



2 σ CL range (Feldman-Cousins)



Normal hierarchy [-2.91, -0.60] rad.
Inverted hierarchy [-1.54, -1.19] rad

CP保存するパラメータ ($\delta=0, \pi$)は 2 σ CL 信頼区間の外！

レプトンセクターでの本格的なCP研究の幕開け

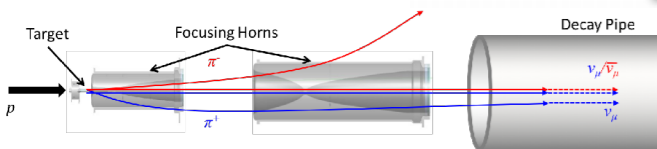
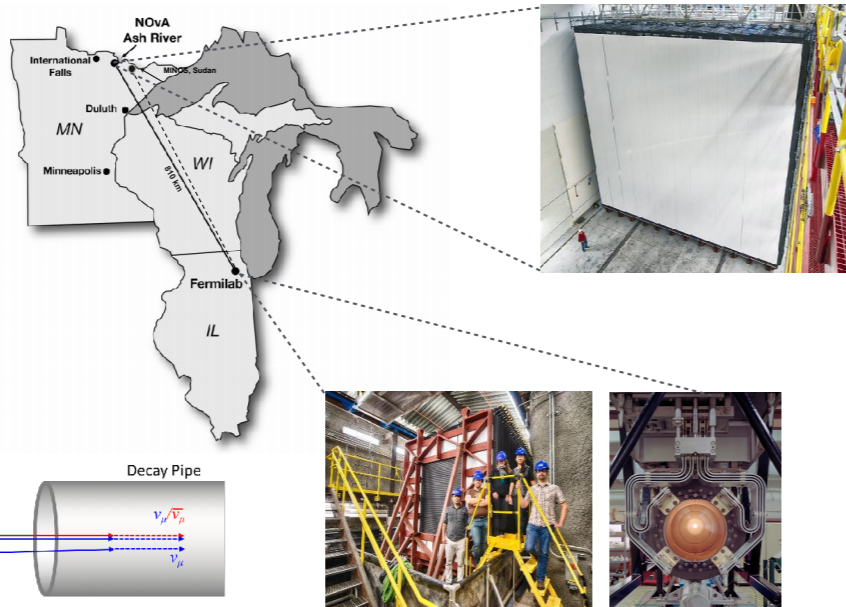
NOvA

NuMI Off-axis ν_e Appearance

12

A. Radovic, JETP January 2018

Studying oscillations over a 810km baseline with two functionally identical detectors and the worlds most powerful muon neutrino beam, NuMI.

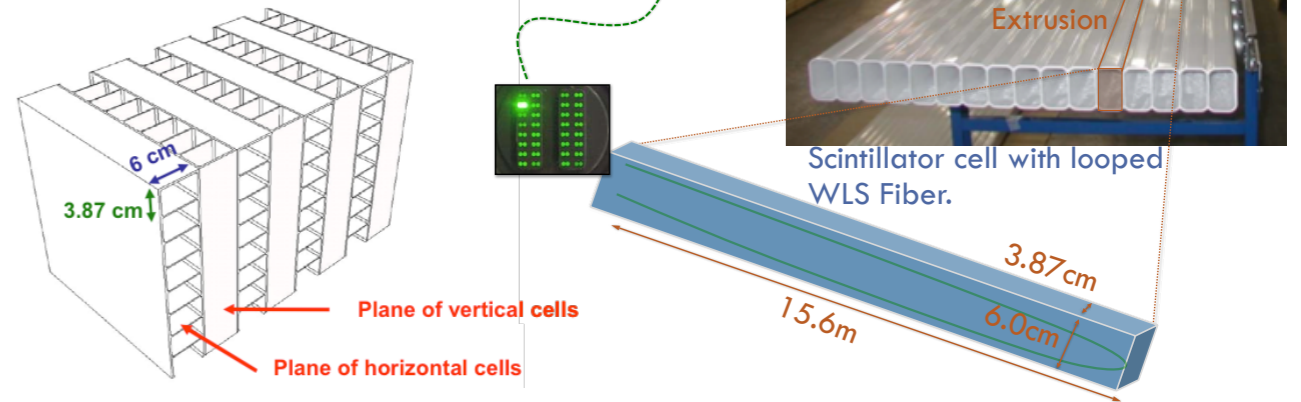


Detector Technology

17

A. Radovic, JETP January 2018

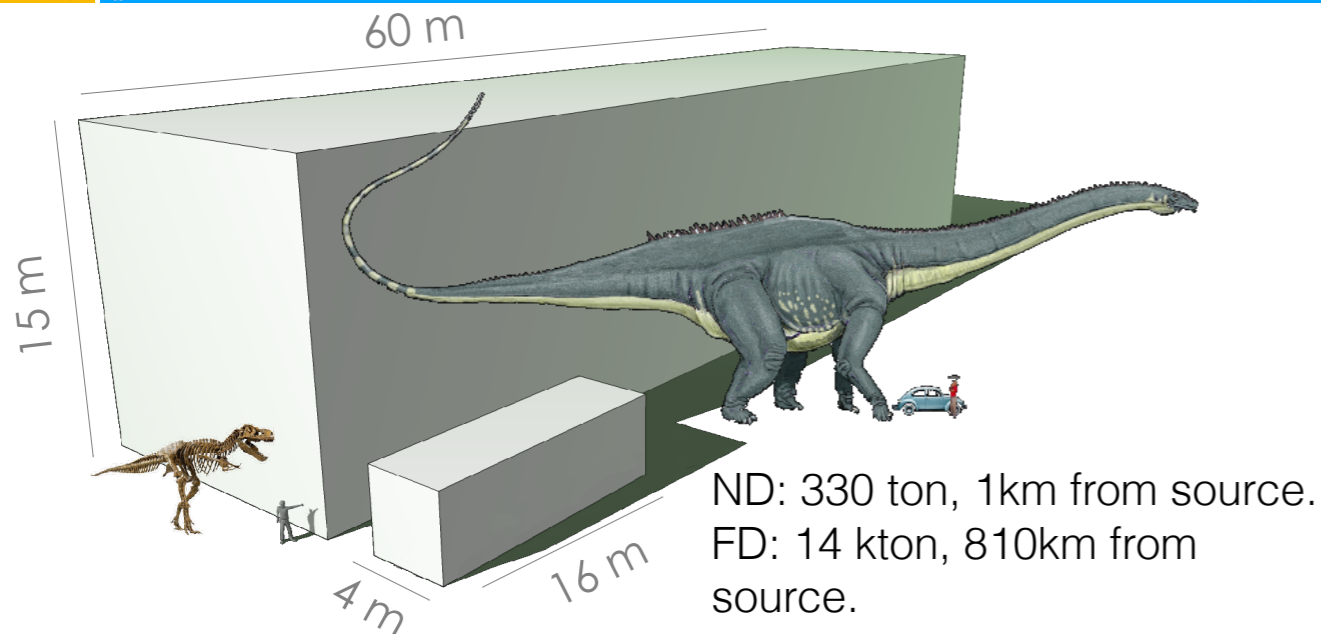
- PVC extrusion + Liquid Scintillator
- mineral oil + 5% pseudocumene
- Read out via WLS fiber to APD
- FD has ~344,000 channels
- muon crossing far end ~40 PE
- Layered planes of orthogonal views



The NOvA Detectors

16

A. Radovic, JETP January 2018



Fermilabからミネソタへ
基線長 810km

Matter effectが大きい (~30%)
Mass hierarchyに感度
(T2Kと合わせるとさらに改善)

T2K-NOvAのjoint analysisに向けた議論も進行中

NOvAは2018年1月に新しい結果を発表

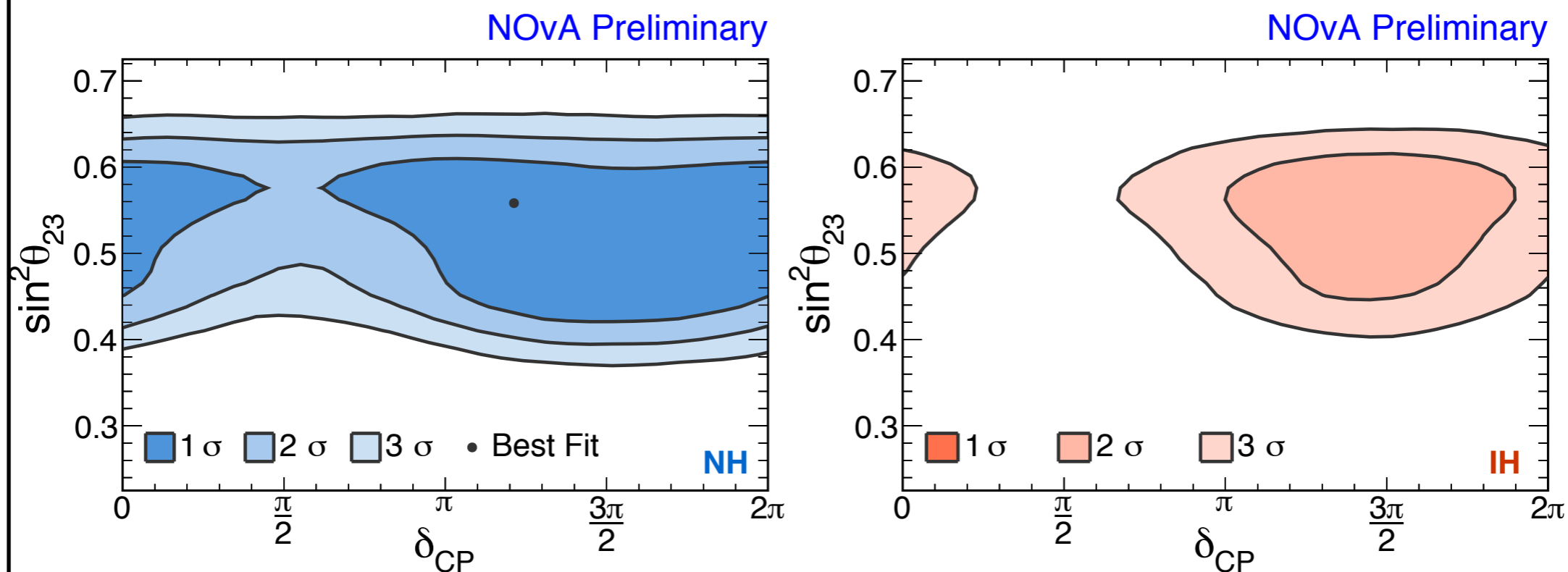
(まだニュートリノデータのみ。反 ν の結果は夏だそう)

Joint Best Fits

72 

A. Radovic, JETP January 2018

- Full joint fit with disappearance analysis. Feldman Cousins corrections in 2D & 1D limits.
- All systematics, oscillation pull terms shared.
- Constrain θ_{13} using world average from PDG, $\sin^2 2\theta_{13} = 0.082$



T2KやSKの結果を確認

- CP大きそう
- Normal hierarchyぽい

NOvAは2018年1月に新しい結果を発表

(まだニュートリノデータのみ。反 ν の結果は夏だそう)

ν_μ Result

49



A. Radovic, JETP January 2018

- Full joint fit with appearance analysis. Feldman Cousins corrections in 2D & 1D limits.
- All systematics, oscillation pull terms shared.
- Constrain θ_{13} using world average from PDG, $\sin^2 2\theta_{13} = 0.082$

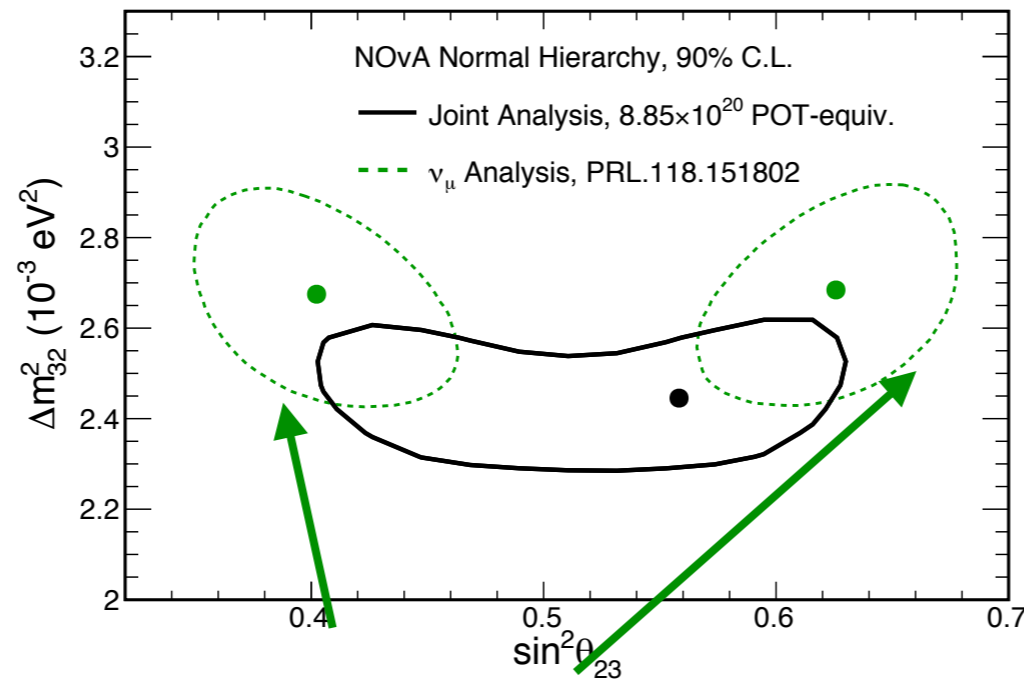
NOvA Preliminary

Best fit:

$$\Delta m_{32}^2 = 2.444^{+0.079}_{-0.077} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

UO preferred at 0.2σ

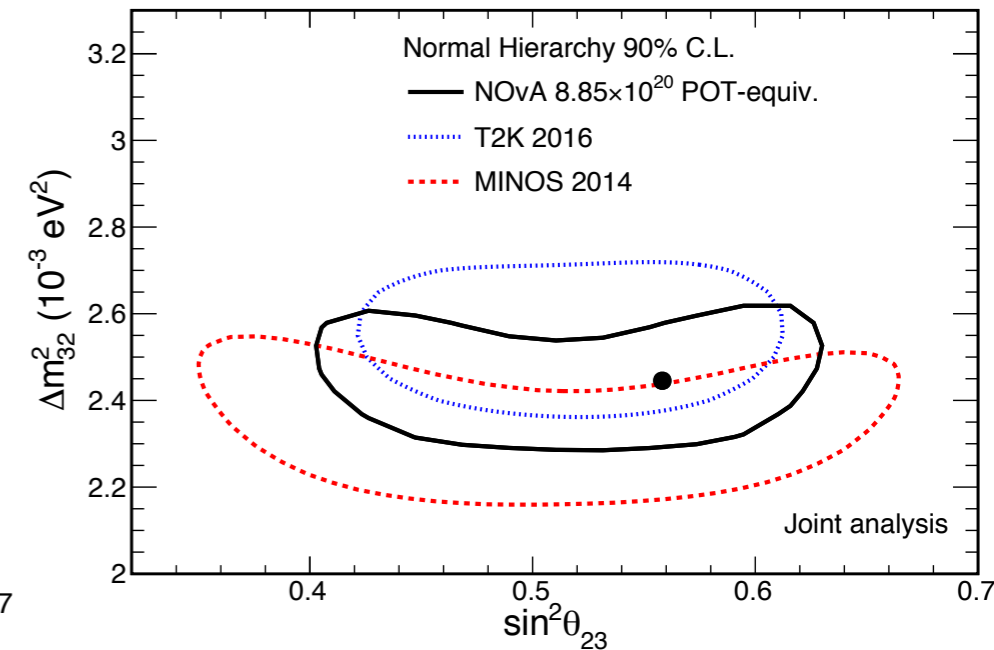
$$\sin^2 \theta_{23} = \begin{aligned} \text{UO: } & 0.558^{+0.041}_{-0.033} \\ \text{LO: } & 0.475^{+0.036}_{-0.044} \end{aligned}$$



前の結果

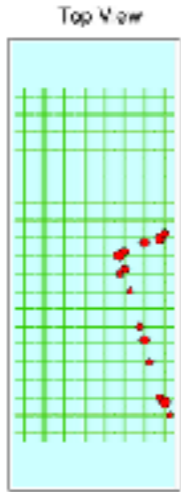
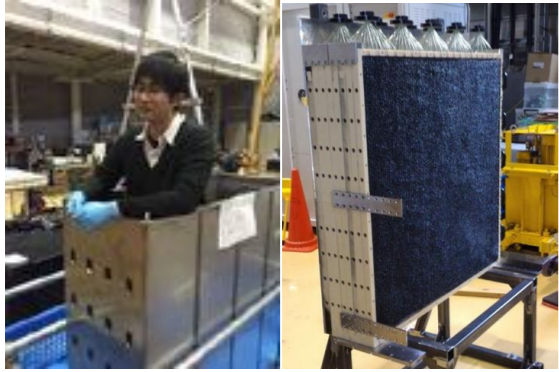
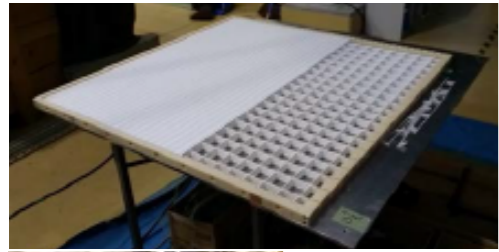
T2Kと比較

NOvA Preliminary

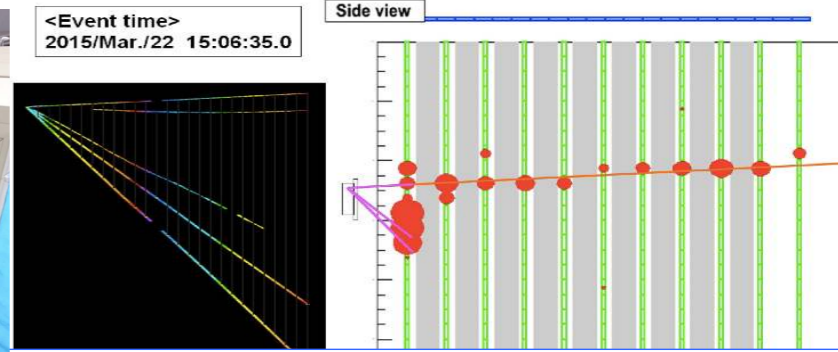


θ_{23} は去年は 45° でないと言っていた(2.6σ)のが、 45° に...
(校正・解析の変更によるもの)

小規模実験群@J-PARCニュートリノ実験ホール



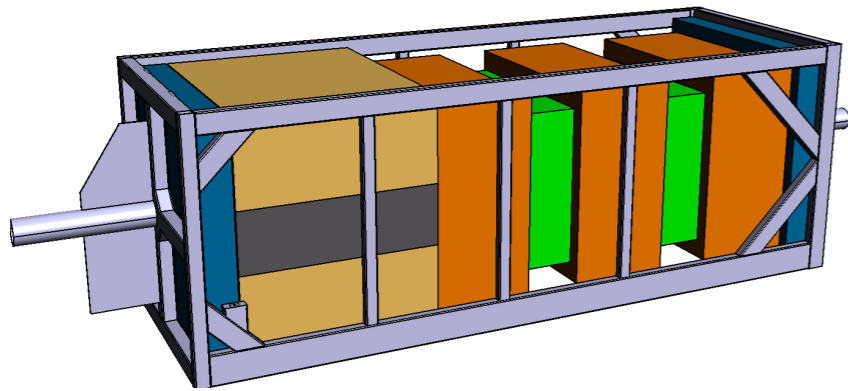
WAGASCI/Baby-MIND



NINJA (次の講演)

中期計画：T2Kアップグレード

大型次期計画
ハイパーカミオカンデ



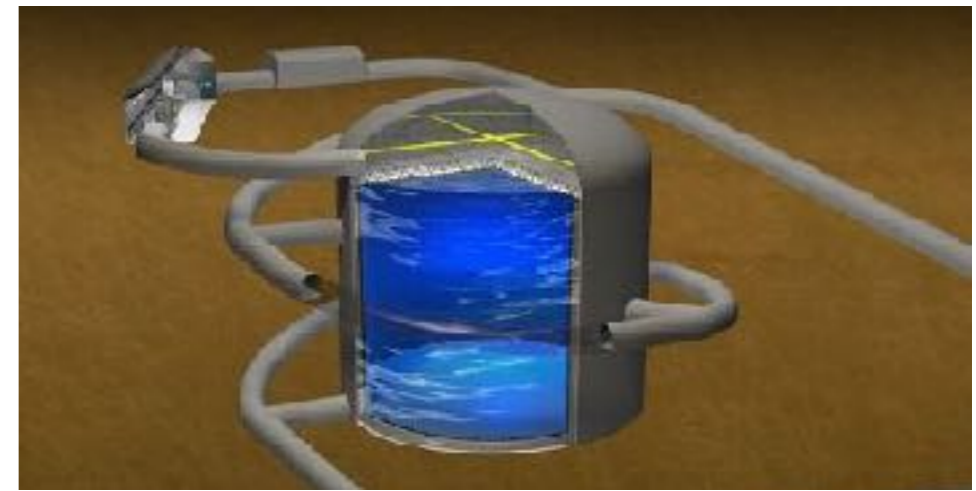
前置検出器改良

岩本氏の講演参照

CERNも加入



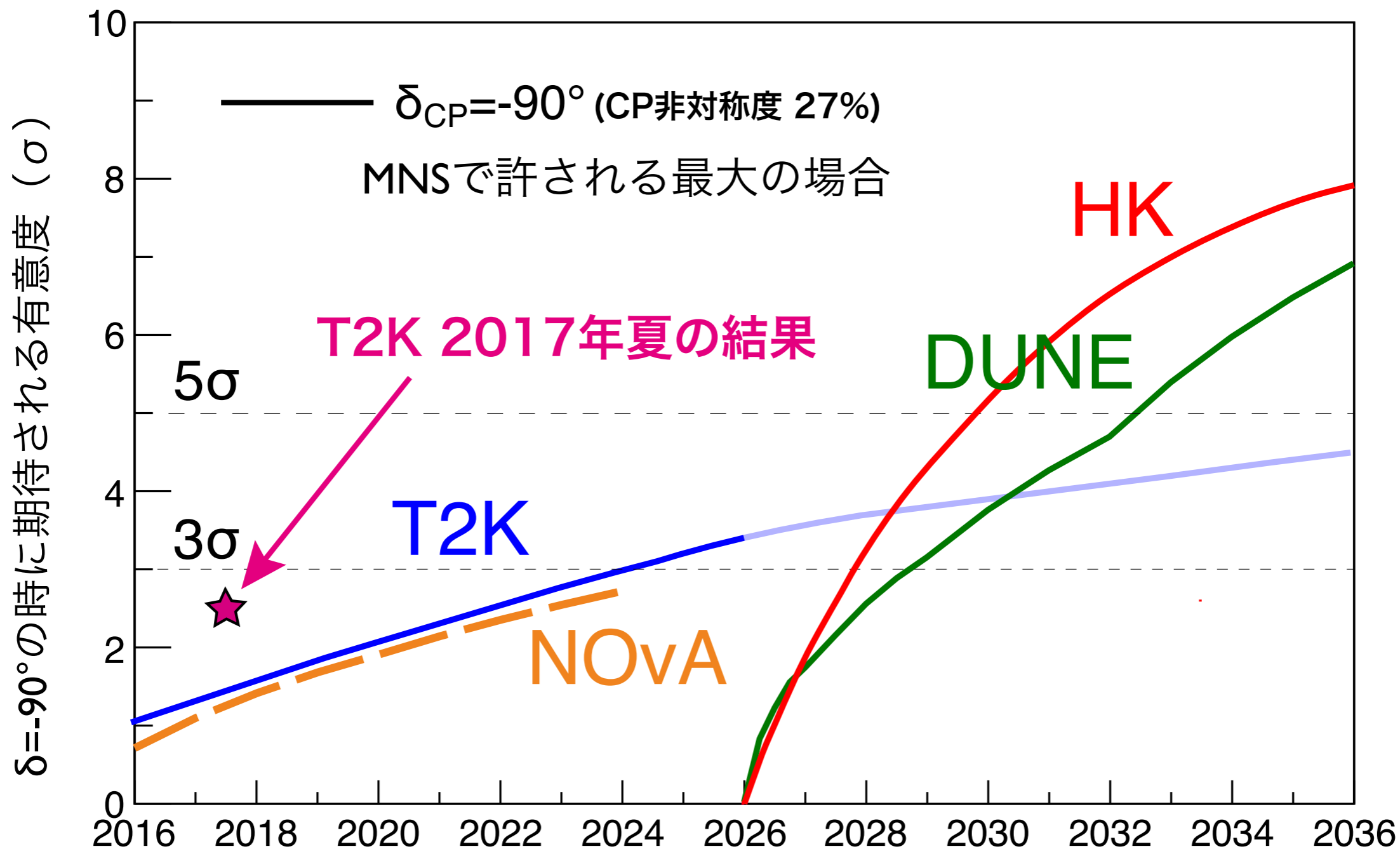
nuPRISM



陽子崩壊見たい！

大・中・小の実験で継続的に人材育成と物理成果

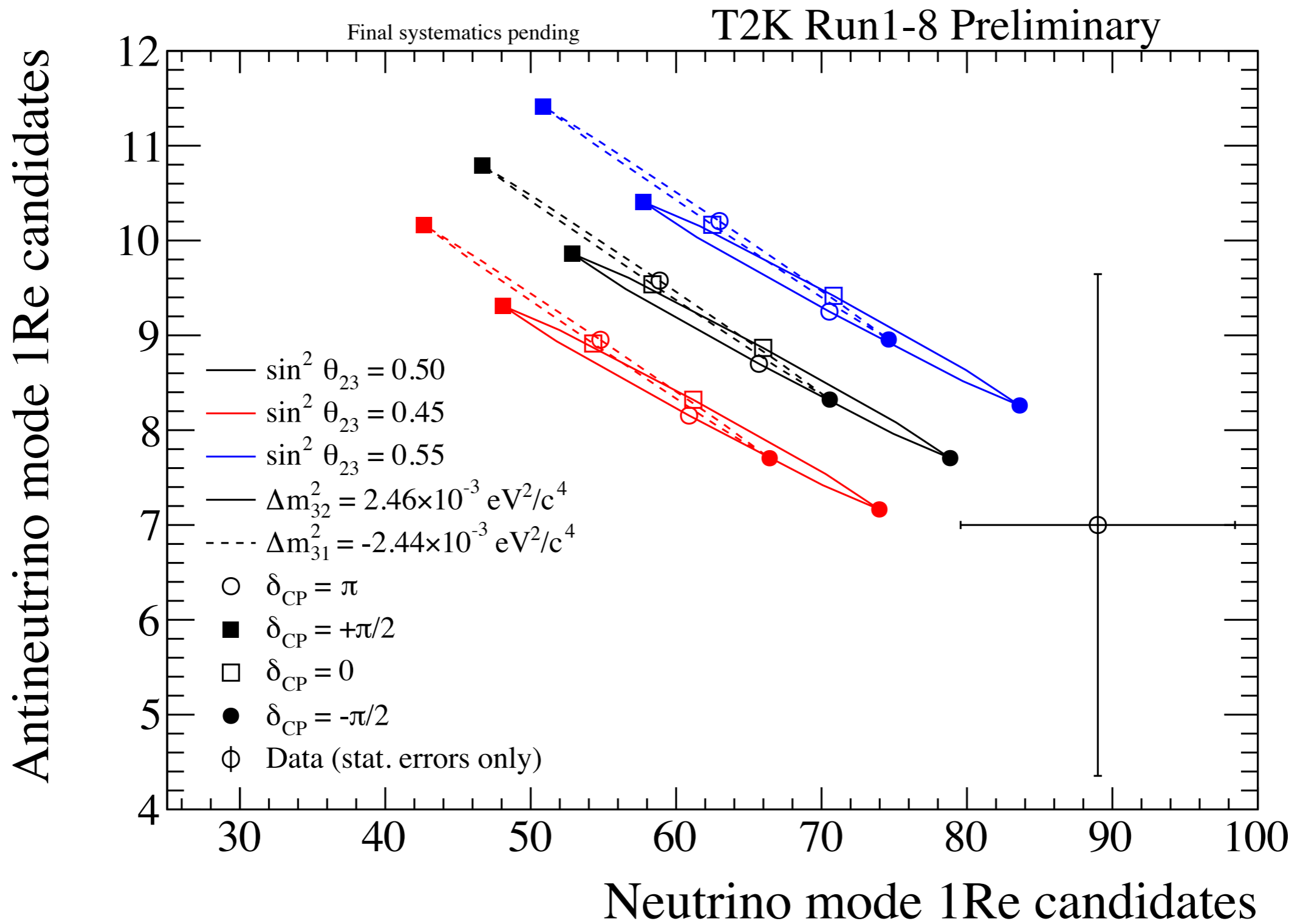
この先の展望



大中小のニュートリノ実験をどんどんと進めつつ...

20年先のことなんてわかるわけないので、
これらに加えて、未知の展開を期待しています

バックアップ



ν_μ Result- Comparison To Previous Result

Our previous result*:
2.6 σ

Our rejection of maximal mixing has moved from 2.6 σ to 0.8 σ . This change in the character of our result comes from a few key changes which I'll break down below.

New simulation & Calibration:
~1.8 σ

Driven by updates to energy response model. Drop to 2.3 σ expected due to new energy resolution. Additionally we have a <70 MeV> shift in our hadronic energy response. This energy shift would be expected to move 0.5 events out of the "dip" region. However it instead pushes 3 "dip" events past a bin boundary.

New selection and analysis:
~0.5 σ

For combined analysis changes 5% of pseudo-experiments in a MC study had this size shift or larger. This probability is driven by a low expected overlap in background events, and to second order the addition of resolution bins.

Full dataset:
~0.4 σ

Full dataset*:
0.8 σ

New, 2.8x10²⁰ POT, data prefers maximal mixing.

*Feldman-cousins corrected significance.