

東海to神岡 長基線ニュートリノ実験



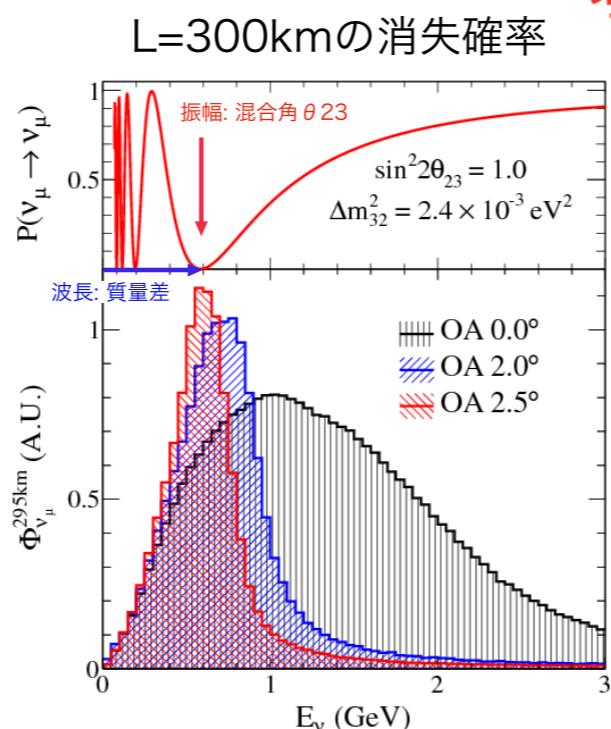
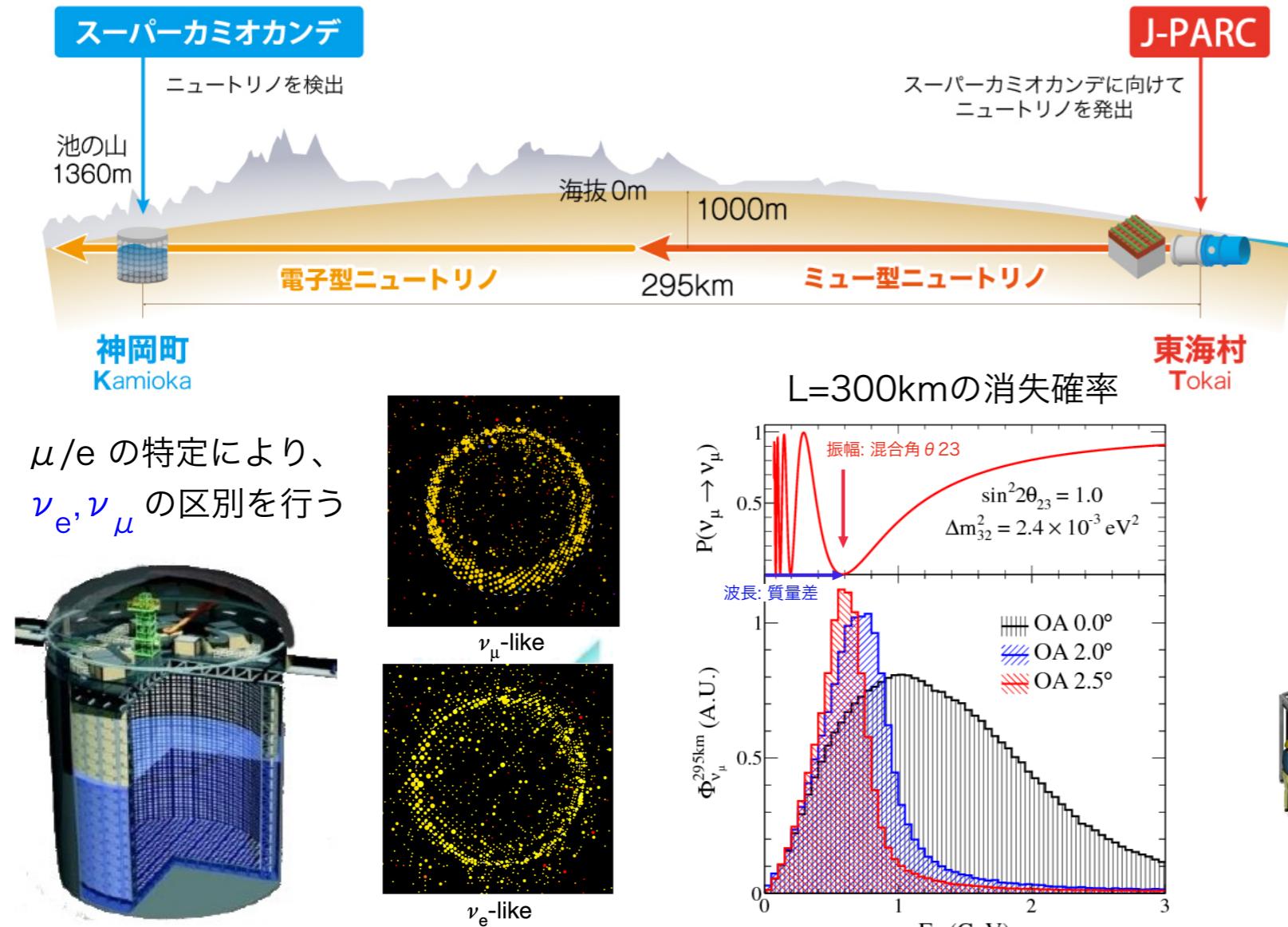
東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会

2022年1月25日

小川智久 (KEK) on behalf of the T2K Collaboration

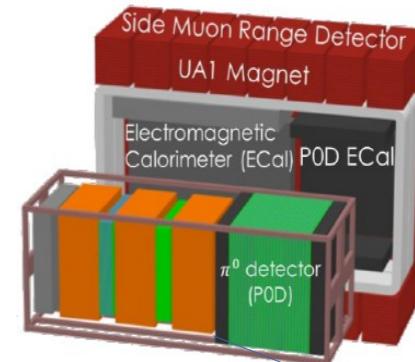
T2K実験と物理目標

J-PARCで生成した人工ニュートリノビーム(消失確率最大に ν エネルギー設定)を、スーパーカミオカンデに打ち込み、ニュートリノ消失出現現象の観測により、PMNS行列パラメータの測定を行う。

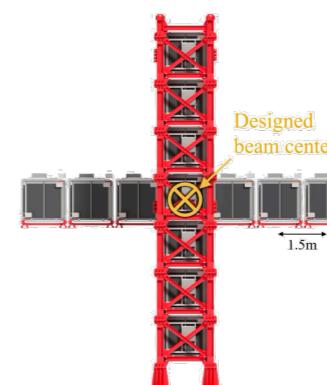


- $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 消失現象を用いて θ_{23} 精密測定 (現在、 Δm_{32}^2 と共に世界最高精度)
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出現現象を人工ビームを用いた初観測から θ_{13} の測定 → $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ を用いて δ_{CP} の測定へ
- レプトンセクタにおけるCPの破れの発見により、宇宙から反物質が消えた原因の手がかり。

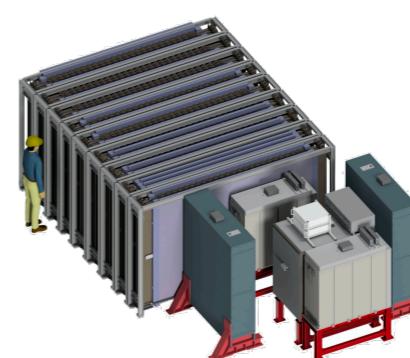
ニュートリノ振動が起こる前の測定：
レビームフラックス × 相互作用断面積
前置検出器：ND280 (2.5° off-axis)



ニュートリノ反応
事象再構成検出器：
TPC, シンチ, 磁場



INGRID :
ビーム方向位置検出、
ニュートリノ断面積測定

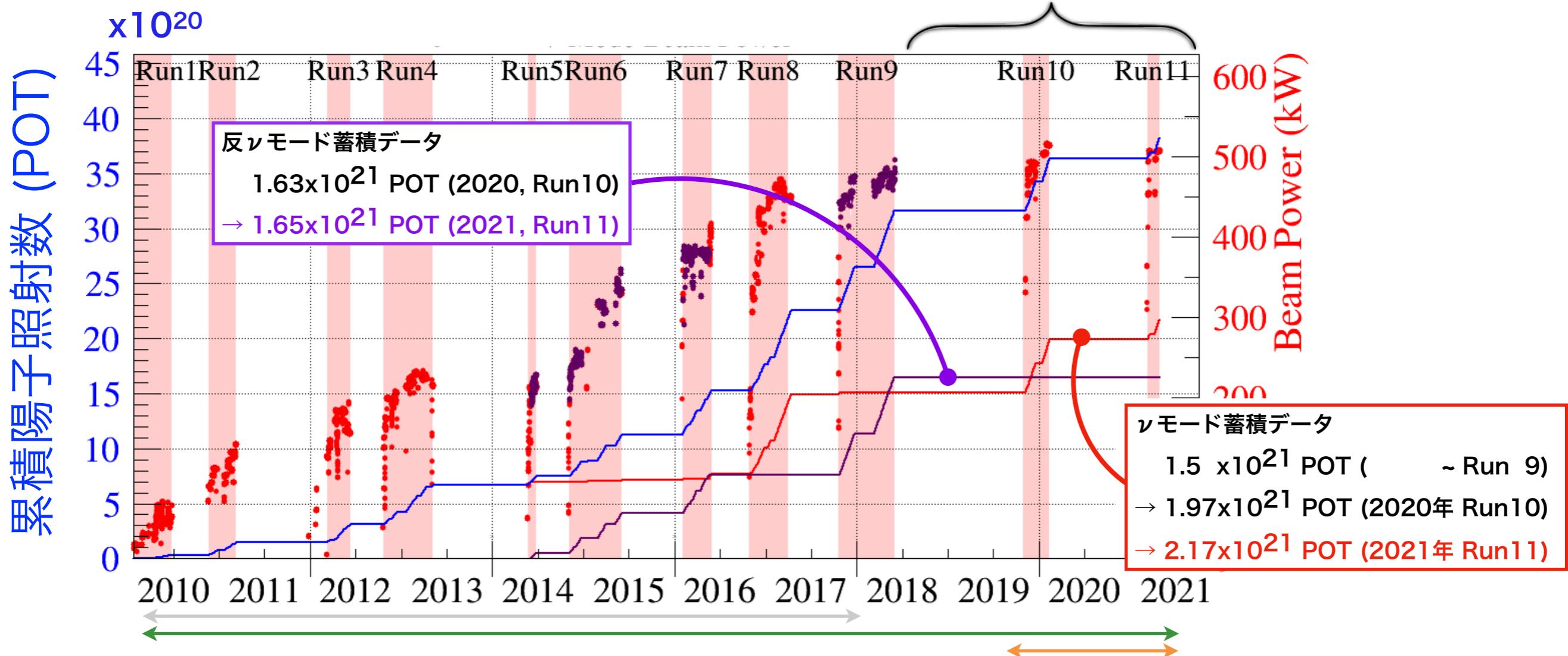


WAGASCI-BabyMIND (1.5° off-axis)

- 異なる反応物質で構成
ND-SK の系統誤差削減
- NDと異なるoff-axis角
狭い ν フラックスを抽出

これまでのデータ取得と主な物理結果

2020 ~ 2021 年で新たなデータ
最大515 kWでの運転を実現



- (昨年の研究会報告) CP 非保存パラメータの許容領域を制限 : CP の破れの兆候 → Nature の 2020 年における特に注目すべき 10 大発見。
- (今年度) Run10 (2019 → 2020) : ν モードのデータが 33%ほど増加データを加えて、 ν フラックスの系統誤差を改善、振動解析の改善 → PRD, 103, 112008
- (今年度) Run11 (2020 → 2021) : 前置 ND280 は COVIDの影響の人員不足でオフ。WAGASCI/Babymind 検出器は SK-Gdと共にデータ取得。

全POT $\sim 3.82 \times 10^{21}$ (2010/Jan/23 ~ 2021/Apr/27)

振動解析の改善 1/3

https://kds.kek.jp/event/40624/contributions/203245/attachments/151139/189822/T2K_Talk_01_Analysis.pdf S. Bolognesi

- 生成 ν フラックスモデルの精度改善 :

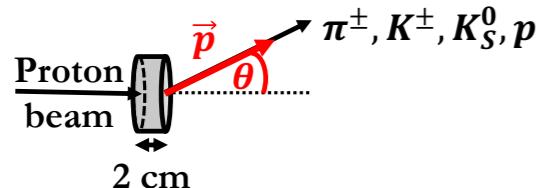
π 崩壊 ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$) だけでなく副次生成物としての μ, K , の崩壊から生成される混入 ν 不定性の理解。
 \Rightarrow SKでの ν フラックス予測に重要。

ハドロン相互作用の精密測定を目的 NA61/SHINE実験
T2K レプリカターゲット実験 (2010) データの使用。

NA61/SHINE実験 @ CERN

Thin target data

Mainly Eur. Phys. J. C (2016) 76:84

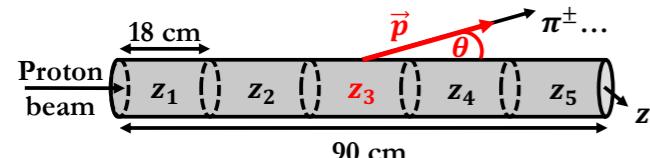


ビームを当てた直後に
出てくる粒子の測定。

\rightarrow ビームシミュレーション調整

Replica target data

Eur. Phys. J. C (2016) 76:617



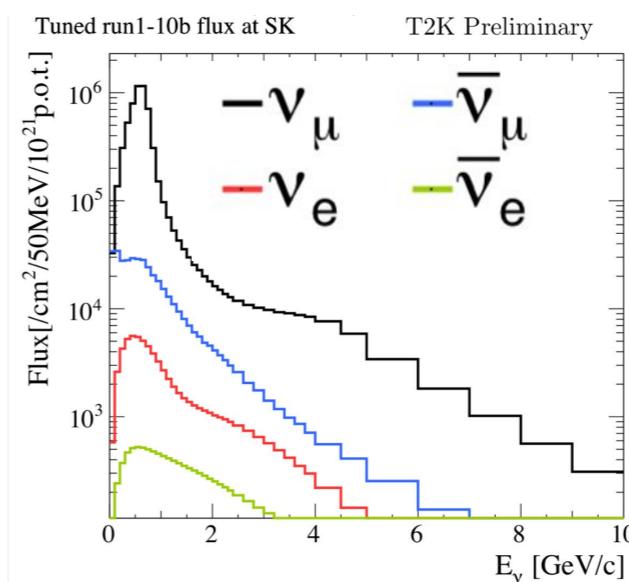
2次、3次…相互作用後に

出てくる粒子の測定も行う。

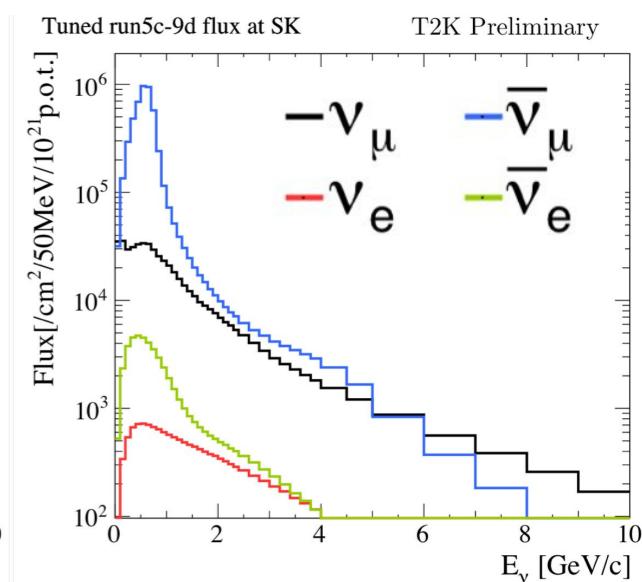
各々ところでの生成粒子を評価
ビームシミュレーション調整

T2Kニュートリノビームフラックスの広い
エネルギー領域で 4% 程度 (点線 → 実線) にまで
ハドロン相互作用に関する不定性を削減。

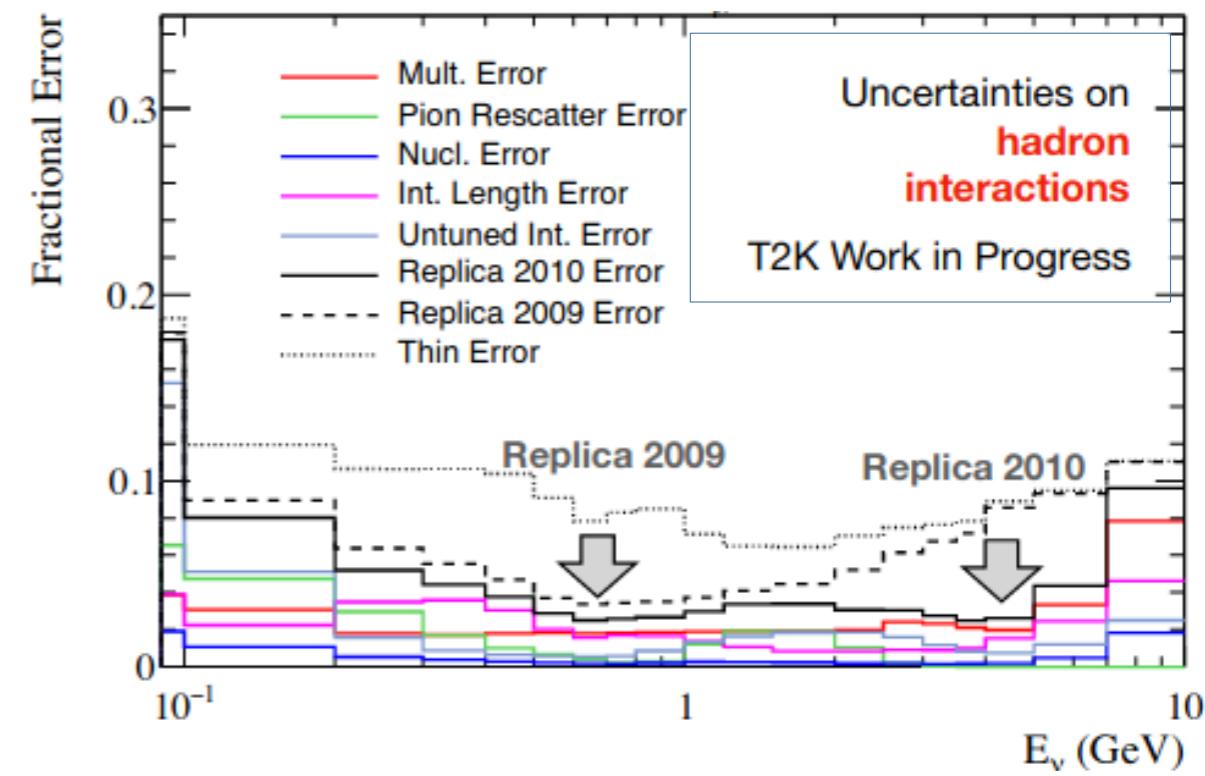
νモード



反νモード



ハドロン相互作用に関するニュートリノ生成不定性



振動解析の改善 1/3

https://kds.kek.jp/event/40624/contributions/203245/attachments/151139/189822/T2K_Talk_01_Analysis.pdf S. Bolognesi

- 生成 ν フラックスモデルの精度改善 :

π 崩壊 ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$) だけでなく副次生成物としての μ, K , の崩壊から生成される混入 ν 不定性の理解。
 \Rightarrow SKでの ν フラックス予測に重要。

ハドロン相互作用の精密測定を目的 NA61/SHINE実験
T2K レプリカターゲット実験 (2010) データの使用。

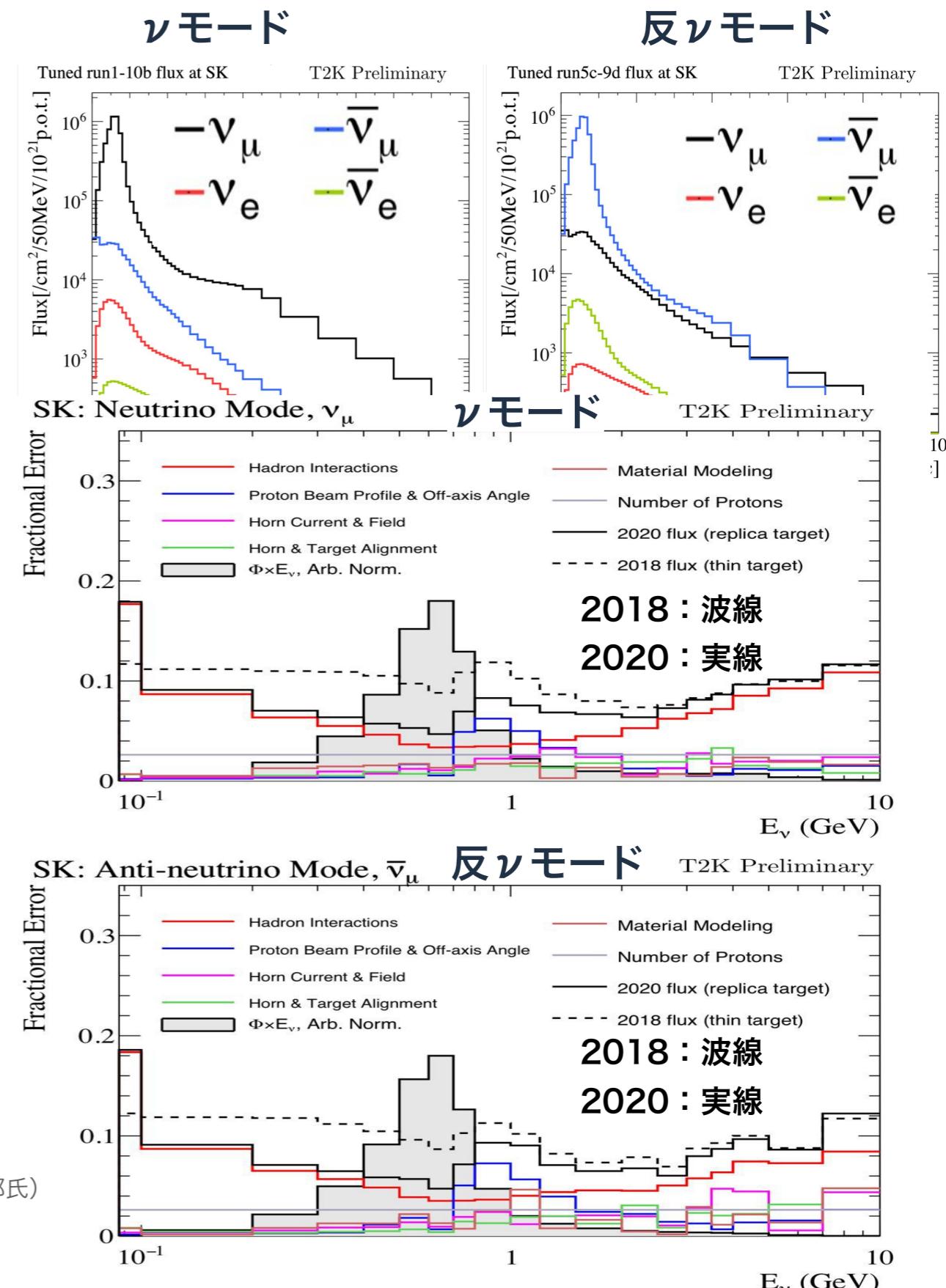
ハドロン相互作用以外の不定性の改善 :

シミュレーションのターゲット構成物質
(冷却水等)の再設定や諸所の改善。

不定性を減少させたビームシミュレーション
が可能になり、粒子反粒子の各 ν フラックス
の詳細評価が可能となってきた。

ν フラックス生成モデル不定性 :
8% (2018) → 5% (2020)へ改善

<https://sites.google.com/g.ecc.u-tokyo.ac.jp/nushin2-seminars/>
D01 ニュートリノフラックス精密測定に向けた二次粒子観測手法の研究 (関口哲郎氏)



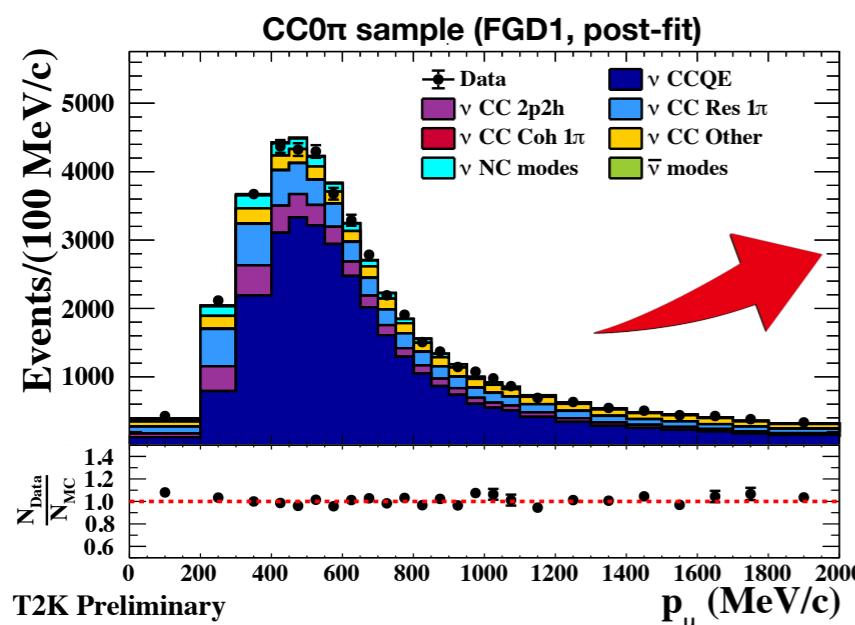
振動解析の改善 2/3

- ニュートリノ相互作用モデルの精度改善と統計増加

ニュートリノ反応事象を区別し、各ニュートリノ-原子核反応に感度を持たせて反応モデルを制限。粒子/反粒子でも反応頻度は異なる。

以前: 14種類(2018) → 再解析: 18種類(2020)
ニュートリノ-原子核反応モデルを詳細に場合分け

- 再構築された π の数: $\nu\mu CC0\pi$, $\nu\mu CC1\pi$ and $\nu\mu CCN\pi$.
- 反応点: 水 + カーボン、カーボンのみを場合分け。
- μ の電荷の判断により
 - ν モード: ニュートリノ (μ^-)
 - 反 ν モード: ニュートリノ (μ^-) と反ニュートリノ (μ^+)。



分布を運動量-角度Fit
で反応モデルを制限、
SKにおける反応予想
の不定性を大きく制限

Run10による ν モード統計量の増加: 1.5e21 →
2.0e21 POT も振動解析への貢献が大きい。

振動解析の改善 2/3

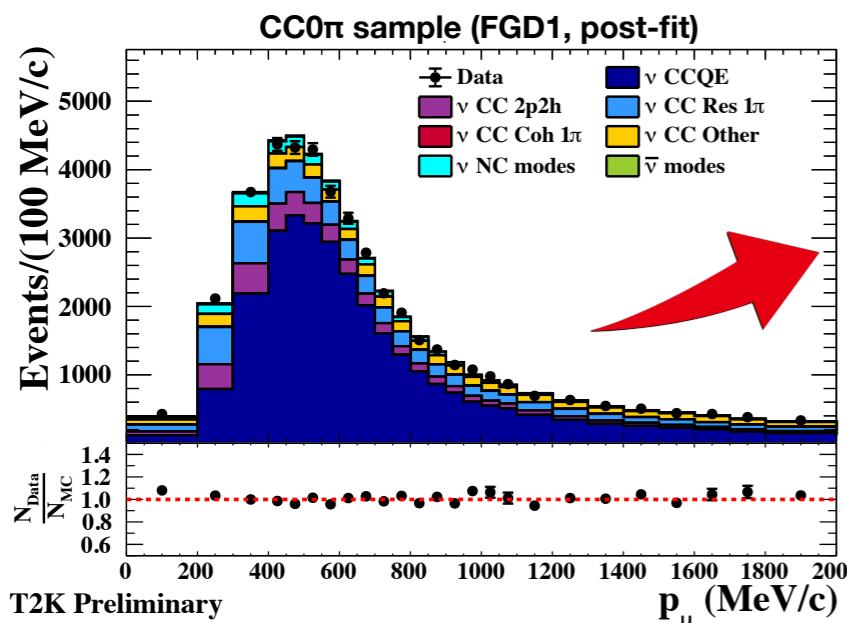
- ニュートリノ相互作用モデルの精度改善と統計増加

ニュートリノ反応事象を区別し、各ニュートリノ-原子核反応に感度を持たせて反応モデルを制限。粒子/反粒子でも反応頻度は異なる。

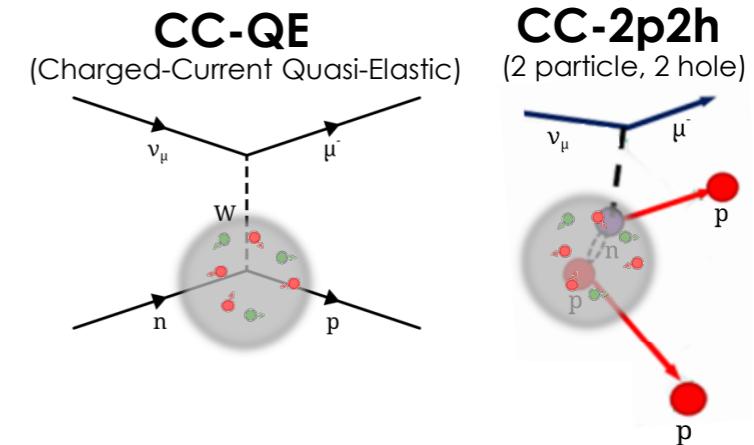
以前: 14種類(2018) → 再解析: 18種類(2020)へ

ニュートリノ-原子核反応モデルを詳細に場合分け → ここ最近(2021~)では、陽子と光子のタグを改善

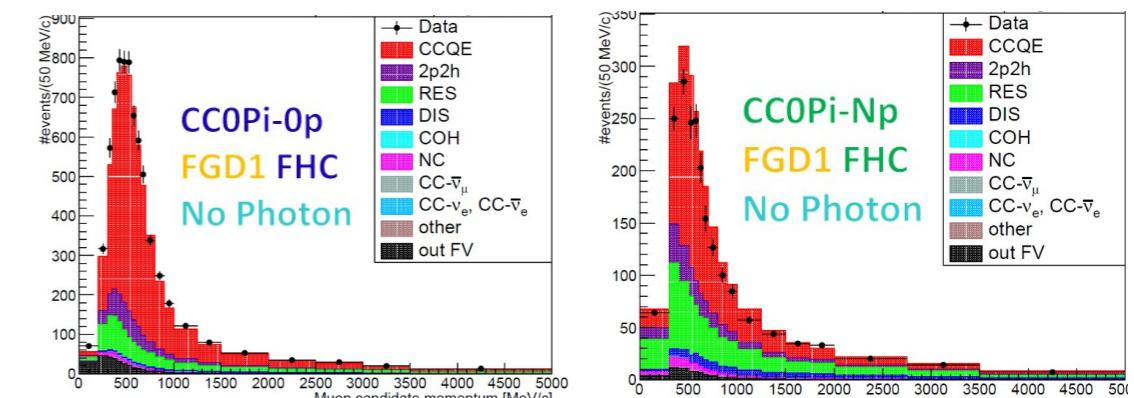
- 再構築された π の数: $\nu_\mu CC0\pi$, $\nu_\mu CC1\pi$ and $\nu_\mu CCN\pi$. → CC0 π 0p0 γ , CC0 π 1p0 γ , CC1 π 0 γ , CC1 π Np, CCN γ , ...
- 反応点: 水+カーボン、カーボンのみを場合分け。
- μ の電荷の判断により
 - ν モード: ニュートリノ (μ^-)
 - 反 ν モード: ニュートリノ (μ^-) と反ニュートリノ (μ^+)。



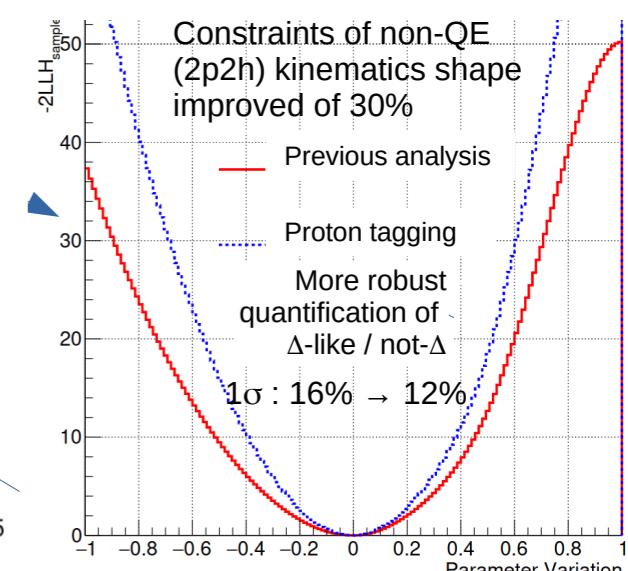
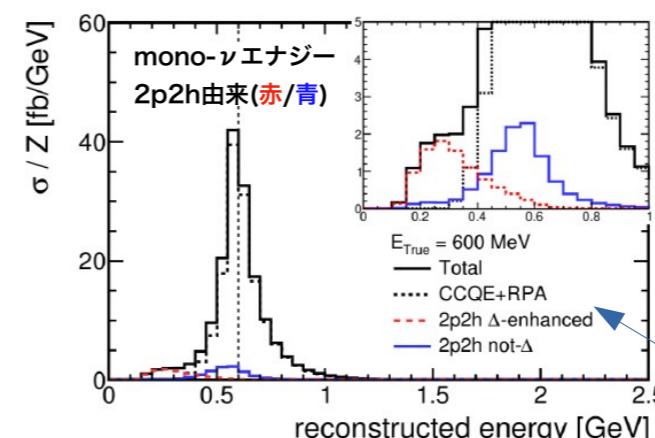
分布を運動量-角度Fitで反応モデルを制限、SKにおける反応予想の不定性を大きく制限



陽子(タグ)あり/なしで場合分



→ 目標: non-QE 過程 (2p2h過程) と QE過程の区別を改善させる。
2p2h を CCQE と誤認するとニュートリノエネルギーの計算のバイアス



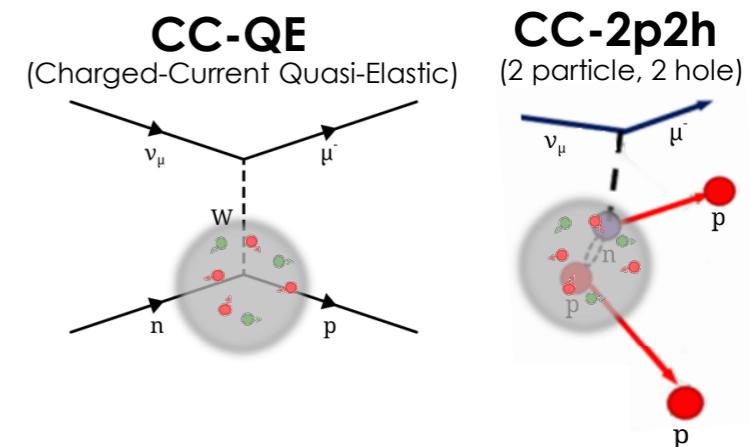
Run10による ν モード統計量の増加: $1.5 \times 10^{21} \rightarrow 2.0 \times 10^{21}$ POT も振動解析への貢献が大きい。

振動解析の改善 2/3

https://kds.kek.jp/event/40624/contributions/203245/attachments/151139/189822/T2K_Talk_01_Analysis.pdf S. Bolognesi

- ニュートリノ相互作用モデルの精度改善と統計増加

ニュートリノ反応事象を区別し、各ニュートリノ-原子核反応に感度を持たせて反応モデルを制限。粒子/反粒子でも反応頻度は異なる。



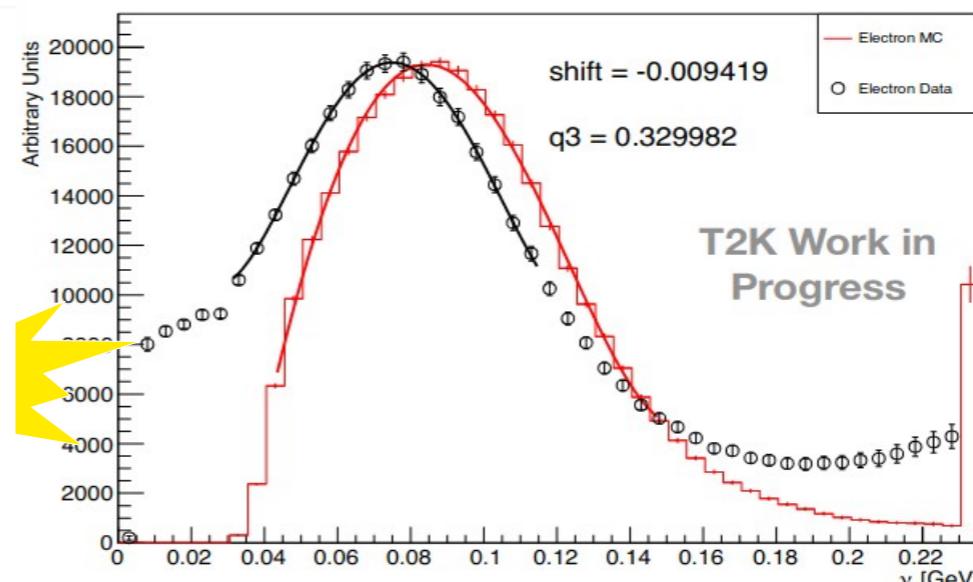
再解析 14クラス(2018)→18(2020)へ詳細に場合分け → ここ最近(2021-)では、陽子と光子のタグを改善

- CCQE 相互作用過程における原子核モデルの精力的な改善が行われてきている。

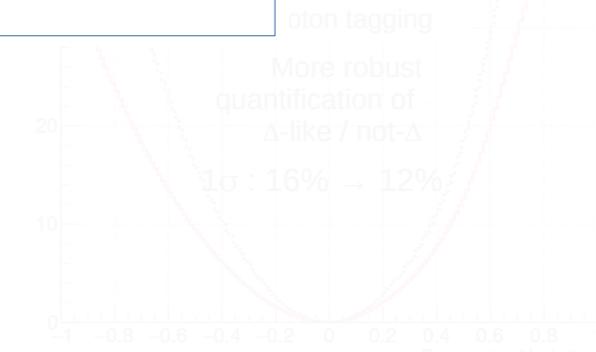
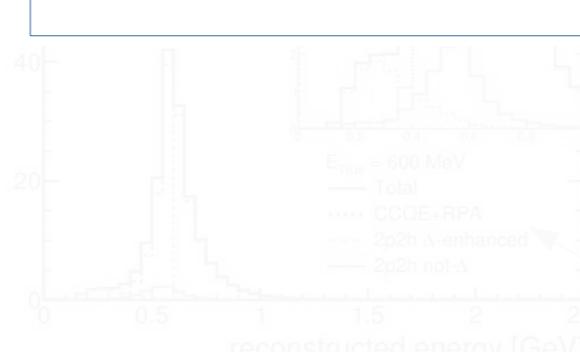
解析に新たにSpectral functionモデル(*)を使用。
加えて、電子散乱実験のデータを用いて、MCに実装されたモデルのチューンを行うことにより、
→ binding energy の不定性を削減している。
(2019 T2K Nature paper の主不定性)
→ 終状態の陽子の振る舞いの理解が進展。
(前述の 2p2hの分離を改善)

(*) 核子の初期状態の振る舞いと原子核に核子を束縛しているエネルギーを取り扱うモデル “Spectral function of finite nuclei and scattering of GeV electrons” Nucl. Phys. A579, 493 (1994)

ドット：電子散乱実験のデータ



Tune of binding energy
— before → — after
∅ Electron scattering data



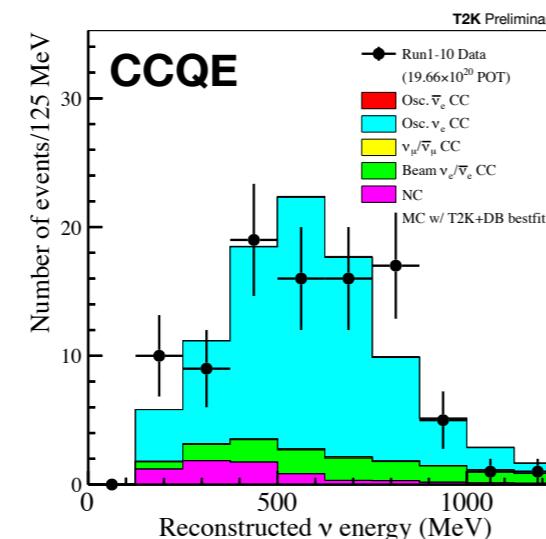
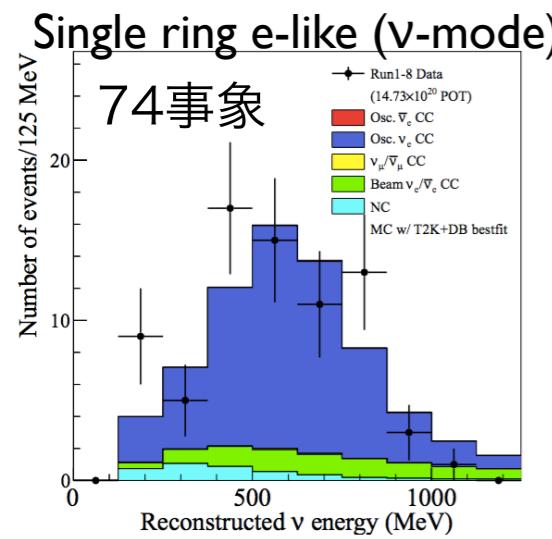
振動解析の改善 3/3

https://kds.kek.jp/event/40624/contributions/203245/attachments/151139/189822/T2K_Talk_01_Analysis.pdf S. Bolognesi

- データ追加による SKでの統計增加：メインチャンネルは準弾性散乱

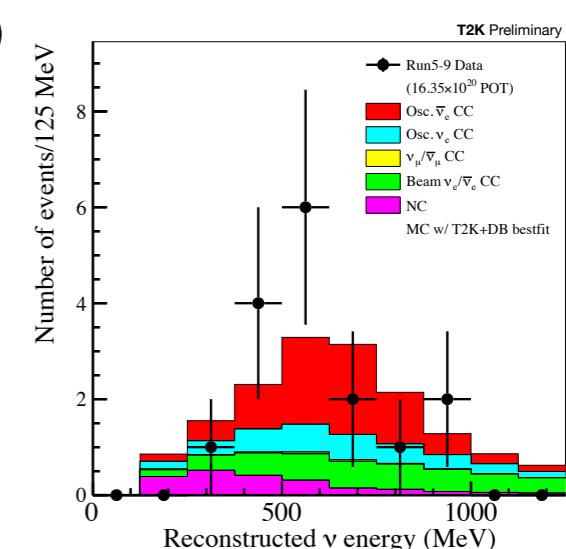
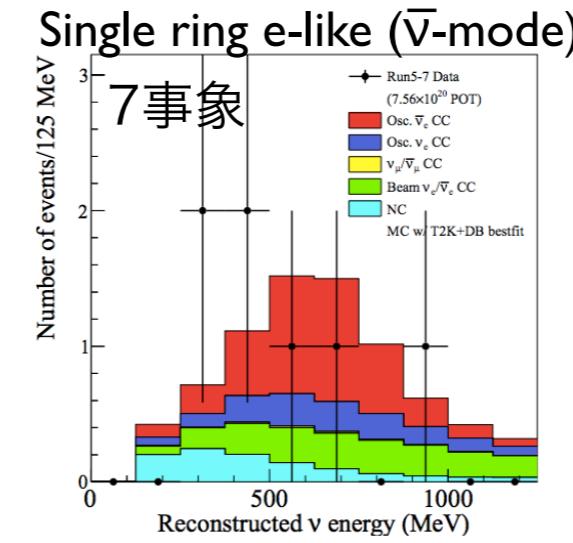
準弾性散乱過程 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出現

74 事象 (~2018) → ~ 90 事象 (2020)



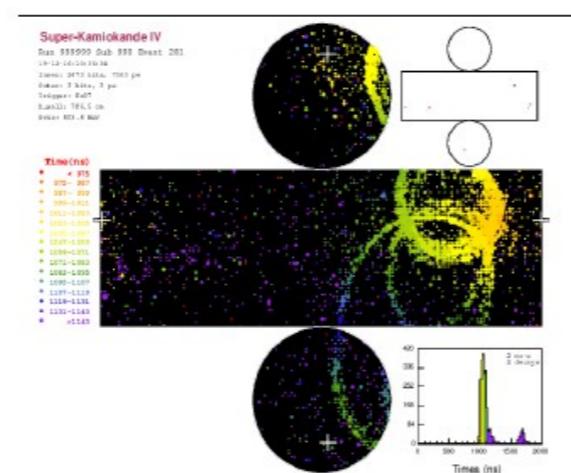
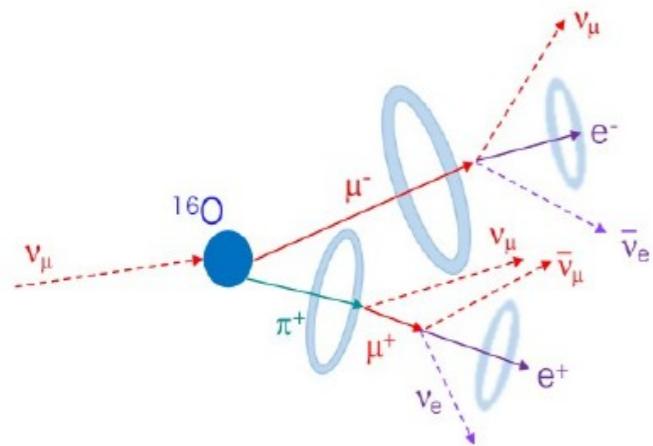
準弾性散乱過程 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 出現

7 事象 (~2018) → 15 事象 (2020)



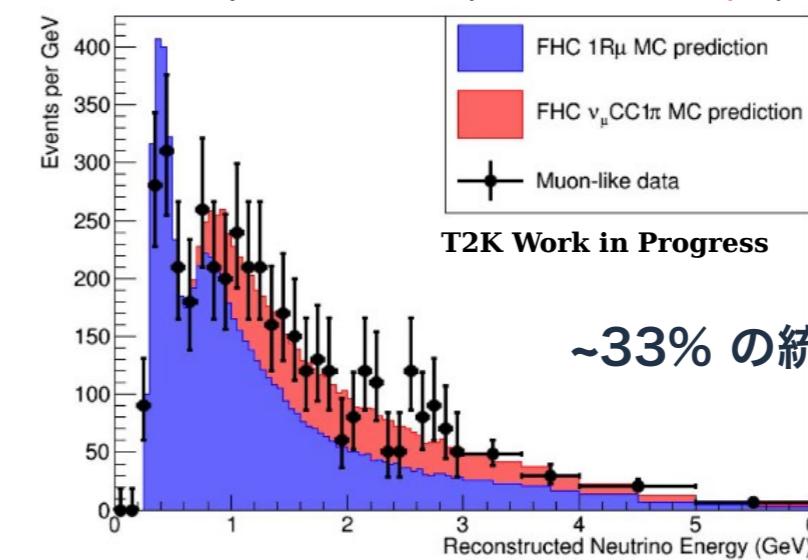
- 準弾性 1π 生成過程の解析：マルチリングトポロジー + 崩壊電子 from μ, π

(追加予定 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 過程の ~12% の統計改善の見込み)。



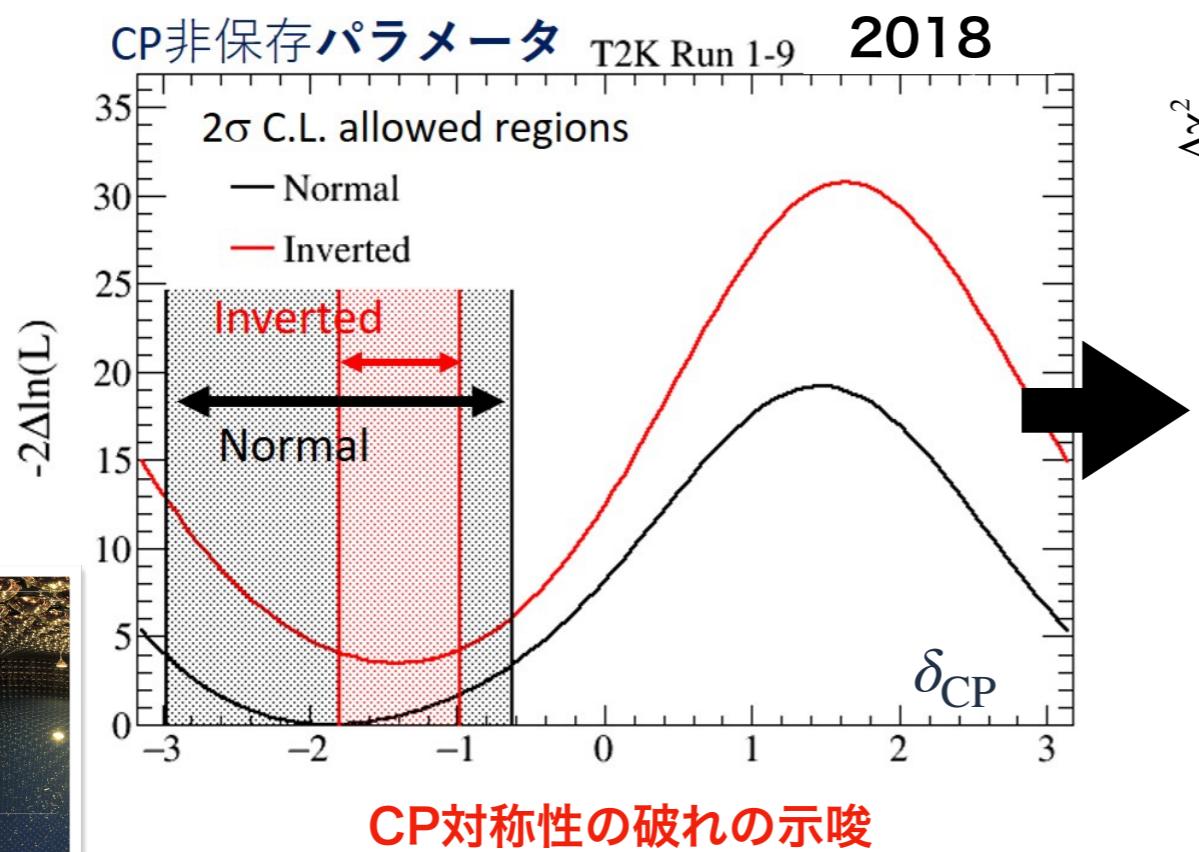
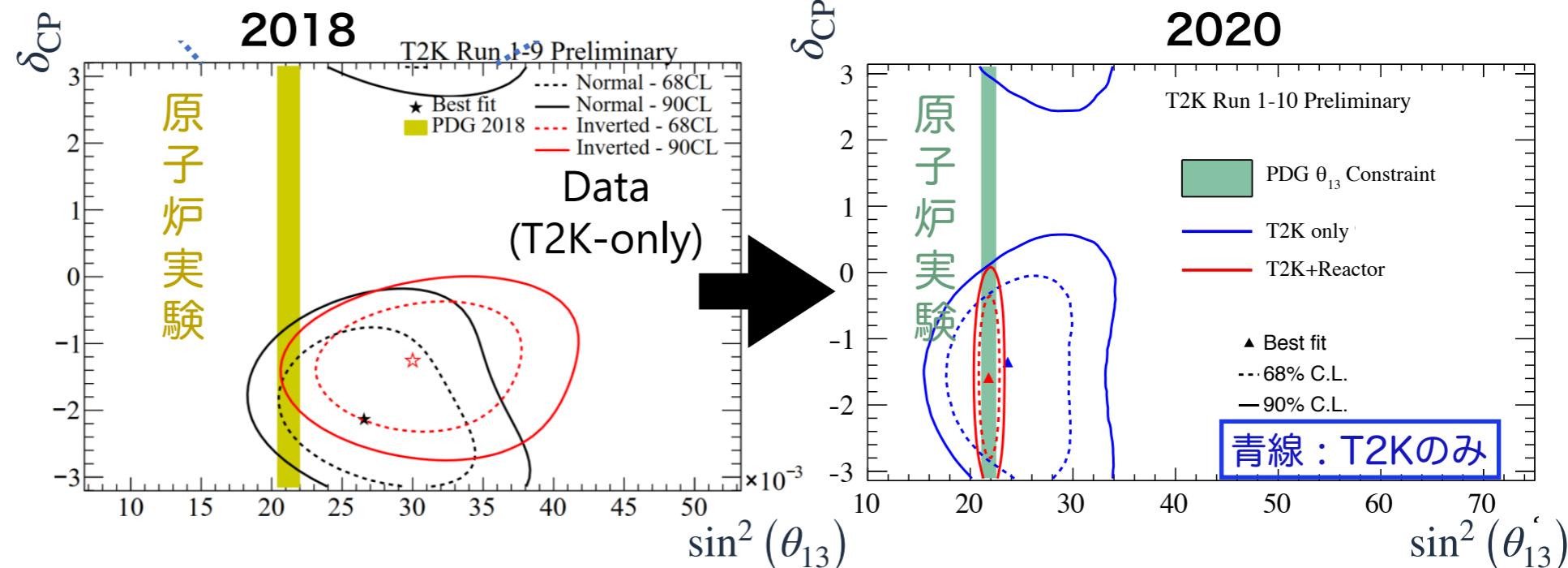
- 多変量解析を用いた再構成手法も開発中。

All samples Run1-10 (red is new sample)



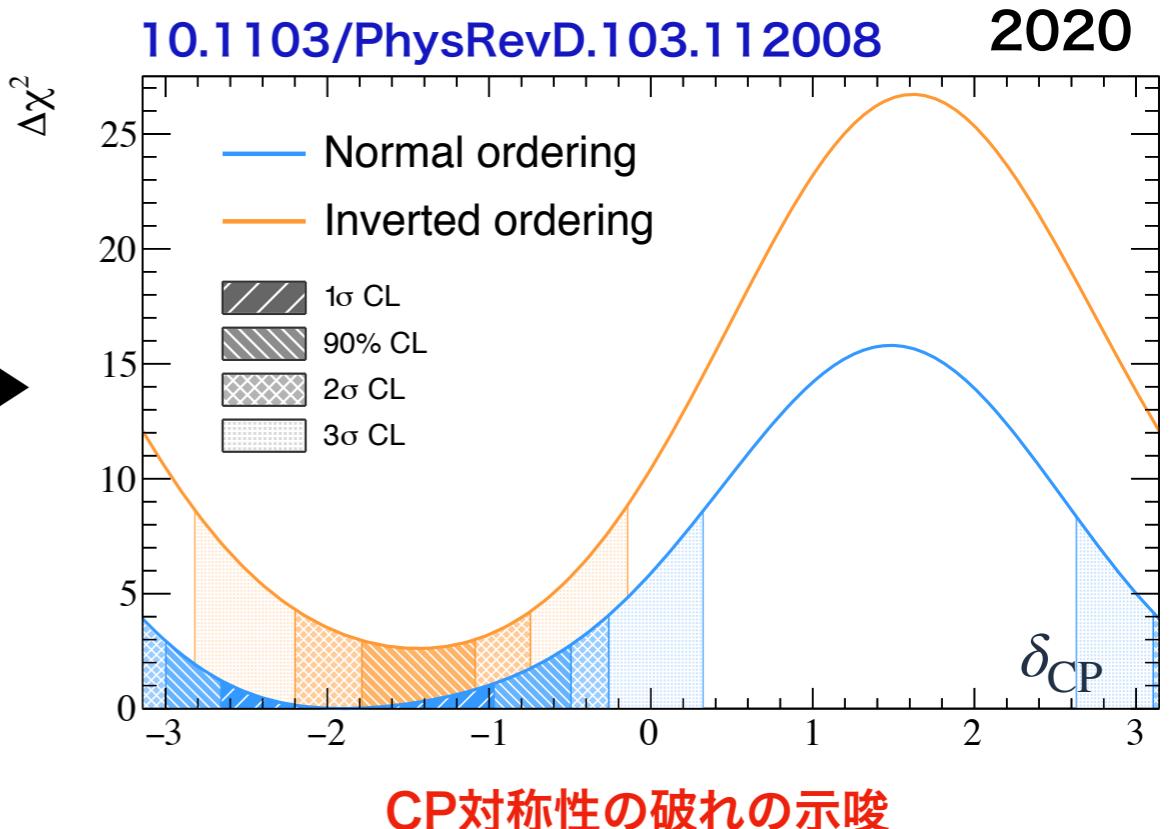
最近の結果：振動パラメータ θ_{13} と δ_{CP} 制限

- 統計+解析の改善により、 θ_{13} の結果は原子炉実験の結果を T2K データで再現。
- まだまだ統計的ふらつき、解析改善により、パラメータ制限域はある程度変動。



CP対称性の破れの示唆

順階層：[-2.96, -0.63] ラジアン
逆階層：[-1.79, -0.98] ラジアン



CP対称性の破れの示唆

をしているが、制限領域は解析状況により変動

今後の計画 1/3

- T2K-II実験：CP対称性の破れの兆候の確認

現在は統計誤差が支配的な状況：

- JPARCのMRの大強度化(1.3MW)。
- レビーム増強にため統計量が増加。
- 現在の系統誤差: 5%~8% を抑える必要。

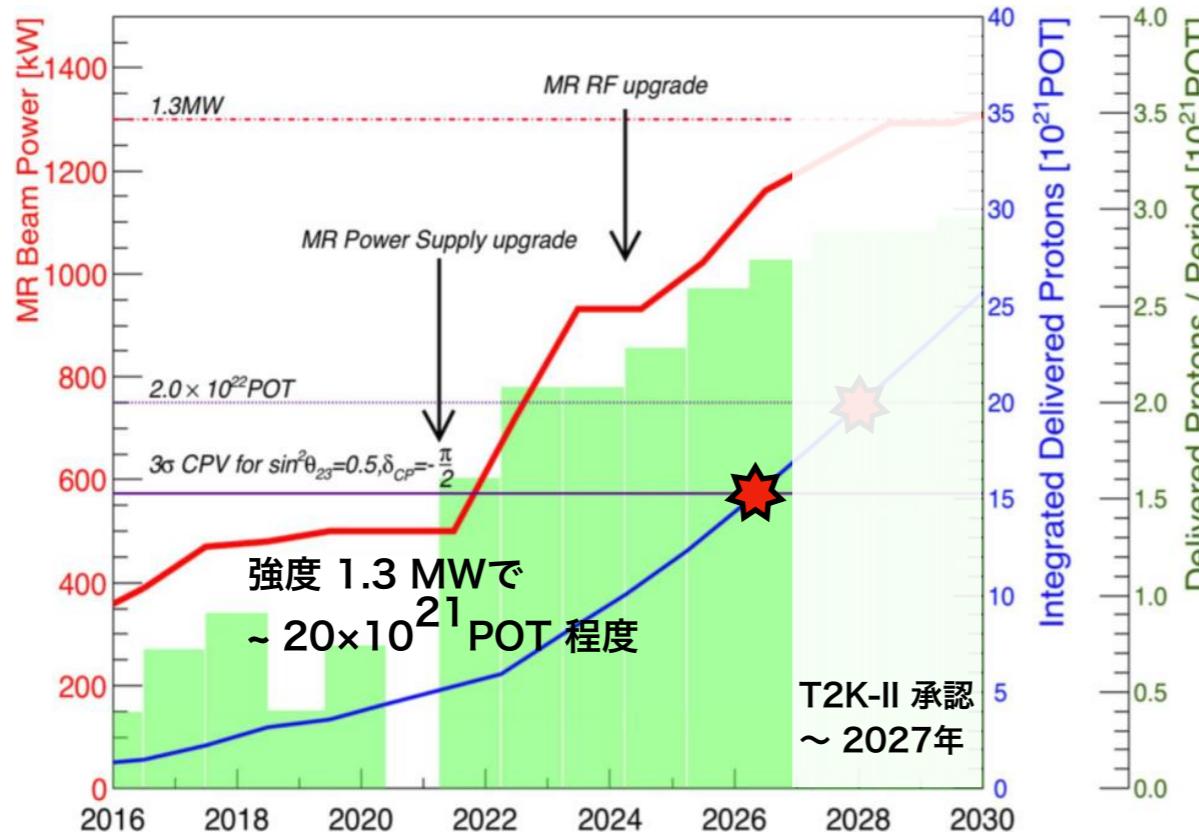
系統誤差はニュートリノ反応の不定性が主。

- ニュートリノ反応の精密測定が重要。
- ND280改良 + WAGASCI検出器
の導入により系統誤差の低減を目指す。

TABLE I. Systematic uncertainty on far detector event yields.

Source [%]	ν_μ	ν_e	$\nu_e\pi^+$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_e$
ND280-unconstrained cross section	2.4	7.8	4.1	1.7	4.8
Flux & ND280-constrained cross sec.	3.3	3.2	4.1	2.7	2.9
SK detector systematics	2.4	2.9	13.3	2.0	3.8
Hadronic re-interactions	2.2	3.0	11.5	2.0	2.3
Total	5.1	8.8	18.4	4.3	7.1

T2K実験のデータ取得のシナリオ



今後の計画 1/3

- T2K-II実験：CP対称性の破れの兆候の確認

現在は統計誤差が支配的な状況：

- JPARCのMRの大強度化(1.3MW)。
- レビーム増強にため統計量が増加。
- 現在の系統誤差: 5%~8% を抑える必要。

系統誤差はニュートリノ反応の不定性が主。

- ニュートリノ反応の精密測定が重要。
- ND280改良 + WAGASCI検出器の導入により系統誤差の低減を目指す。

T2K実験のデータ取得のシナリオ

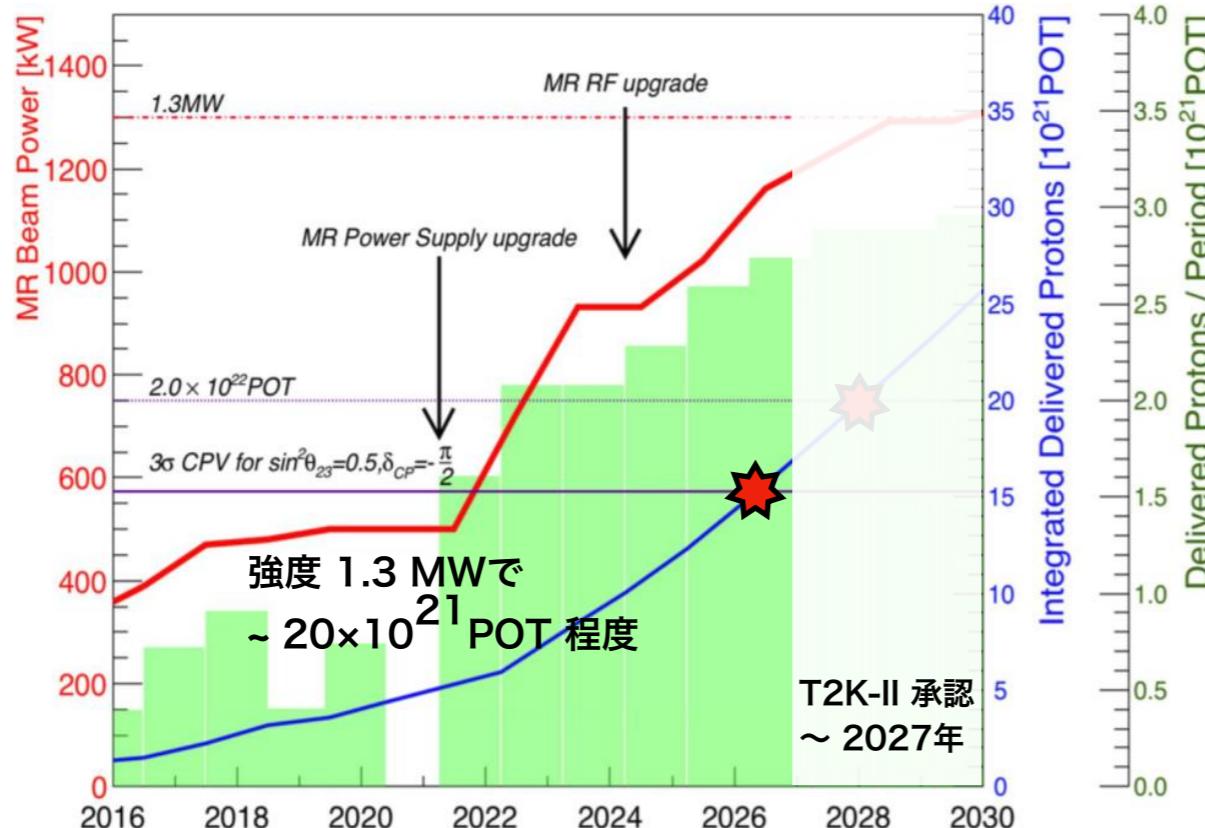
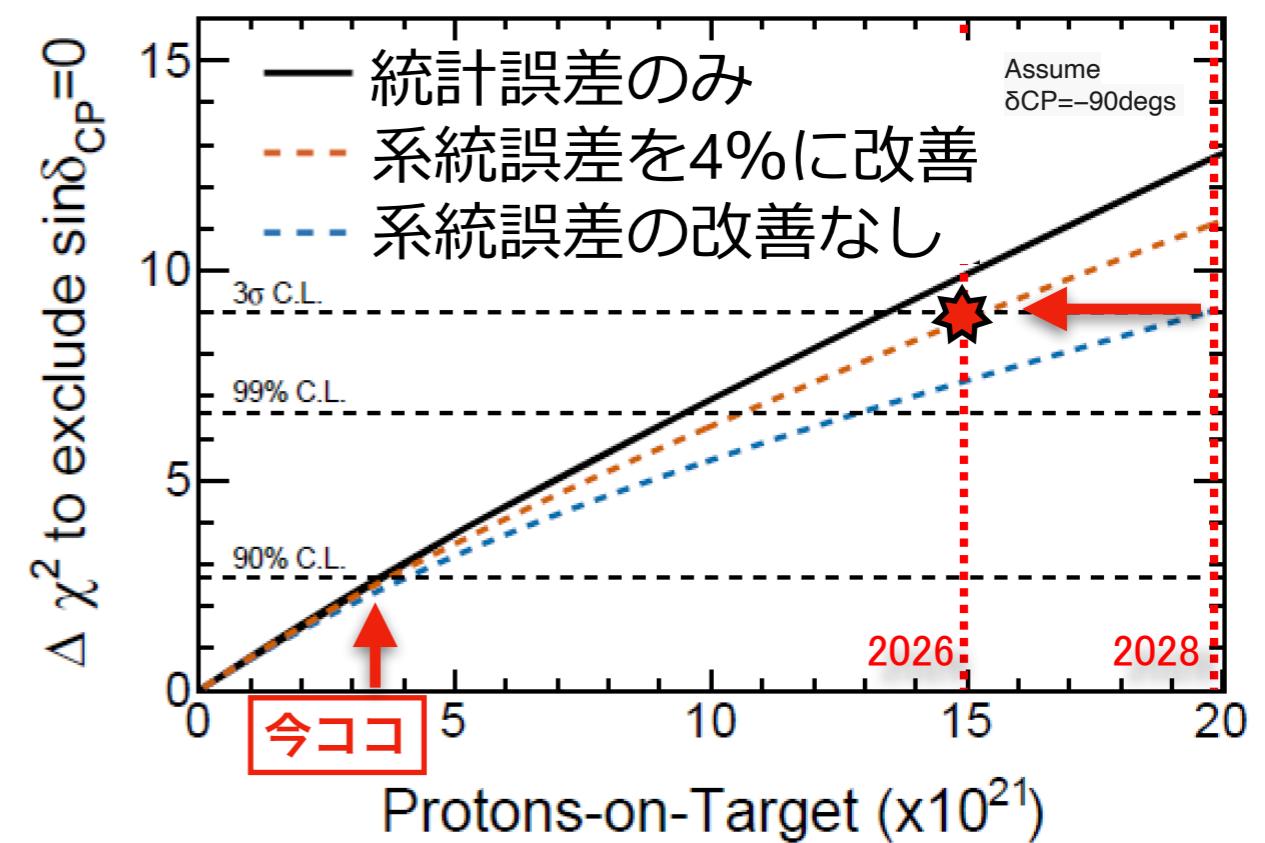


TABLE I. Systematic uncertainty on far detector event yields.

Source [%]	ν_μ	ν_e	$\nu_e\pi^+$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_e$
ND280-unconstrained cross section	2.4	7.8	4.1	1.7	4.8
Flux & ND280-constrained cross sec.	3.3	3.2	4.1	2.7	2.9
SK detector systematics	2.4	2.9	13.3	2.0	3.8
Hadronic re-interactions	2.2	3.0	11.5	2.0	2.3
Total	5.1	8.8	18.4	4.3	7.1

arXiv:1609.04111



目標：系統誤差を 4% まで削減。

CPの破れの証拠を3σ信頼度に必要な統計量を、

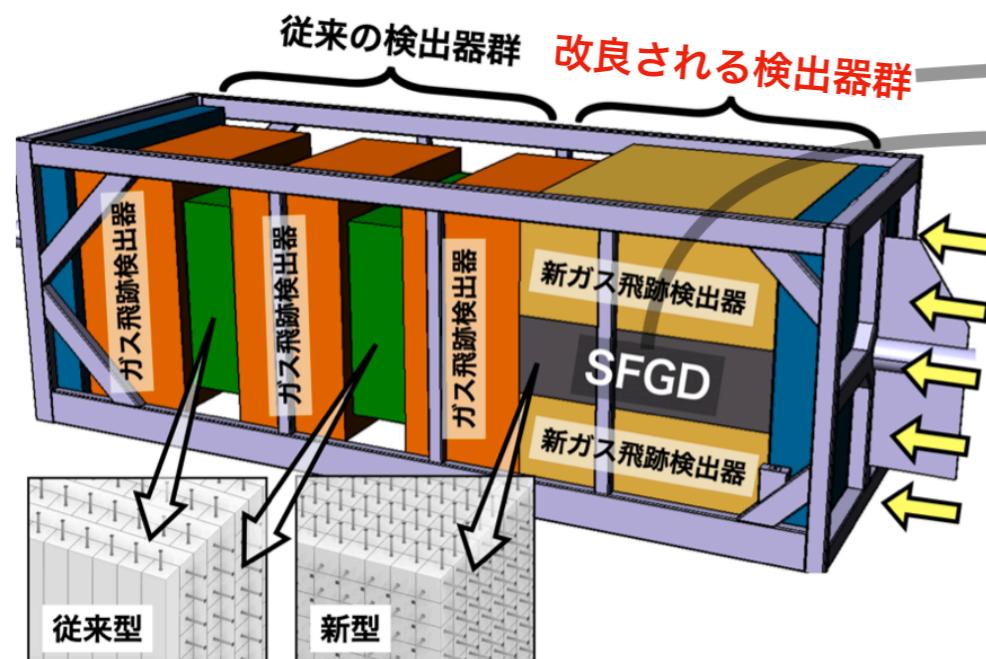
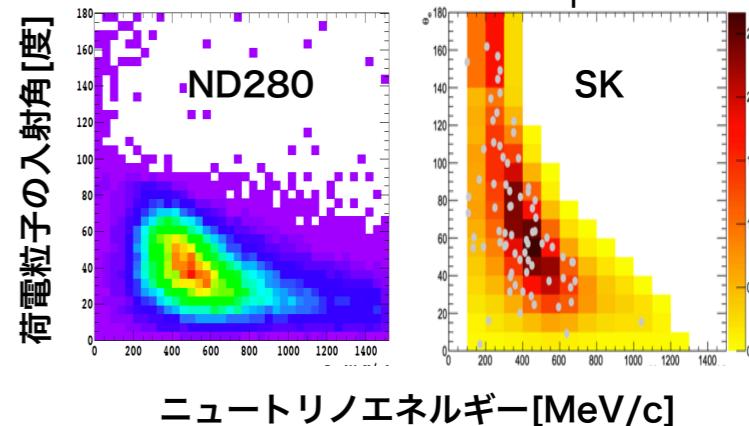
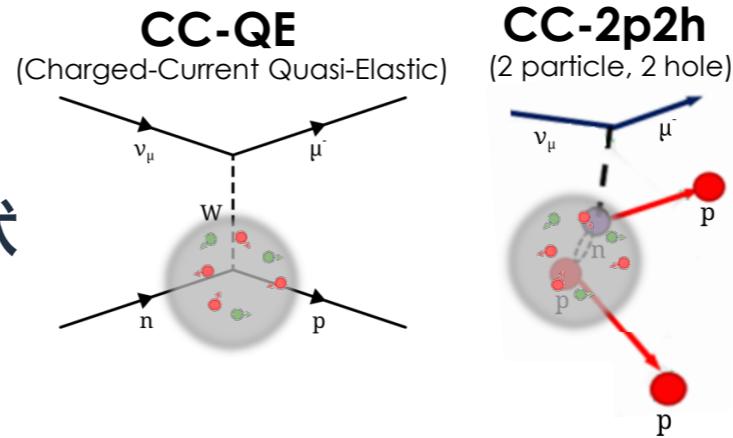
15×10^{21} P.O.T. に減らす(二年分)ことが可能。

(+ 解析の改善とSK-Gd の効果により早期に達成する)

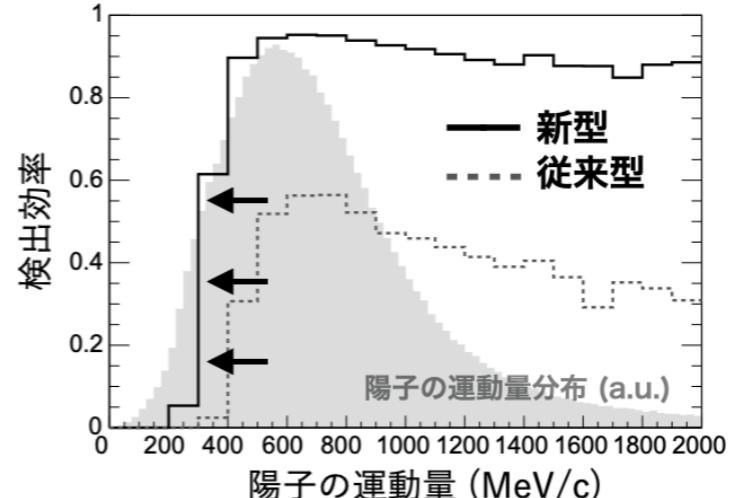
今後の計画 2/3

- 前置検出器 ND280 の改良の現状

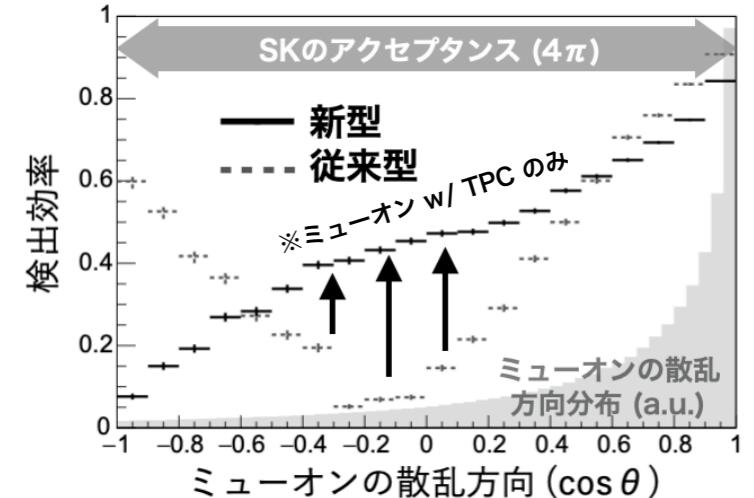
低運動量の荷電粒子の検出効率 (Super-FGD)、
大角度散乱する粒子の検出効率を改善 (TPCs)



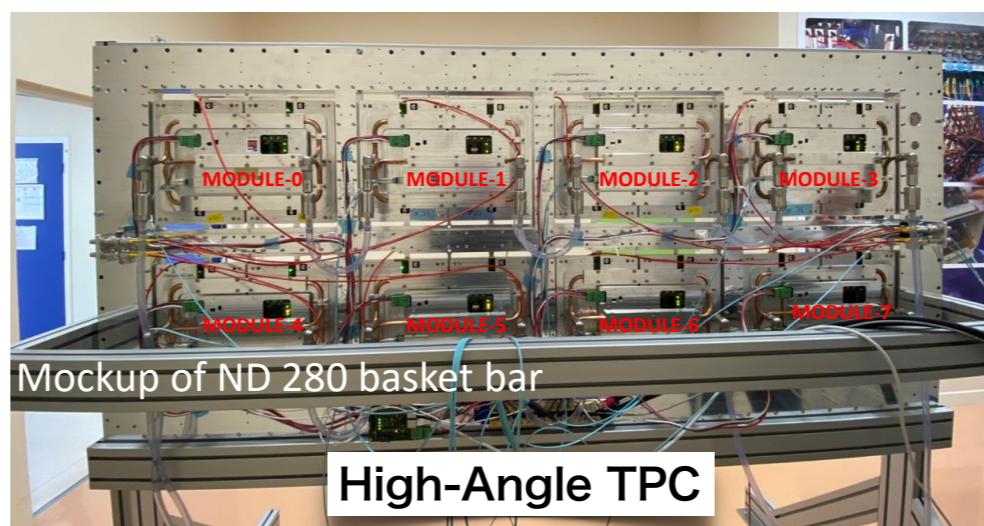
1cm の細分割で、300MeVまでの
低運動量陽子の検出
短飛程粒子の検出効率の改善



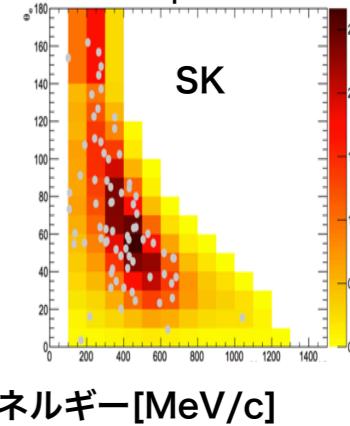
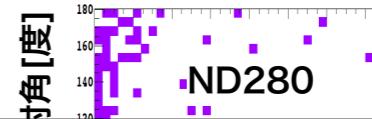
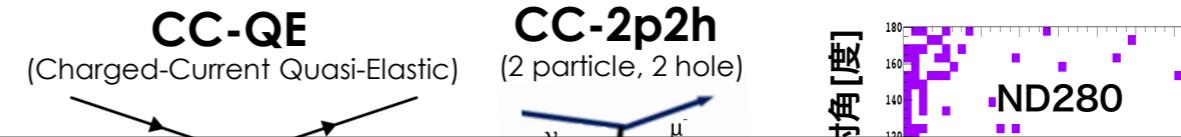
SFGD+TPC により大角度まで
> 0.8 の検出効率 (SKと同じ位相空間)
大角度散乱粒子の検出効率の改善



- 2021/12月、T2Kコラボレーション会議、各検出器の状況報告。
- 2022年秋のND280への設置に向けて、検出器製造、組み立ての最終段階。



今後の計画 2/3



- 前置検討

低運動量の
大角度散乱

ND280 Upgrade: Integration and Time Schedule

- ND280 Upgrade Safety Committee established and functioning
- DAQ integration task force set
- Efforts on cable routing as well as NM and NA space organization have started
- New ND280 chiller to be purchased because of the increased power ($12.5 \text{ kW} \rightarrow 15.6 \text{ kW}$)
- 1st TPC ready in Summer 2022 at CERN for shipment. SuperFGD assembly to be completed before Fall 2022. 2nd TPC will be ready to be shipped in Winter 2022

2022/1月	2022				2023	
	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6
	P0D removal	Basket modification		Installation of new detectors		Ready to accept beam

- Plan to be ready with full installation of the ND280 upgrade detectors and ready to accept beam in February or March 2023
 - ◆ Preparing full list of tasks, including for existing detectors, and working out plan to minimise international travels
 - ◆ Uncertainties due to COVID (travel restrictions, delivery of components, etc.)

https://kds.kek.jp/event/40624/contributions/203245/attachments/151139/189824/T2K_Talk_02_Hardware.pdf by D. Sgalaberna

- 2022年度 冬からデータ取得再開予定で検出器の導入の調整が進行中。
- コロナの状況により、海外からの入国制限等がある場合、スケジュールが変動する可能性…

今後の計画 3/3

- WAGASCI-BabyMIND 検出器の導入

WAGASCI/Baby-MINDを用いて、 ν と水(SK)や
プラシンチ(ND)の反応を高精度で測定比較、

→ 反応物質の違いの系統誤差の大幅な削減を行う。

ND280 とは異なるoff-axis 角のため、異なる ν フラックス

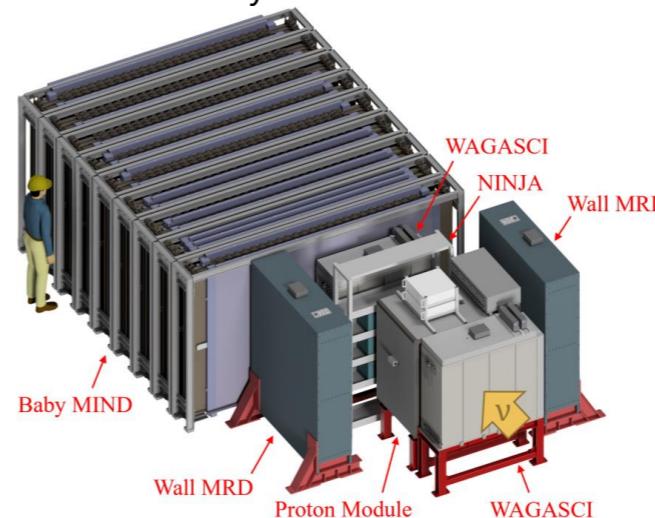
→ 両者の差し引きして、2種のエネルギー幅が小さい ν フラックス
を用いて精密なニュートリノ反応モデルの検証

- Run10 から物理データの取得開始

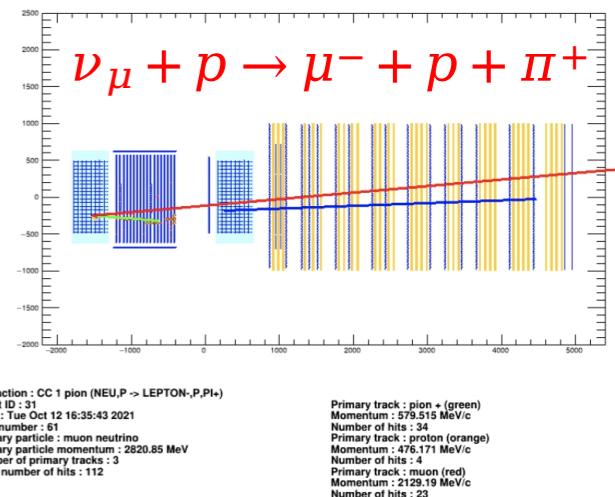
日(仏)のグループで、MCを用いたトラック再構成、
事象選別の解析手法を開発/改良中。

→ 2021から実データ解析進行中、詳細解析に移行の計画。
(一部のハードウェアトラブルにも対応中)

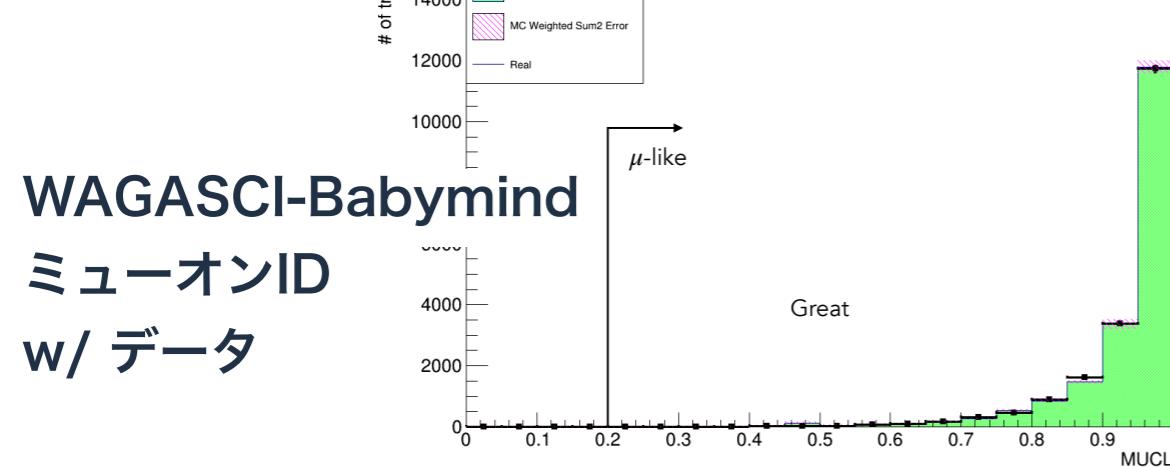
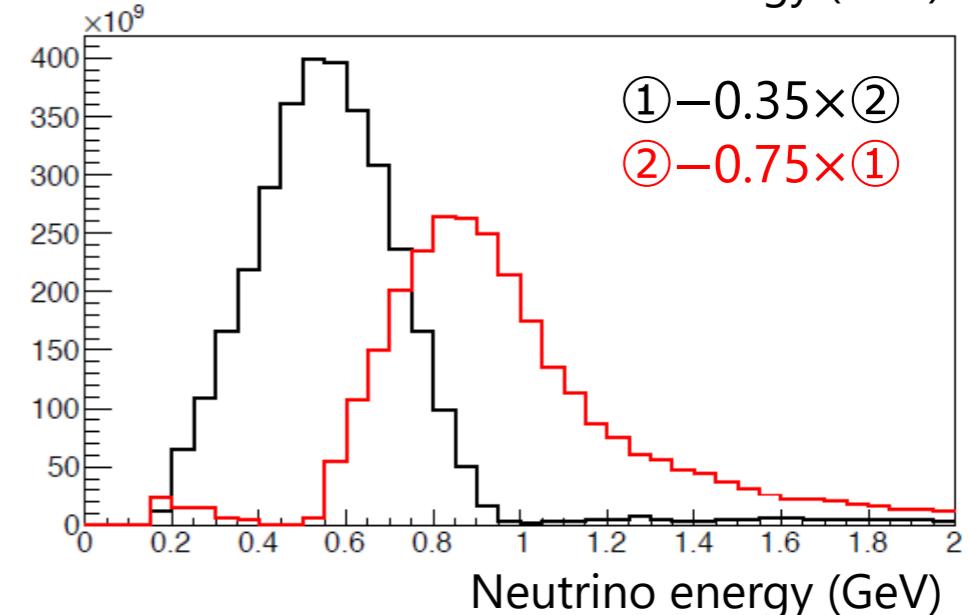
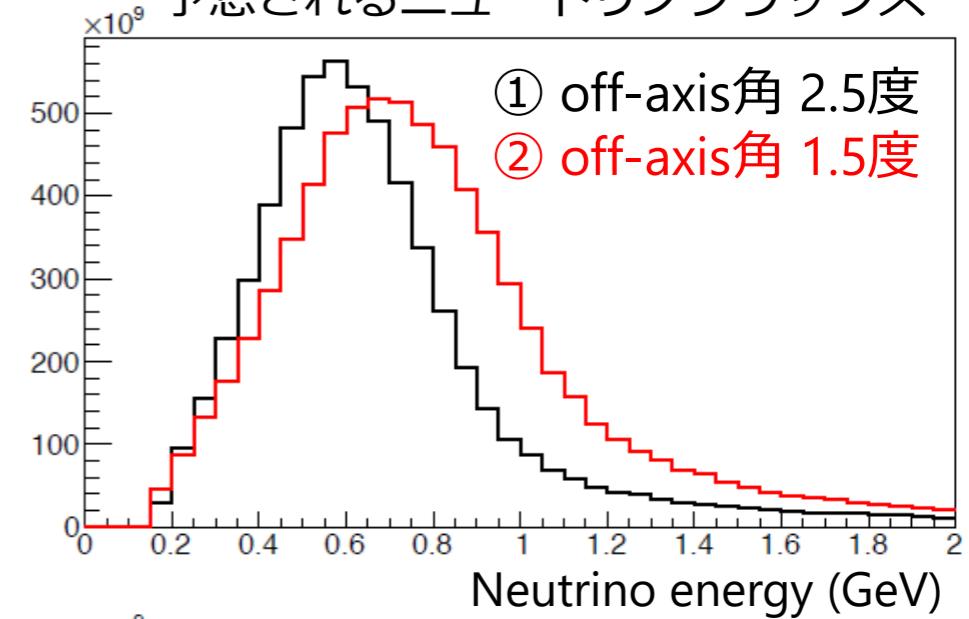
WAGASCI-BabyMIND検出器の概要図



Side-view



予想されるニュートリノフラックス



Joint fit: 前置検出器群

https://kds.kek.jp/event/40624/contributions/203245/attachments/151139/189822/T2K_Talk_01_Analysis.pdf S. Bolognesi

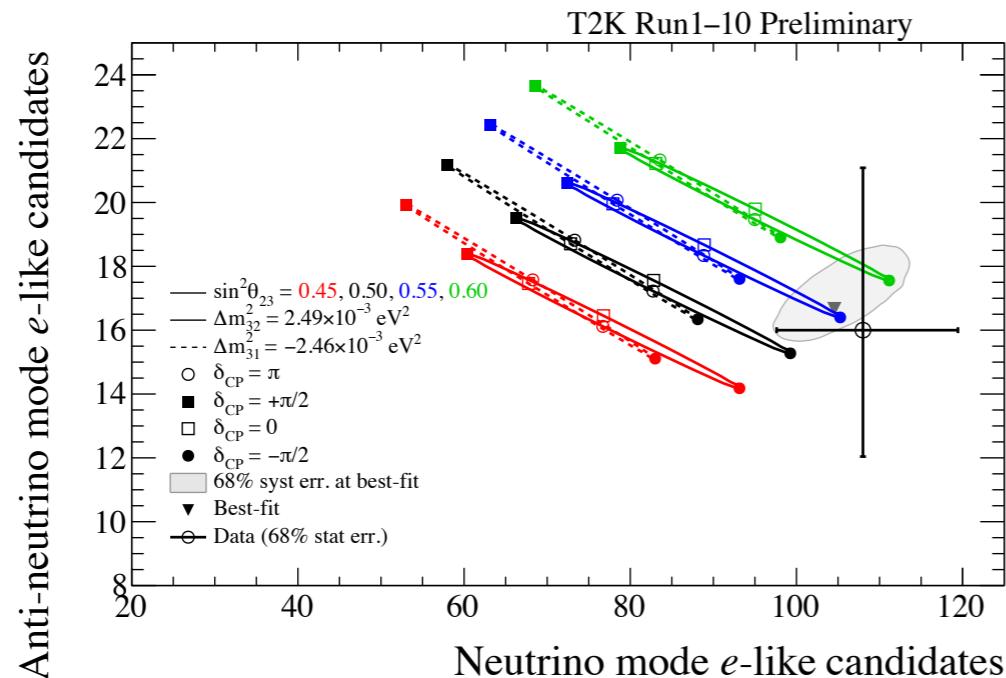
- 前置検出器群での joint-fit: ニュートリノ断面積測定の改善
off-axis(ND280) + on-axis(INGRID+ProtonModule) → 公開の最終段階、近々公開
- 相互作用物質との断面積の系統誤差削減
より狭いニュートリノエネルギー分布の利用
off-axis(ND280) + on-axis(INGRID+ProtonModule)
off-axis WAGASCI-BabyMind 検出 → 現在検討中…

Joint fit: 他実験

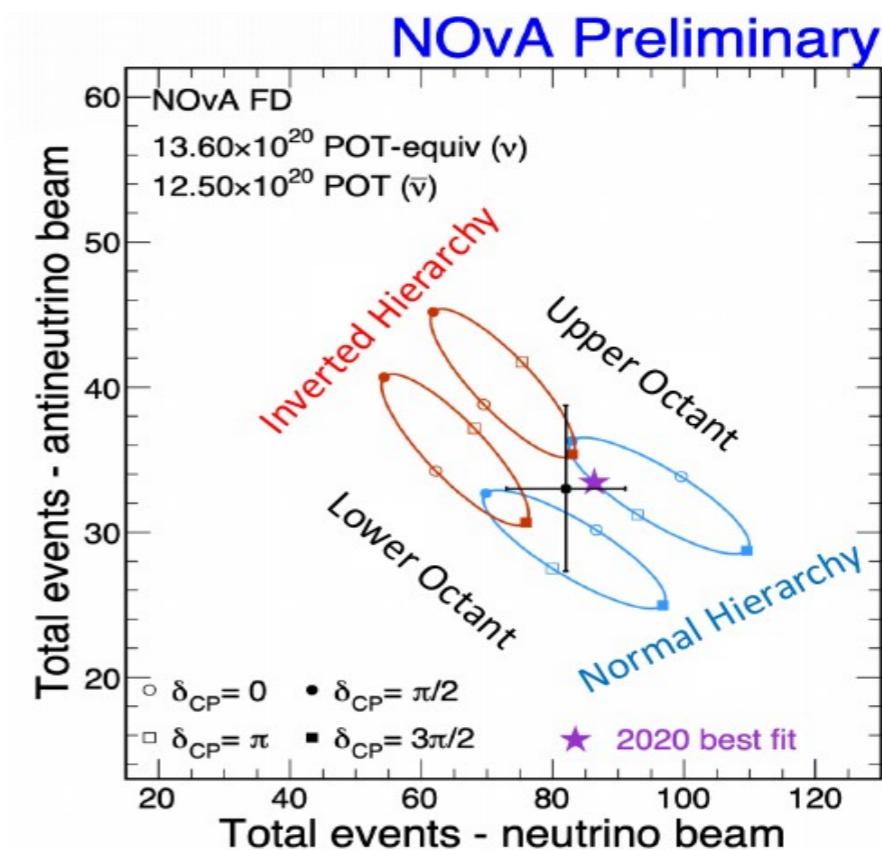
https://kds.kek.jp/event/40624/contributions/203245/attachments/151139/189822/T2K_Talk_01_Analysis.pdf S. Bolognesi

- T2K + Nova

T2Kは質量順階層で最大のCPの破れを示唆



NOvAは質量逆階層で最大のCPの破れ or
順階層でCPはある程度保存を示唆



現状では、統計的なふらつきが大きい

→ T2K+Nova 両実験データセットを利用し、振動パラメータの縮退を解消し、感度をあげたい。

- 解析の方法が、両実験で異なる。両実験の系統誤差の取り扱いが難しい。
- 主要な測定エネルギー領域の違いのため、NearDetector ν 反応モデルを用いた FarDetector への ν フラックス の外挿調整が難しい： T2K ~ 0.7GeV、Nova ~ 2GeV

Joint fit: 他実験

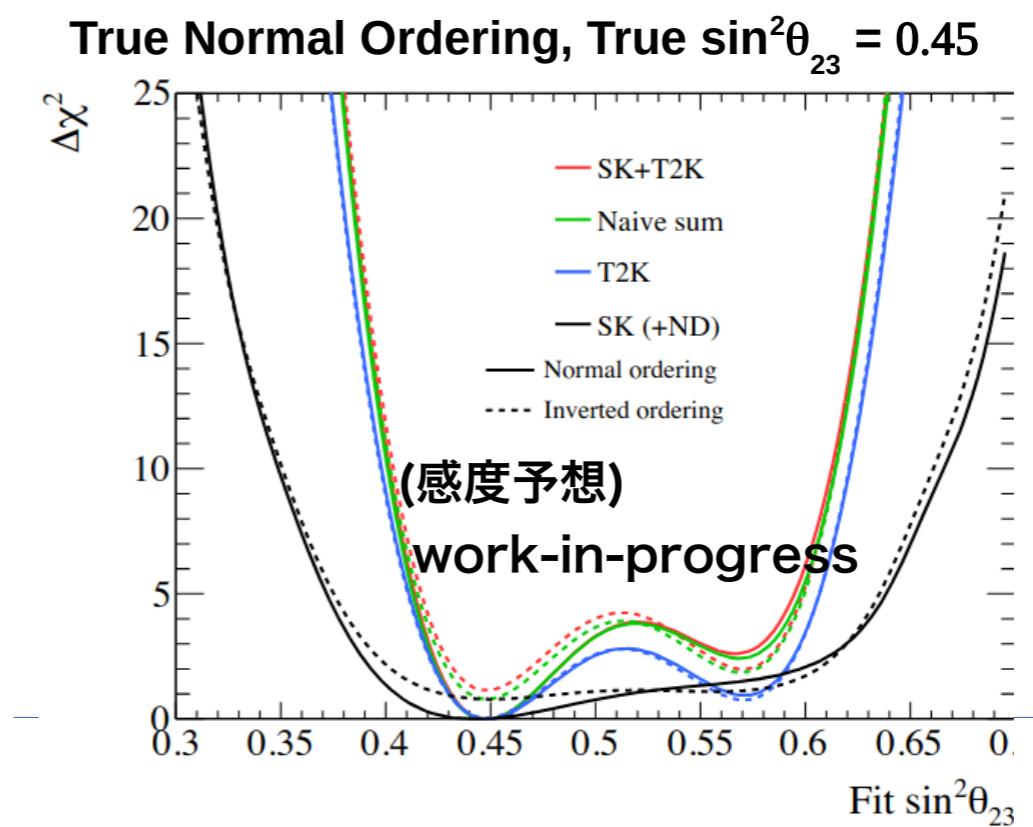
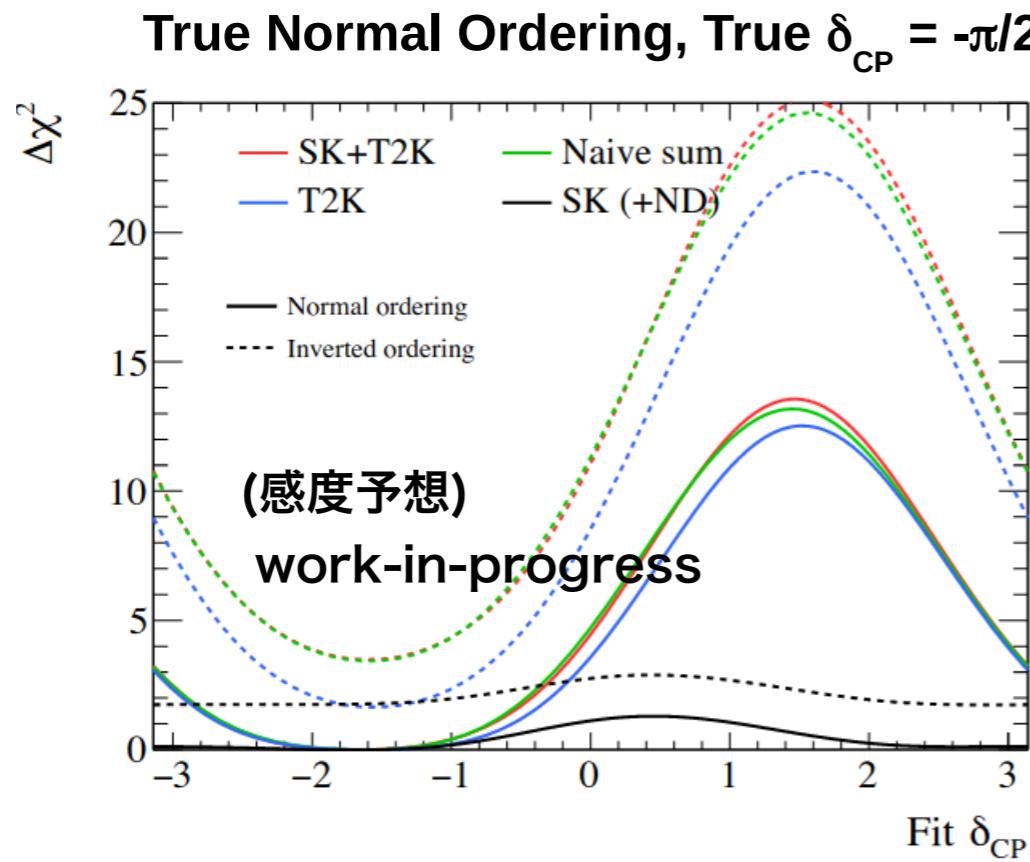
https://kds.kek.jp/event/40624/contributions/203245/attachments/151139/189822/T2K_Talk_01_Analysis.pdf S. Bolognesi

- T2K + SK

- SuperKamiokande atmospheric neutrinos and T2K beam neutrinos

Full model of neutrino interactions (correlated at low energy) and of far detector systematics (fully correlated) developed! First sensitivity studies!

大気ニュートリノ測定情報を用いて、
質量階層性、CP、 θ_{23} オクタント縮退問題 の感度を上げる。



まとめ

- T2K実験はレプトンセクタにおけるCP対称性の破れを 95% C.L. (2σ)で示唆。CPの破れの兆候を掴むことを目標に、T2K-II 実験に移行。
- 2020年から Run10、Run11が行われ統計量増加、加えて解析の改善が進行中。系統誤差の削減を目的に、WAGASCI-BabyMIND検出器が導入。Run10からWAGASCI-BabyMIND検出器でニュートリノデータの取得が開始。
- 現在のところ統計誤差が支配的 → 2022年にJPARC-MRの増強。系統誤差の削減の削減のため、ニュートリノ反応の精密測定を目的とした、前置検出器ND280のアップグレードが最終段階、2022に導入、測定開始を目指。
- T2K-ND群での joint-fit、また T2K-Nova, T2K-SK の共同解析も進行中。

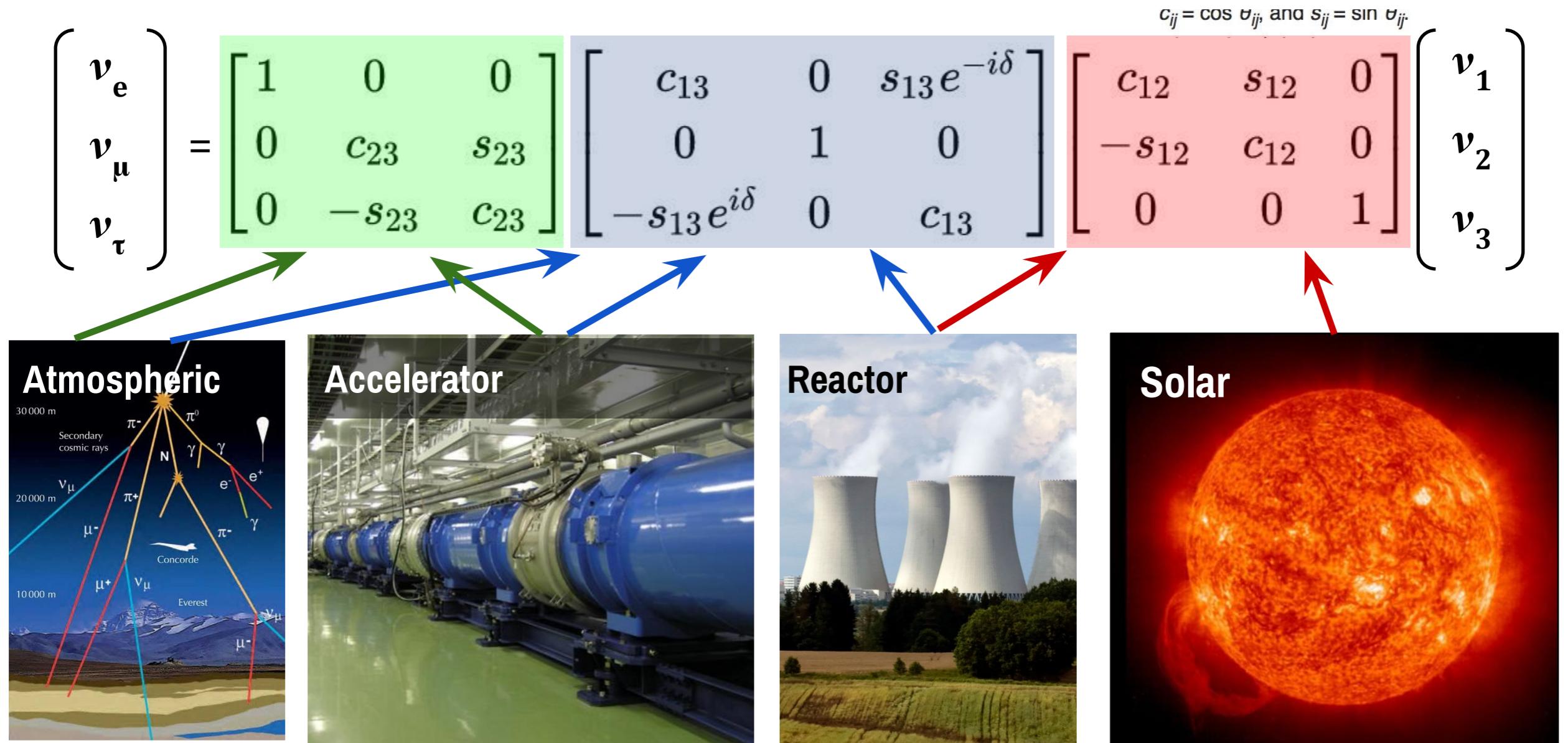
T2K collaboration



2019年7月のコラボレーション
ミーティング in フランスにて

~500 scientist from 12 countries

T2K実験、最近の成果



KNOWNS	($\sim 1\sigma$ accuracy)
$\Delta m^2 / \text{eV}^2 = 2.48 \times 10^{-3}$	(1.3%)
$\delta m^2 / \text{eV}^2 = 7.34 \times 10^{-3}$	(2.2%)
$\sin^2 \theta_{13} = 0.0225$	(3.0%)
$\sin^2 \theta_{12} = 0.303$	(4.4%)
$\sin^2 \theta_{23} = 0.545$	(~5%)

UNKNOWNs	(> 1σ hints)
Dirac or Majorana	
Mass ordering	(> 3σ NO)
Absolute mass	(<sub-eV)
Dirac CP phase δ_{cp}	(1.6 σ CPV)
Octant of θ_{23}	

T2K実験、最近の成果

Cristóvão Vilela on behalf of the T2K Collaboration and Hyper-Kamiokande @ PANIC2021

Not just oscillations!

PHYSICAL REVIEW D **103**, 112009 (2021)

First T2K measurement of transverse kinematic imbalance in the muon-neutrino charged-current single- π^+ production channel containing at least one proton



PHYSICAL REVIEW D **101**, 112004 (2020)

Simultaneous measurement of the muon neutrino charged-current cross section on oxygen and carbon without pions in the final state at T2K



PHYSICAL REVIEW D **101**, 112001 (2020)

First combined measurement of the muon neutrino and antineutrino charged-current cross section without pions in the final state at T2K



PHYSICAL REVIEW D **101**, 012007 (2020)

Measurement of the muon neutrino charged-current single π^+ production on hydrocarbon using the T2K off-axis near detector ND280

PTEP



Prog. Theor. Exp. Phys. **2021**, 043C01 (28 pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptab014

Measurements of $\bar{\nu}_\mu$ and $\bar{\nu}_\mu + \nu_\mu$ charged-current cross-sections without detected pions or protons on water and hydrocarbon at a mean anti-neutrino energy of 0.86 GeV

PHYSICAL REVIEW D **102**, 012007 (2020)



First measurement of the charged current $\bar{\nu}_\mu$ double differential cross section on a water target without pions in the final state

JHEP

PUBLISHED FOR SISSA BY SPRINGER

RECEIVED: February 28, 2020

REVISED: July 20, 2020

ACCEPTED: September 13, 2020

PUBLISHED: October 19, 2020



Measurement of the charged-current electron (anti-)neutrino inclusive cross-sections at the T2K off-axis near detector ND280



PHYSICAL REVIEW D **100**, 112009 (2019)

Measurement of neutrino and antineutrino neutral-current quasielasticlike interactions on oxygen by detecting nuclear deexcitation γ rays

http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~nakahata_s/tokusui/talk/nakajima_jps_2018spring.pdf

Super-K Gd (SK-Gd)では、Gdによる中性子捕獲を用いて ニュートリノ反応により生じた中性子を高効率で検出可能に。

反ニュートリノモードのデータに約30%含まれる"wrong sign"(ニュートリノ)イベントの理解。

振動パラメター測定への影響

反ニュートリノモードビームのみを
用いた解析での感度（統計誤差のみ）

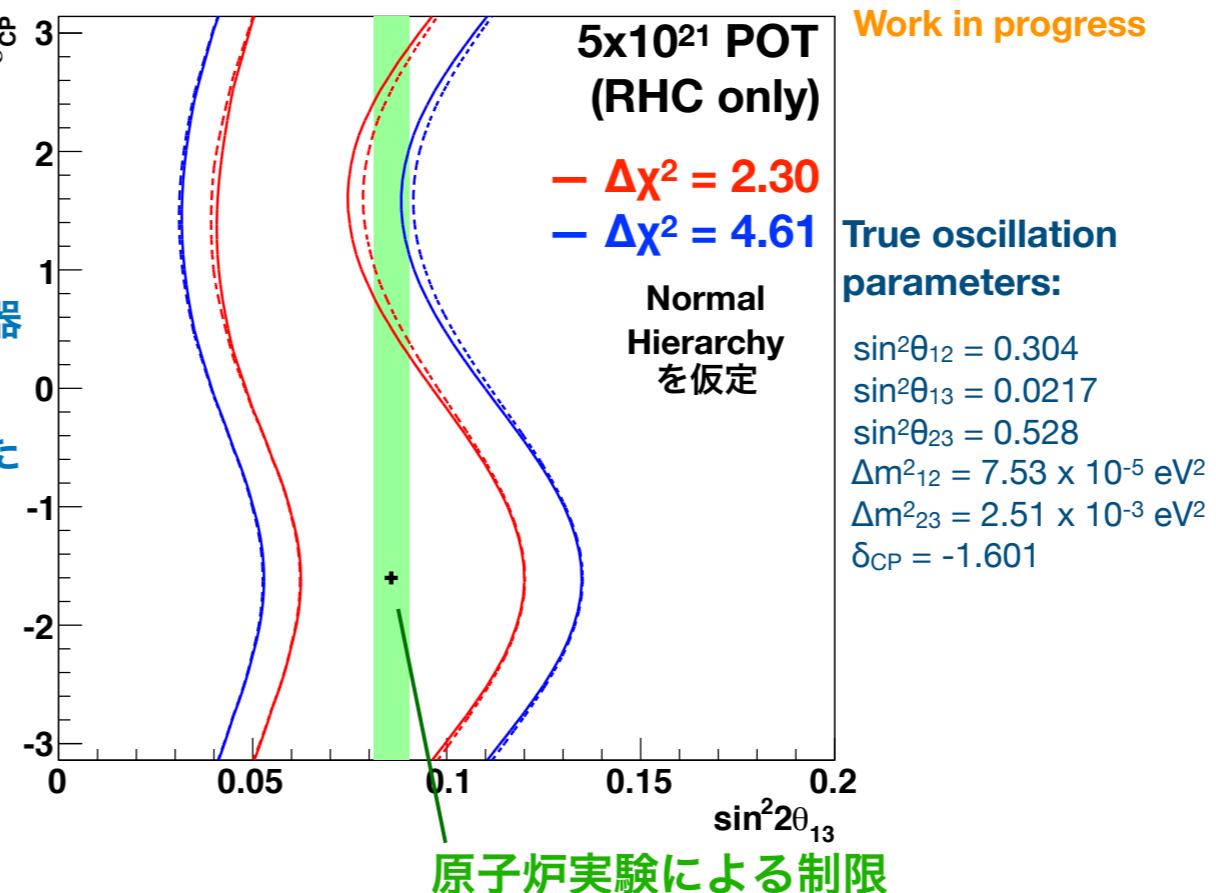
- 反ニュートリノモードデータの解析において、中性子タグを用いることで、 δ_{CP} , $\sin^2 2\theta_{13}$ 測定精度が向上(現時点では統計誤差のみでの評価)

- 原子炉実験の制限によらない加速器実験単独でのCP非保存探索
- 反ニュートリノデータのみを用いた CP非保存パラメターの測定

に対するインパクトが期待

- 系統誤差を含めた影響評価を現在行っている

実線：中性子タグを用いた場合
破線：中性子タグを用いなかった場合

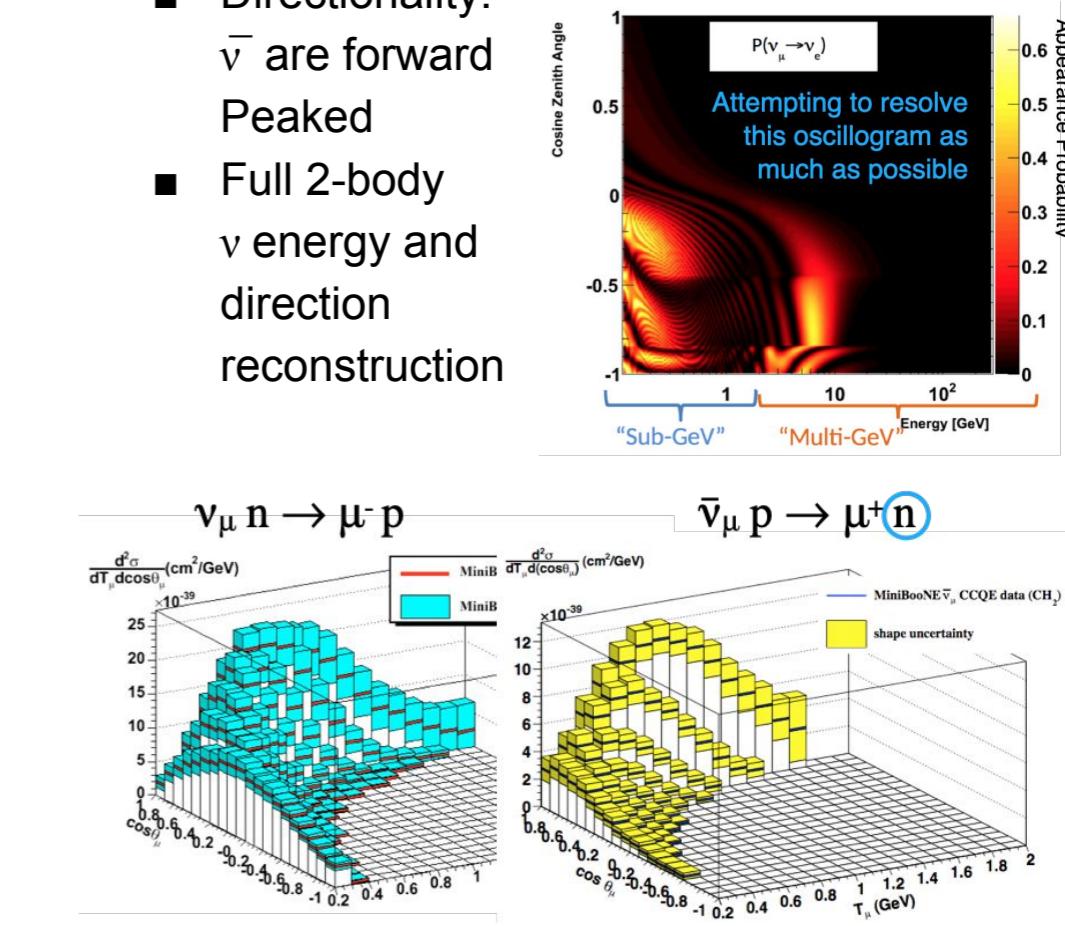
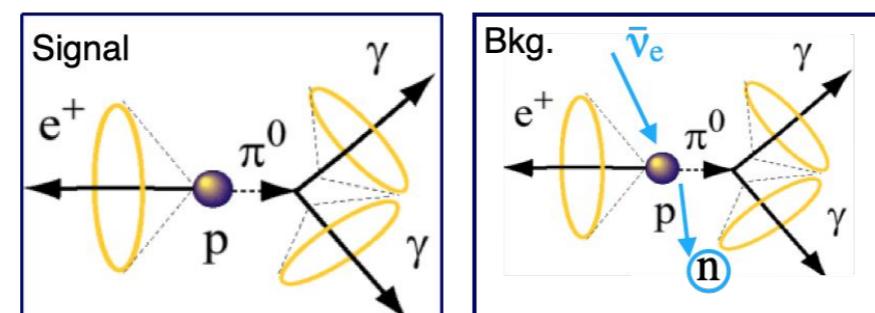
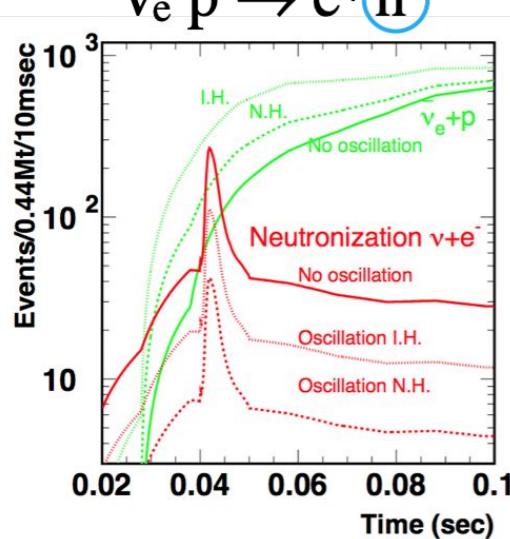


T2K実験、最近の成果

Patrick de Perio @ CAP Congress, June 8, 2021

Super-K Gadolinium Upgrade Physics Potentials

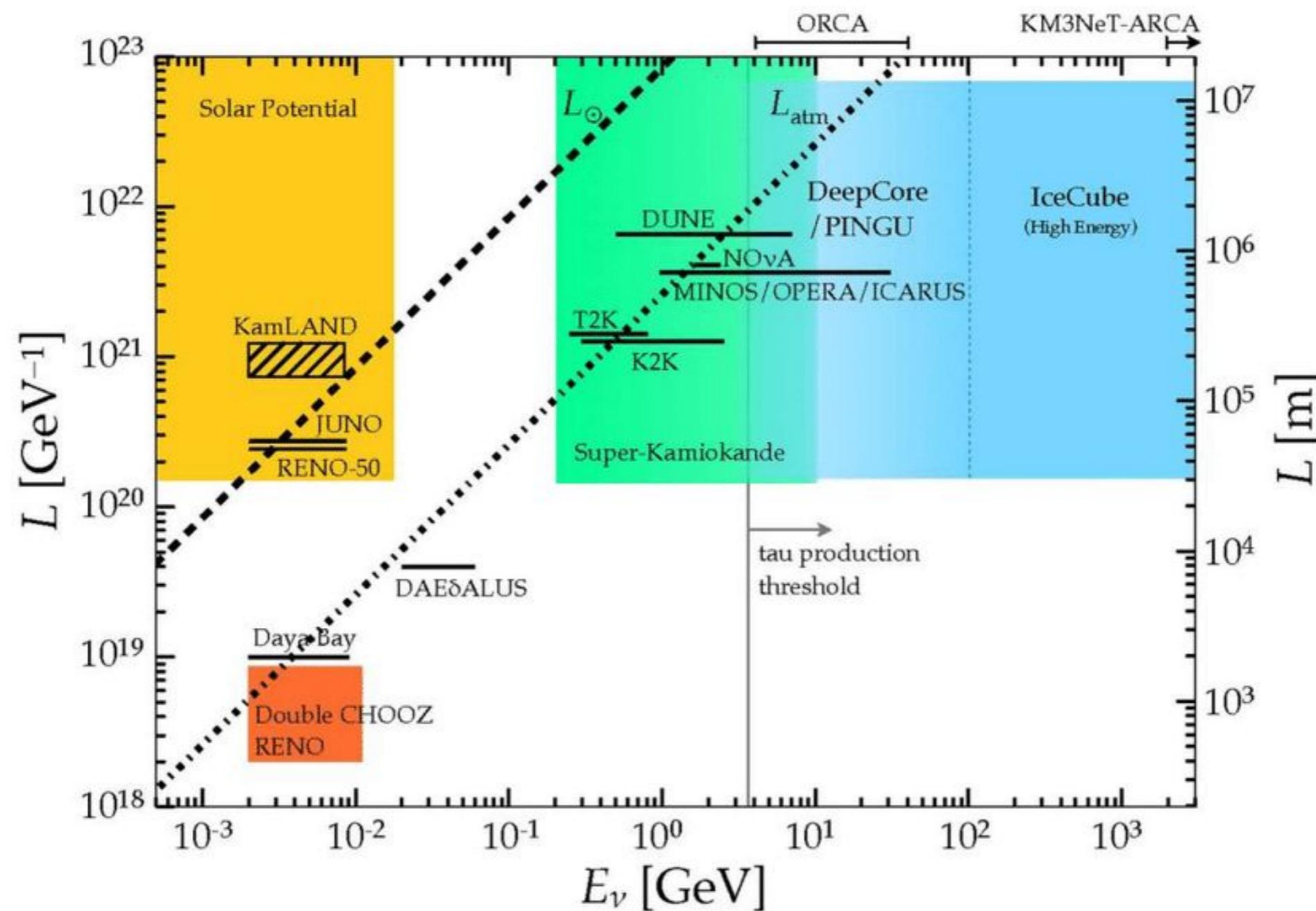
- Supernova burst and relic ν
 - Separating IBD from elastic scattering for better direction resolution
 - Reduction of invisible μ decay-e bkg
- Proton decay
 - Removal of atmospheric ν backgrounds
 - Towards background-free measurement
- Neutrino oscillation
 - Improved separation of $\nu/\bar{\nu}$
 - Reduction of beam wrong-sign bkg.
 - New probe of sub-GeV oscillogram
 - Directionality: $\bar{\nu}$ are forward Peaked
 - Full 2-body ν energy and direction reconstruction



T2K実験、最近の成果

Patrick de Perio @ CAP Congress, June 8, 2021

Neutrino Oscillation L/E Scales

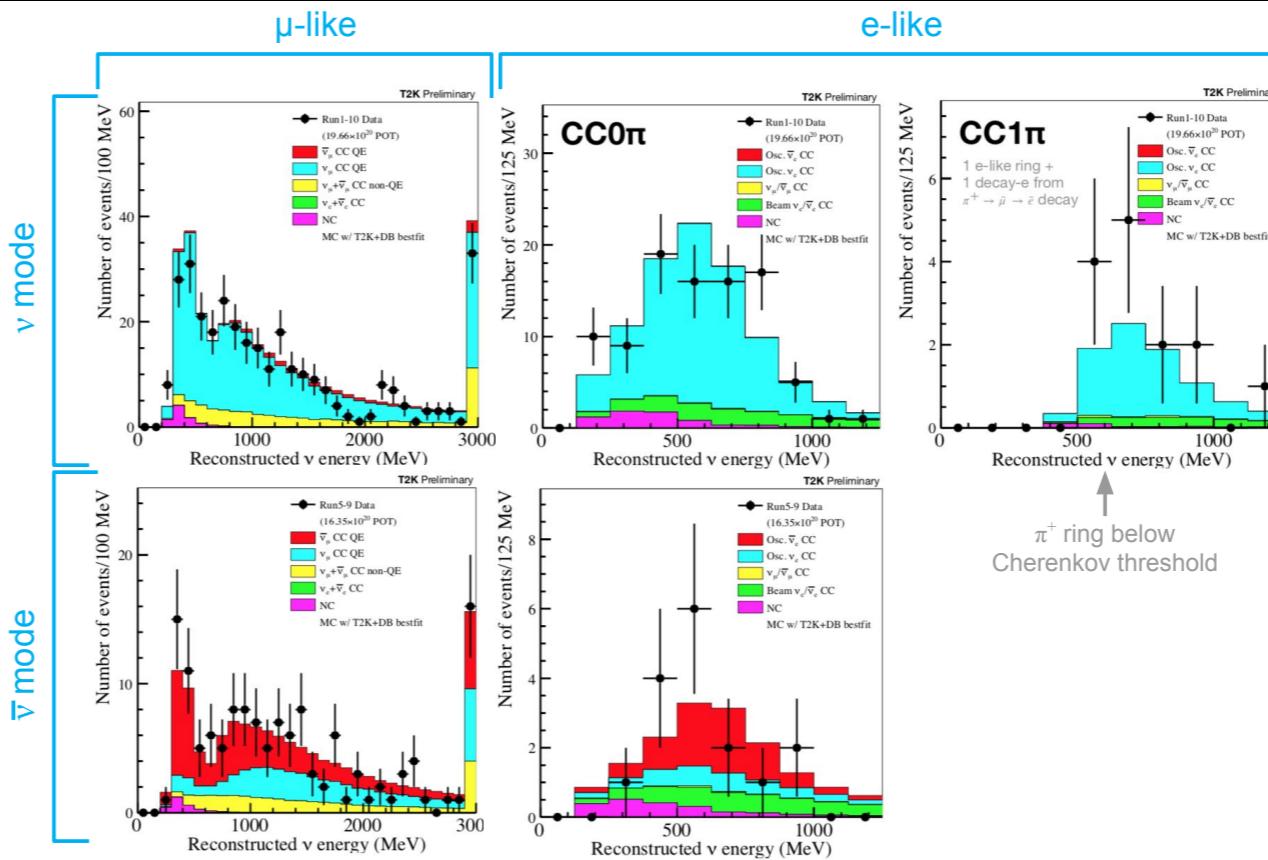


T2K-SK Single-Ring Datasets for CPV Analysis

- Updated Super-K datasets used for 2020 CPV analysis

- ν_μ disappearance
- ν_e appearance
- Only one visible Cherenkov ring

- Event reconstruction (fiTQun) and detector systematic analyses developed in Canada 



T2K-SK Multi-Ring Datasets for Future Analyses

- Second dominant interaction channel: **resonant 1π production**
- Expected to improve oscillation parameter measurements
 - E.g. ~12% increase in ν_e signal statistics
- New BDT pushing the limits of traditional likelihood reconstruction algorithm

