

加速器長基線 ニュートリノ振動実験

2020/6/4, 高エネルギー将来計画委員会 第2回 勉強会

"Intensity フロンティア" : J-PARC加速器、加速器長基線

ニュートリノ振動、K稀崩壊の現状、展望、ビヨンド

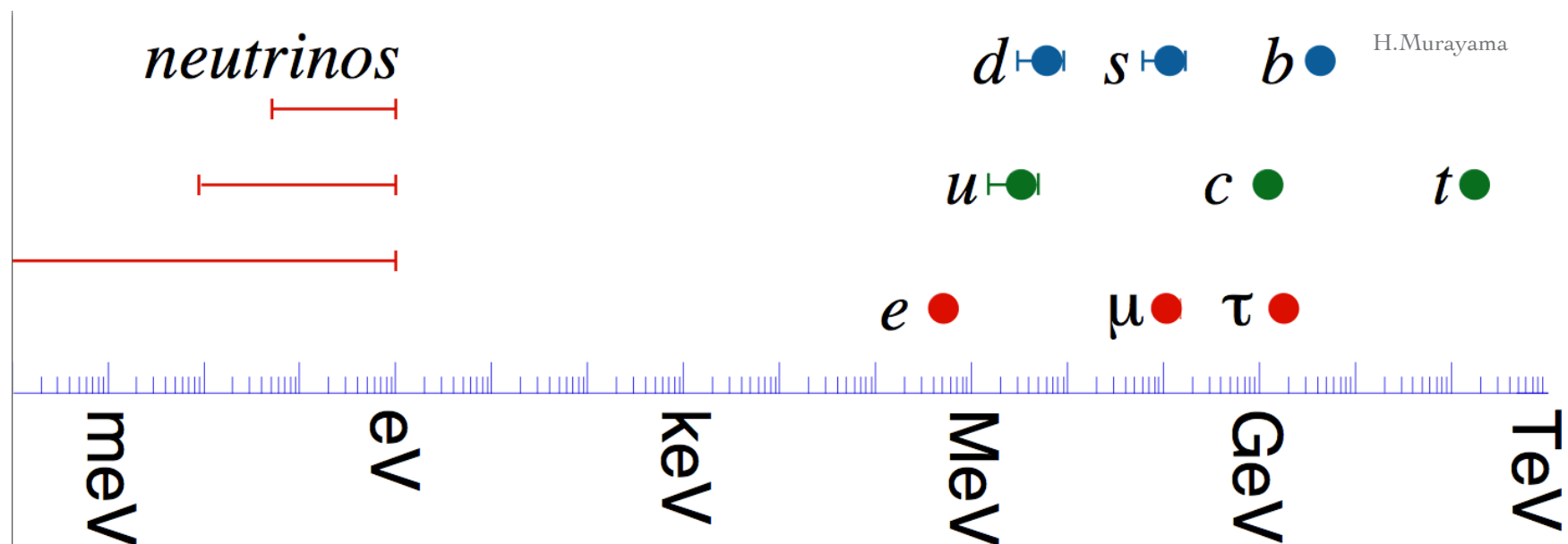
坂下健(KEK/J-PARC)

Contents

- ・ イントロダクション
- ・ 加速器長基線ニュートリノ振動実験の現状と展望
 - ・ 解決すべき問題とその対処プラン
- ・ まとめ

イントロダクション

📌 ニュートリノの質量 → 標準模型を超える物理



📌 非常に小さな質量: $m_\nu/m_e < 10^{-6}$

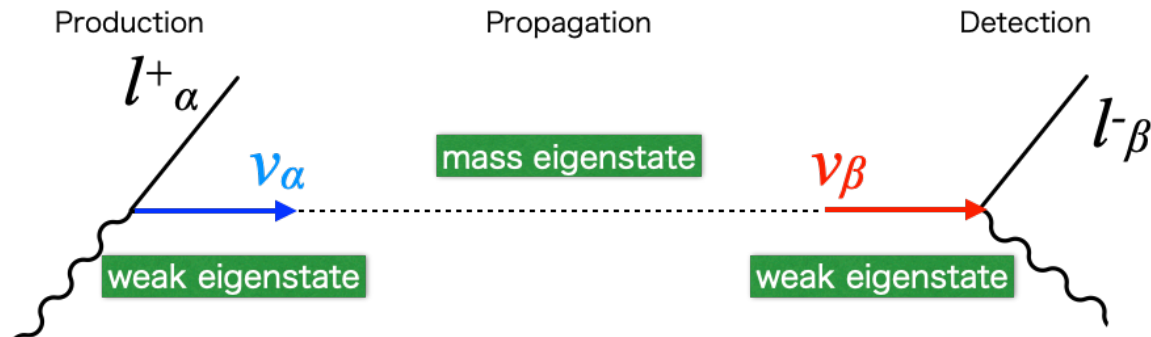
- ▶ 重たい右巻きニュートリノの存在? マヨラナ粒子?
- ▶ $\sim 10^{16}$ GeV (~GUT) scaleまで幅広いエネルギー領域の物理に感度がある

➡ 様々な方法で新しい物理の探索が必要

ν 振動実験、ステライル ν 探索、 $0\nu\beta\beta$ 探索、 ν mass直接測定

3世代ニュートリノ振動

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



$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \cdot \sin^2 \Phi_{ij} \pm 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \cdot \sin 2\Phi_{ij}$$

振動確率 = 距離(L) とエネルギー(E_ν) の関数

$$\Phi_{ij} \equiv 1.27 \frac{\Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2/c^4] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]}$$

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

現状 :

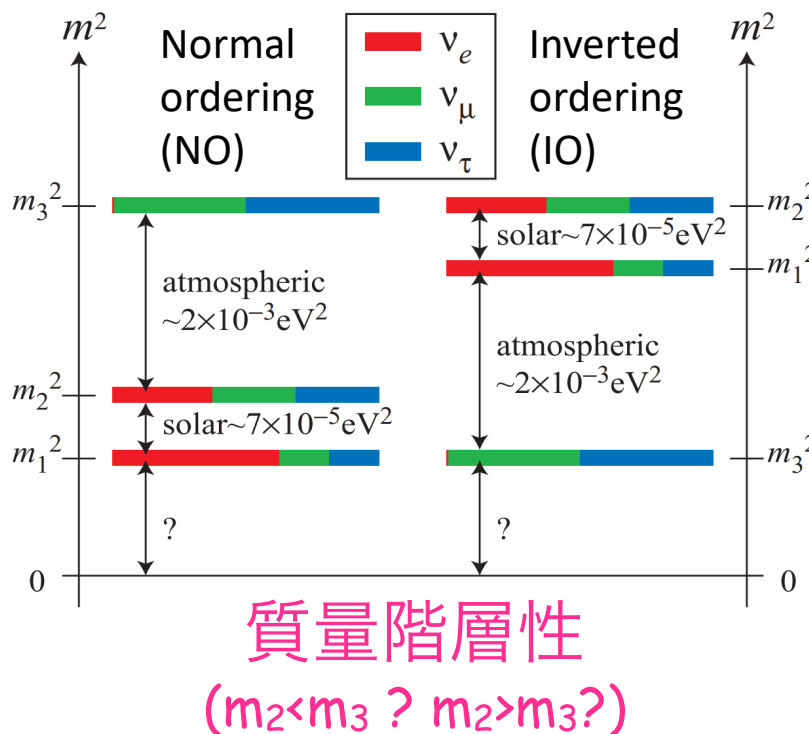
$$|U_{\text{PMNS}}| \sim \begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & 0.1 \\ 0.5 & 0.6 & 0.7 \\ 0.3 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$



まだ誤差大きいが
quarkと大きく異なる

$$|V_{\text{CKM}}| \sim \begin{pmatrix} 1 & 0.2 & 0.004 \\ 0.2 & 1 & 0.04 \\ 0.008 & 0.04 & 1 \end{pmatrix}$$

まだ分かっていないこと :



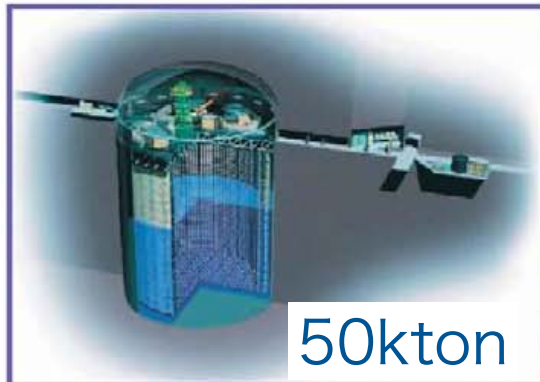
CP violation
parameter :

δ_{CP}

長基線ν振動の現行実験：



International collaboration
 ~500 members, 69 Institutes
 12 countries

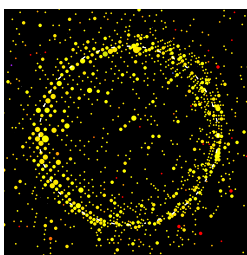


50kton

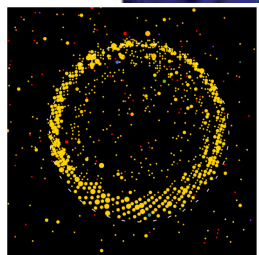
Super-Kamiokande
 (ICRR, Univ. Tokyo)



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



ν_e-like

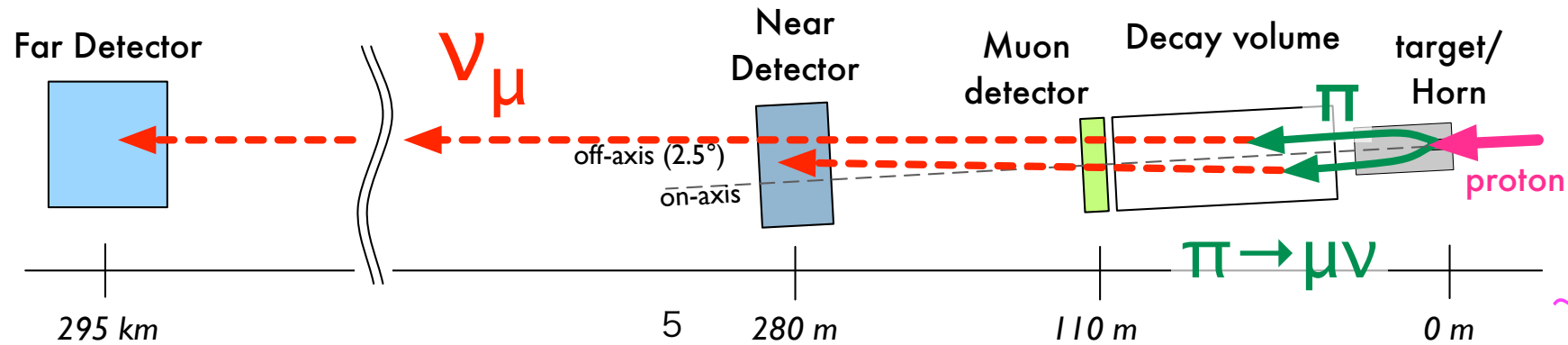


ν_μ-like

スーパーカミオカンデで
 ニュートリノ振動を観測

前置検出器で
 数やエネルギー等を測定

J-PARCで大強度
 ν_μ(反ν_μ)ビームを生成



現在
 ~515kW

T2Kで見るニュートリノ振動

ν_μ disappearance

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - (\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} + \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23}) \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}$$

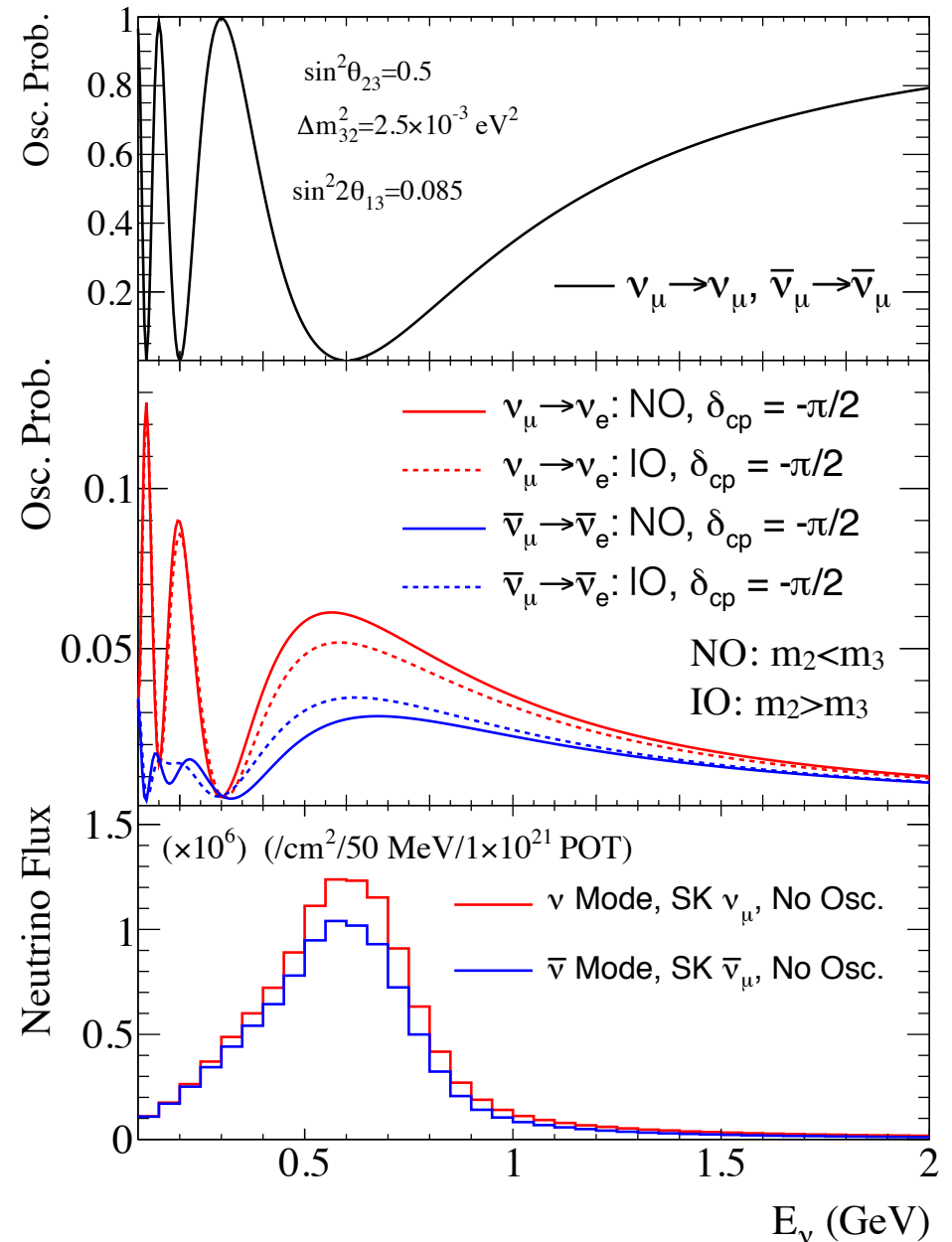
残った $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ のエネルギー分布から
 $\sin^2 2\theta_{23}$ と Δm_{32}^2 を決める

ν_e appearance

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2(\Delta m_{31}^2 L/4E) + (\text{CPV term}) + (\text{matter term}) \dots$$

$\delta_{CP} \rightarrow -\delta_{CP}$ if $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 質量階層性に感度
 295kmでは効果が小さい

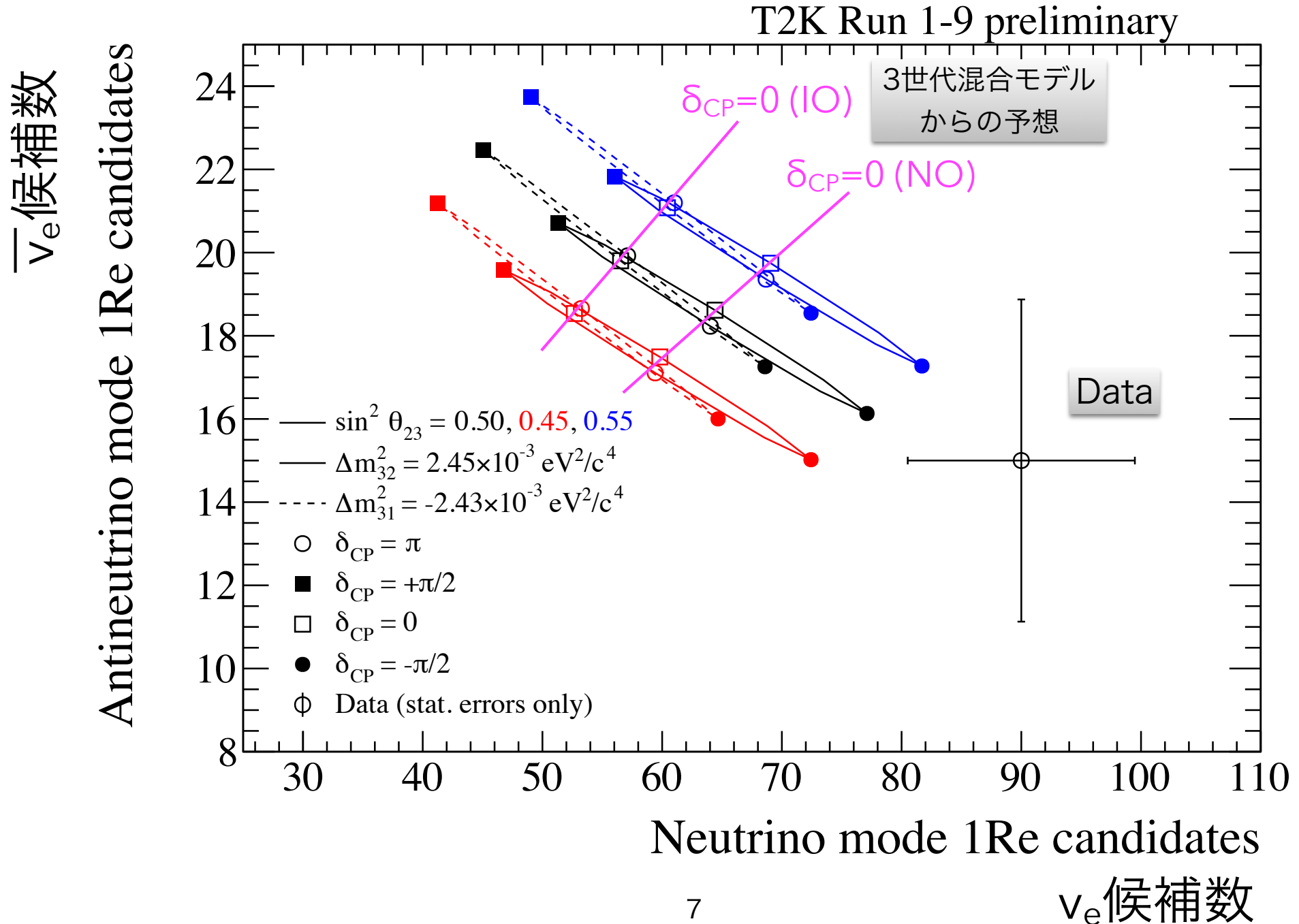
ν_e 出現事象と $\bar{\nu}_e$ 出現事象を比較して
 CP対称性の破れ(δ_{CP})を探索



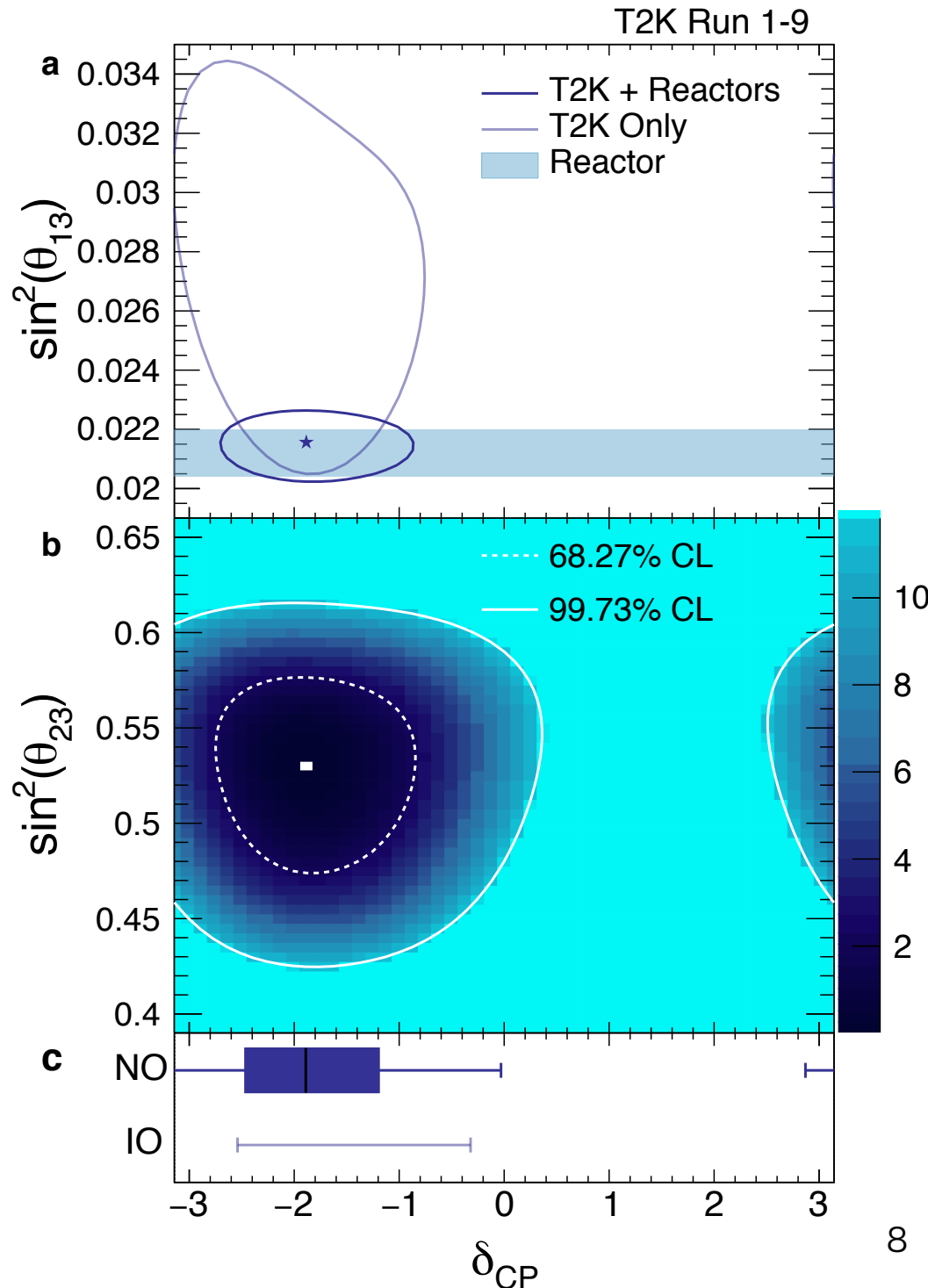
T2K: 2019年までの9年間のデータ解析結果

ν_e 候補数 vs $\bar{\nu}_e$ 候補数

ν -mode : 14.9×10^{20} POT , $\bar{\nu}$ -mode : 16.4×10^{20} POT



T2K: 2019年までの9年間のデータ解析結果 ($\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ 事象も合わせて)



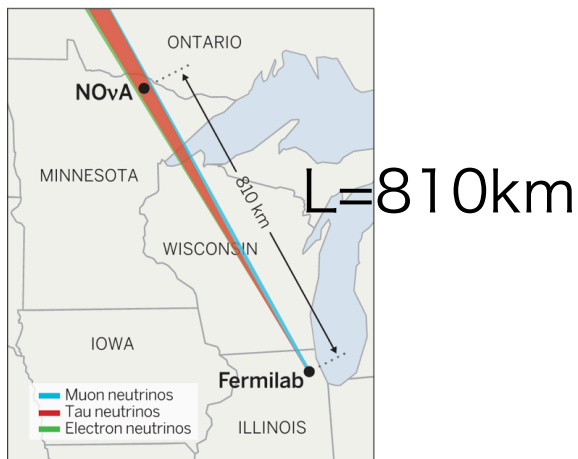
- CP対称性保存 $\sin\delta_{CP}=0$ を 2σ で棄却
- δ_{CP} が $[0,\pi]$ の大部分を 3σ で棄却
- θ_{23} は最大混合角に近い
- DataがNO($m_2 < m_3$)を示す確率89%

2020年4月
NATUREに掲載

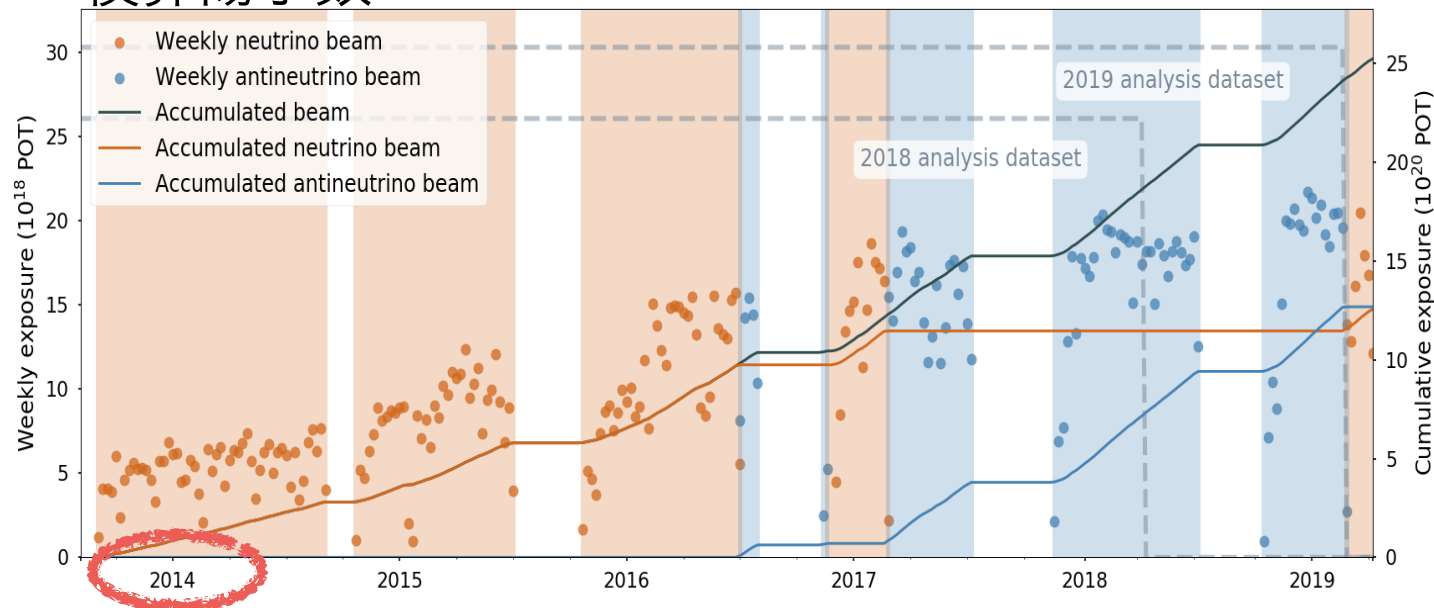


DOI:10.1038/s41586-020-2177-0

NOvA実験



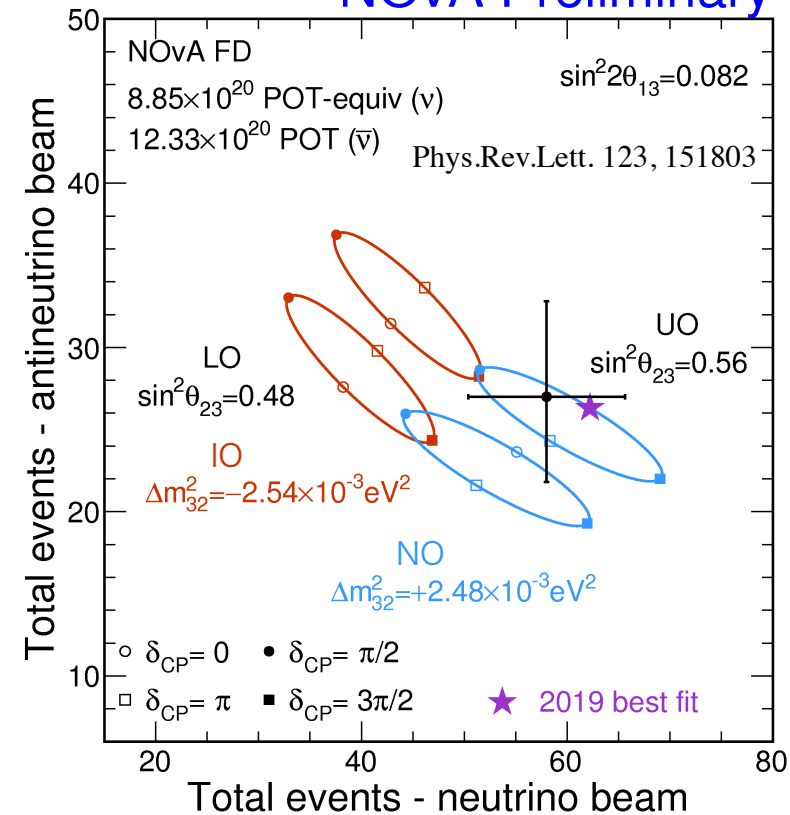
積算陽子数



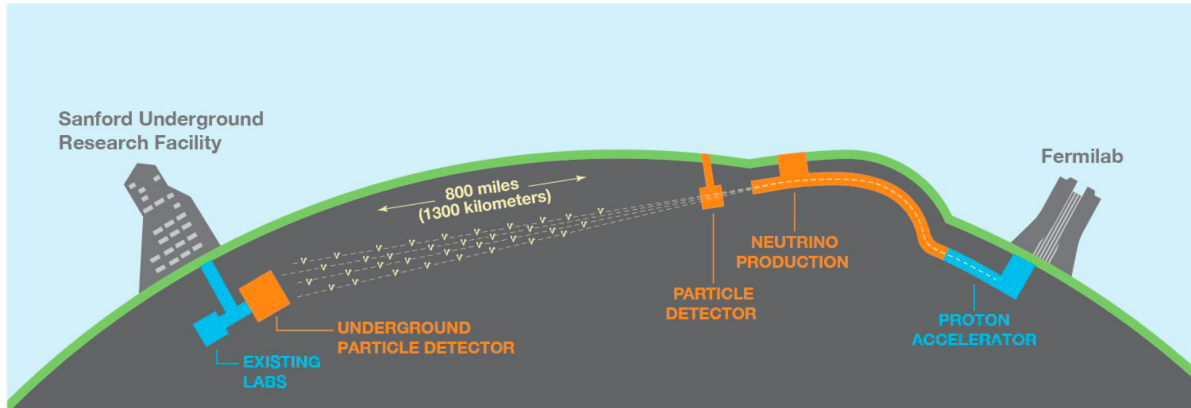
猛烈な追い上げ

- ・ >700kWのビームパワーで運転(運転時間も長い)
- ・ これまでに 4σ 以上での $\bar{\nu}_e$ 出現の発見
- ・ 2025年まで実験の予定：CPV探索、質量階層性の測定

NOvA Preliminary



Deep Underground Neutrino Experiment



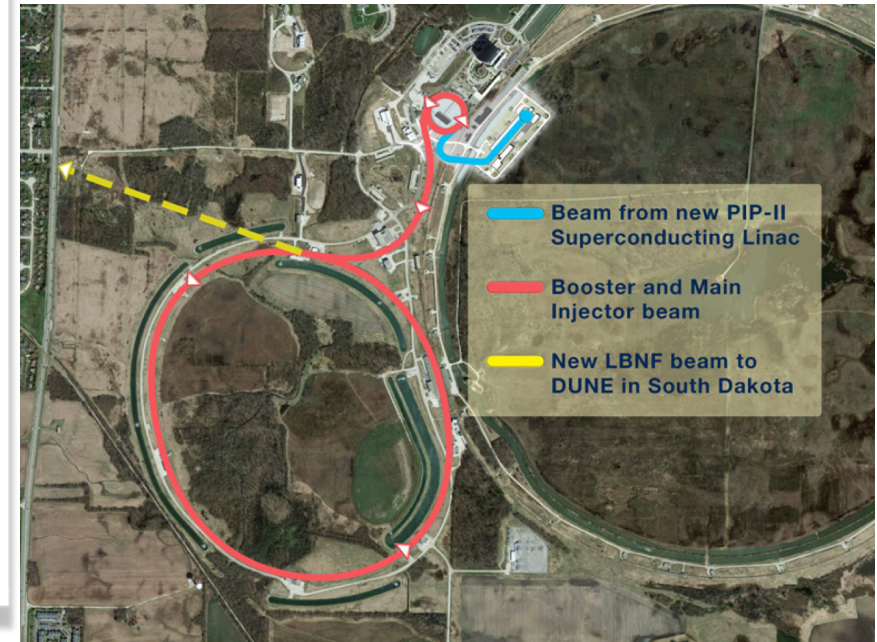
- 1.2MW neutrino beamline from Fermilab (Illinois, USA) to SURF (South Dakota, USA)
- Far Detector: Liquid argon time projection chamber (1300km downstream)
- Near Detector: composite (574m downstream)

4 18/12/2019 Nicola McConkey | DUNE



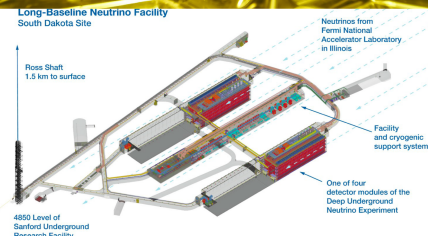
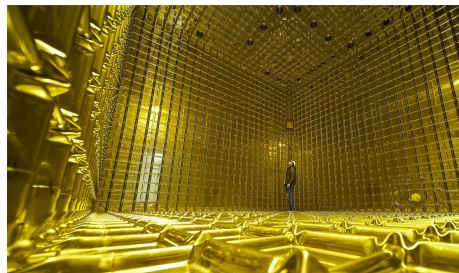
Global collaboration

- 34 countries
- 192 institutions
- 1104 collaborators



DUNE Far Detector

- Sanford Underground Research Facility
 - South Dakota
 - 1.5km underground
- 4 x 10kt modules
 - Membrane cryostat
 - Cryostat: 62m x 19m x 18m
 - 17kt total LAr per module
 - Staged installation
- Groundbreaking July 2017
 - Work ongoing!



- New ν beamline w/ 1.2MW (PIP-II)
- Far detector siteのconstruction開始
- 2026年から実験開始予定 (w/ 20kton)

T2Kから

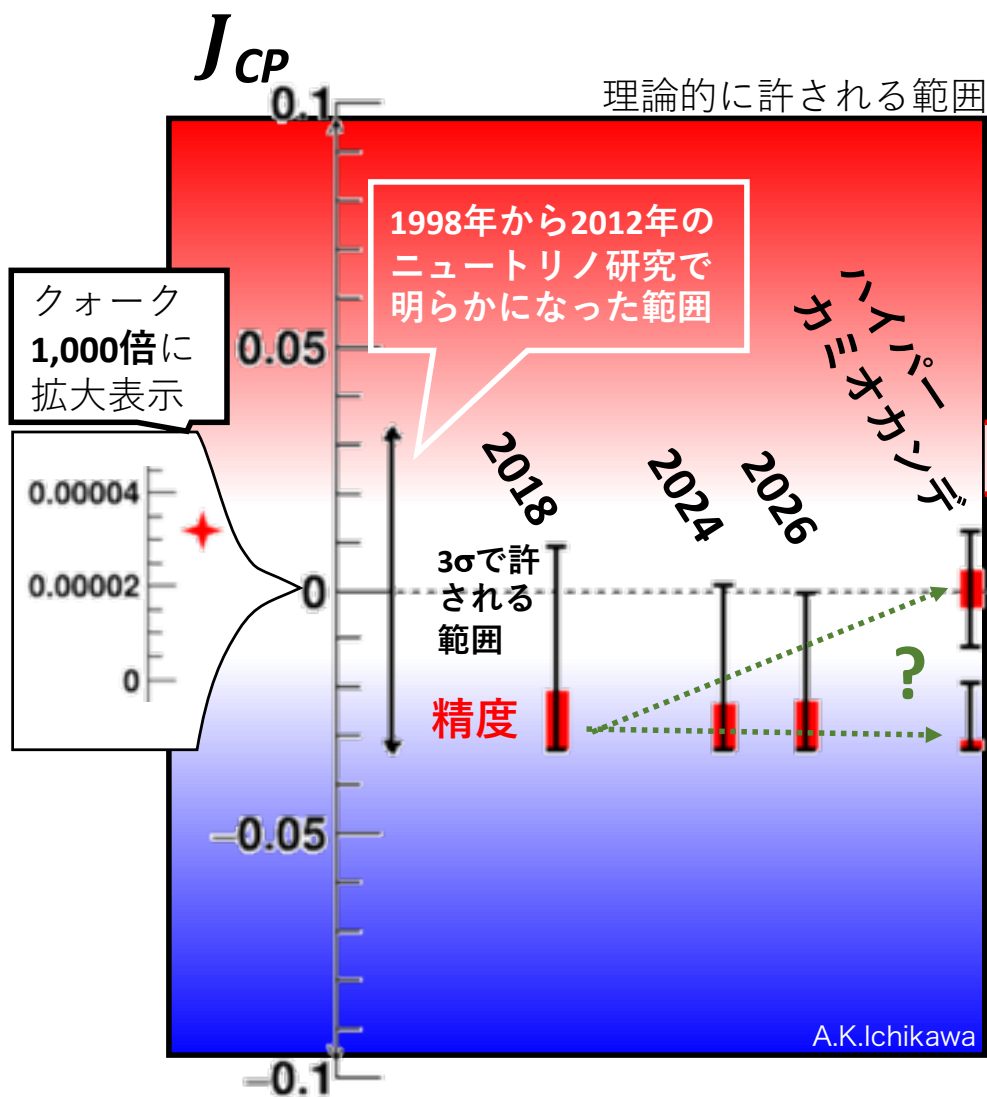
T2K-II, Hyper-Kamiokande(HK)へ

消えた反物質の謎の解明

CP対称性の破れの大きさ $J_{CP} \equiv \frac{1}{8} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin \delta$

混合行列の非対角成分が大きいいため、ニュートリノCP対称性の破れの大きさはクォークの場合に比べて約3桁大きい可能性がある

ニュートリノCP対称性の破れは物質優勢宇宙の誕生を説明する有力な手がかり



- ▶ ニュートリノ振動(+Majorana)で物質優勢宇宙を作るモデル
[arXiv:1609.05028. arXiv:1807.06582]
- ▶ $|\sin \delta| > 0.02$ の場合、 δ (Dirac phase)のみで物質優勢宇宙を作るモデル
[Nucl. Phys. B774 (2007) 1 etc.]
- ▶ あるモデルでは、 δ の符号とレプトジェネシスで物質・反物質どちらが残るかに関係がある ($\delta < 0$ で物質が残る)

[arXiv:2005.01039]

まず $\sin \delta \neq 0$ を確定させて、その大きさの測定へ

振動パラメーターの精密測定 ⇒新しい物理の探索へ

* 3世代混合の検証：異なる測定方法の間で「ズレ」がないか検証

- HKだけで $(\theta_{13}, \delta_{CP})$ を決める \Leftrightarrow 原子炉実験の θ_{13} と比較
- 高精度な Δm^2 測定の比較 e.g. HK \Leftrightarrow JUNO(次期原子炉実験)実験

* CPTの検証： ν_μ disappearance vs $\bar{\nu}_\mu$ disappearance (Δm_{ν}^2 v.s. $\Delta m_{\bar{\nu}}^2$)

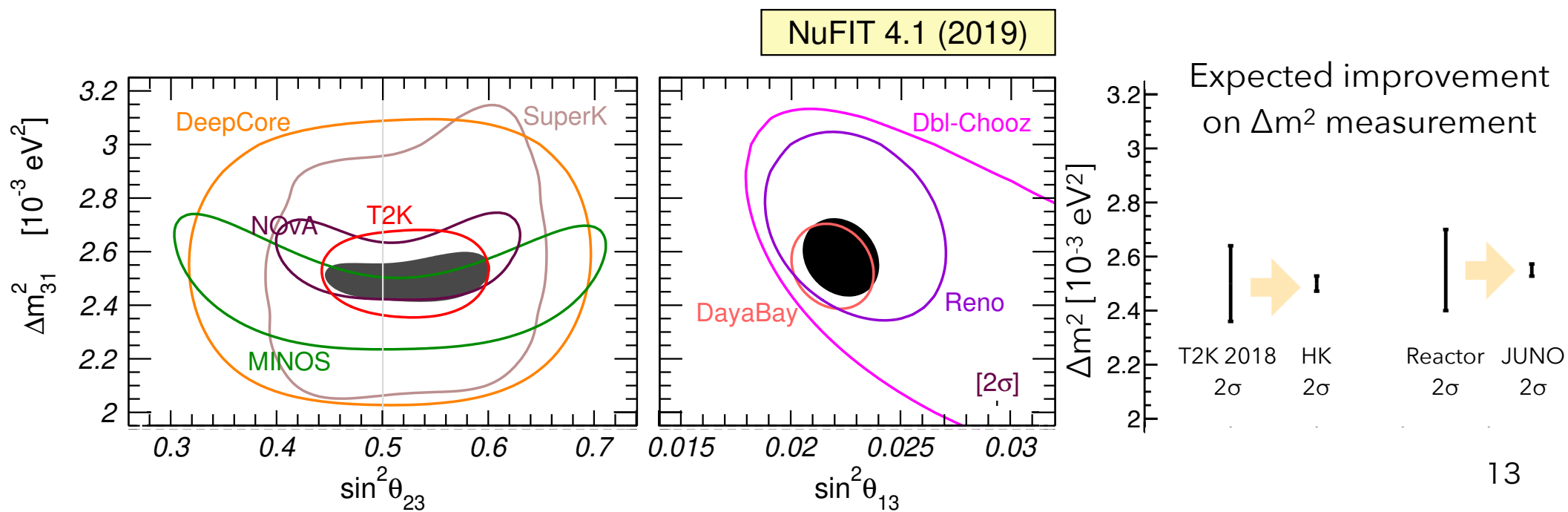
- 非常に軽い ν 質量 \rightarrow 高いエネルギースケールでのCPT testが可能

[Phys. Lett. B 597, 73, (2004)]

* Flavor symmetry の検証

- e.g. θ_{23} 最大混合角? \rightarrow 非常に軽い ν 質量を説明するモデルへのヒント

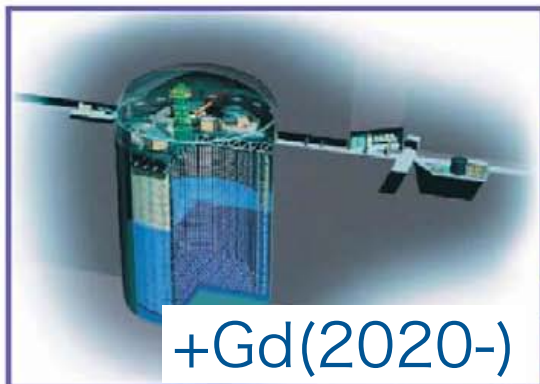
[arXiv:1405.1521 他]



T2K → T2K-II → Hyper-Kamiokande

(Present)

(2027~)



+Gd(2020-)

Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)

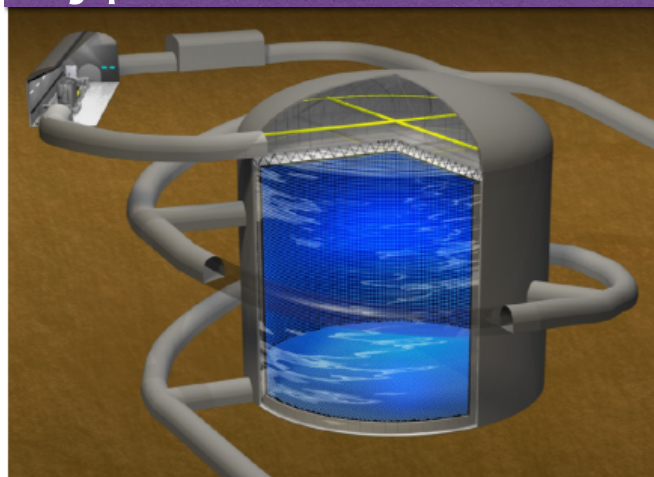


ビーム大強度化
現在0.5MW → 1.3MW

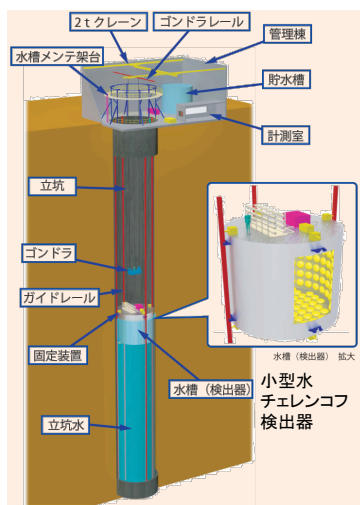
J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



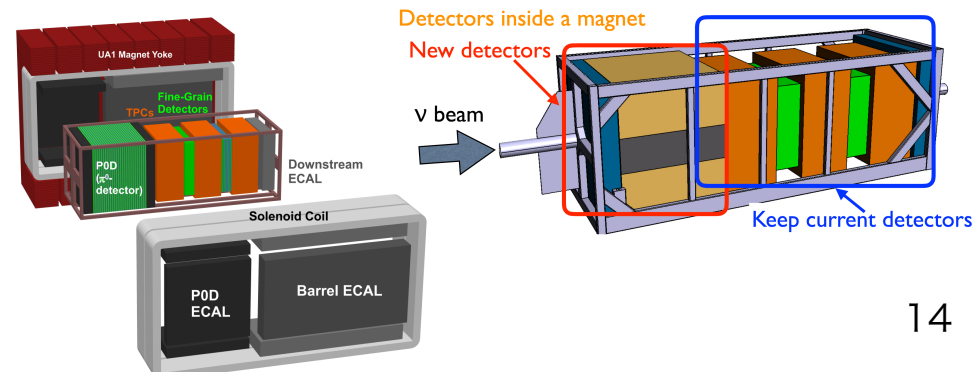
Hyper-Kamiokande



中間検出器

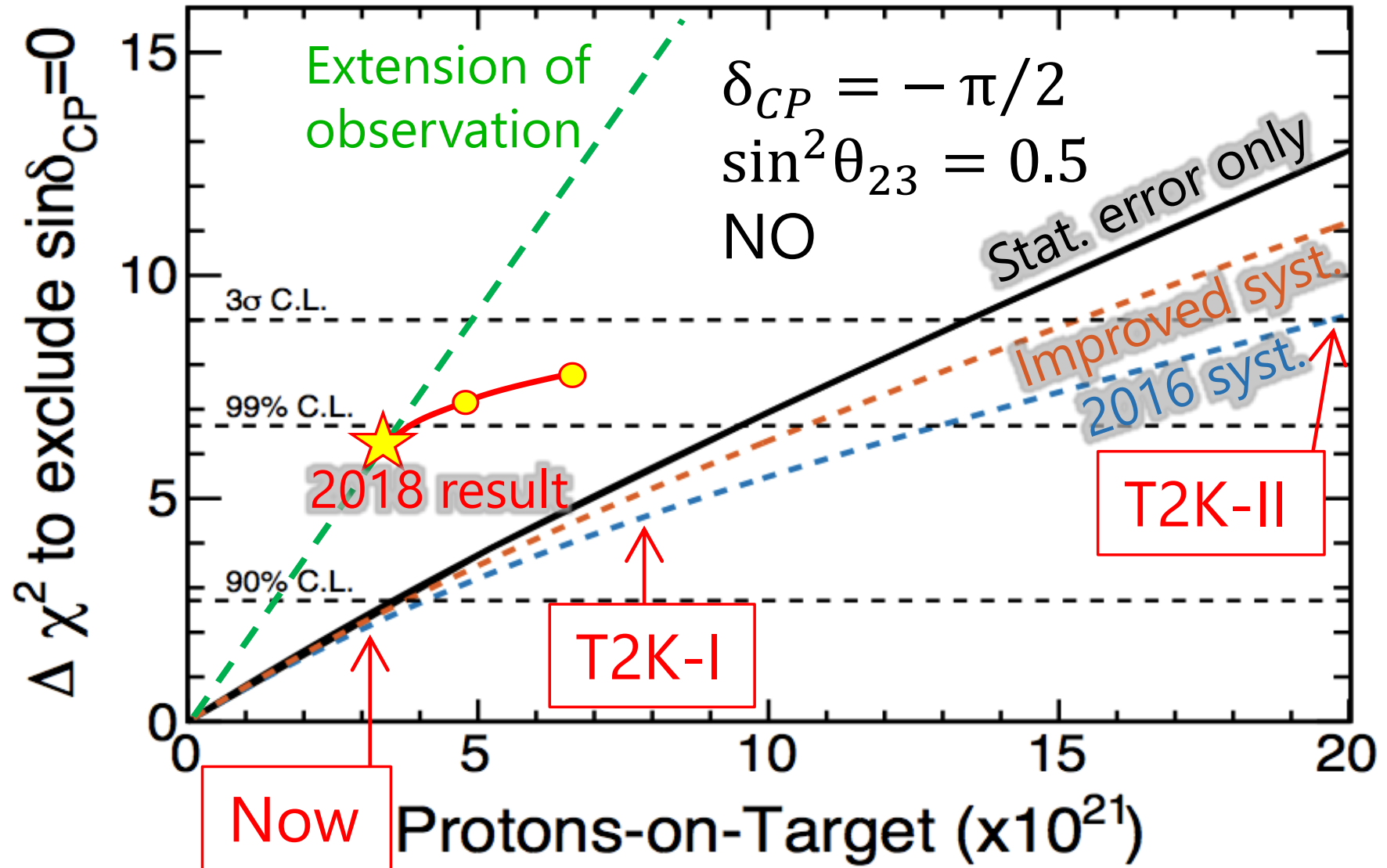


前置検出器(ND280) upgrade



T2K, T2K-IIでどこまでいけるか

Sensitivity to CP violation

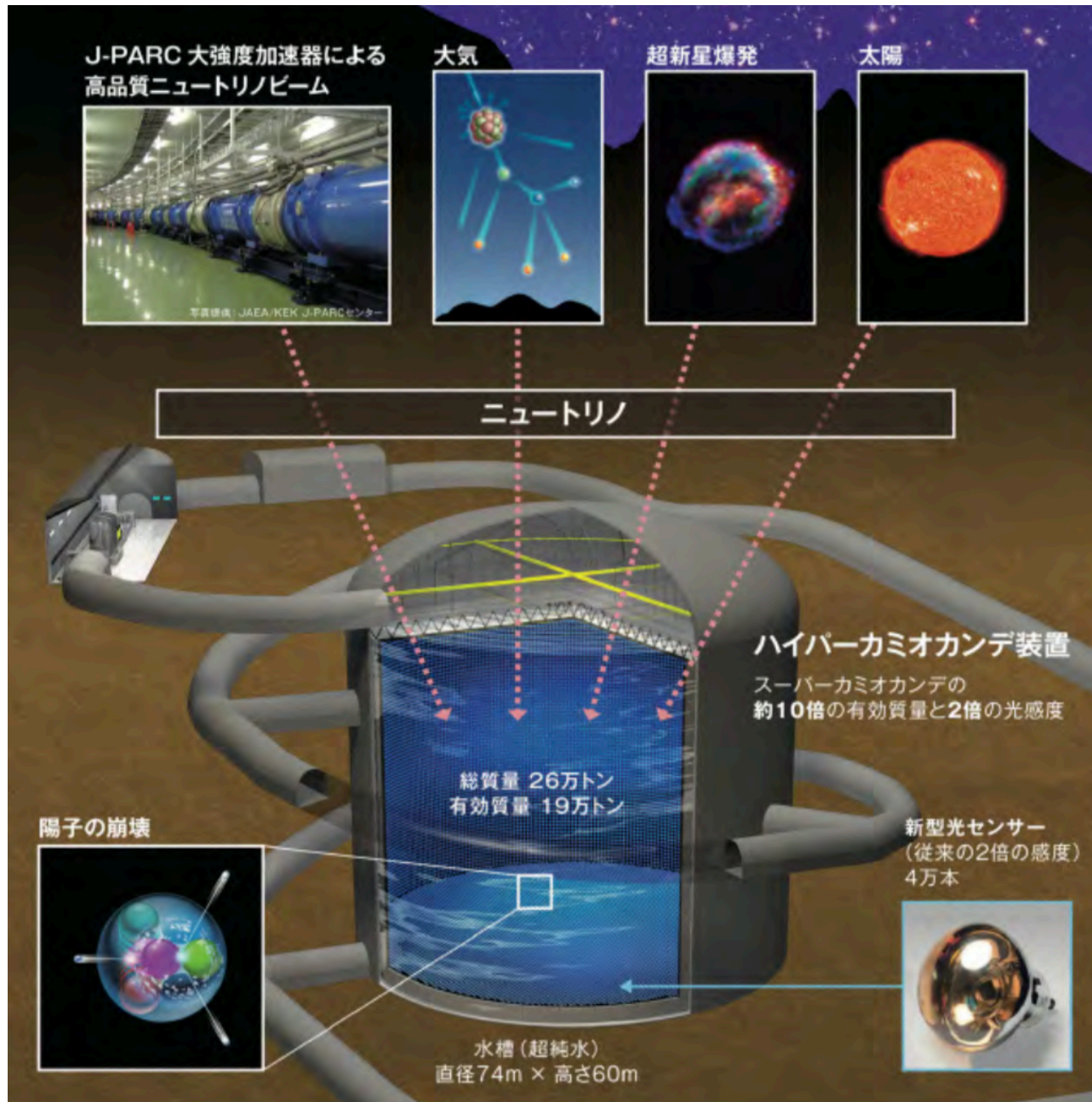


3 σ ($\delta = -\pi/2$ のとき)の感度でCPVの探索ができる

解決すべき問題

限られたビームタイム、系統誤差の改善(現在~9% \rightarrow ~4%)

ハイパーカミオカンデ実験



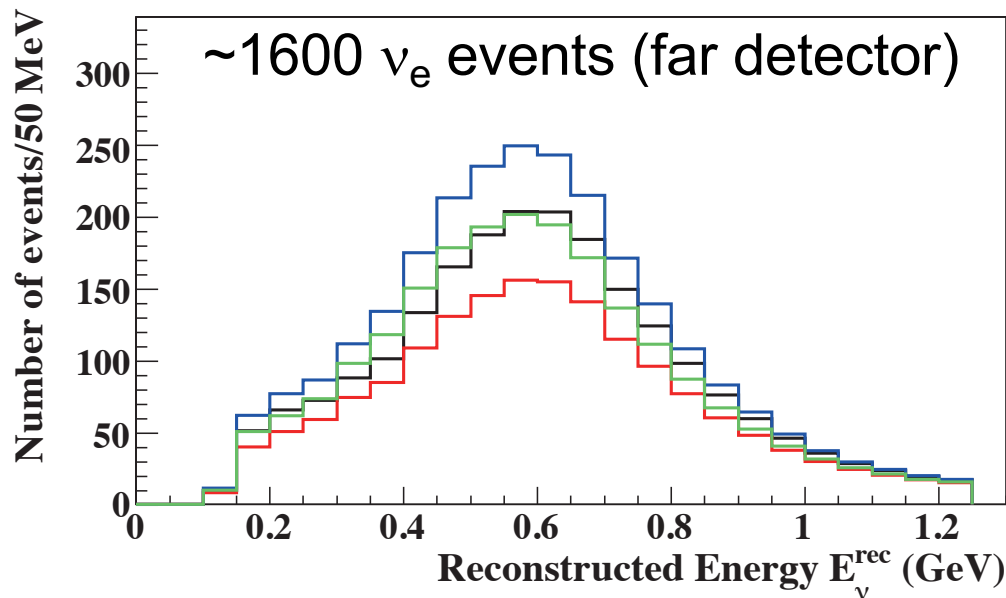
- ・ 19万トンの有効体積 (~8 x SK)
- ・ 従来の2倍の高感度光センサーを4万本
- ・ **J-PARC 1.3MWニュートリノビームを用いた研究、陽子崩壊探索など幅広いサイエンス**
- ・ 2019年度から予算化→建設開始
- ・ 2027年度からの測定開始を目指す

米国DUNE計画と熾烈な競争

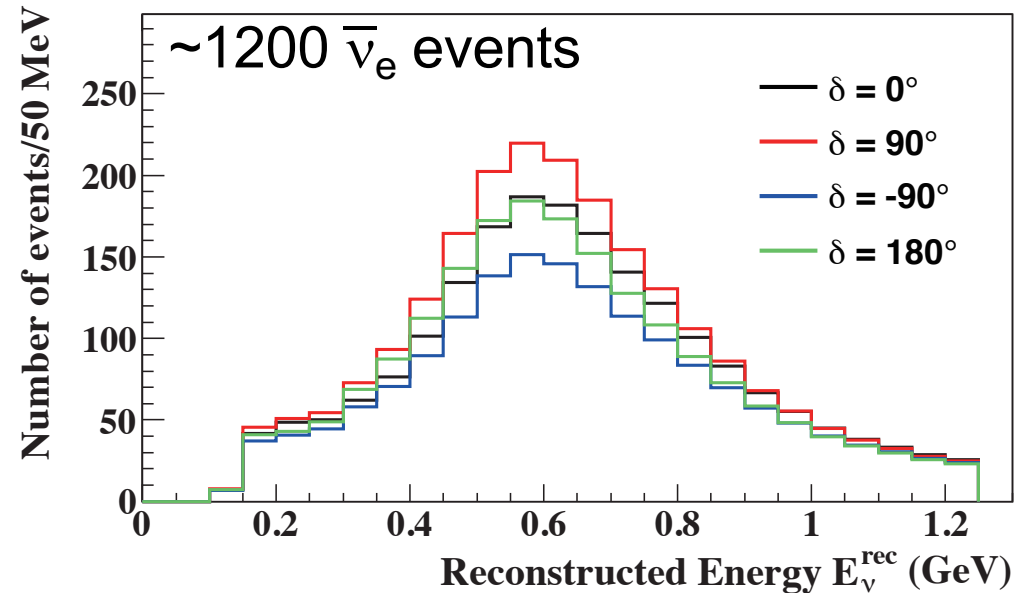
ハイパーカミオカンデ実験でのCPV探索

with 190kton Fiducial volume, 1.3MW x 6cycles/year x 10years

Neutrino mode: appearance



Antineutrino mode: appearance



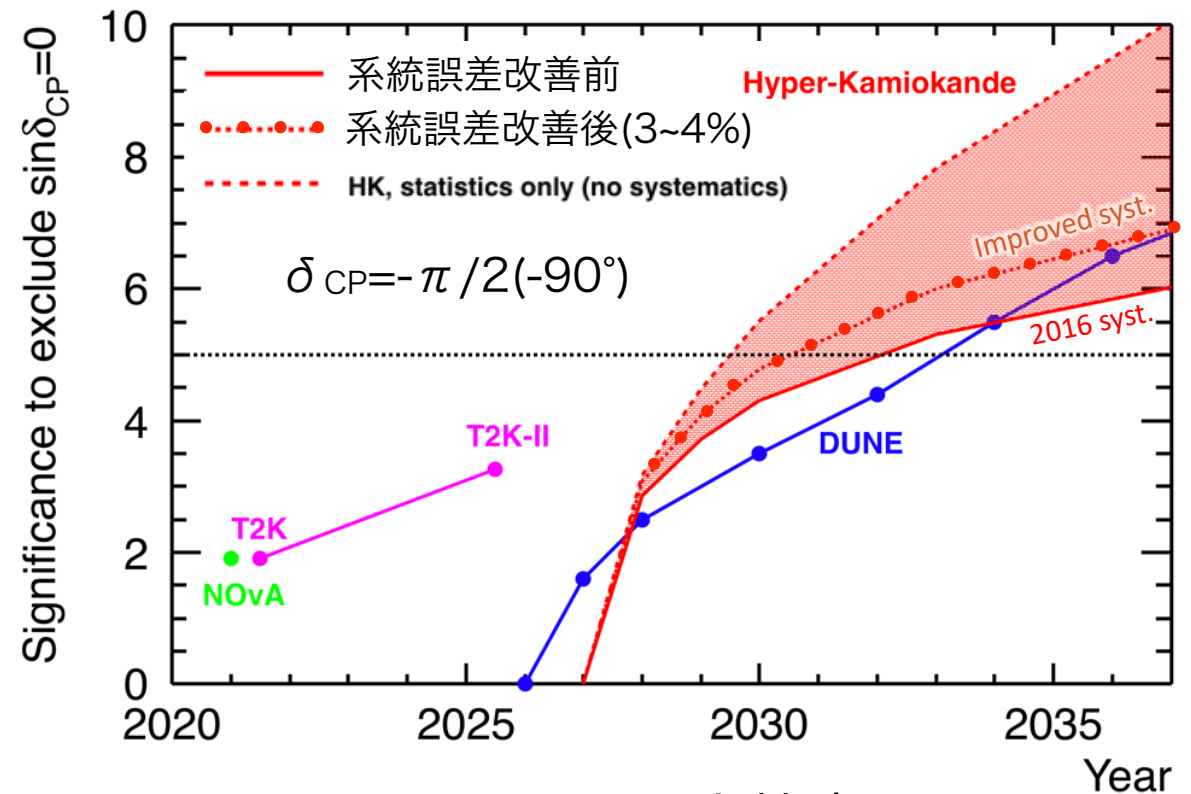
Expected number of ν_e appearance signal and background

	Appearance signal	Wrong sign signal	Beam ν_e background	NC background	Total	T2K-II	T2K(now)
Neutrino mode	1600	20	260	130	2010	468	90
Antineutrino mode	1200	200	320	200	1920	134	15

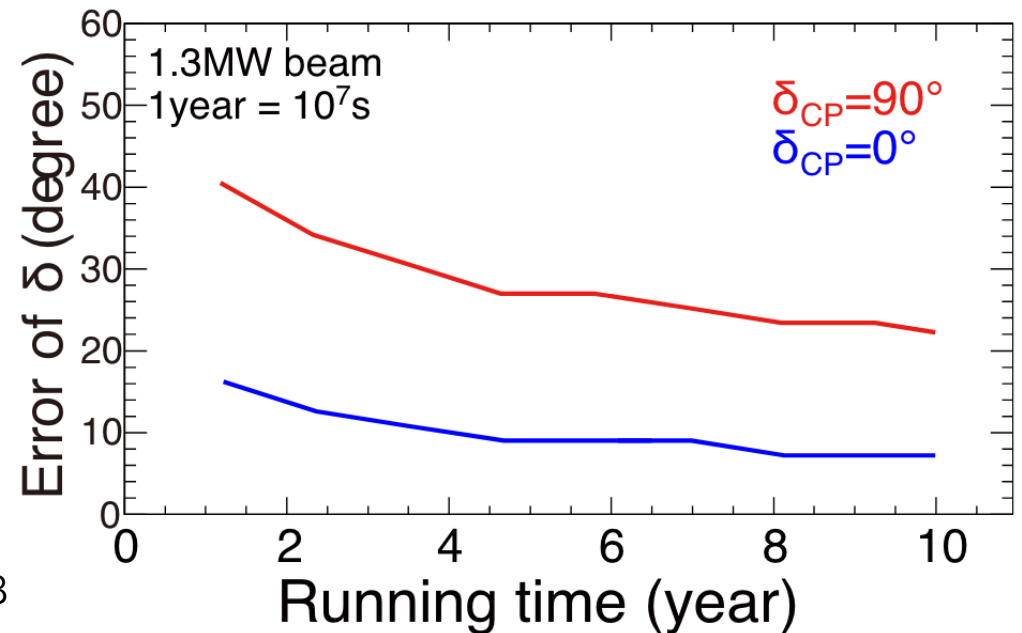
高統計な測定が可能

sin $\delta_{CP}=0$ 棄却の有意度

- ・ HK開始(2027年)後、3-4年で5 σ でのCPV探索が可能
 - 高統計化に伴い系統誤差の影響が大きくなる
- ・ HKでは δ_{CP} 等の高精度測定も可能
 - 物質優勢宇宙誕生の解明
 - 新しい物理の探索



δ_{CP} の測定精度



解決すべき問題

HK開始時にビーム強度を
~1.3MWに、また系統誤差を
3~4%に改善することが重要

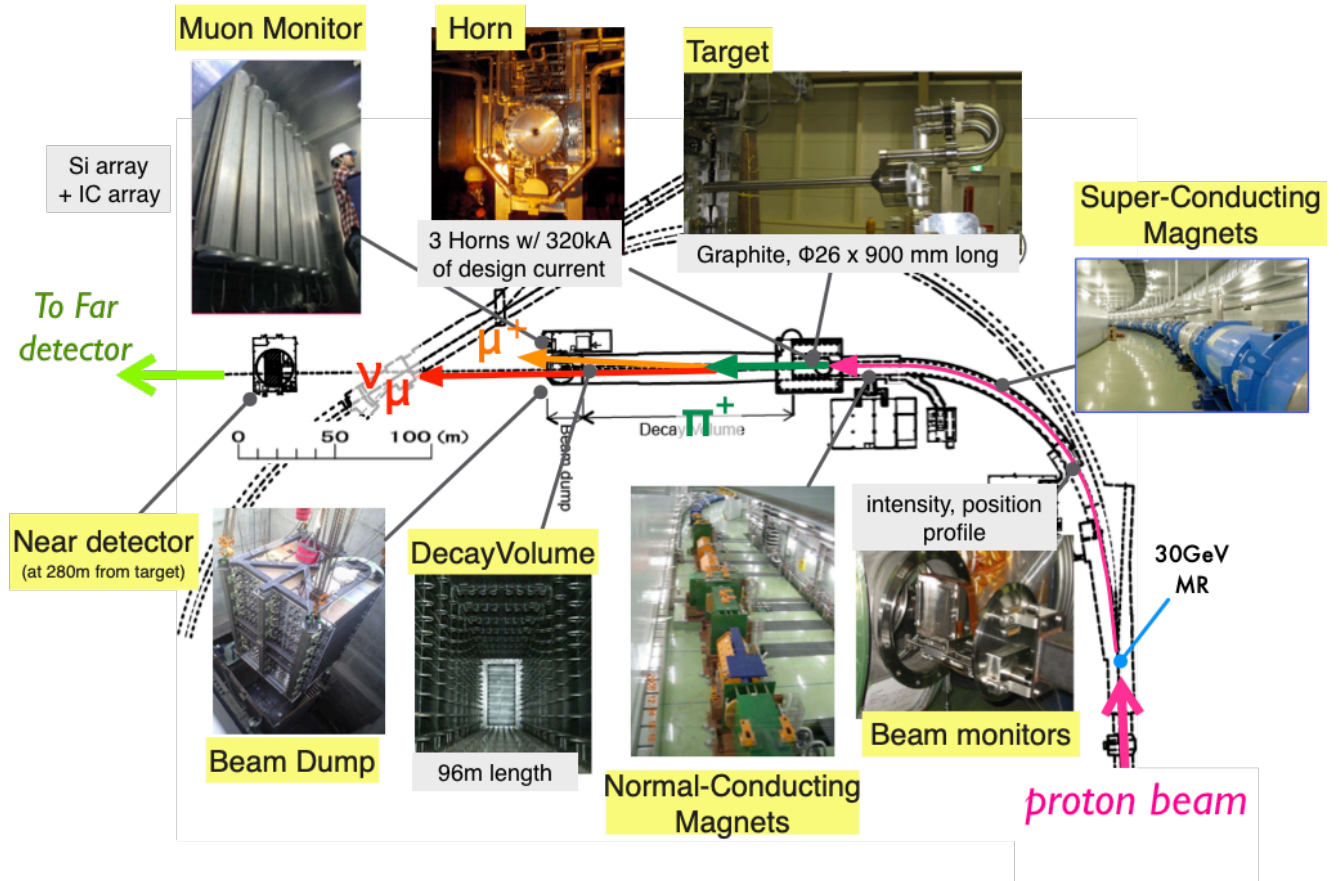
ニュートリノビーム大強度化

J-PARC MRの大強度化(~1.3MW)にあわせて
ニュートリノビームラインもアップグレード

Technical Design Report : arXiv:1908.05141

当初の設計(750kW)から
強化する項目：

- ▶ ビーム熱に対する冷却能力
- ▶ 高繰り返し化対応
- ▶ 放射化物処理能力
- ▶ インターロック
- ▶ 高放射線環境下での運転



HK予算化と同時に大強度化も一部が予算化

HK開始時に>1MWにするためには、それまでのビーム運転が必須

ビームライン大強度化での課題解決にむけてR&D、実装等が進行中

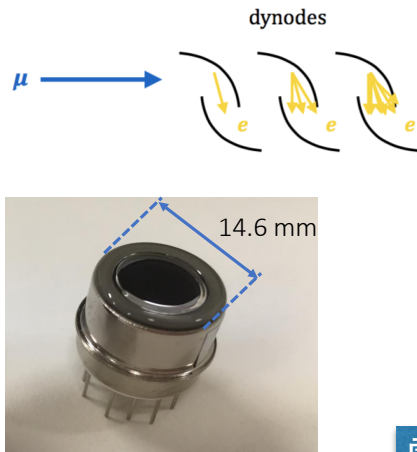
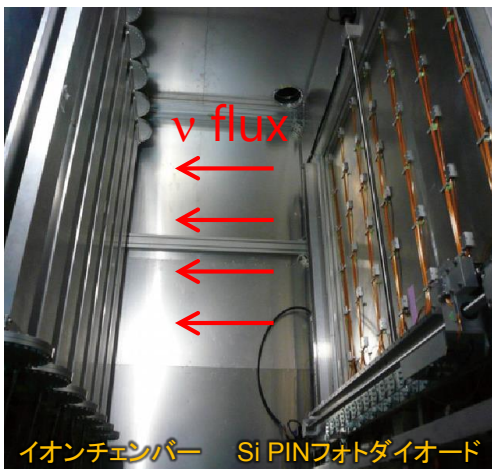
例えば：

ミュオンモニター増強

Si diodeの信号劣化が問題。

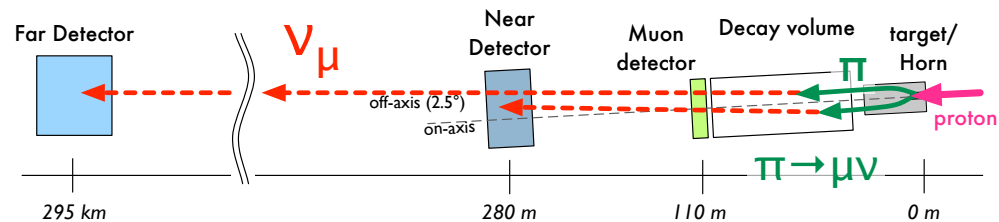
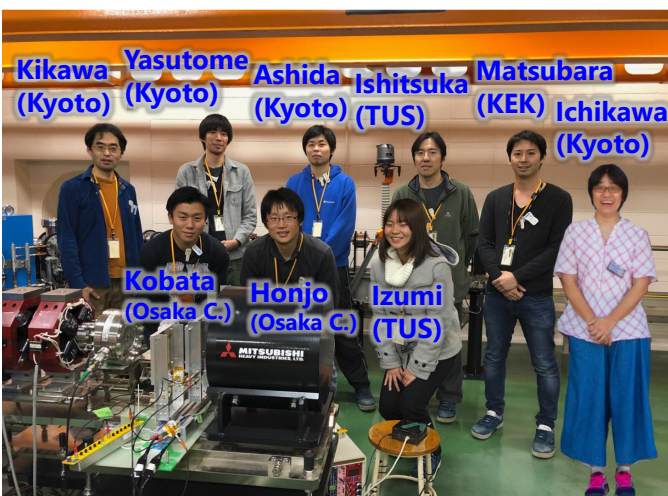
放射線耐性のある検出器の候補として電子増倍管をR&D中

ミュオンモニター

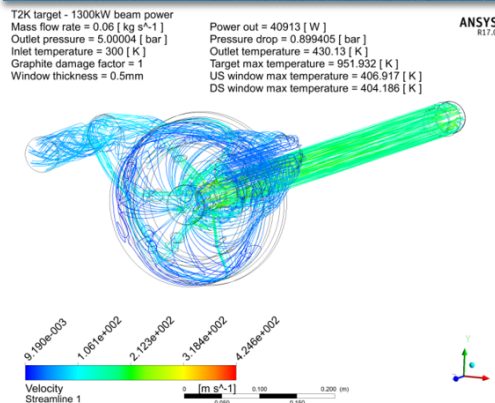


- 2種類の独立な検出器
- 7×7のアレイ

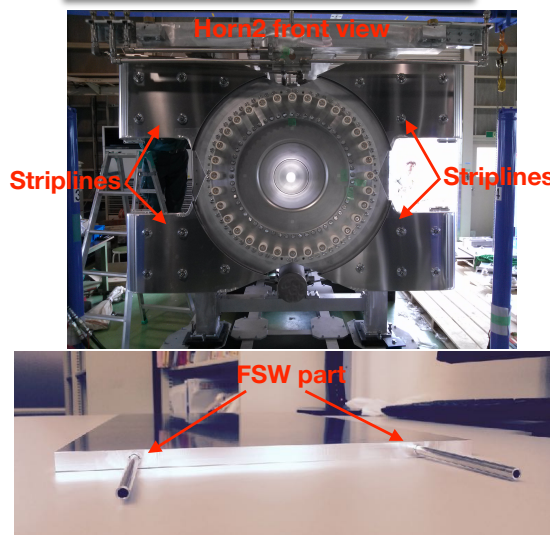
PTEP 2018, no.10, 103H01(2018)
<https://doi.org/10.1093/ptep/pty104>



ターゲット冷却能力増強



電磁ホーン高度化



ホーン本体の改良+電源等の増強で、250kA→320kAに。同じビームパワーでニュートリノ fluxを10%増加できる。

ターゲット(+Horn)の形状を最適化して、さらなるflux増加や backgroundとなるwrong sign fluxを減らす検討も進めている 20

T2K実験の系統誤差

~9% → T2K-II, HKにむけて~4%に改善する

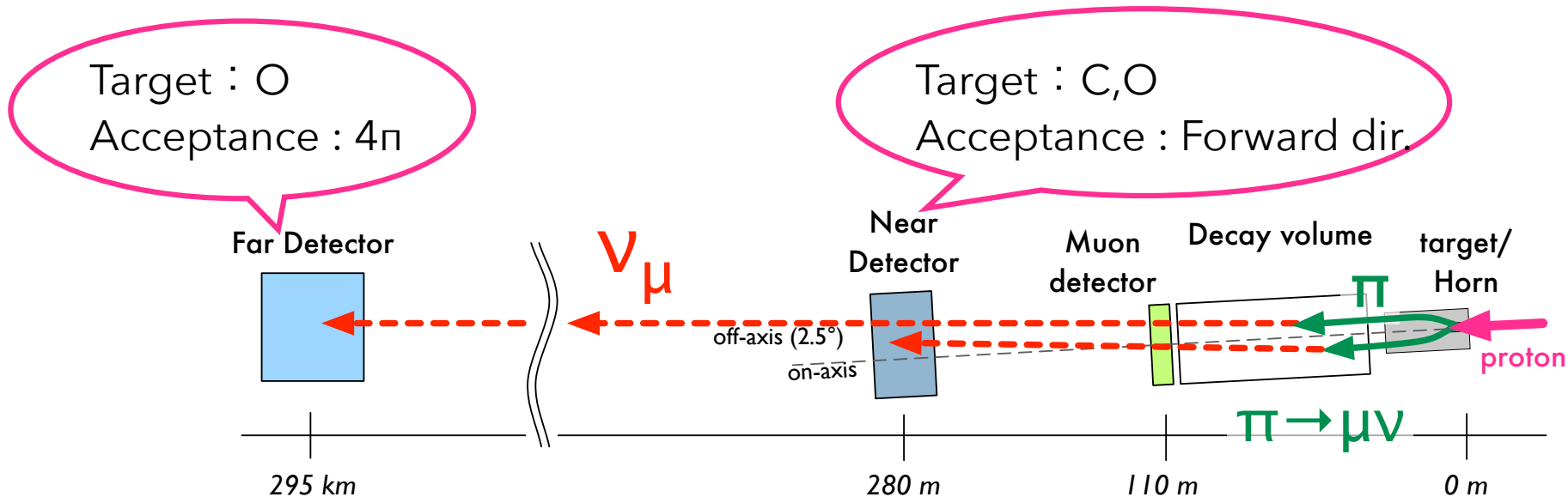
Systematic error on Super-K events

	ν_e	$\bar{\nu}_e$
フラックス+ニュートリノ反応 (ND280により制限)	3.02%	2.86%
ND280により制限されない ニュートリノ反応	7.80%	4.72%
ニュートリノ反応後のハドロン反応	3.02%	2.31%
スーパーカミオカンデ検出器	2.83%	3.79%
計	8.81%	7.03%

ν フラックス自体のエラー ~10%

- ▶ ハドロン生成分布の新しいデータを使って~5%になる
- ▶ さらなる低減に向けたハドロン生成分布測定実験を実施

ニュートリノ原子核反応に起因する
系統誤差が支配的

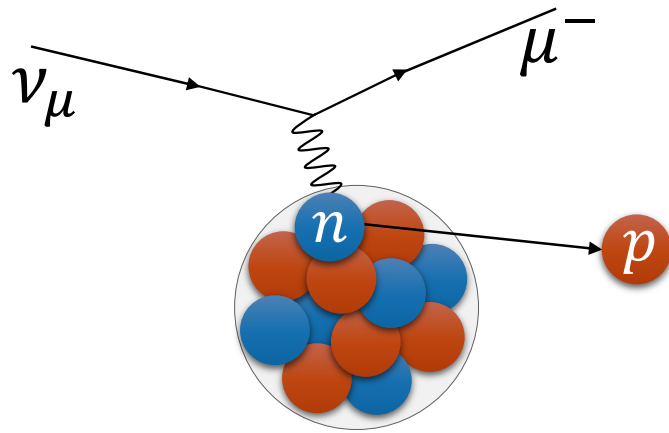


▶ニュートリノ原子核反応の理解

「原子核」との反応は複雑。。

解決方法：

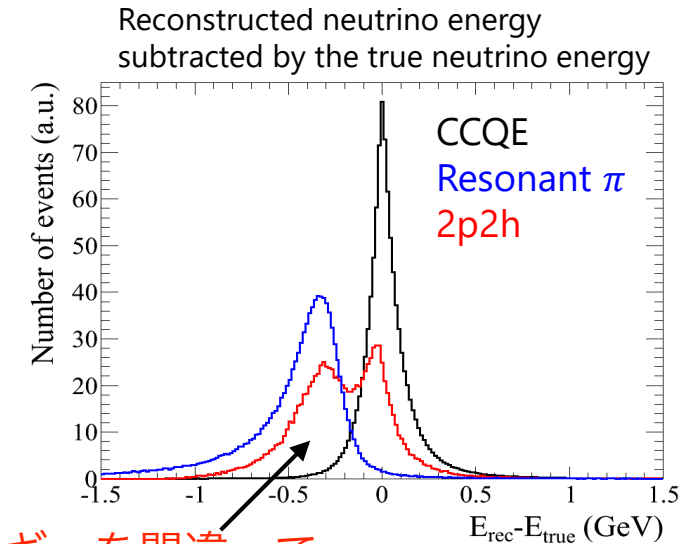
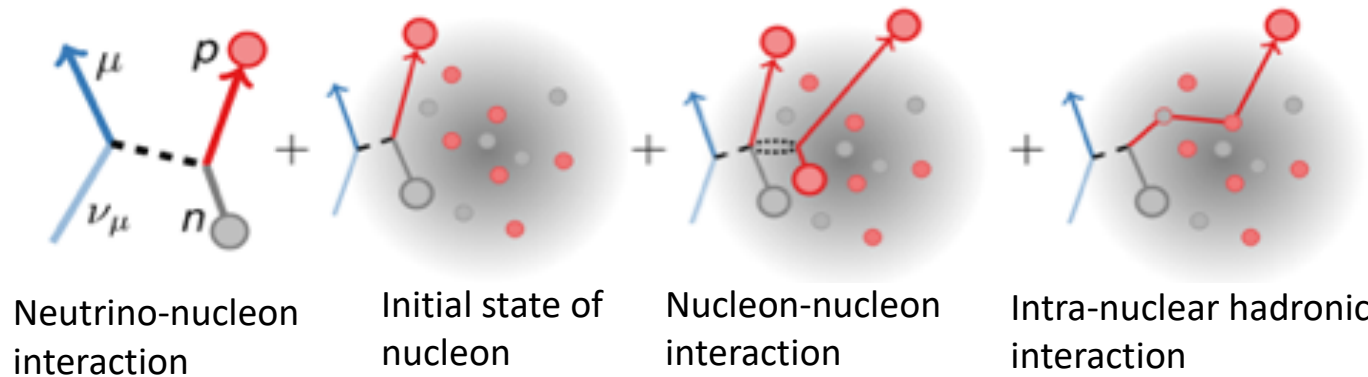
- 様々な測定による ν 原子核反応モデルの改良
- Far det.と同じ水との反応を測定
- モデルにあまり依存しない方法



$$E_{\text{rec}} = \frac{m_p^2 - (m_n - E_b)^2 - m_l^2 + 2(m_n - E_b)E_l}{2(m_n - E_b - E_l + p_l \cos \theta_l)}$$

Charged lepton kinematics

Nuclear effect in neutrino interaction



νエネルギーを間違っ
て再構成してしまう

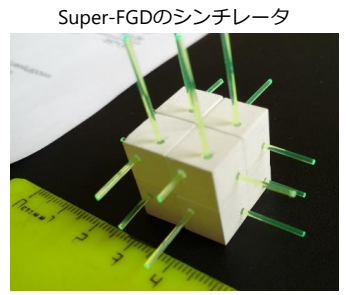
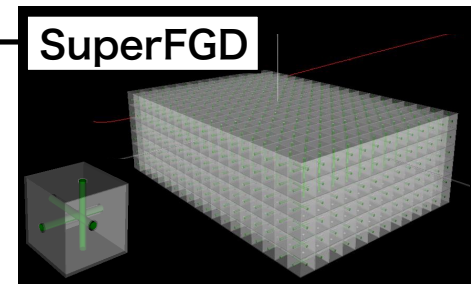
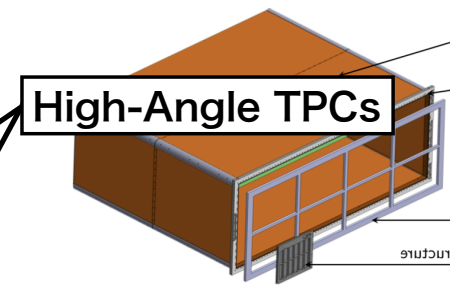
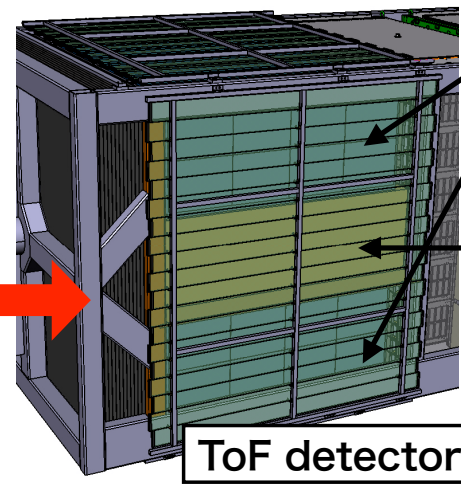
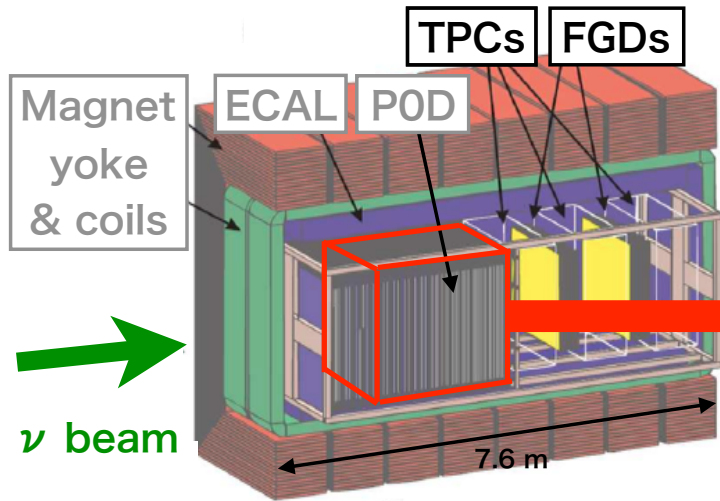
▶ ν_e 反応の理解

ν_e 反応断面積の輻射補正が理論計算のみ。実際の測定が必要。

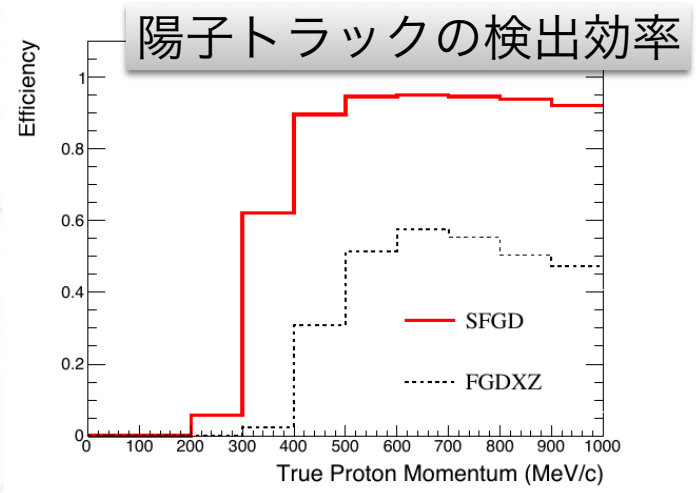
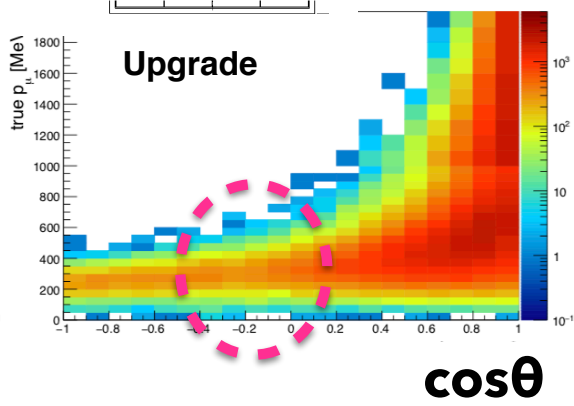
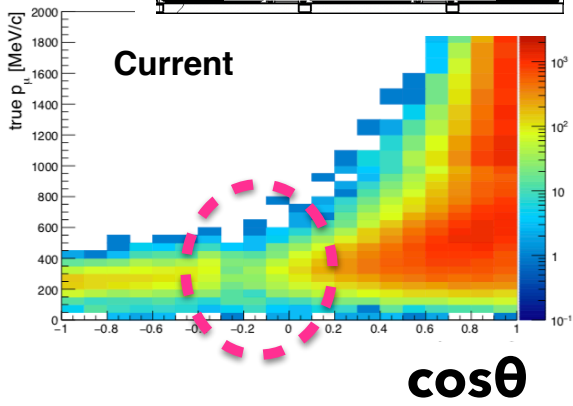
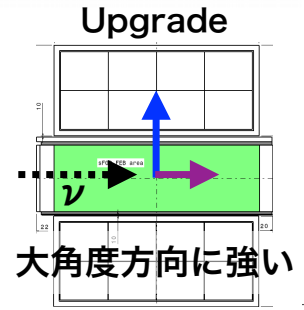
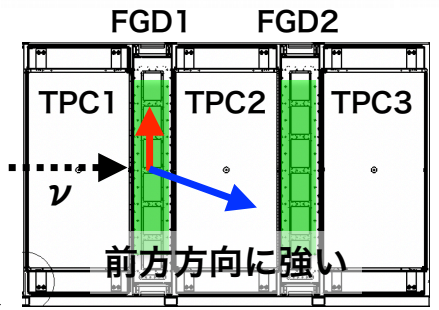
前置検出器(ND280) upgrade

Current ND280

Upgraded ND280



1x1x1cm³立方体シンチレーターを200万個並べる



・大きな反跳角のトラックや
低運動量粒子の検出効率が向上

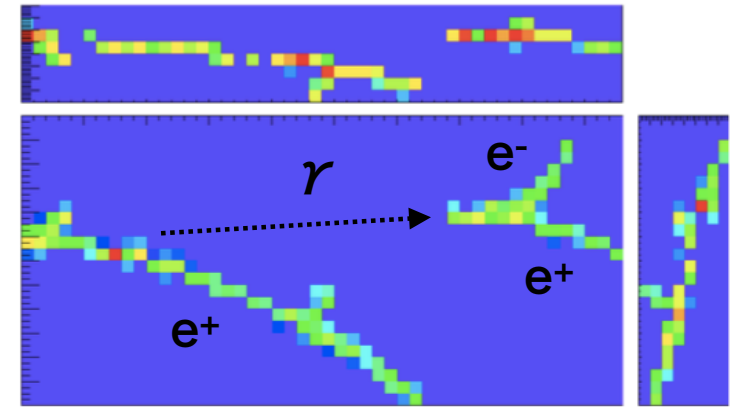
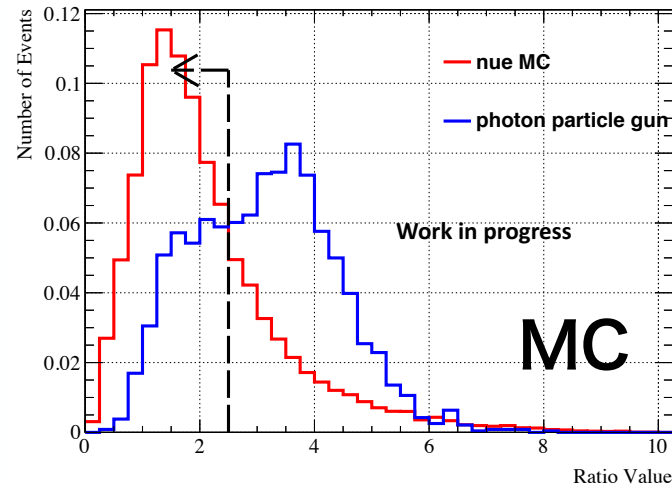
→ ν 原子核反応モデルの改善が可能

- e/γ 識別能力も向上

現ND280での ν_e 測定は外からの γ 起因の背景事象が問題

→ ν_e 反応の測定が改善できる

Expected separation power



Positron, 1 GeV, B = 0.2T

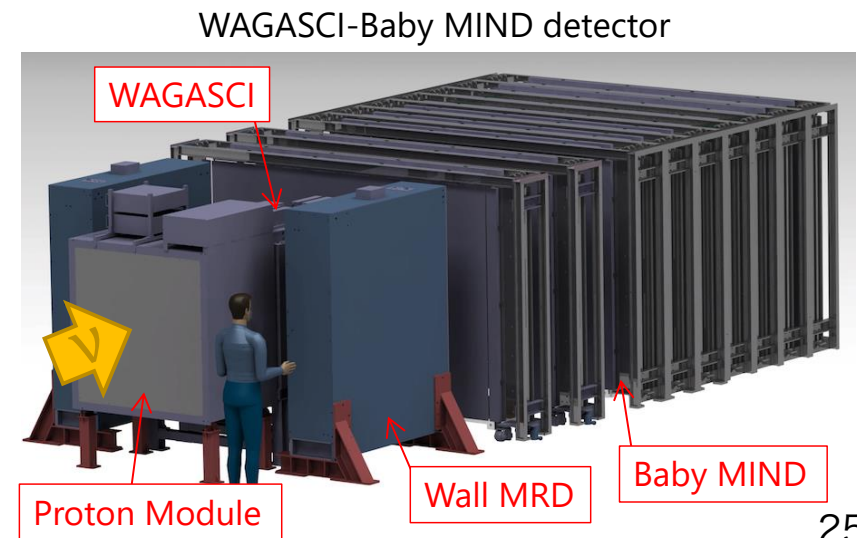
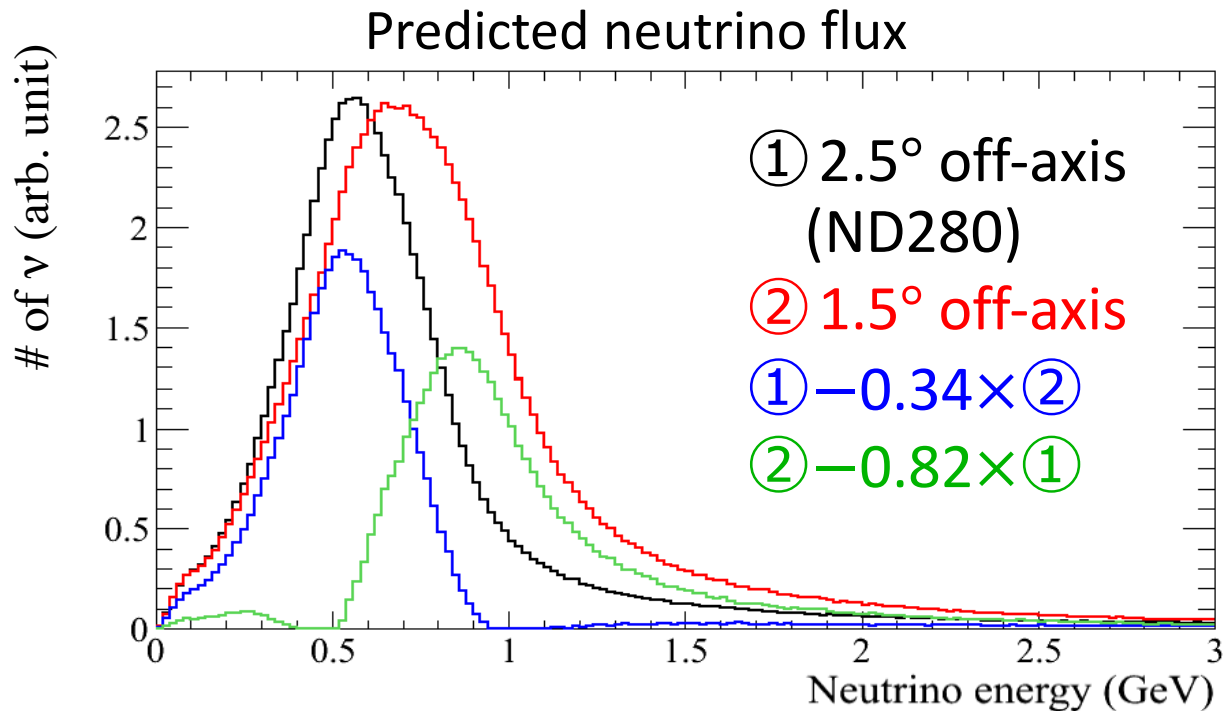
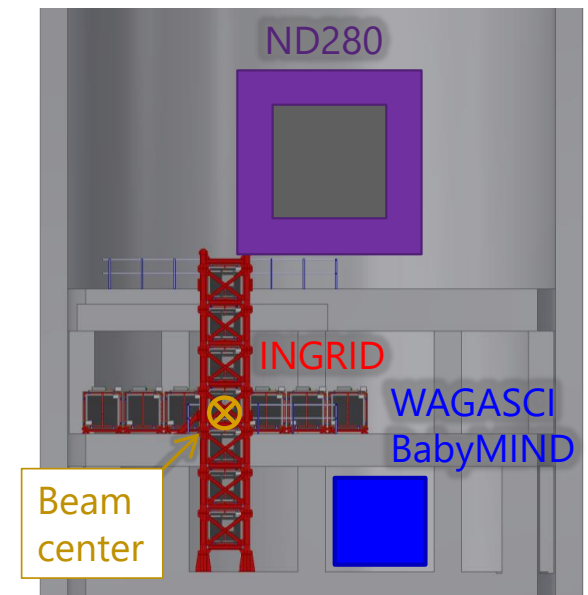
beam testによる性能評価

- ▶ 国内外10カ国+CERNのcollaborator
(海外からの大きな貢献)
- ▶ 開発から建設のフェーズへ
- ▶ MR 電源増強後から測定開始して、
HK開始前までにニュートリノ原子核反応
からの系統誤差を改善する

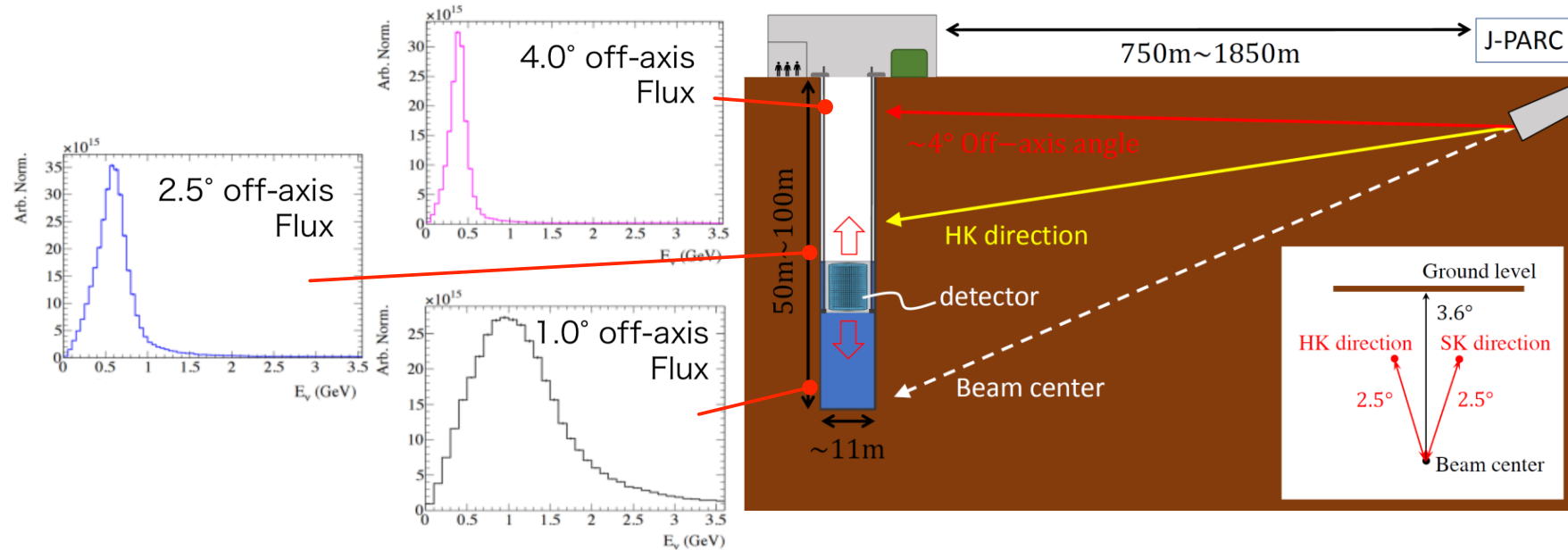


違うoff-axisでの測定、水標的

- 1.5° off-axisに新しい検出器を設置。2019年ランから測定開始
- ND280(2.5°)のデータと組み合わせることで、特定のニュートリノエネルギー領域の反応断面積が測定できる
→ ν 原子核反応モデルの改善が可能
- シンチレーター(CH) & 水(H₂O)が標的
→ Far det.と同じ水との反応を測定



中間ニュートリノ検出器



・新しい水チェレンコフ検出器(~1kton)をビームから1~2kmの距離に建設し、検出器を上下移動させて1~4度のオフアクス角度で測定

→Far det.と同じ水との反応を 4π で測定

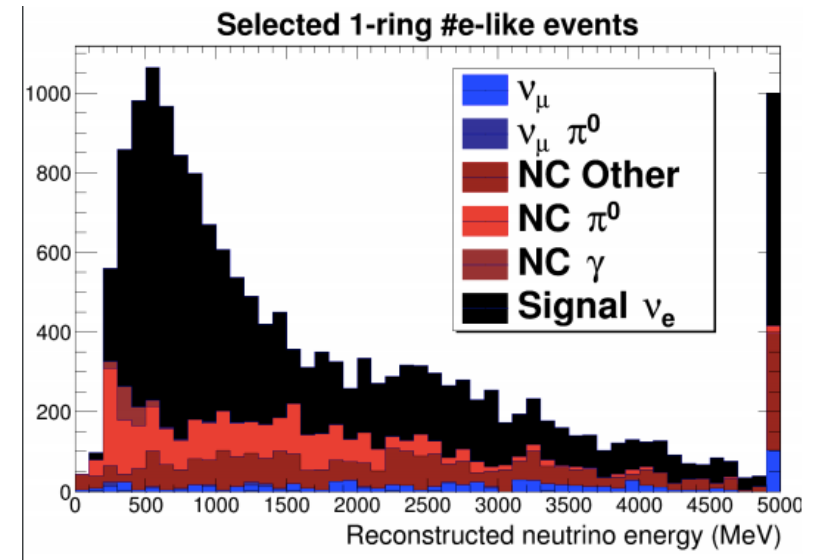
→ ν_e 反応の測定

・ニュートリノエネルギー毎のニュートリノ原子核反応断面積を測定

→ ν 原子核反応モデルの改善

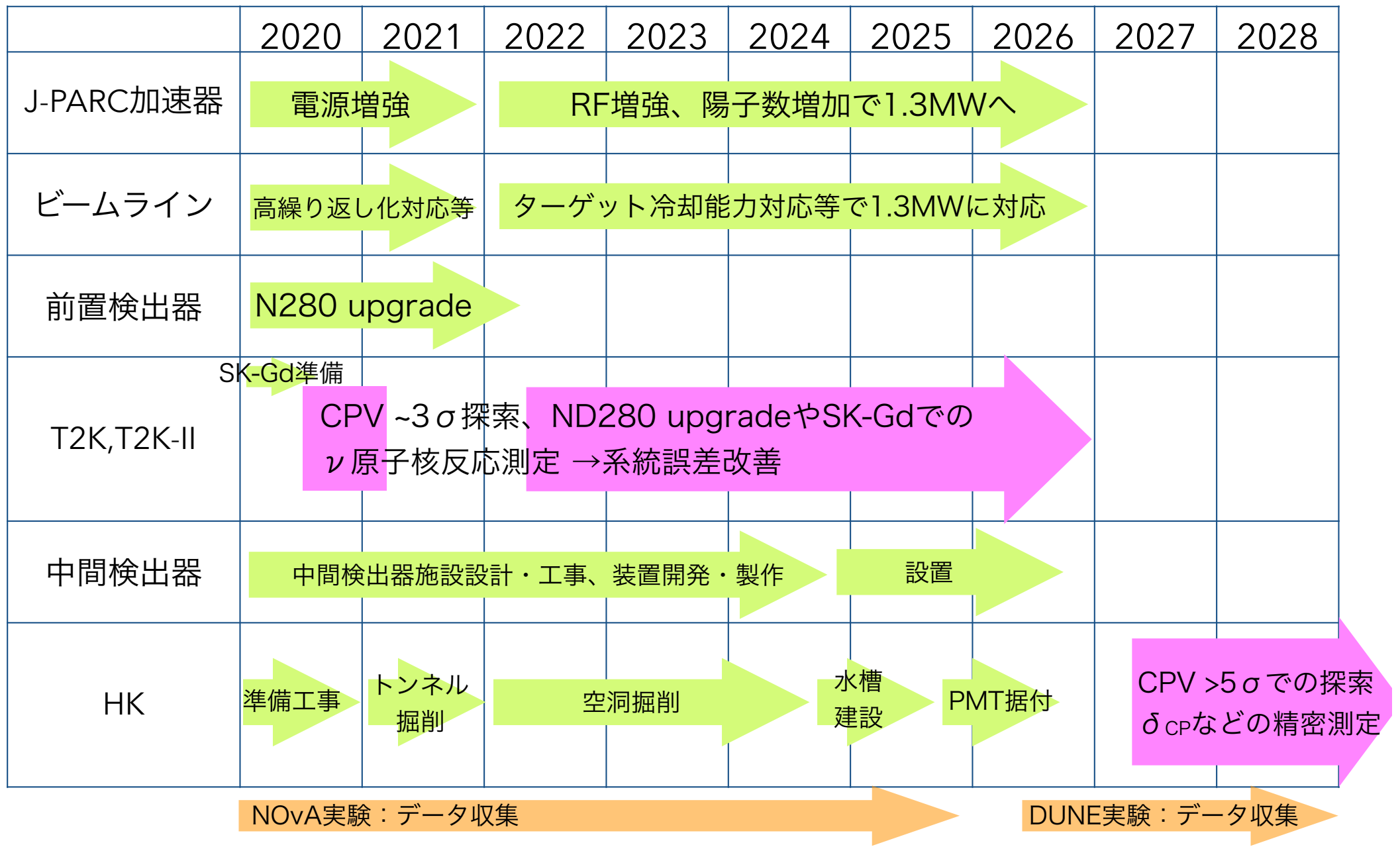
▶ HKの前置検出器の1つとして、国内外研究者の協力でR&D・設計等が進行中

高いevent rateの中で検出器を動作させる必要がある



ν_e/ν_μ 断面積比を3~4%の精度で測定

T2K,T2K-IIからHKへ：スケジュール



この期間の「建設・アップグレードと運転の両立」が
激しい国際競争の中でHKでタイムリーに結果を出すために重要

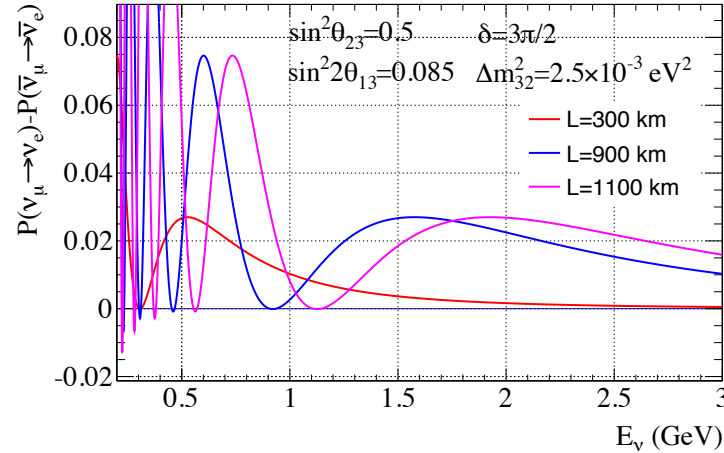
Beyond δ_{CP}



3世代混合パラメーターのover-constrainな測定,
non-unitarity, non-standard-interaction 等

→高統計、振動パターン測定、違う振動モード?

2nd det. @Korea



- * 2nd peakを測定
- * いくつかの候補地を検討中
- * HK実験開始後の建設開始を目指している

arXiv:1611.06118v3
PTEP (2018) 6,063C01

Proton Linac@KEKB tunnel案

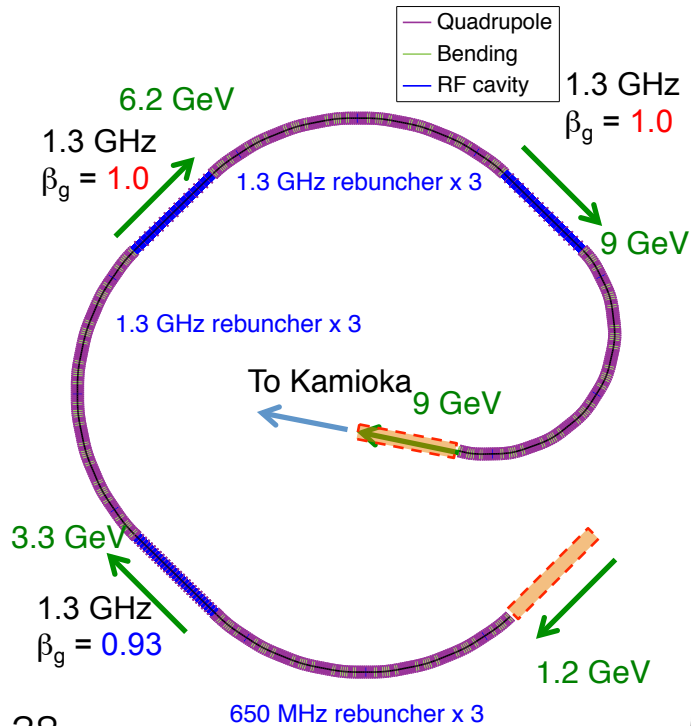
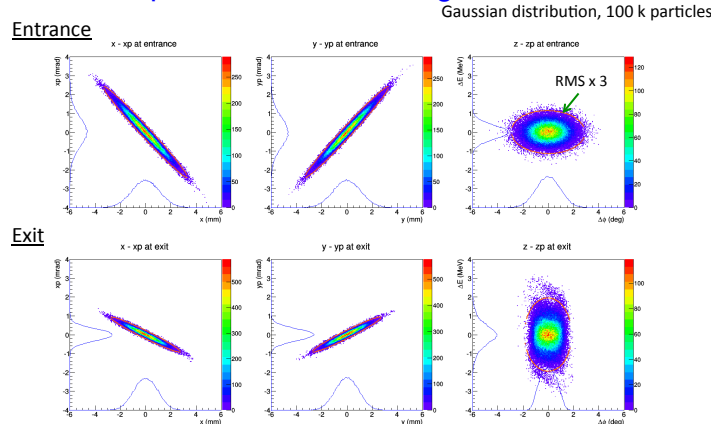
ILC type cavity利用して、9GeVまで加速

* ビームを発散せず回せることをsimulationで確認

* High power target, Horn等R&Dが必要

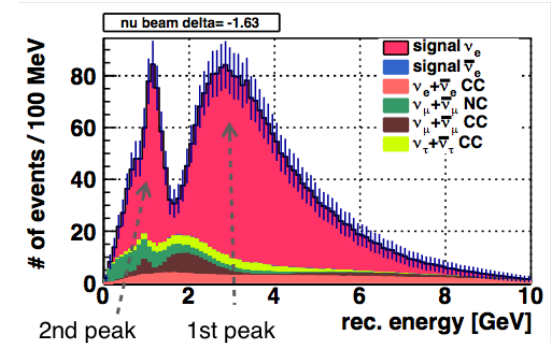
* ~9MW ⇒高統計な測定が可能

Beam profile at the 2nd straight section



@1900kmで振動パターンを見る検討

L=1900km, 5MW*50kton*10x10⁷sec,
sin²2θ₁₃=0.1, δ_{CP} = -94度, 30GeV beam, ν mode only



まとめ

- ・ 長基線ニュートリノ振動実験では、ニュートリノCP対称性の破れや振動パラメーターの精密測定などが課題
- ・ T2K,T2K-IIでCPの破れを $\sim 3\sigma$ 感度で探索、HKでは高統計、高精度な測定から物質優勢宇宙の解明、新物理探索を行う
- ・ CP破れへの感度は、まだ統計リミットだが、高統計に伴い系統誤差の改善も課題になる
 - ・ 系統誤差の改善にむけて様々なアプローチを実施、計画中