

# ニュートリノ振動実験の現状と展望

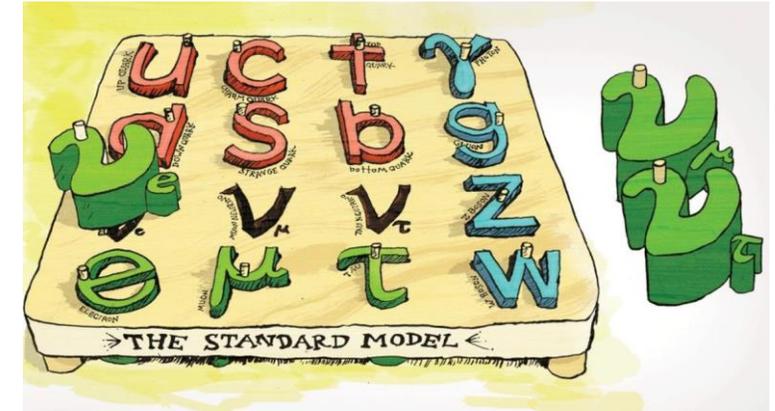
木河達也 (京都大学)

素粒子物理学の進展2024

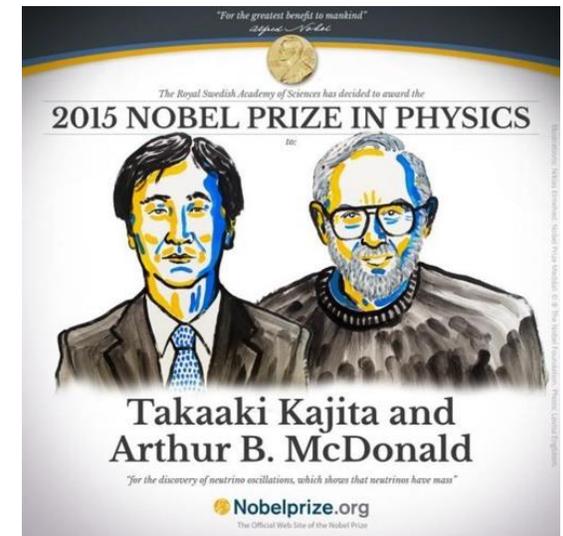
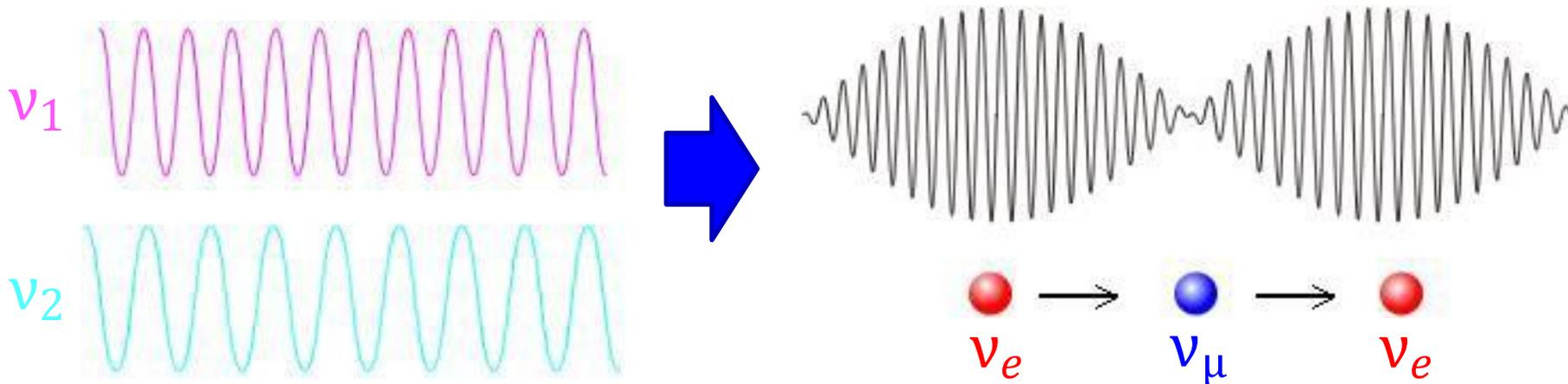
2024年8月23日 @ 京都大学基研

# ニュートリノ振動

- ニュートリノの質量と混合に起因して波のうねりの効果でニュートリノフレーバー( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )が飛行中に周期的に変化。
- ニュートリノの質量を0とする標準模型を超えた現象。
- 2015年にノーベル物理学賞受賞。



[symmetrymagazine.org](http://symmetrymagazine.org)



[Nobelprize.org](http://Nobelprize.org)

# ニュートリノ振動

- 3つの混合角 $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$ , 2つの質量二乗差 $\Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2$ , 1つの複素位相 $\delta_{CP}$ によって記述される。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta_{CP}} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

フレーバー固有状態
ポンテコルボ・牧・中川・坂田行列
質量固有状態

2フレーバーでのニュートリノ振動

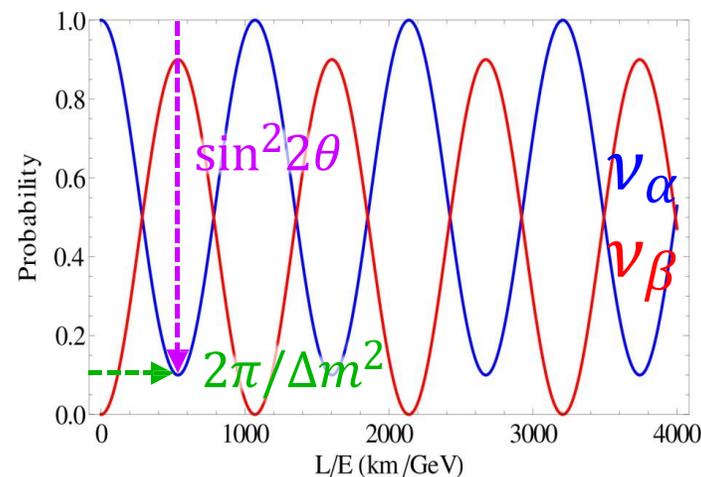
$$|\nu_\alpha\rangle = |\nu_1\rangle \cos \theta + |\nu_2\rangle \sin \theta$$



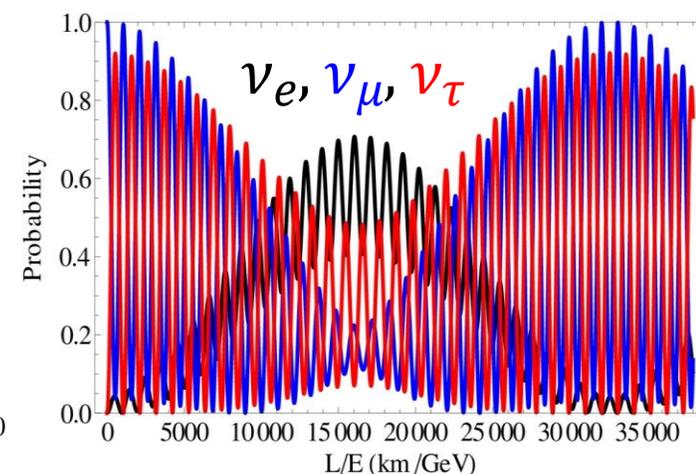
$$|\nu_1\rangle e^{-i\frac{m_1^2}{2E}L} \cos \theta + |\nu_2\rangle e^{-i\frac{m_2^2}{2E}L} \sin \theta$$

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 \quad \boxed{\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2} \\
 &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \Delta m^2 \frac{L}{4E} \right)
 \end{aligned}$$

2フレーバーでの振動確率



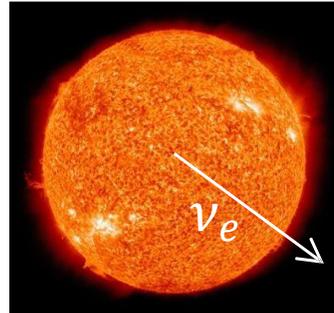
3フレーバーでの振動確率



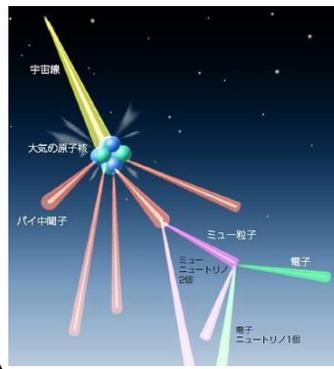
# ニュートリノ生成源

- さまざまな生成源のニュートリノを用いてニュートリノ振動の測定を行ってきた。

## 自然ニュートリノ



太陽ニュートリノ  
太陽中での核融合  
 $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$   
 ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$   
など

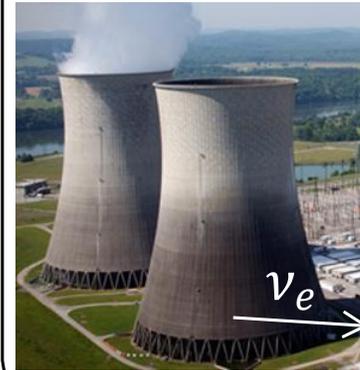


大気ニュートリノ  
宇宙線と大気の反応で生成されたπの崩壊  
 $\pi^{+(-)} \rightarrow \mu^{+(-)} + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$   
 $\mu^{+(-)} \rightarrow e^{+(-)} + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu) + \nu_e(\bar{\nu}_e)$

## 人工ニュートリノ

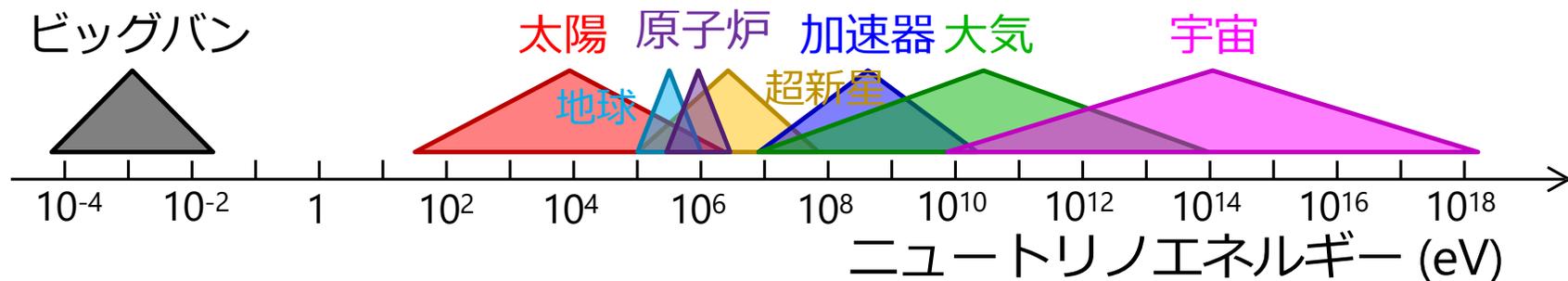


加速器ニュートリノ  
加速器からのビームと標的の反応で生成されたπの崩壊  
 $\pi^{+(-)} \rightarrow \mu^{+(-)} + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$



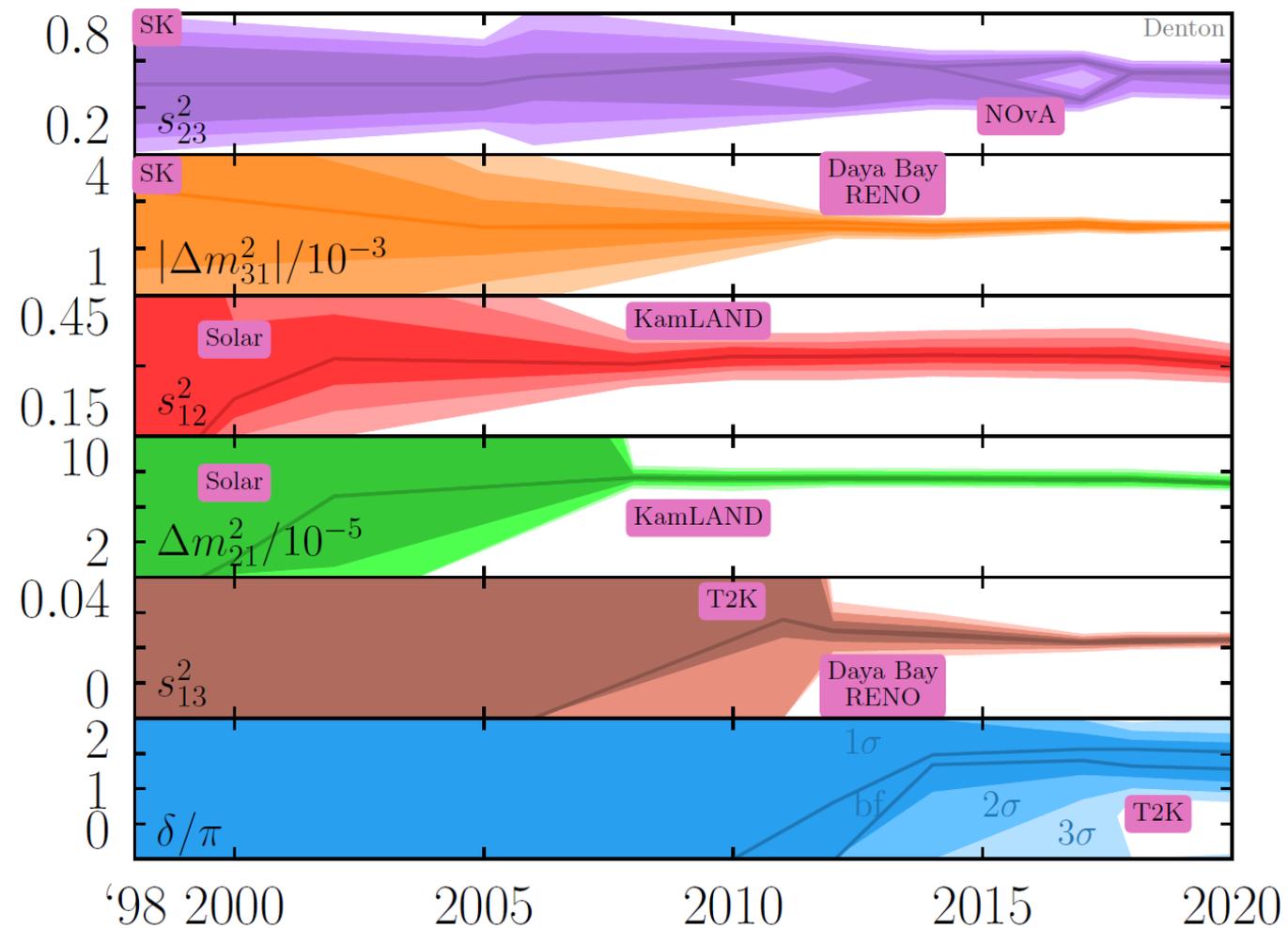
原子炉ニュートリノ  
原子炉中での核分裂  
 $n + {}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{141}\text{Ba} + {}^{89}\text{Kr} + 3n$   
 ${}^{141}\text{Ba} \rightarrow {}^{141}\text{La} + e^- + \bar{\nu}_e$   
 ${}^{141}\text{La} \rightarrow {}^{141}\text{Ce} + e^- + \bar{\nu}_e$   
など

ビッグバン



# ニュートリノ振動パラメータ測定の世界

- 1998年: スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ振動の発見
- 2001年: SNOによる太陽ニュートリノ振動の実証
- 2003年: KamLANDの原子炉ニュートリノ振動の測定による大混合角解の決定
- 2011年: T2Kが $\theta_{13} \neq 0$ を示唆
- 2012年: Daya Bayが $\theta_{13} \neq 0$ を実証
- 2014年: T2Kが $\delta_{CP}$ を初めて制限



# ニュートリノ振動パラメータの最新値

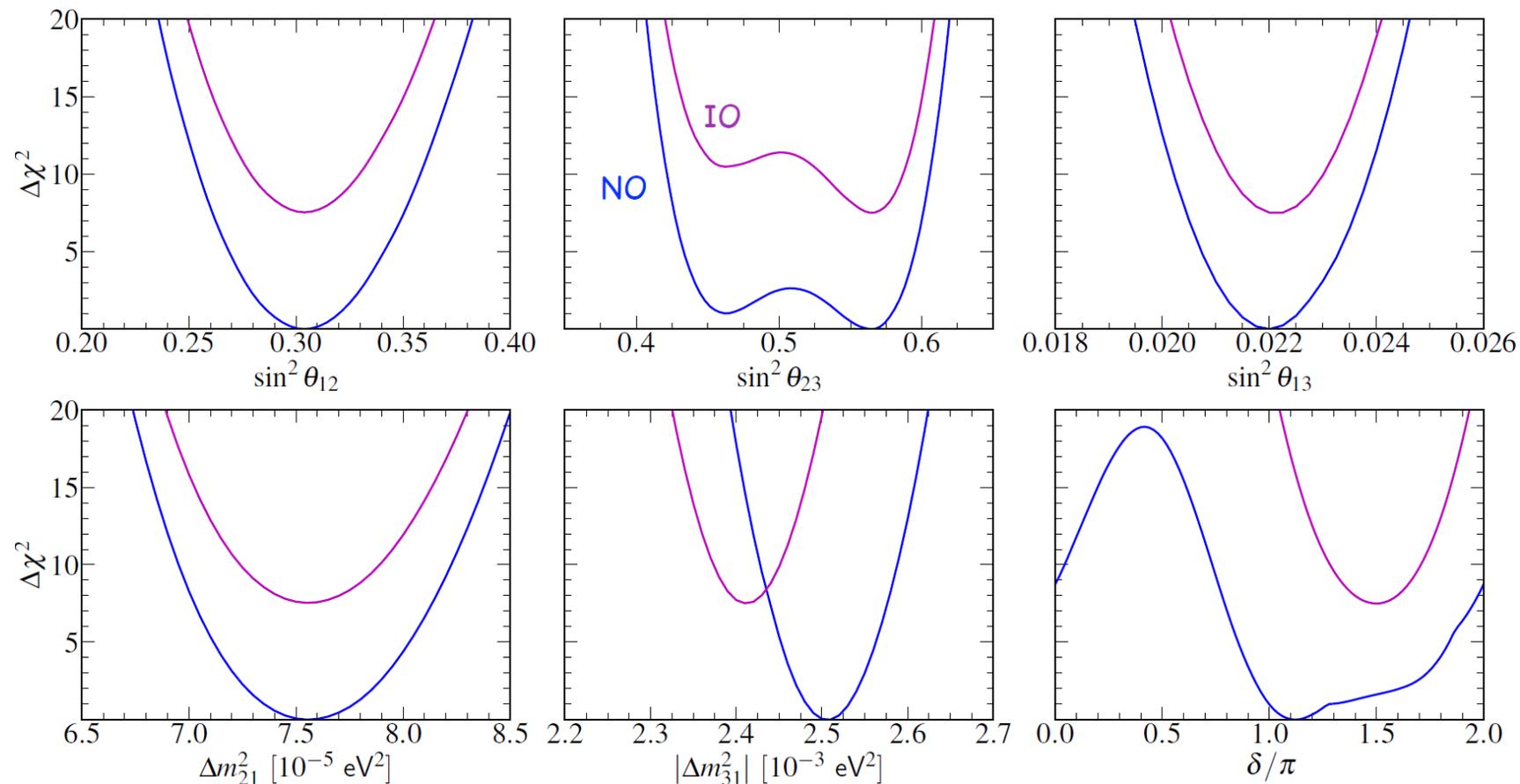
- 多実験の結果のグローバルフィット。

Valencia Global Fit

Mariam Tórtola, Neutrino 2024

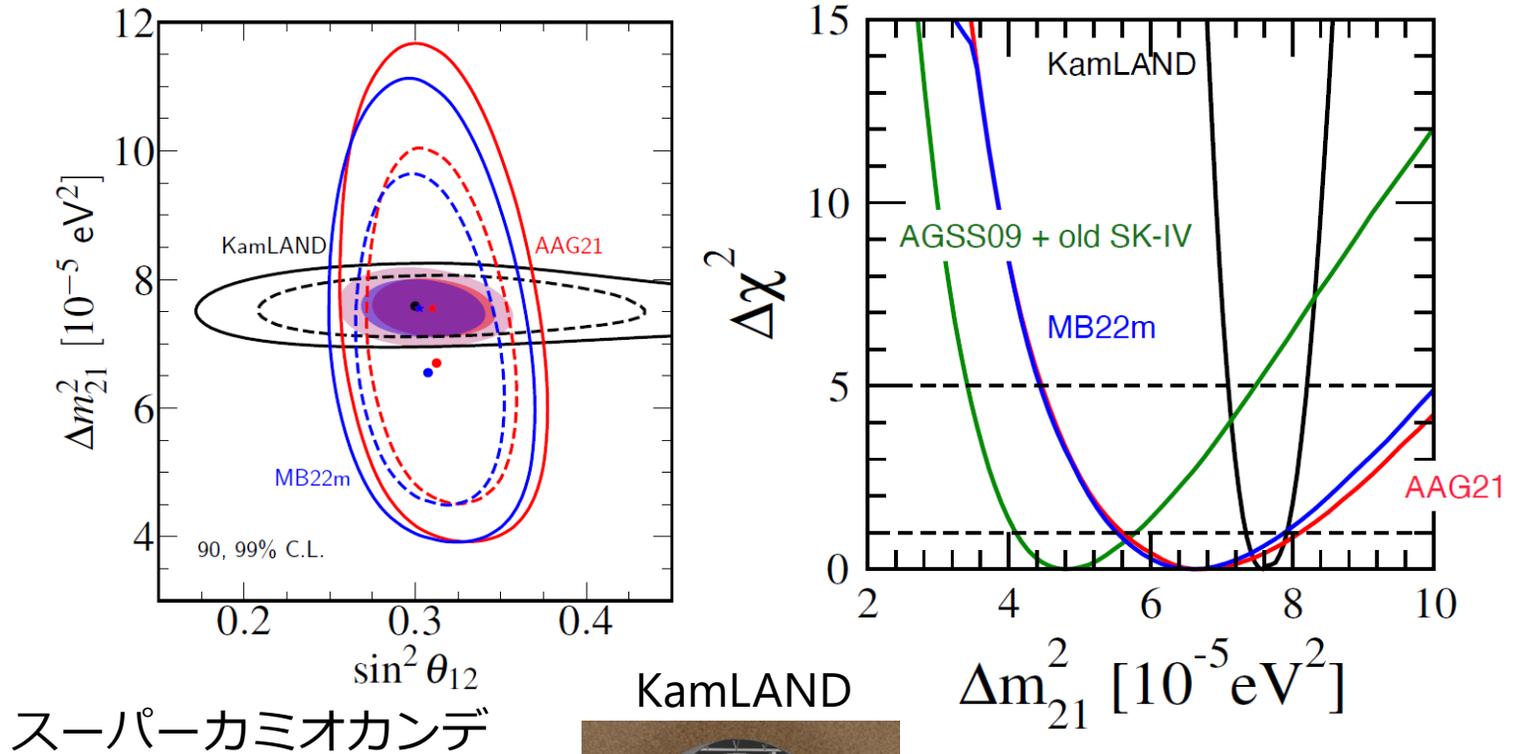
質量順序  
 NO: 標準階層  
 IO: 逆順序

parameter	best fit $\pm 1\sigma$	$3\sigma$ range
$\Delta m_{21}^2$ [ $10^{-5} \text{eV}^2$ ]	$7.55^{+0.22}_{-0.20}$	6.98–8.19
$ \Delta m_{31}^2 $ [ $10^{-3} \text{eV}^2$ ] (NO)	$2.51^{+0.02}_{-0.03}$	2.43–2.58
$ \Delta m_{31}^2 $ [ $10^{-3} \text{eV}^2$ ] (IO)	$2.41^{+0.03}_{-0.02}$	2.34–2.49
$\sin^2 \theta_{12}/10^{-1}$	$3.04 \pm 0.16$	2.57–3.55
$\sin^2 \theta_{23}/10^{-1}$ (NO)	$5.64^{+0.15}_{-0.21}$	4.23–6.04
$\sin^2 \theta_{23}/10^{-1}$ (IO)	$5.64^{+0.15}_{-0.18}$	4.27–6.03
$\sin^2 \theta_{13}/10^{-2}$ (NO)	$2.20^{+0.05}_{-0.06}$	2.03–2.38
$\sin^2 \theta_{13}/10^{-2}$ (IO)	$2.20^{+0.07}_{-0.04}$	2.04–2.38
$\delta/\pi$ (NO)	$1.12^{+0.16}_{-0.12}$	0.76–2.00
$\delta/\pi$ (IO)	$1.50^{+0.13}_{-0.14}$	1.11–1.87

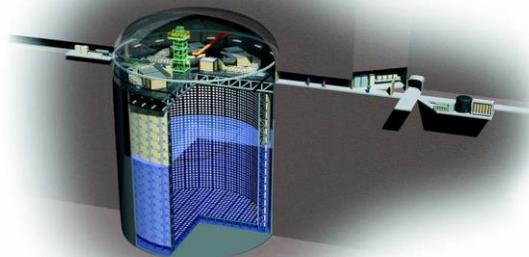


# 太陽セクター ( $\theta_{12}, \Delta m_{21}^2$ )

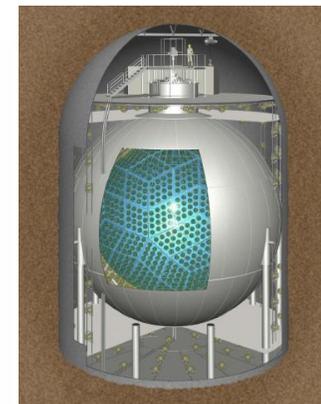
- $\theta_{12}$ は太陽ニュートリノにより高精度で測定。
- $\Delta m_{21}^2$ はKamLANDによる長基線原子炉ニュートリノ測定がより高い精度。
- 太陽ニュートリノとKamLANDの間の $\Delta m_{21}^2$ のテンションが最新のスーパーカミオカンデのデータを入れることで低減 ( $2\sigma \rightarrow 1\sigma$ )。



スーパーカミオカンデ



KamLAND



Valencia Global Fit

# 短基線原子炉ニュートリノによる $\theta_{13}$ 測定

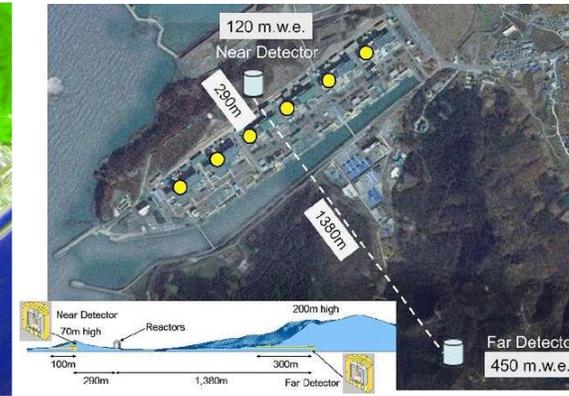
- $\theta_{13}$  は2012年までは未測定であったが、短基線原子炉ニュートリノにより精密測定。

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m_{31}^2 L(\text{m})}{E_\nu(\text{MeV})} \right)$$

Daya Bay (中国)



RENO (韓国)

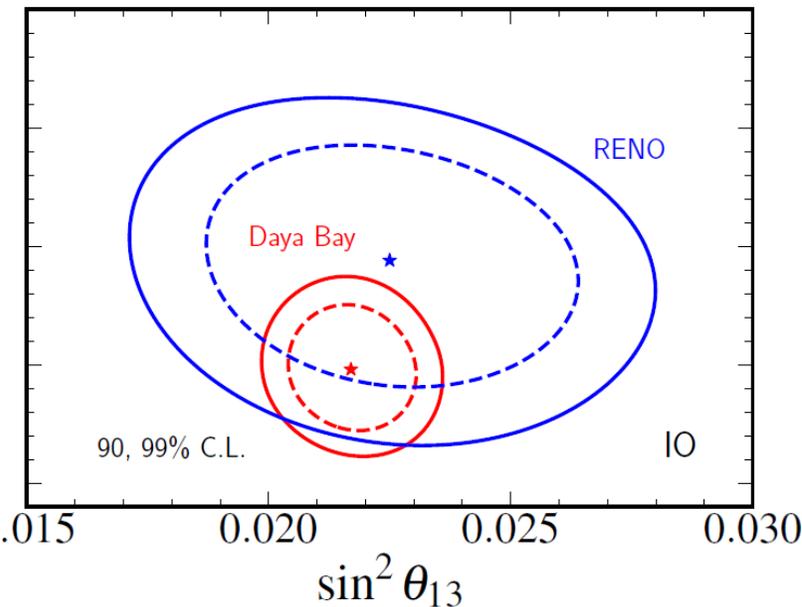
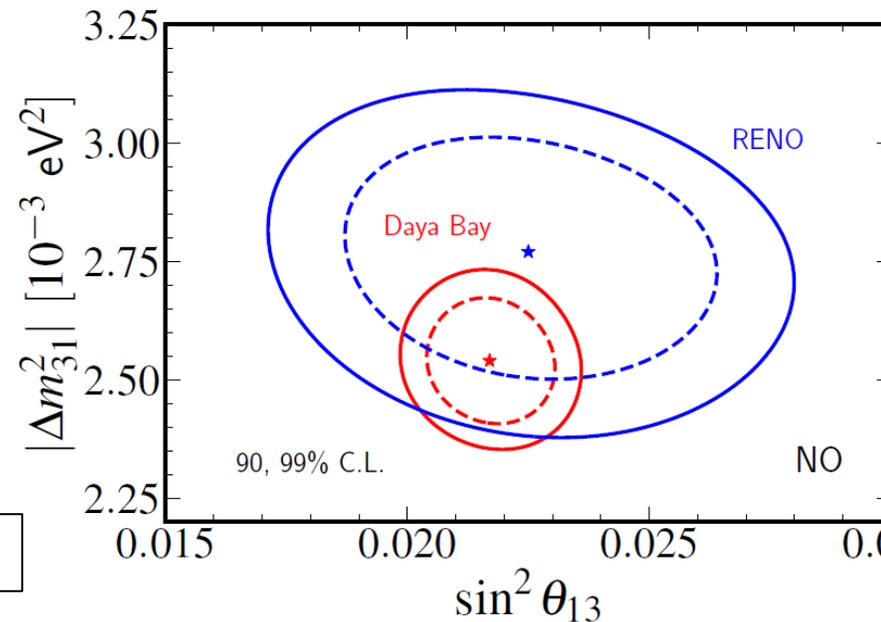


Double Chooz (フランス)



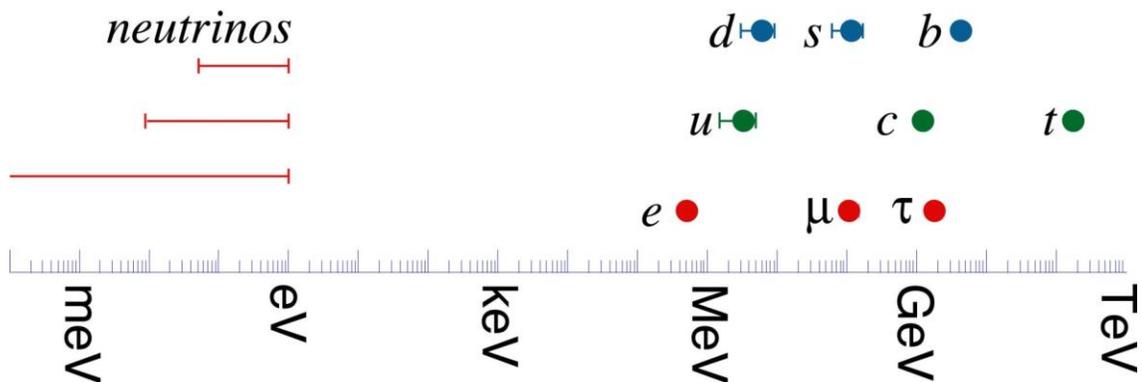
- CP対称性の破れの探索のための重要なインプット。

Valencia Global Fit



# ニュートリノの残された謎

- CP対称性は破れているか?
- 混合角はどのような意味を持つのか?
- 3世代だけか。
- 質量順序は標準順序か逆順序か?
- 質量の絶対値。
- ディラック粒子かマヨラナ粒子か。

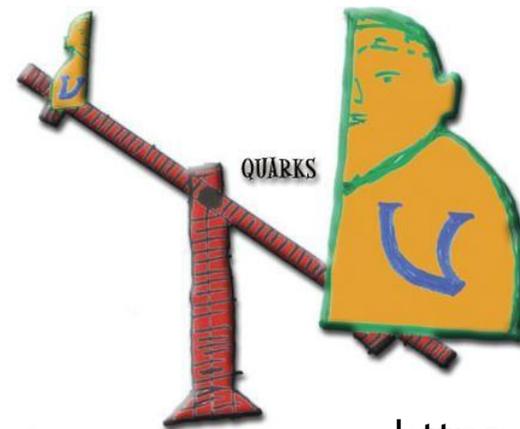


ニュートリノ振動実験

ニュートリノレス二重  
ベータ崩壊探索実験

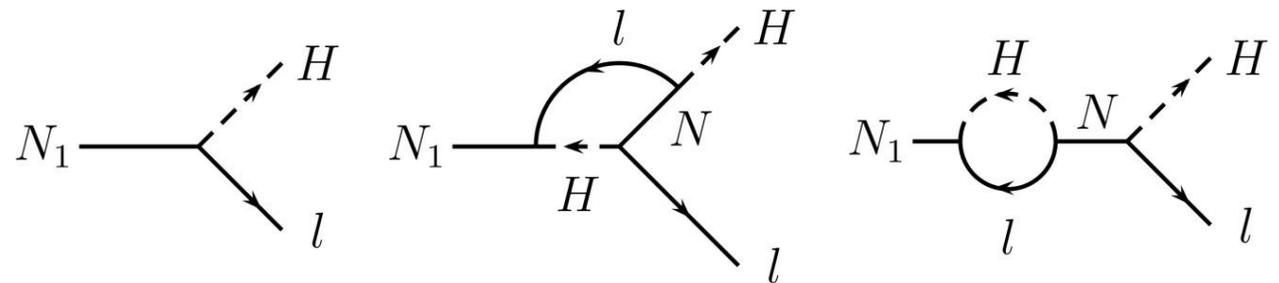
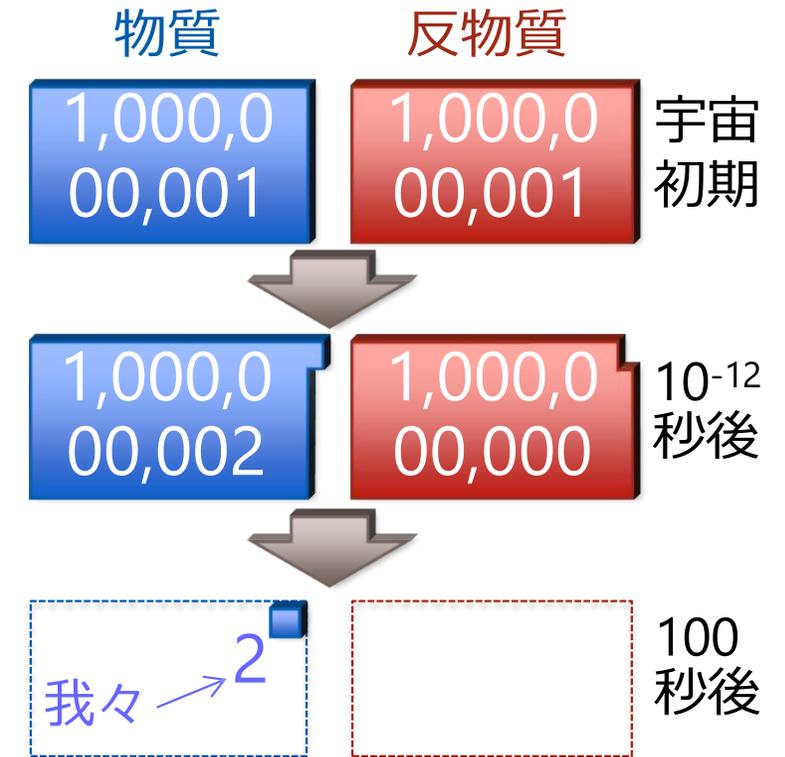
宇宙背景マイクロ波放射測定実験

ベータ崩壊精密測定実験



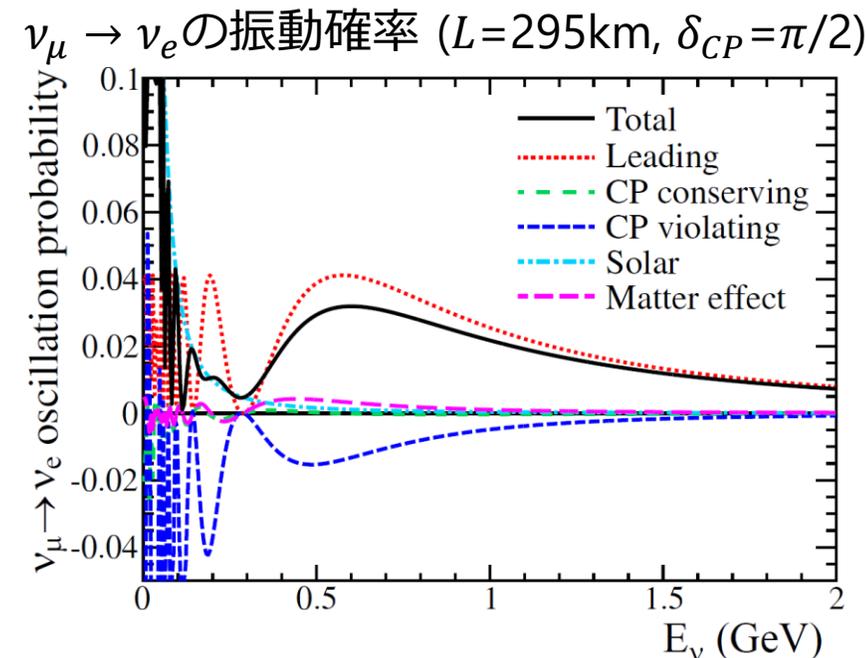
# レプトンにおけるCP対称性の破れ

- 物質優勢宇宙を説明するためのサハロフの3条件。
  - バリオン数の破れ。
  - 非熱平衡状態。
  - C, CP対称性の破れ。
- 小林益川理論におけるクォークのCP対称性の破れだけでは物質優勢宇宙を説明するには小さすぎる。
- 新たなCP対称性の破れが必要。
- レプトジェネシスが候補。
  - 重い右巻きニュートリノの崩壊によりレプトン数が生成。
  - レプトン数がバリオン数に変化。



# ニュートリノ振動によるCP対称性の破れの探索

- 長基線ニュートリノ振動における $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率にCP位相の効果が現れる。
- $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の振動確率ではCP非保存項が反転する。
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の振動確率を比較することでCP対称性の破れを検証できる。

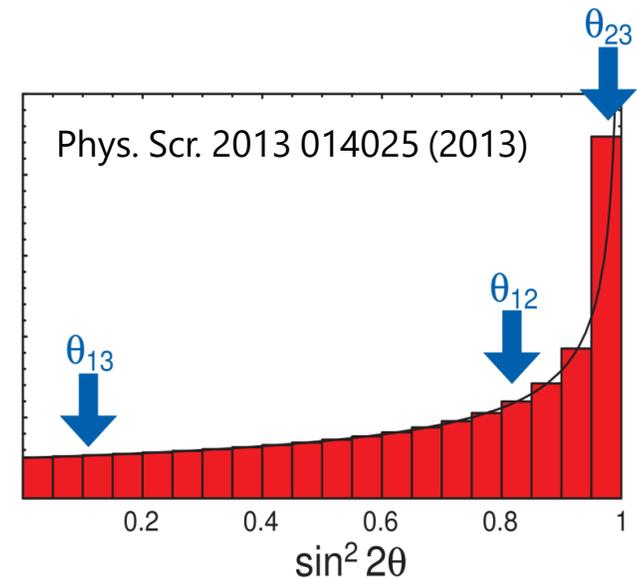
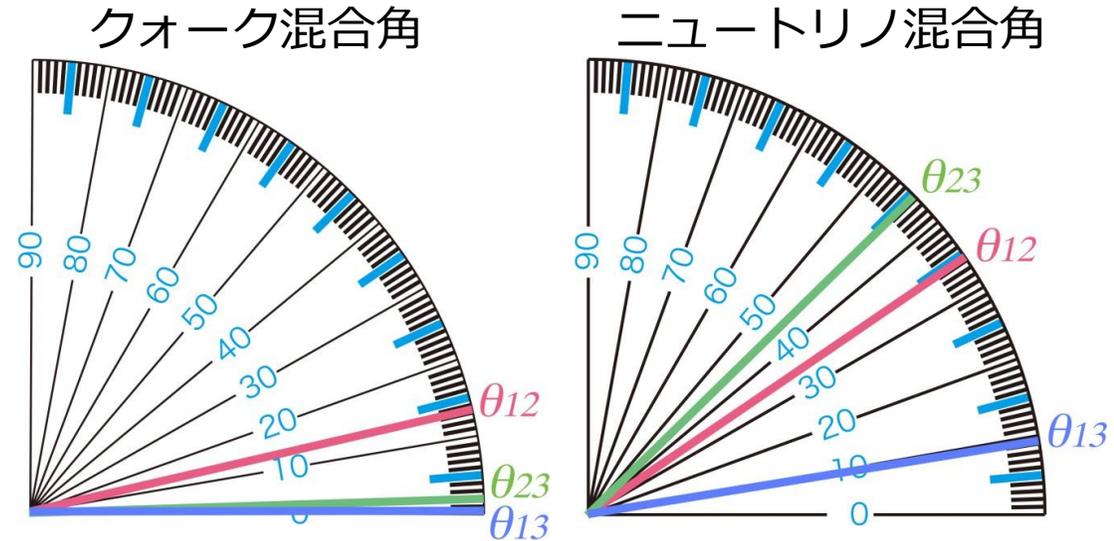


$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & \boxed{4C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \cdot \sin^2 \Delta_{31}} \text{ 主要項} \\
 & \boxed{+8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos \delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cdot \cos \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21}} \text{ CP保存項} \\
 & \boxed{-8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin \delta \cdot \sin \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21}} \text{ CP非保存項} \\
 & \boxed{+4S_{12}^2 C_{13}^2 (C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \cos \delta) \cdot \sin^2 \Delta_{21}} \text{ 太陽振動項} \\
 & \boxed{-8C_{13}^2 S_{12}^2 S_{23}^2 \cdot \frac{aL}{4E_\nu} (1 - 2S_{13}^2) \cdot \cos \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31}} \\
 & \boxed{+8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \cdot \frac{a}{\Delta m_{13}^2} (1 - 2S_{13}^2) \cdot \sin^2 \Delta_{31}} \text{ 物質振動項}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{ij} &= \sin \theta_{ij} \\
 C_{ij} &= \cos \theta_{ij} \\
 \Delta_{ij} &= \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}
 \end{aligned}$$

# ニュートリノ混合角のもつ意味

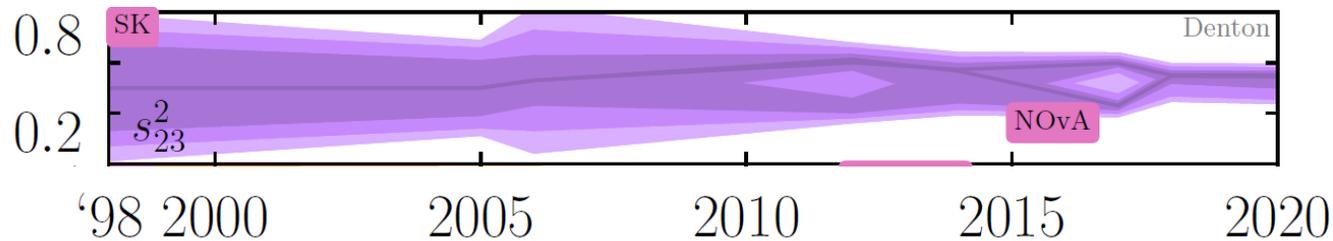
- ニュートリノの混合角はクォークの混合角と比べて大きい。
- 混合角はどのように決まっているのか。
- Anarchy model
  - 混合角はすべてランダムに決まってる。
  - ぴったり45°とか0ということはない。
- クォークの混合角と関係している？
  - $\theta_{12}$ (ニュートリノ) +  $\theta_c$ (カビボ角) = 45° ?
  - $\sin \theta_{13}$ (ニュートリノ) =  $\sin \theta_c$ (カビボ角) / 2 ?
- 混合角の精密測定が鍵になる。



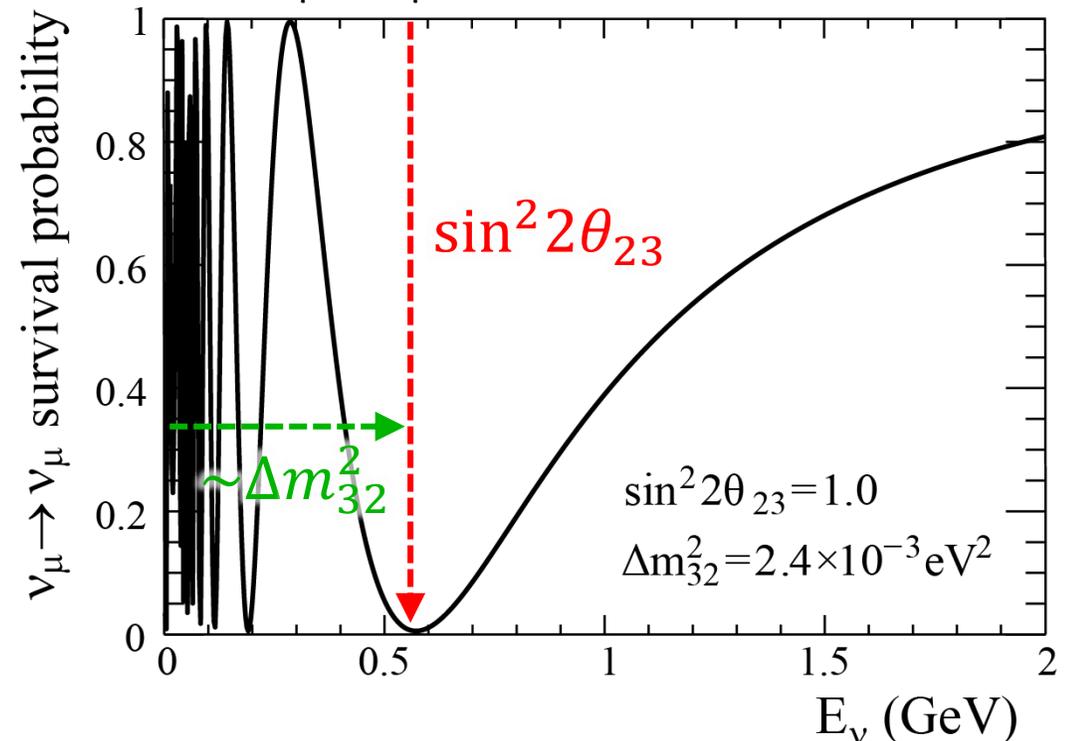
# ニュートリノ混合角の精密測定

- 最大の関心事は $\theta_{23}$ が $45^\circ$ (最大混合)からずれているかどうか。
- $45^\circ$ からのずれは長基線ニュートリノ振動による $\nu_\mu$ 消失( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ )の測定により決定できる。  

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - (\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} + \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23}) \sin^2 \left( \Delta m_{32}^2 \frac{L}{4E} \right)$$
- $45^\circ$ より大きい小さいかは $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 測定が感度を持つ。
- CP対称性の破れの感度を高めるうえでも重要。

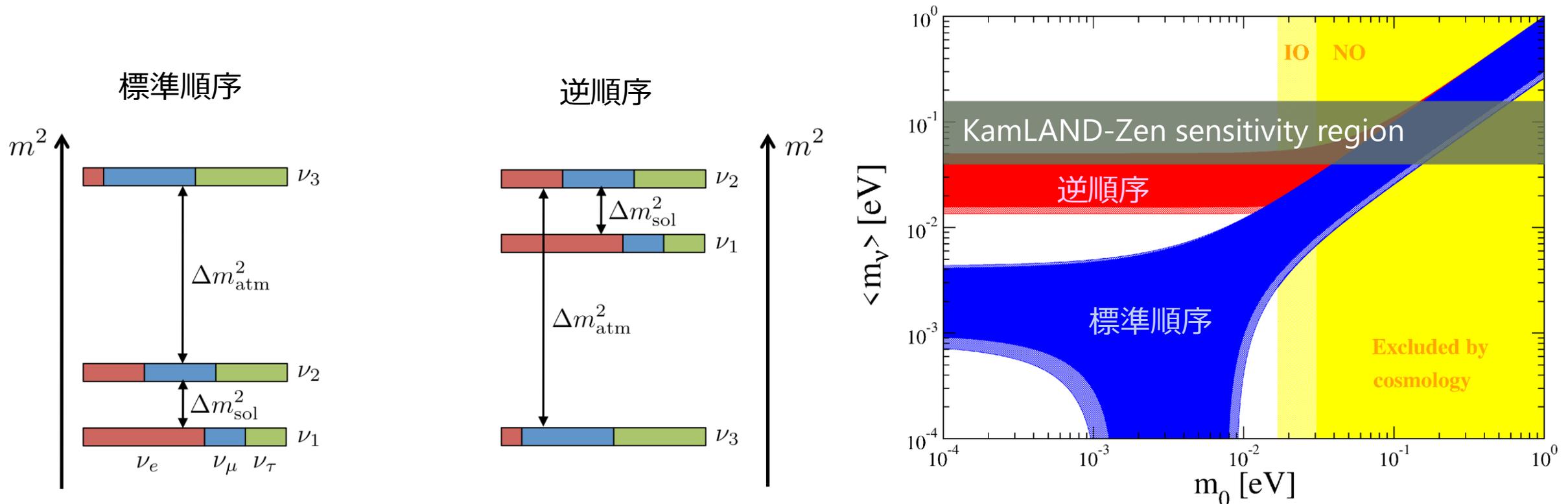


Peter B. Denton (BNL), Neutrino 2022



# ニュートリノ質量順序

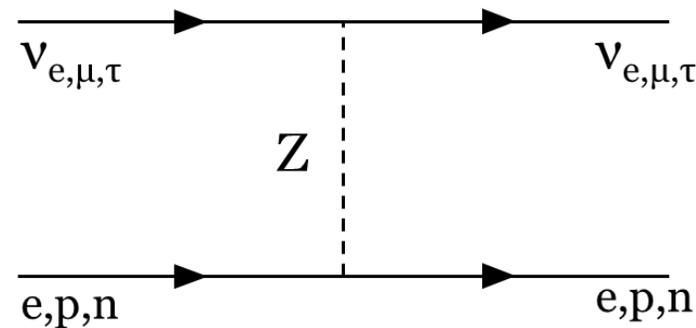
- ニュートリノ質量差の絶対値は高精度で測定されているが、質量の順序が  $m_1 < m_2 < m_3$  (標準順序)か  $m_3 < m_1 < m_2$  (逆順序)かわかっていない。
- ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索のためにも重要。



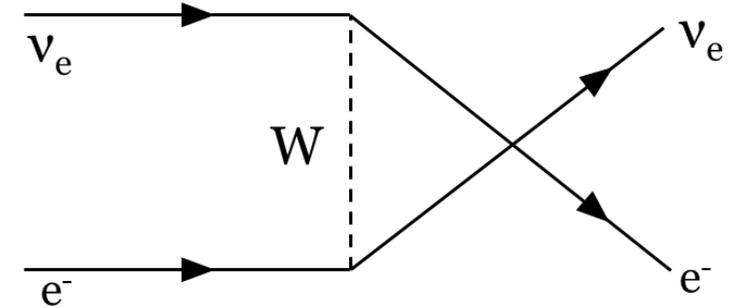
# ニュートリノ振動における物質効果

- ニュートリノが物質中を飛行時、すべてのニュートリノが電子、核子と中性カレント反応をする。電子ニュートリノのみが荷電カレント反応をする。
- 電子ニュートリノのみが追加のポテンシャルを感じる。
- 余分な位相のずれが生じニュートリノ振動に影響。
- 質量順序に感度が出る。

電子、核子との中性カレント反応



電子との荷電カレント反応



$$i \frac{d}{dt} |\nu_\alpha(t)\rangle = (\mathcal{H}_{\text{vac}} + V) |\nu_\alpha(t)\rangle$$

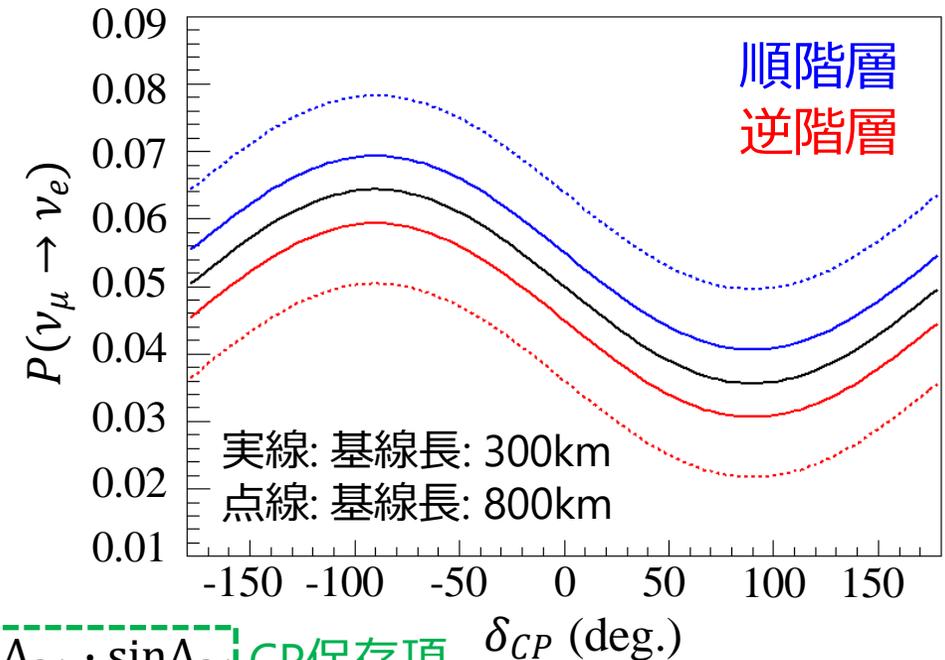
$$V = \begin{pmatrix} \sqrt{2}G_F n_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

# 物質効果による質量順序の決定

- CP位相だけでなく物質効果も $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動確率を変化させる。
- $\delta_{CP} = -90$ 度で順階層または $\delta_{CP} = 90$ 度で逆階層なら両方を決定できる。
- それ以外の領域では縮退が起きるが基線長の異なる複数の実験で測定すれば両方を決定できる。

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & \boxed{4C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \cdot \sin^2 \Delta_{31}} \text{ 主要項} \\
 & + 8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos \delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cdot \cos \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21} \text{ CP保存項} \\
 & - 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin \delta \cdot \sin \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21} \text{ CP非保存項} \\
 & + 4S_{12}^2 C_{13}^2 (C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \cos \delta) \cdot \sin^2 \Delta_{21} \text{ 太陽振動項} \\
 & - 8C_{13}^2 S_{12}^2 S_{23}^2 \cdot \frac{aL}{4E_\nu} (1 - 2S_{13}^2) \cdot \cos \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \\
 & + 8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \cdot \frac{a}{\Delta m_{13}^2} (1 - 2S_{13}^2) \cdot \sin^2 \Delta_{31} \text{ 物質振動項}
 \end{aligned}$$

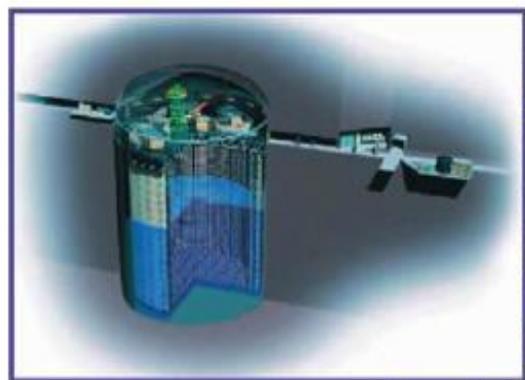
最大振動エネルギーにおける $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動確率



$$\begin{aligned}
 S_{ij} &= \sin \theta_{ij} \\
 C_{ij} &= \cos \theta_{ij} \\
 \Delta_{ij} &= \frac{\Delta_{ij}^2 L}{4E}
 \end{aligned}$$

# T2K実験

- 日本における加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験。
- J-PARC加速器により $\nu_\mu$ または $\bar{\nu}_\mu$ ビームを生成。
- ニュートリノを前置検出器と295km離れたスーパーカミオカンデで測定。



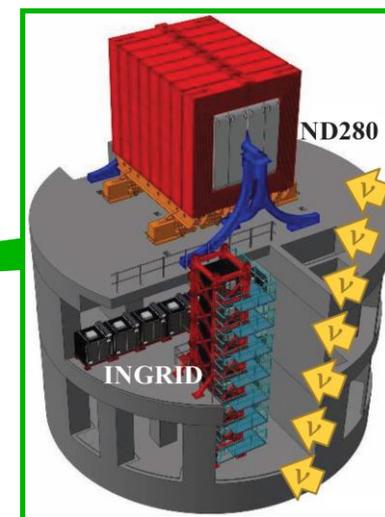
Super-Kamiokande  
(ICRR, Univ. Tokyo)



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

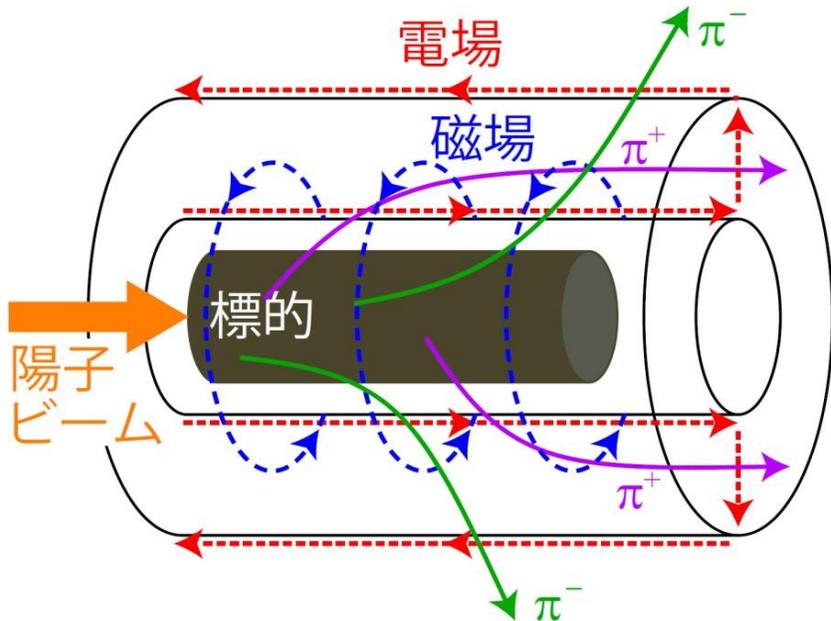


Near detector

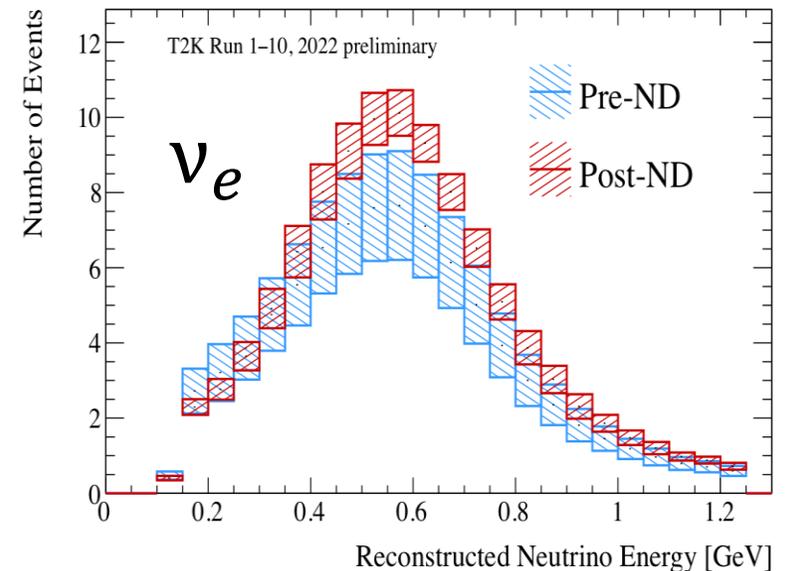
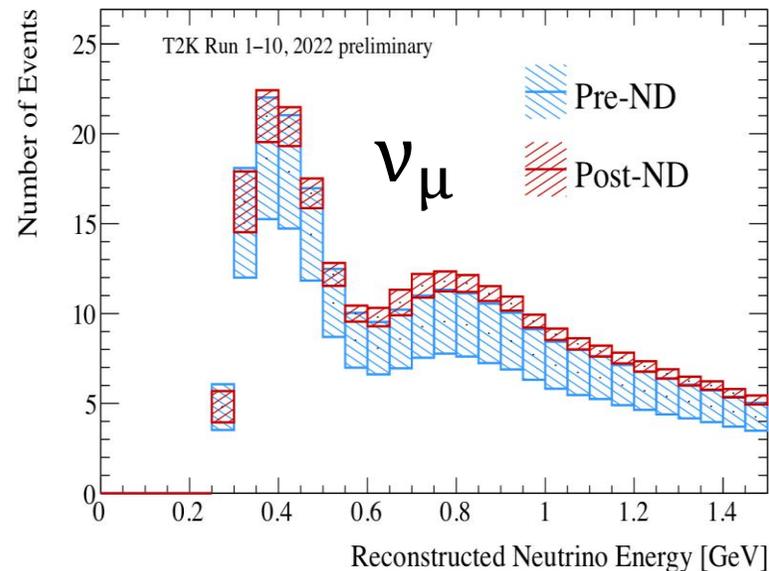


# T2K実験でのニュートリノ振動測定

- 電磁ホーンの電流の向きを変えることで $\nu_\mu$ ビームを作るか $\bar{\nu}_\mu$ ビームを作るか選択できる。
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ ,  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ,  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の4つのモードが測定可能。
- 前置検出器により系統誤差を大幅に削減。



スーパーカミオカンデにおけるエネルギースペクトルの不定性

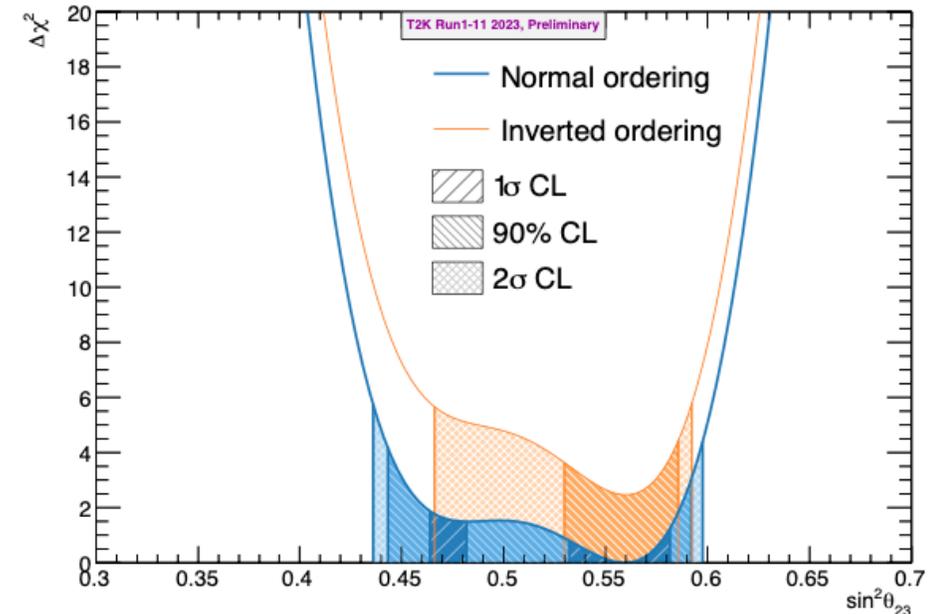
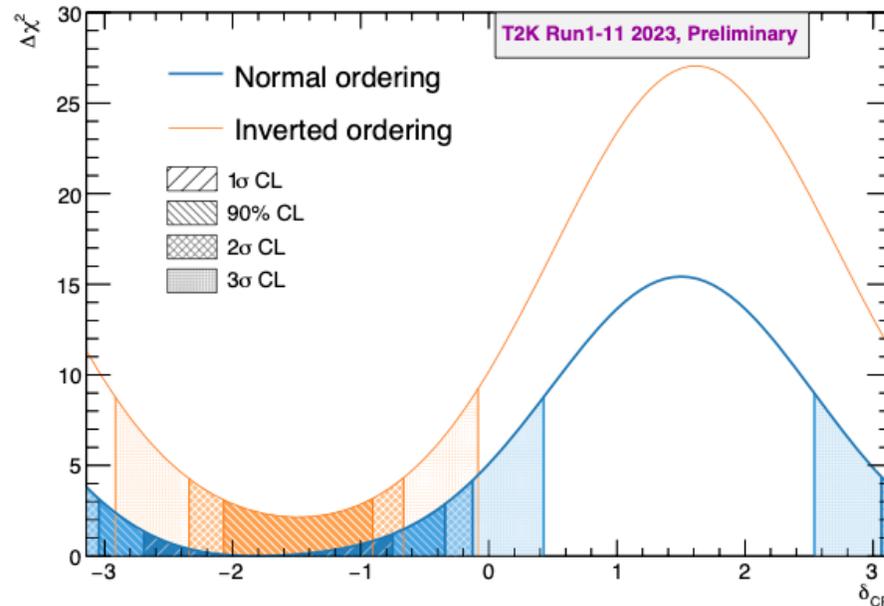


# T2K実験の最新結果

- 90% C.L. で CP 対称性の破れを示唆。  
(Best fit は  $\delta_{CP} = -\pi/2$ )
- $\theta_{23}$  は 45 度と無矛盾だが Best fit は 45 度より大きい。
- 質量順序は標準順序を Prefer。

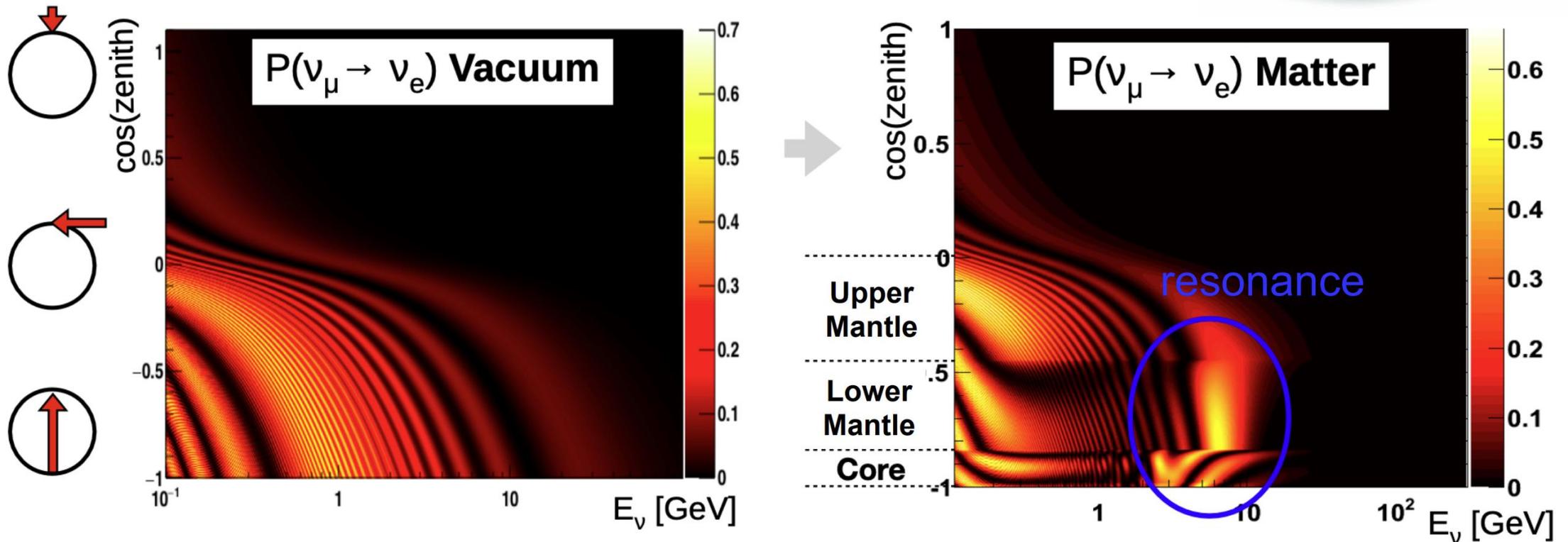
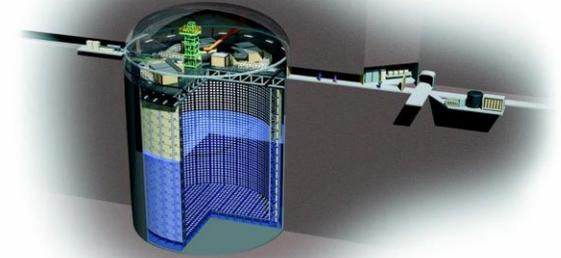
## ベイズファクター

	$\sin^2 \theta_{23} < 0.5$	$\sin^2 \theta_{23} > 0.5$	Sum
NH ( $\Delta m_{32}^2 > 0$ )	0.23	0.54	0.77
IH ( $\Delta m_{32}^2 < 0$ )	0.05	0.18	0.23
Sum	0.28	0.72	1.00



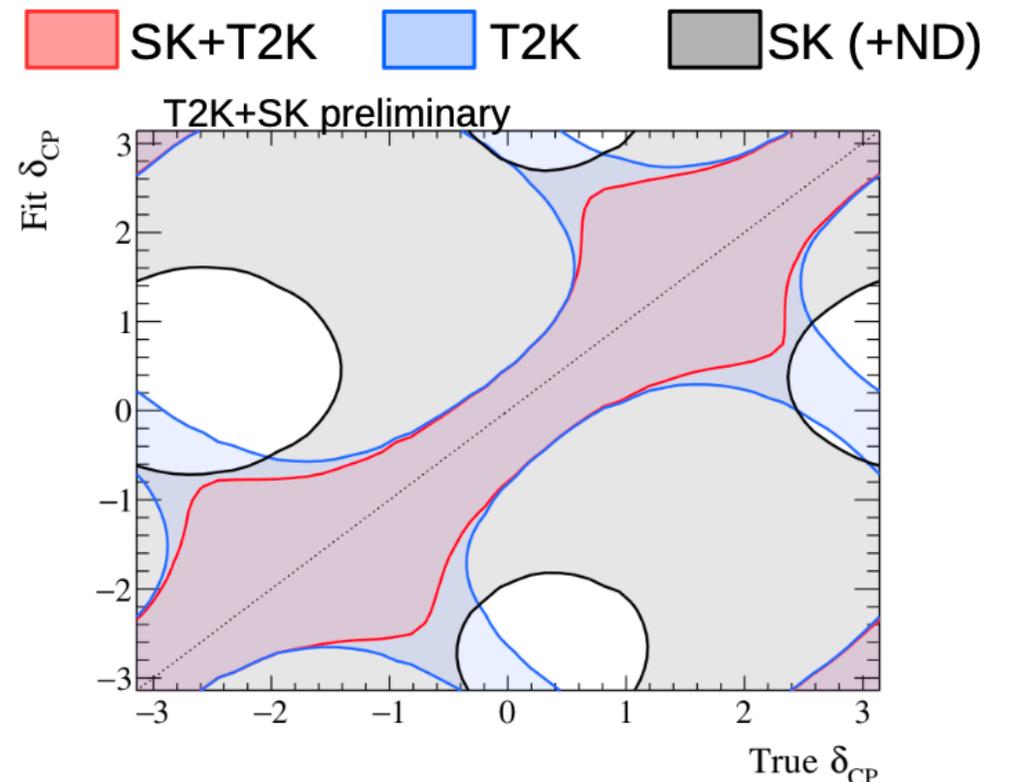
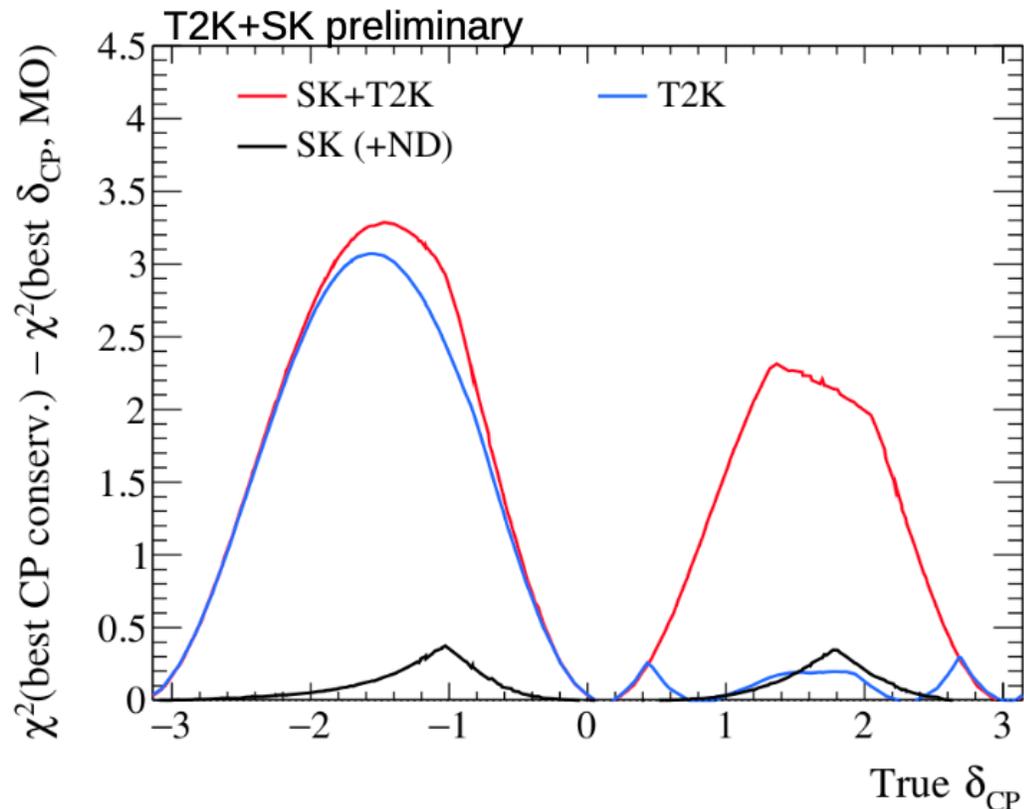
# スーパーカミオカンデでの大気ニュートリノ振動測定

- 大気ニュートリノを用いてニュートリノ振動の測定。
- 物質効果による共鳴によって質量順序に高い感度。  
(標準順序の場合  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  に逆順序の場合  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  に現れる。)



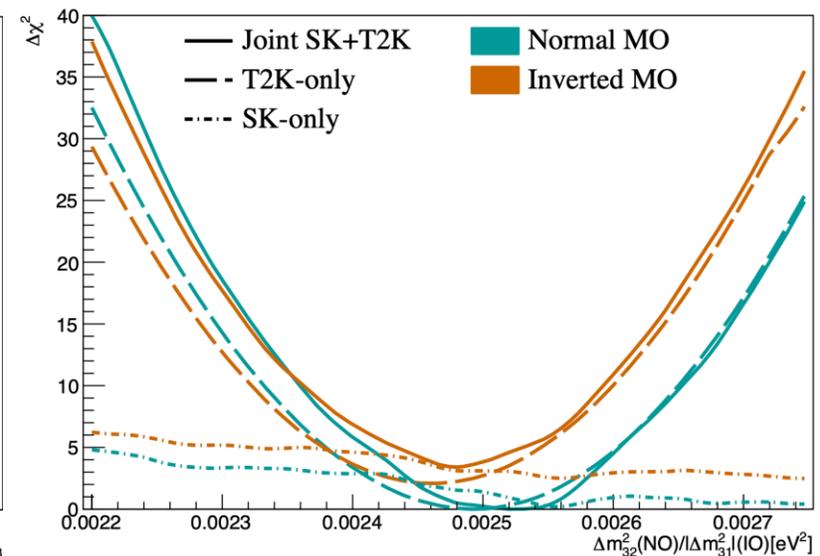
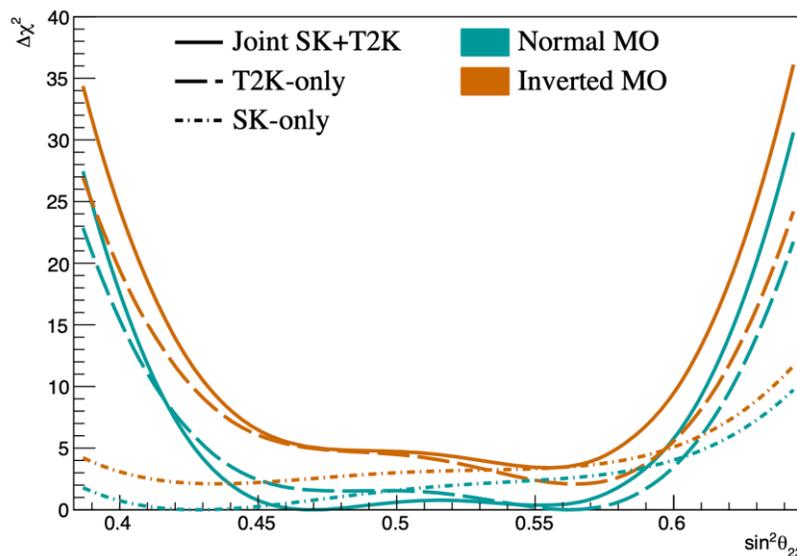
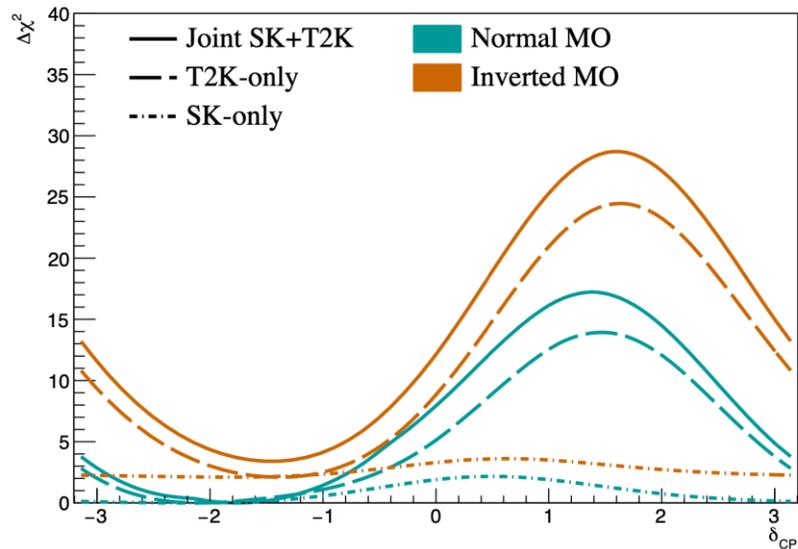
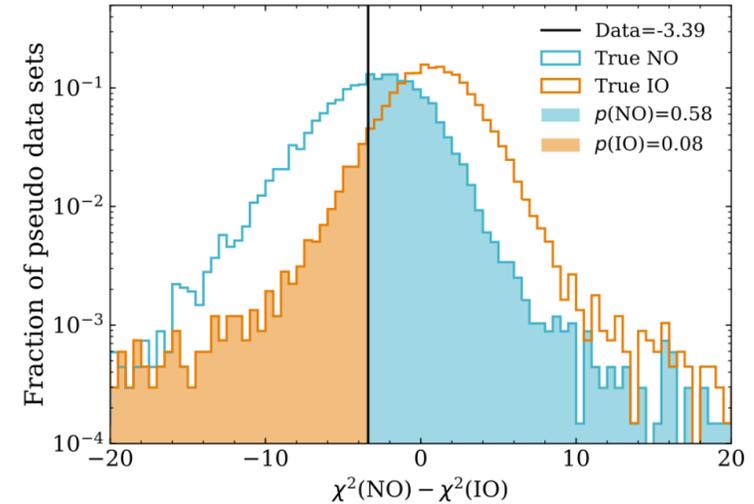
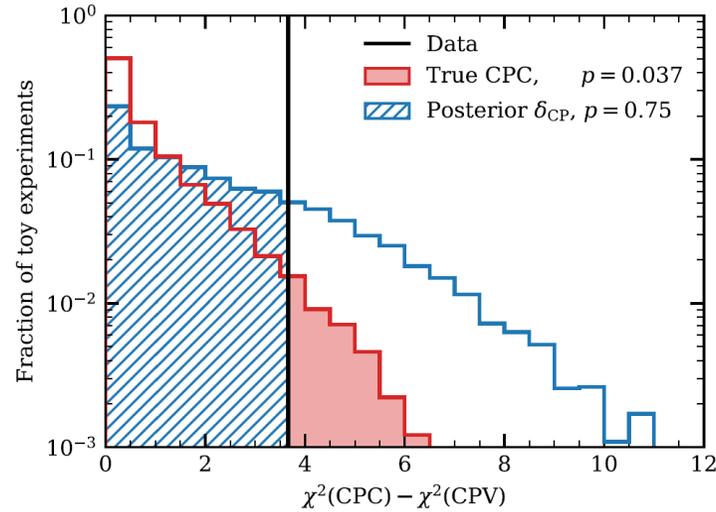
# T2K実験とSK大気ニュートリノの統合解析

- 統合解析によりCP非保存項と物質効果の縮退を解いて、CP位相と質量順序の両方に高い感度を持つようになる。
- 共通の系統誤差などを考慮して正しい結果を出すことができる。



# 統合解析の結果

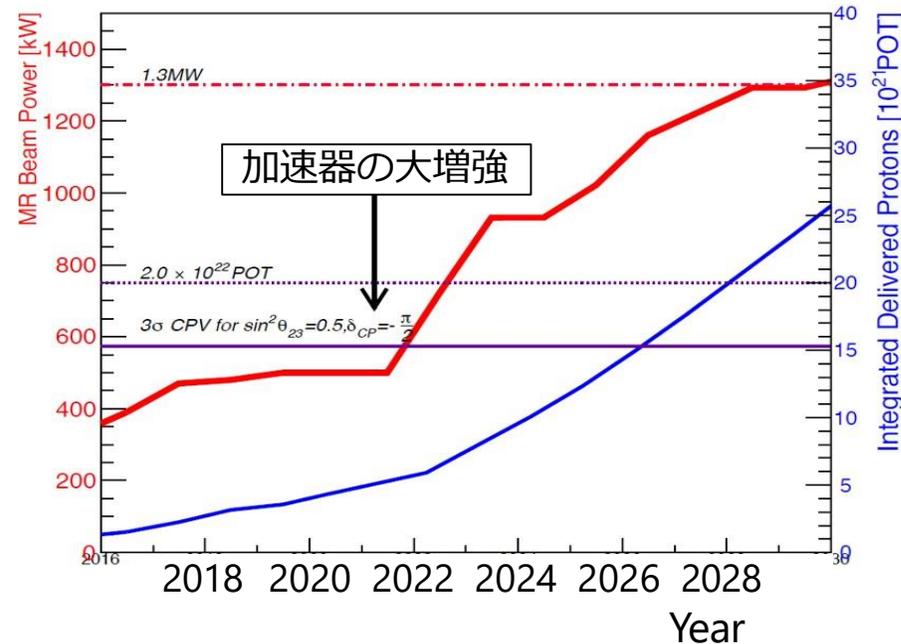
- T2K実験単体の結果と比べて精度が向上。
- CP対称性の破れのC.L.は $1.9\sigma$ と $2\sigma$ の間。
- 依然として標準順序をPrefer (逆順序のp-valueは0.08)



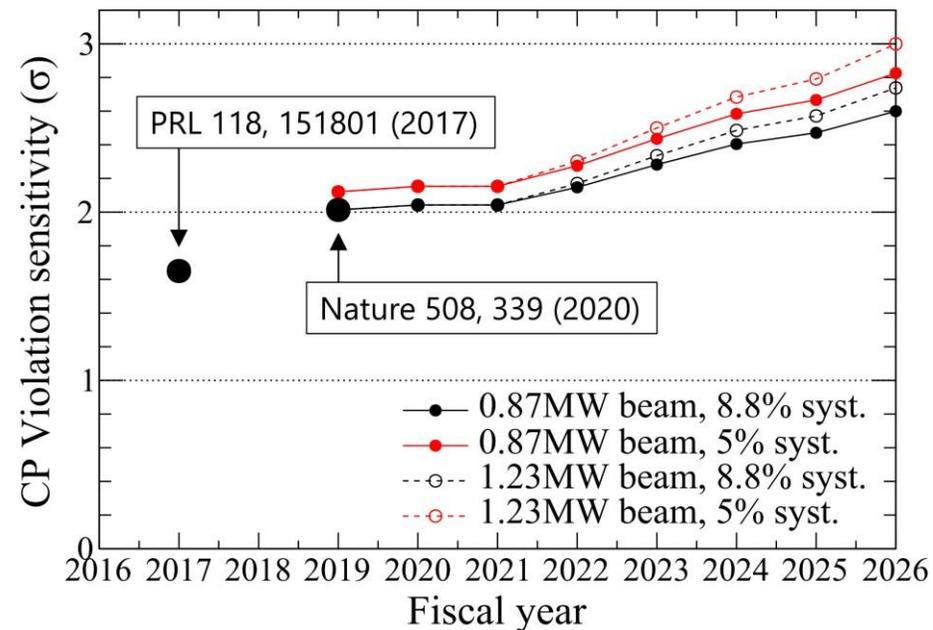
# T2K実験の展望

- J-PARC加速器のアップグレードが完了。(ビーム強度 500kW→800kW)  
→ より高統計のデータ取得。
- スーパーカミオカンデにガドリニウムをドープ。  
→ 中性子タグを行うことでニュートリノと反ニュートリノの識別性能が向上。

今後のビーム増強の計画



ニュートリノCP対称性破れの探索感度



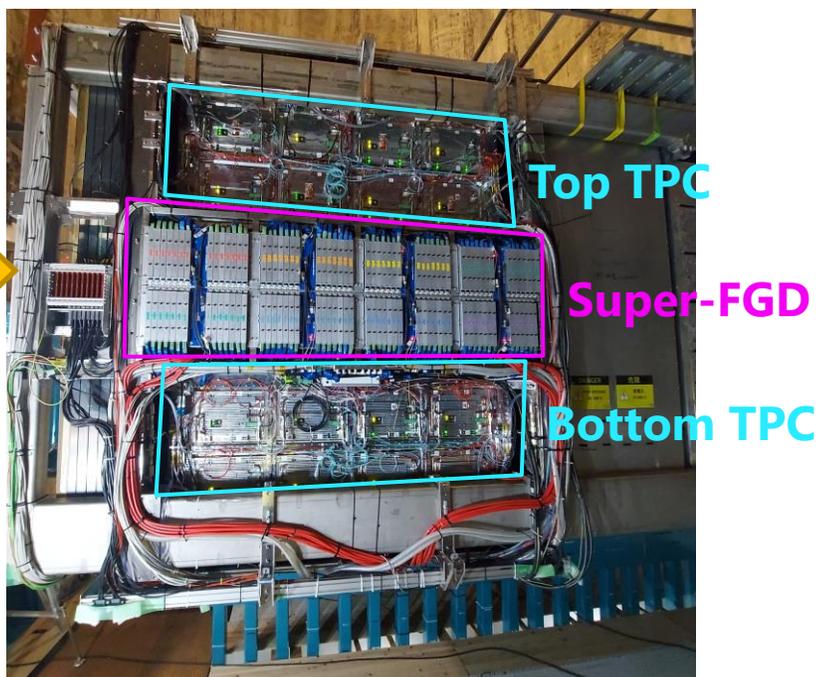
Gd<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>



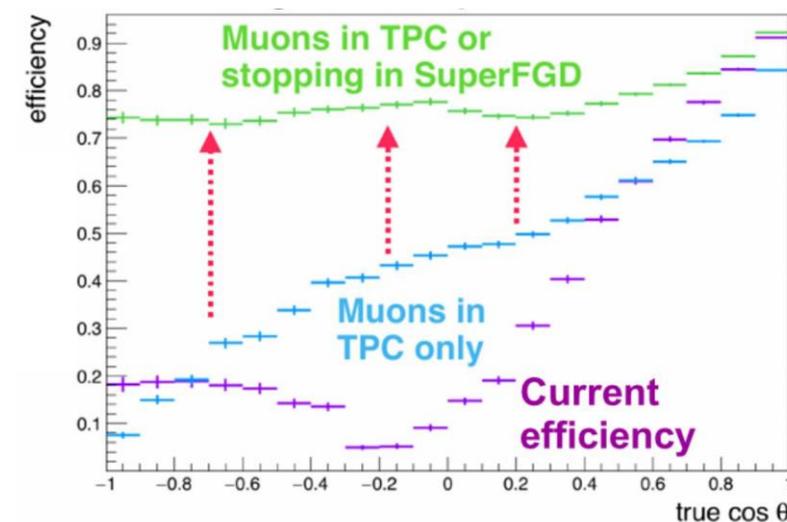
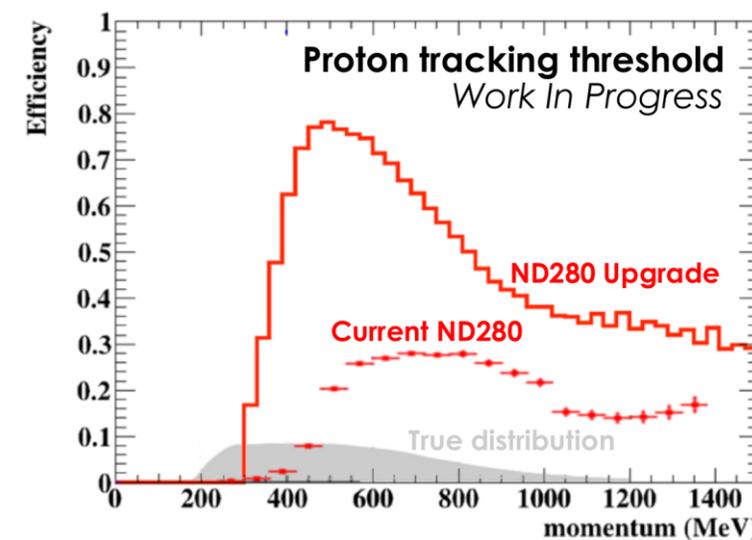
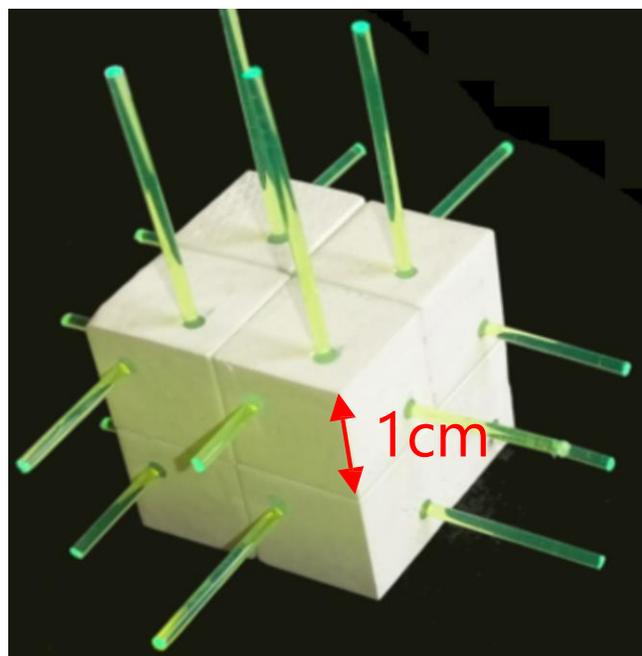
# T2K実験の展望

- 前置検出器の大幅なアップグレードが完了し、2023年にデータ取得を開始。
- より精密なニュートリノ反応の測定をすることで系統誤差を削減。

アップグレードされた前置検出器



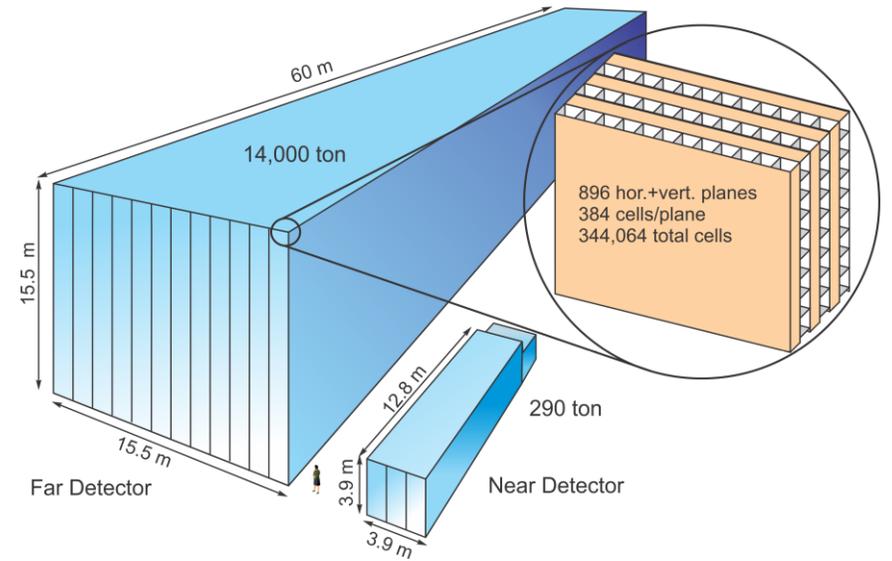
Super-FGDのシンチレータ



# NOvA実験

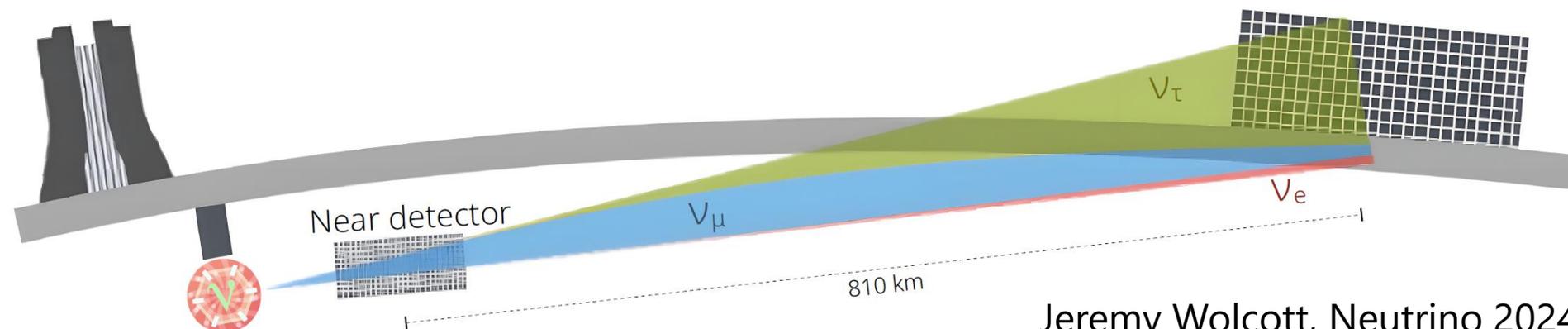
- 米国における加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験。
- T2K実験より基線長が長く、物質効果による影響が大きい。
- シンチレータ検出器によりカロリメータとしてエネルギーを再構成。

	基線長	ピークエネルギー
T2K実験	295km	0.6 GeV
NOvA実験	810km	2.0 GeV



Fermilab

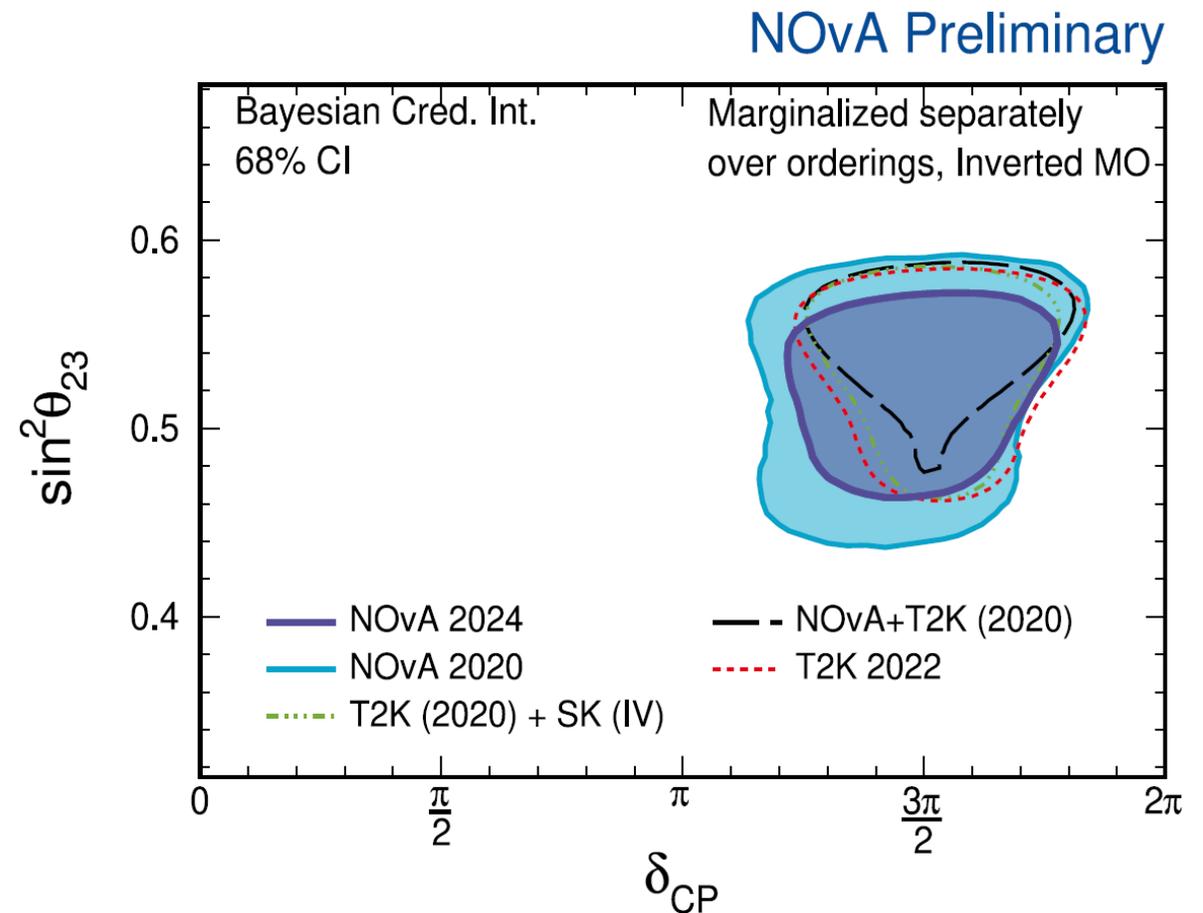
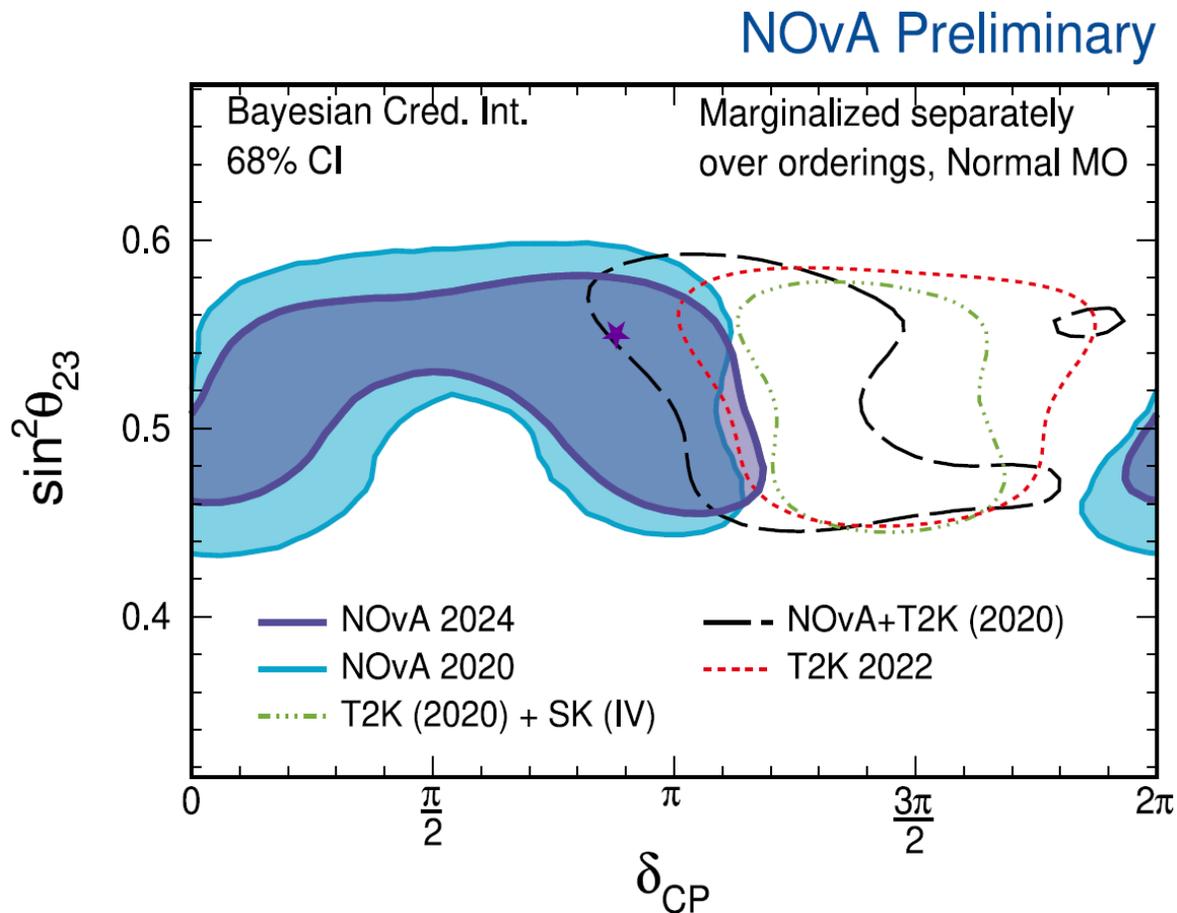
Far detector:  
Ash River, MN



# NOvA実験の最新結果

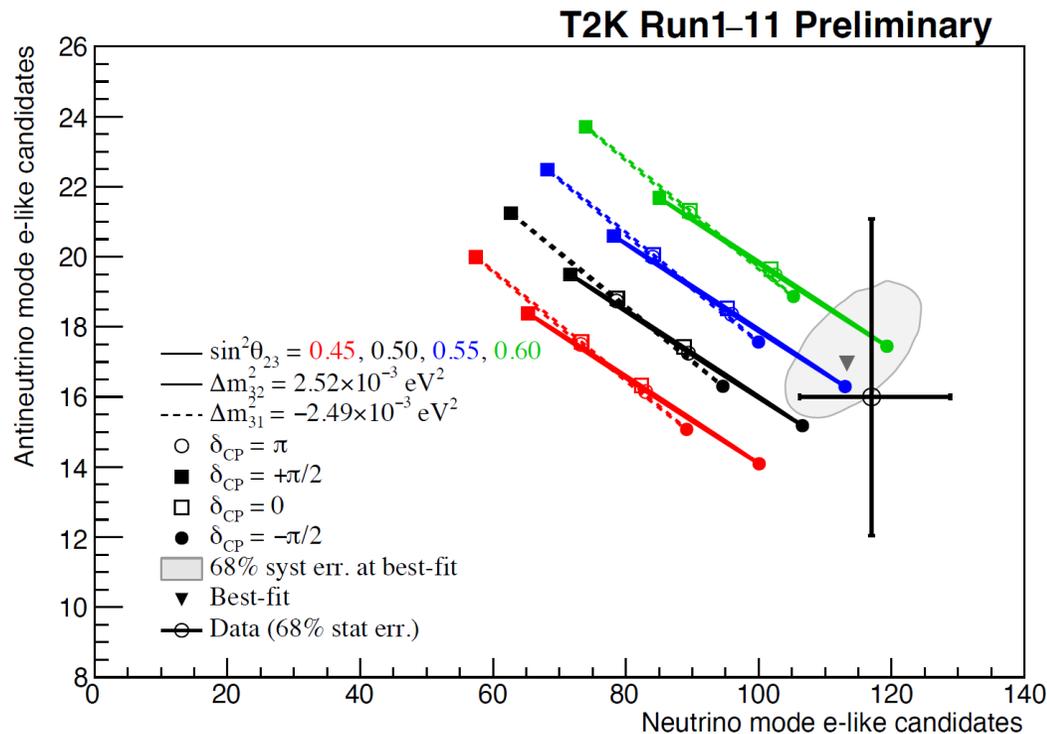
- 質量順序は標準順序をFavor
- しかし標準順序では $\delta_{CP}$ はT2Kと異なる領域をFavor

Jeremy Wolcott, Neutrino 2024

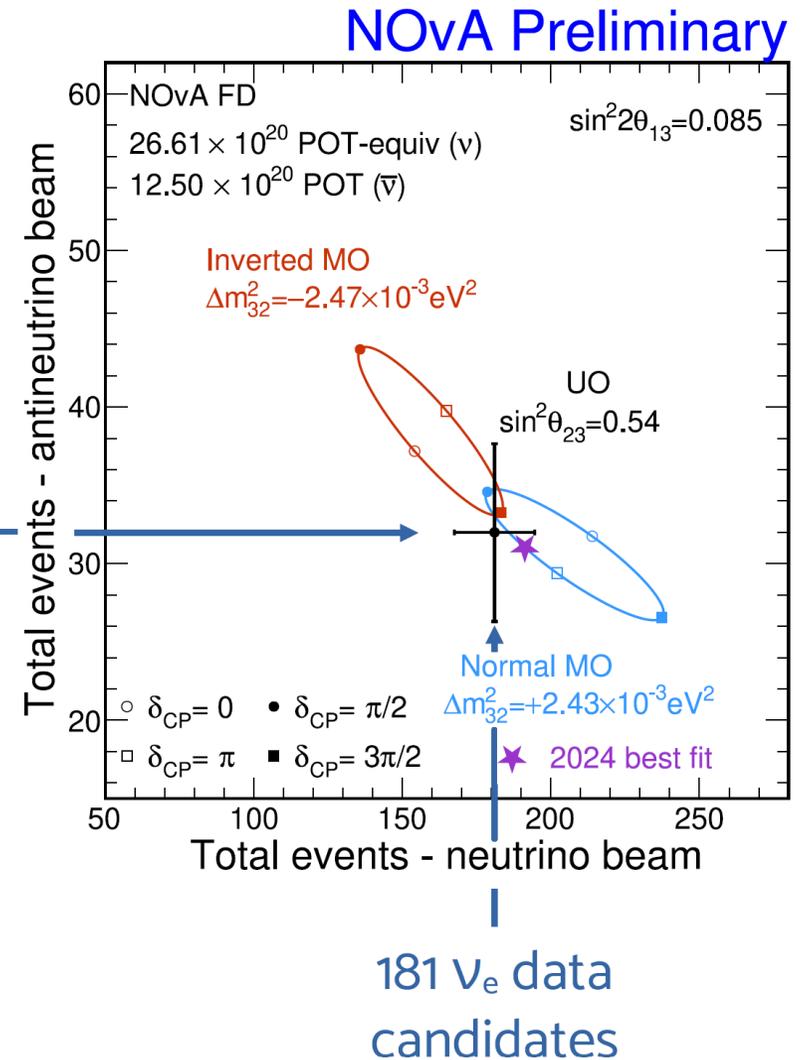


# T2K実験とNOvA実験のイベント数での比較

- 解析にはスペクトル情報も用いているが感度はほとんどイベント数で決まっている。
- T2K実験とNOvA実験の統合解析も進行中。

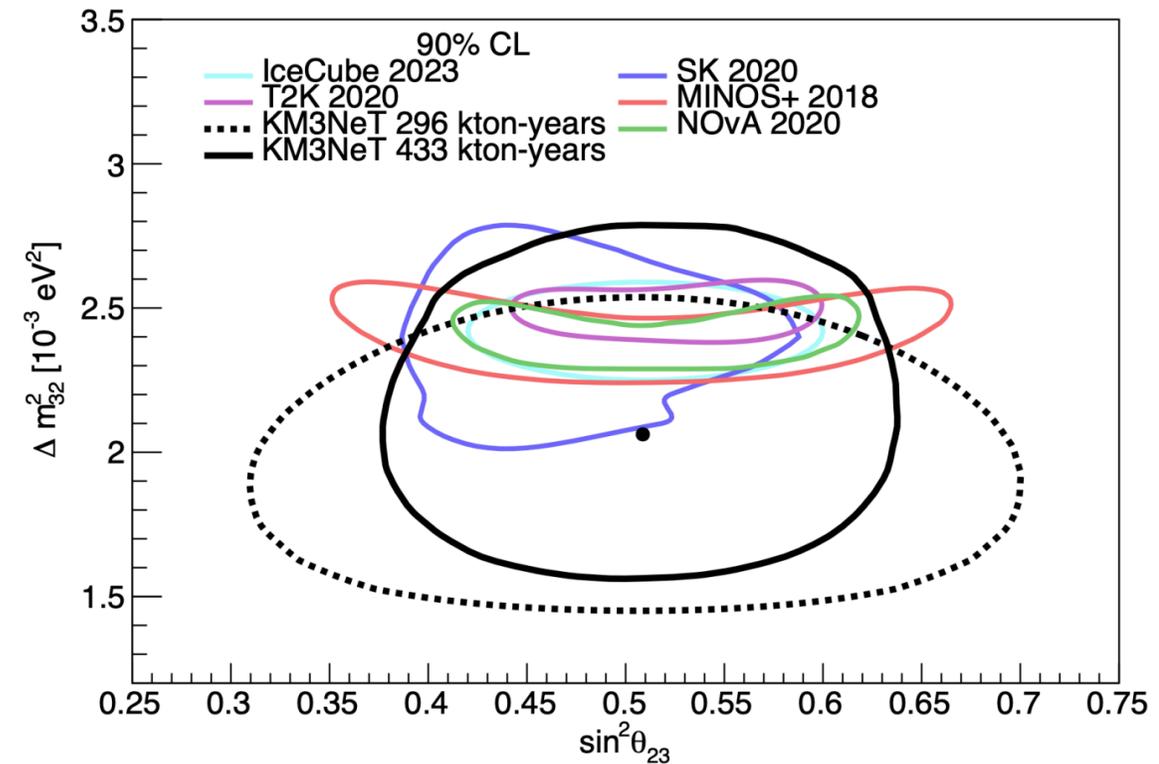
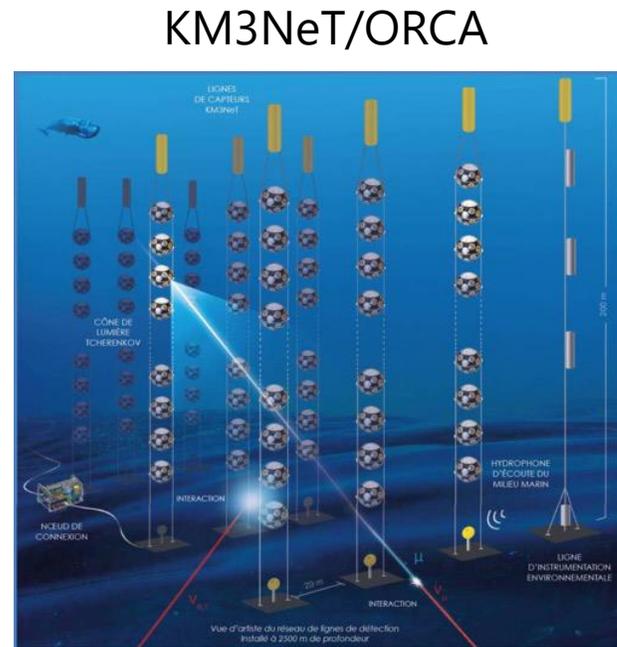
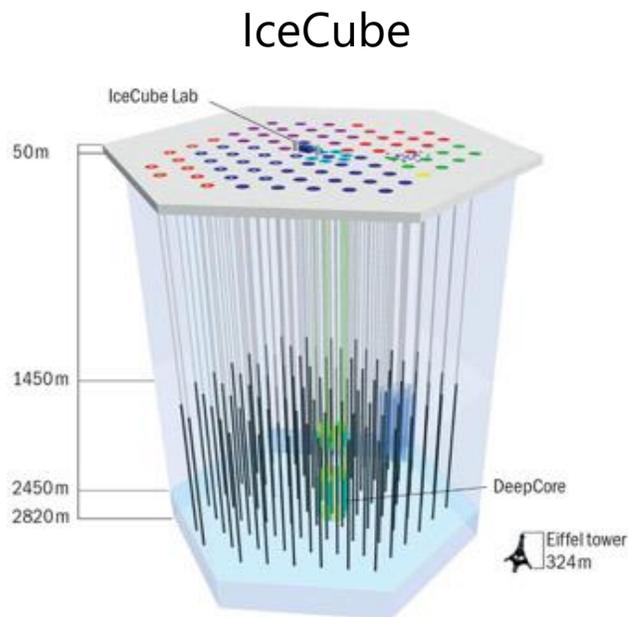


32  $\bar{\nu}_e$  data candidates



# 大型チェレンコフ検出器での大気ニュートリノ測定

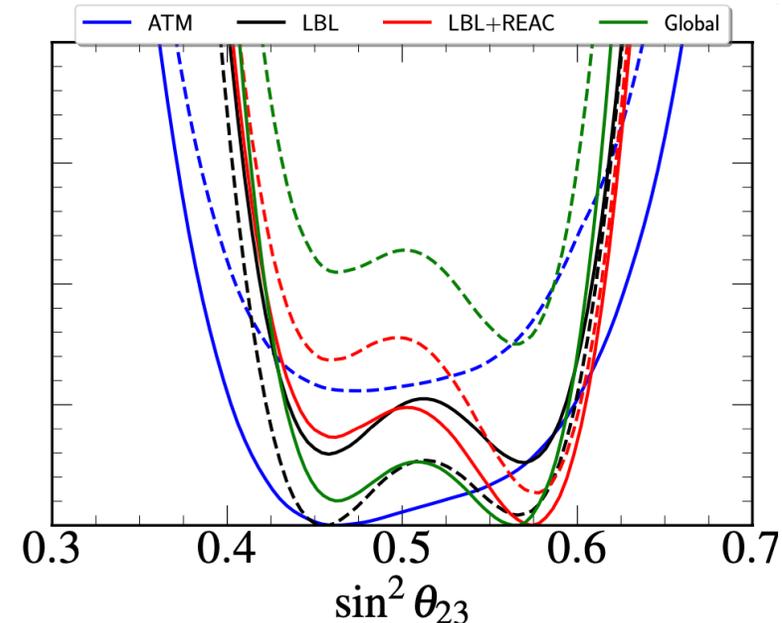
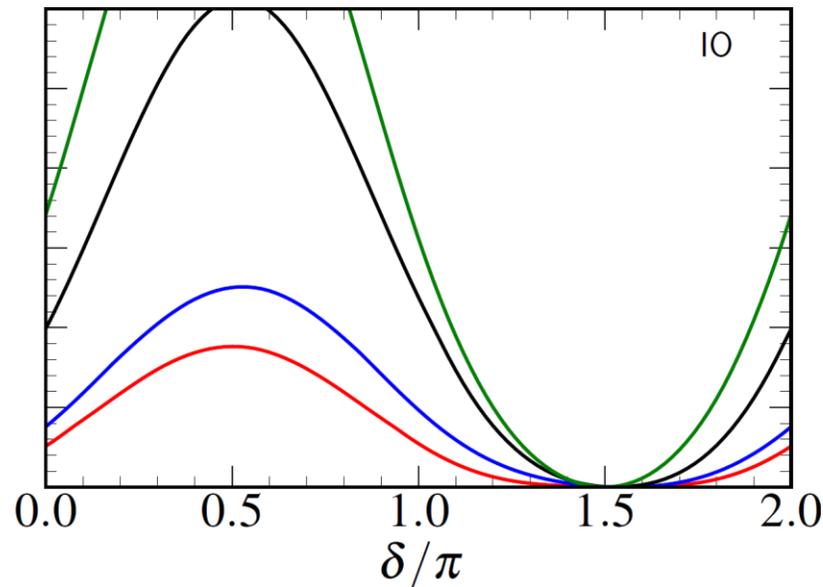
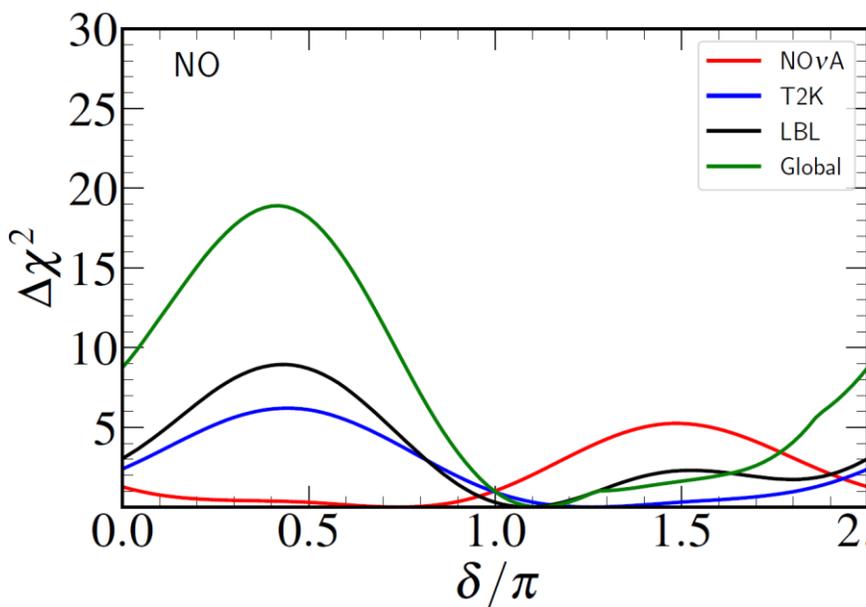
- IceCubeやKM3NeT/ORCAなどの自然中の大型チェレンコフ検出器でも待機ニュートリノの測定をしている。



# グローバルフィット

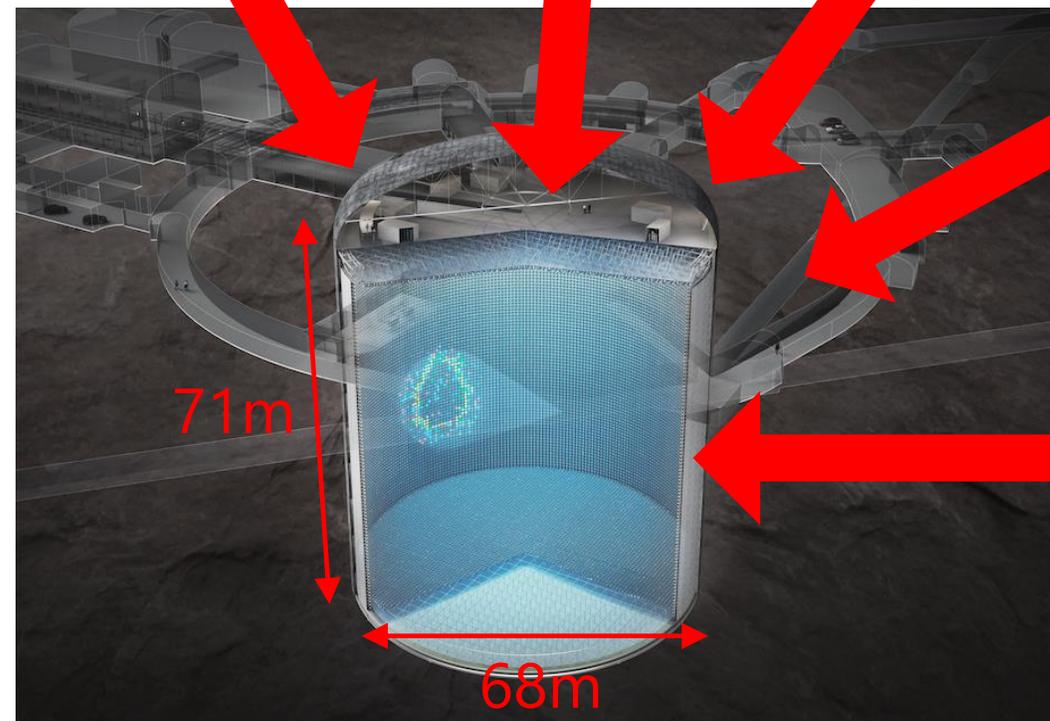
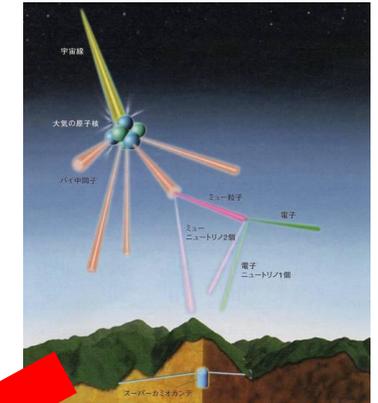
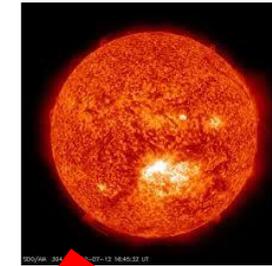
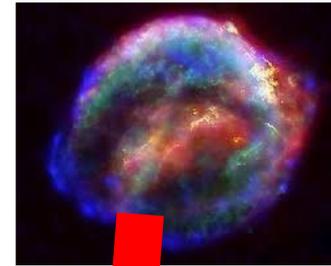
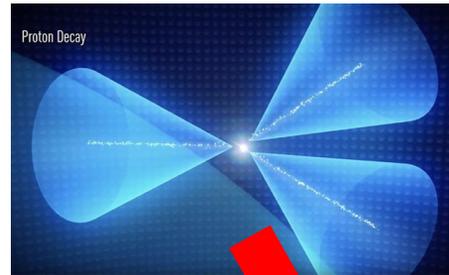
- NOvA実験の最新結果は入っていない。
- 質量順序については逆順序をfavor:  $\Delta\chi^2$ (標準順序 - 逆順序) = 7.5
- 逆順序の場合はずべての実験が $\delta_{CP} = -\pi/2$ をfavor.
- $\theta_{23}$ は45°より大きい領域をfavorするが、45°とも無矛盾。

Valencia Global Fit



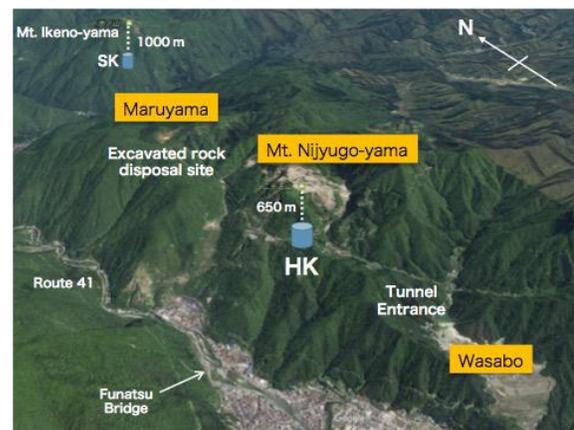
# ハイパーカミオカンデ実験

- スーパーカミオカンデの8.4倍の有効質量をもつハイパーカミオカンデを建設中。
- 陽子崩壊や超新星ニュートリノの検出に加えて、太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、J-PARCからの加速器ニュートリノを用いたニュートリノ振動の精密測定が最重要課題。

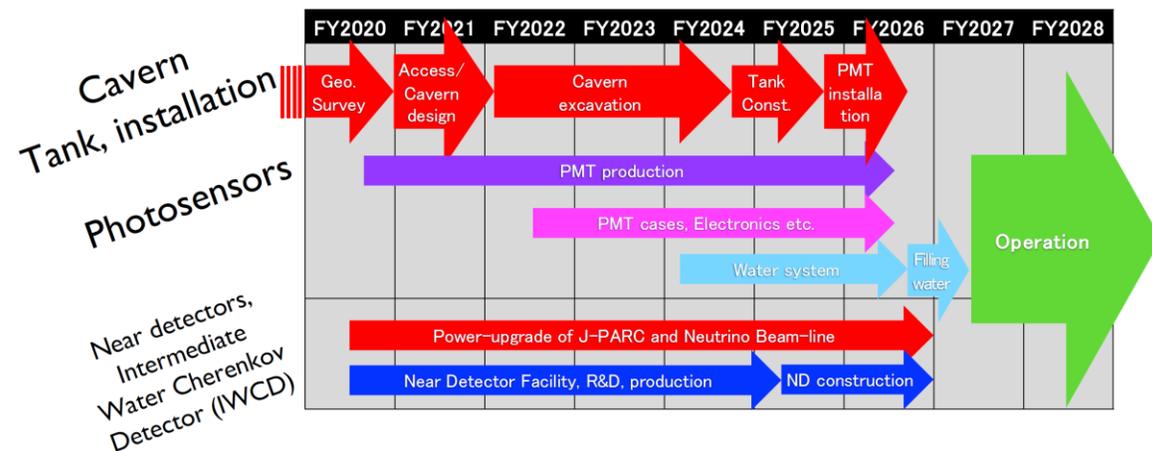
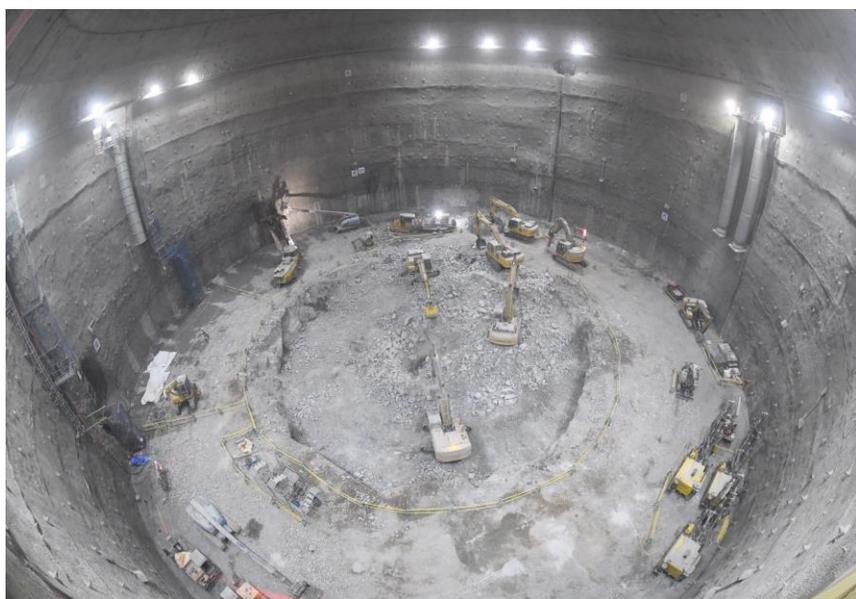


# ハイパーカミオカンデの建設状況

- 2027年からのデータ取得開始に向けて建設中。



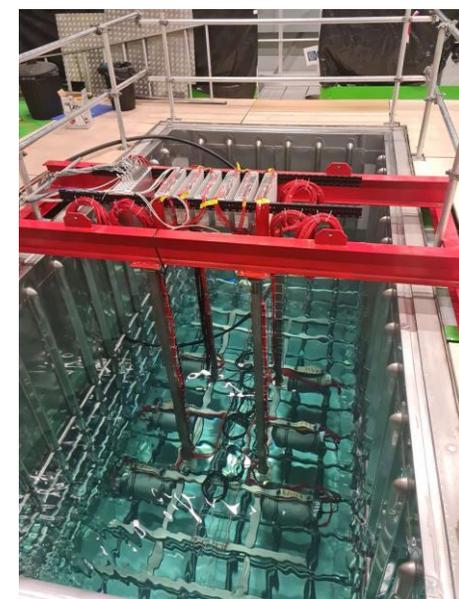
空洞掘削



光電子増倍管試験

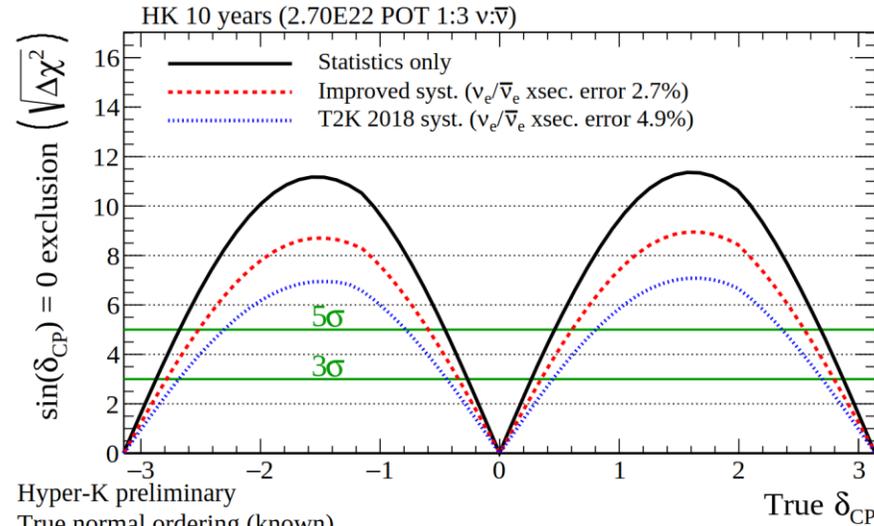


水中エレクトロニクス試験

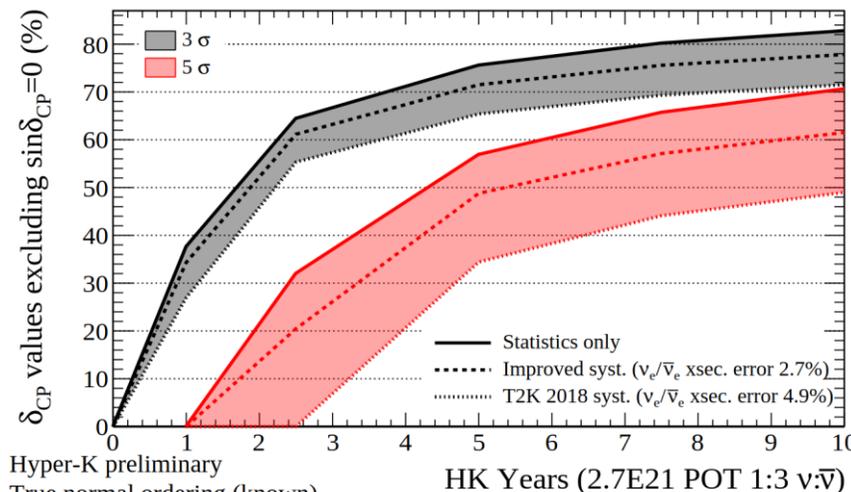


# ハイパーカミオカンデの期待感度

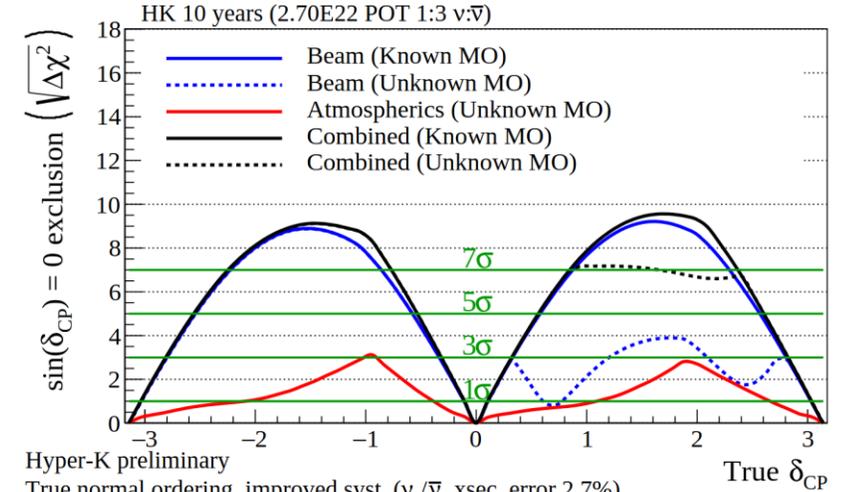
- 質量順序がわかっていなくても大気ニュートリノと統合解析をすることで感度を向上できる。
- 系統誤差の影響が大きい。
- 多くの $\delta_{CP}$ の領域においてCP対称性の破れの $5\sigma$ での発見が可能になる。



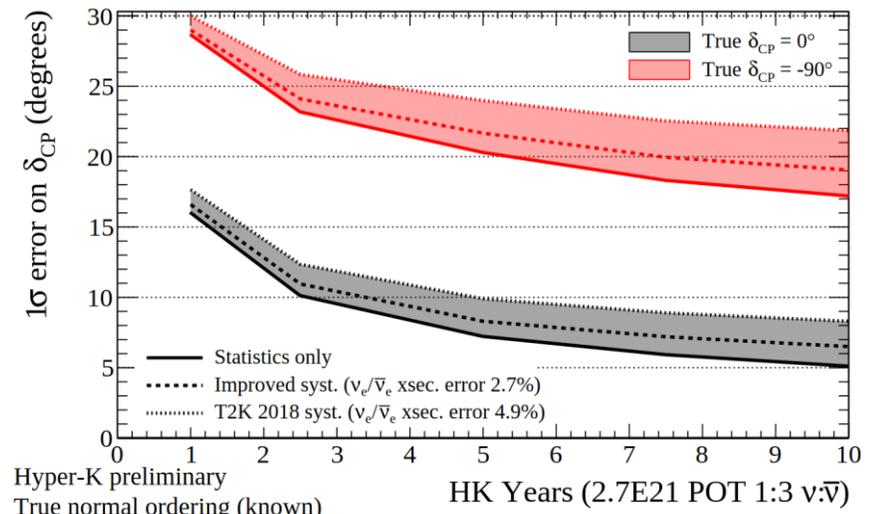
Hyper-K preliminary  
 True normal ordering (known)  
 $\sin^2(\theta_{13}) = 0.0218$   $\sin^2(\theta_{23}) = 0.528$   $|\Delta m_{32}^2| = 2.509E-3$  eV<sup>2</sup>/c<sup>4</sup>



Hyper-K preliminary  
 True normal ordering (known)  
 $\sin^2(\theta_{13}) = 0.0218$   $\sin^2(\theta_{23}) = 0.528$   $|\Delta m_{32}^2| = 2.509E-3$  eV<sup>2</sup>/c<sup>4</sup>



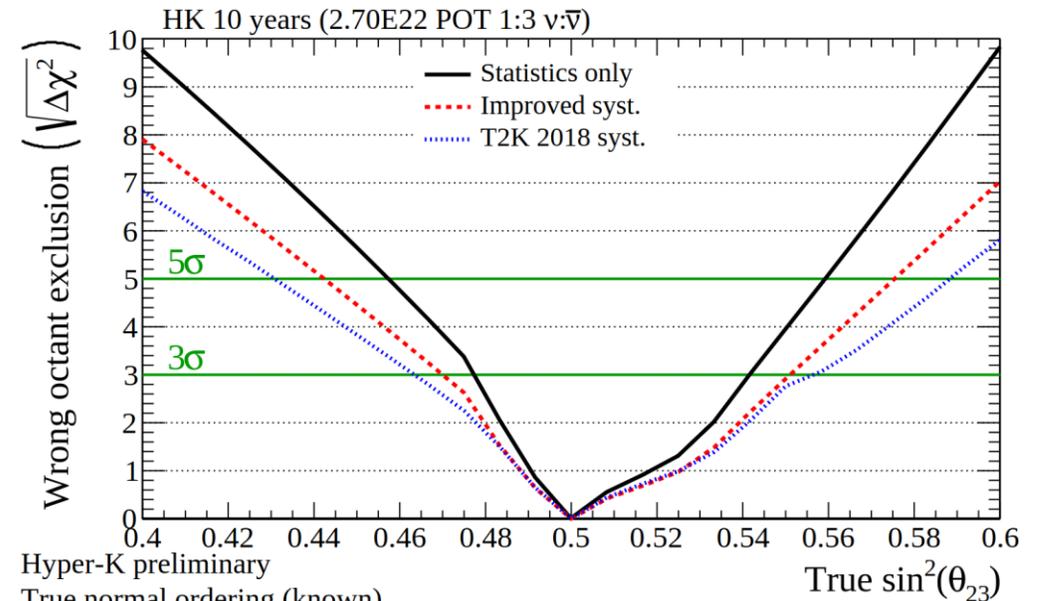
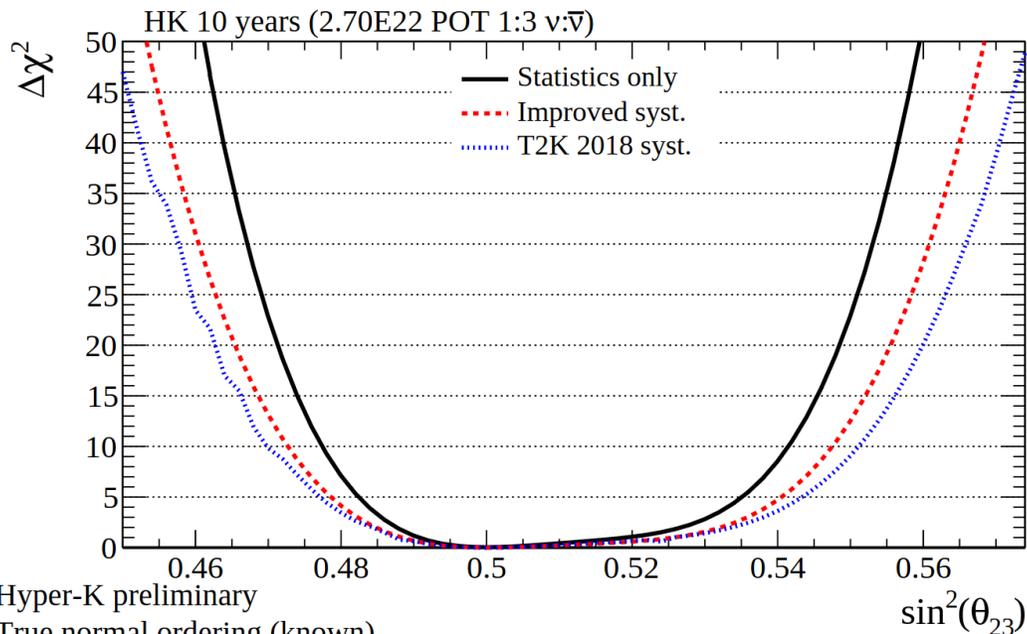
Hyper-K preliminary  
 True normal ordering, improved syst. ( $\nu_e/\bar{\nu}_e$  xsec. error 2.7%)  
 $\sin^2(\theta_{13}) = 0.0218$   $\sin^2(\theta_{23}) = 0.528$   $|\Delta m_{32}^2| = 2.509 \times 10^{-3}$  eV<sup>2</sup>/c<sup>4</sup>



Hyper-K preliminary  
 True normal ordering (known)  
 $\sin^2(\theta_{13}) = 0.0218$   $\sin^2(\theta_{23}) = 0.528$   $|\Delta m_{32}^2| = 2.509E-3$  eV<sup>2</sup>/c<sup>4</sup>

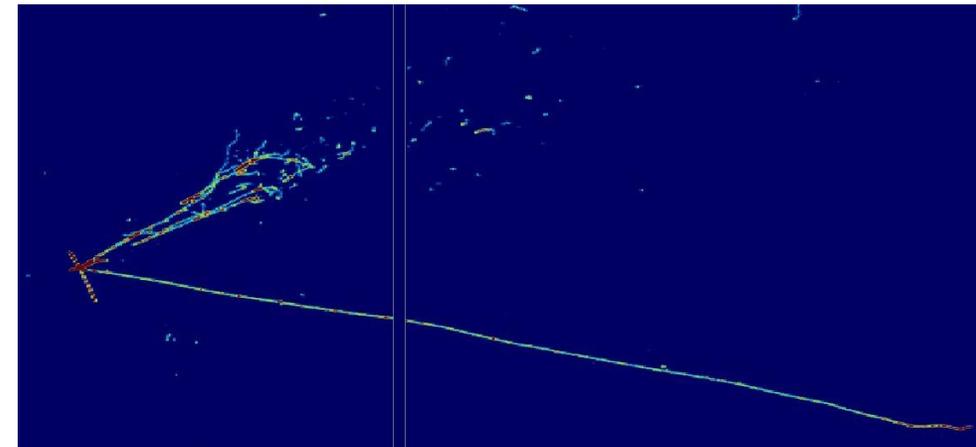
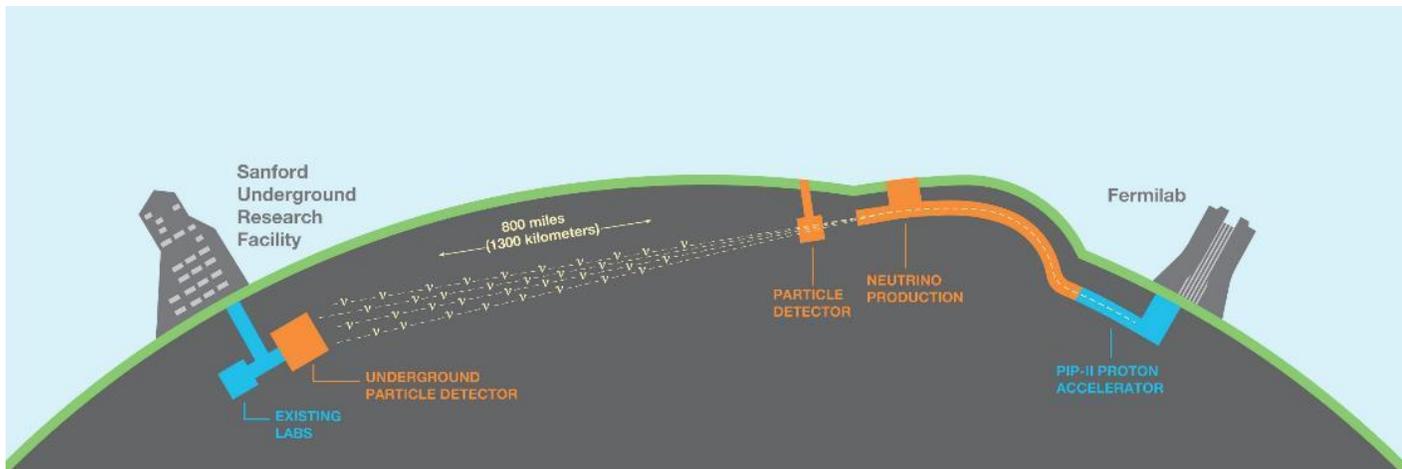
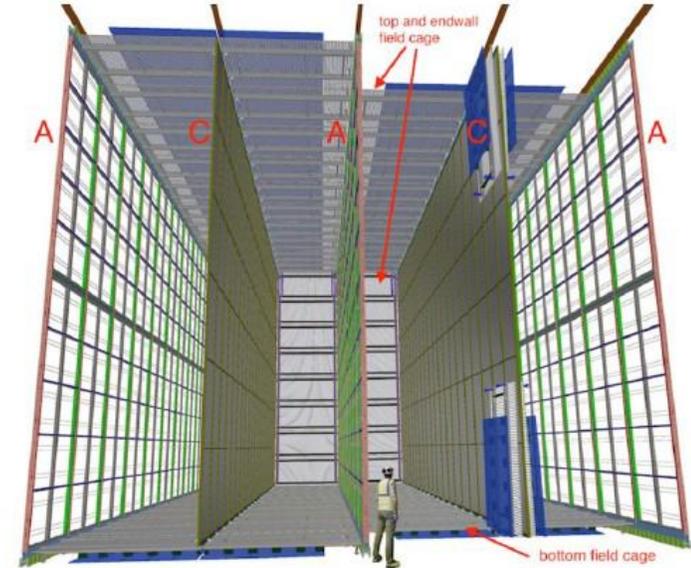
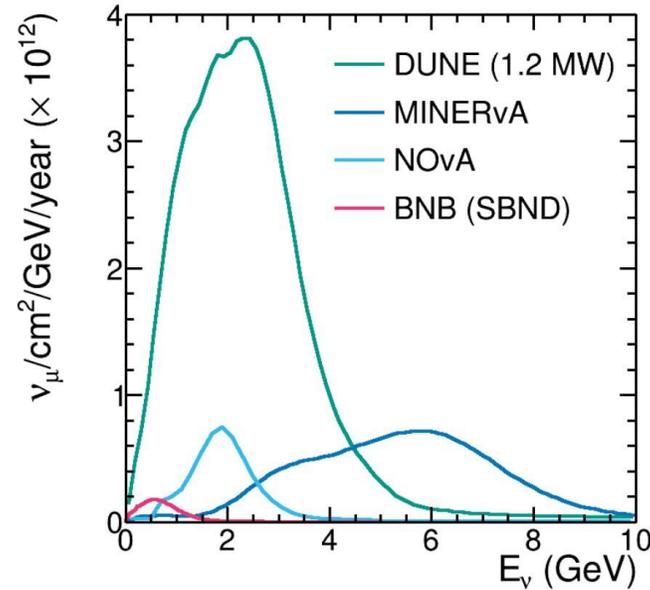
# ハイパーカミオカンデの期待感度

- 感度は $\theta_{23}$ の真の値に強く依存する。
- $\sin^2\theta_{23} < 0.47$ または $\sin^2\theta_{23} > 0.55$ の領域で $3\sigma$ で $\theta_{23}$ が $45^\circ$ より大きい小さいかを決定できる。



# DUNE実験

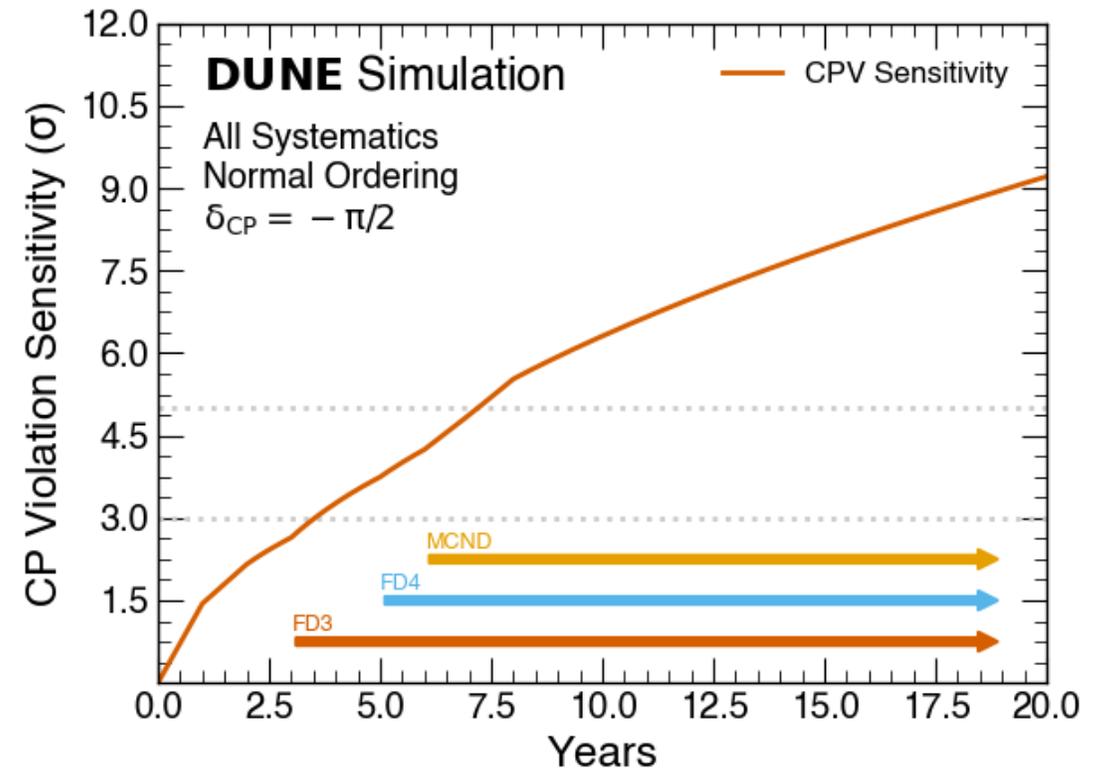
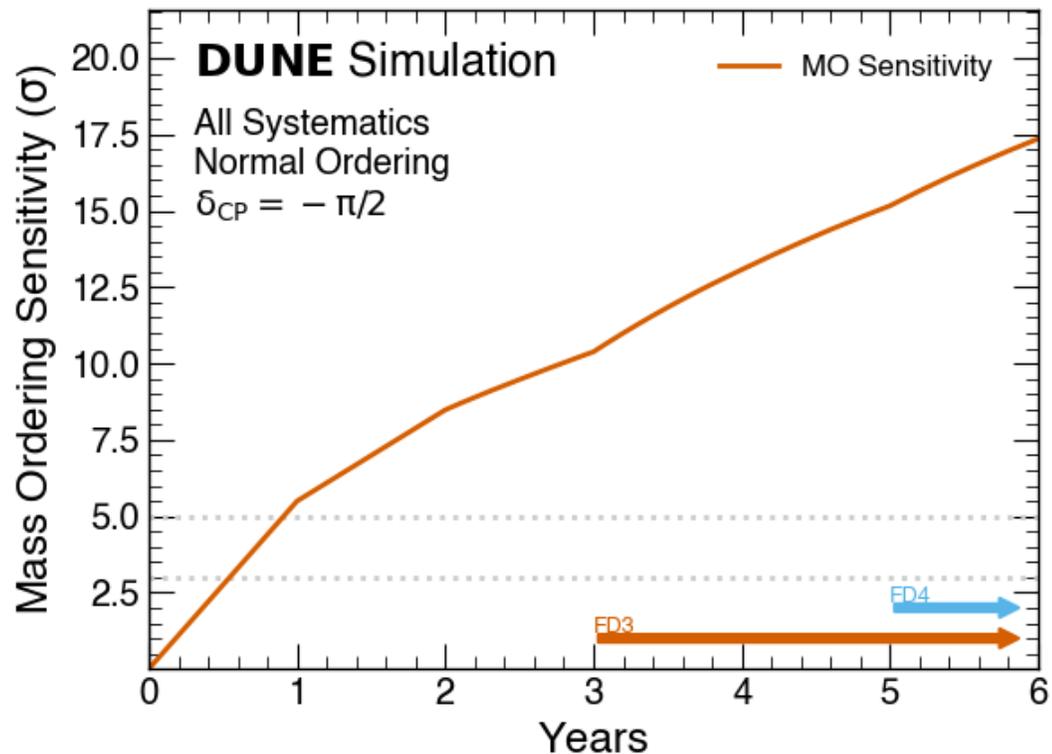
- 米国における次世代長基線ニュートリノ振動実験。(基線長1300km)
- エネルギー幅の広い大強度ニュートリノビーム。
- 40kt有効質量の液体アルゴンTPC。
- 後置検出器は2027年にインストール予定。



# DUNE実験の期待感度

- 1年の運転で5 $\sigma$ で質量順序を決定。
- 3.5年の運転でCP対称性の破れの感度が3.5 $\sigma$  (標準順序,  $\delta_{CP} = -\pi/2$ の場合)

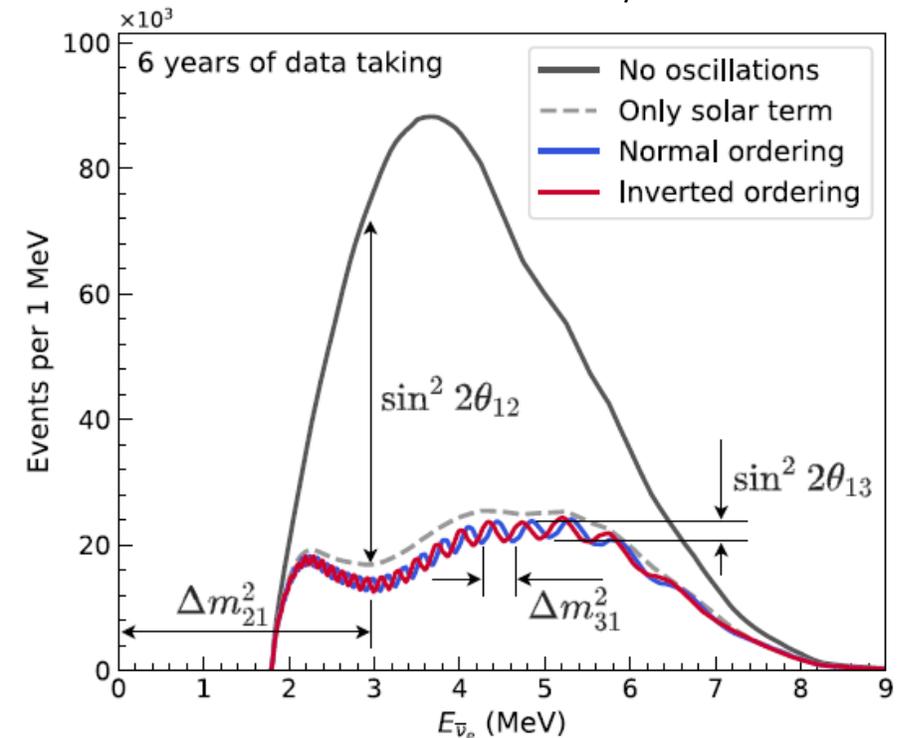
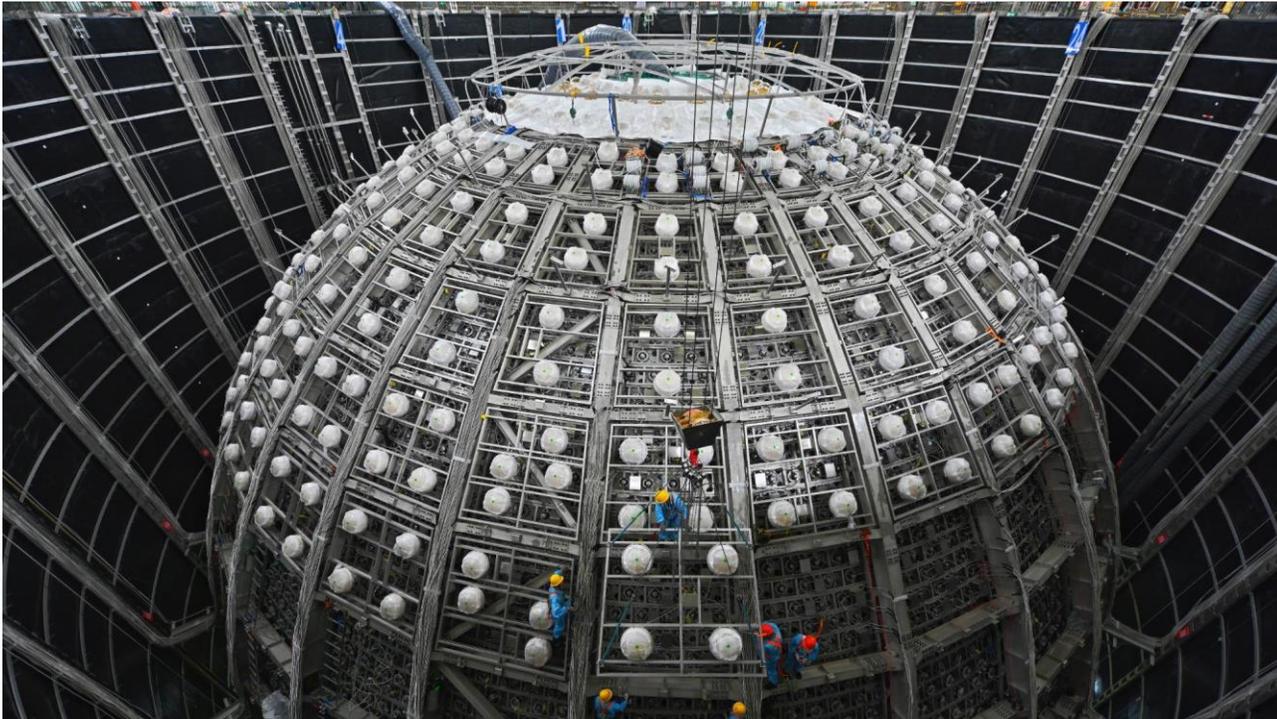
Eur. Phys. J. C 80, 978 (2020)



# JUNO実験

- 中国における次世代原子炉ニュートリノ実験。
- 20kt液体シンチレータ検出器。
- 2024年中に検出器の建設が完了し、シンチレータの注入を開始する予定。

Jun Cao, Neutrino 2024

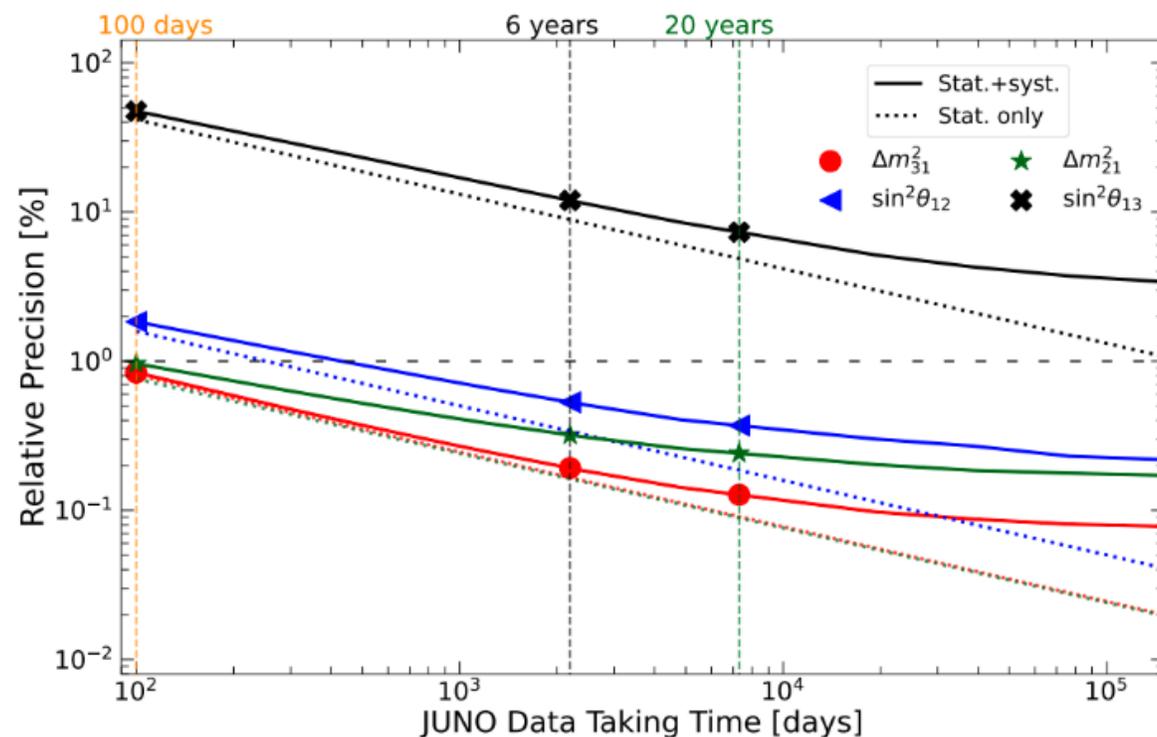
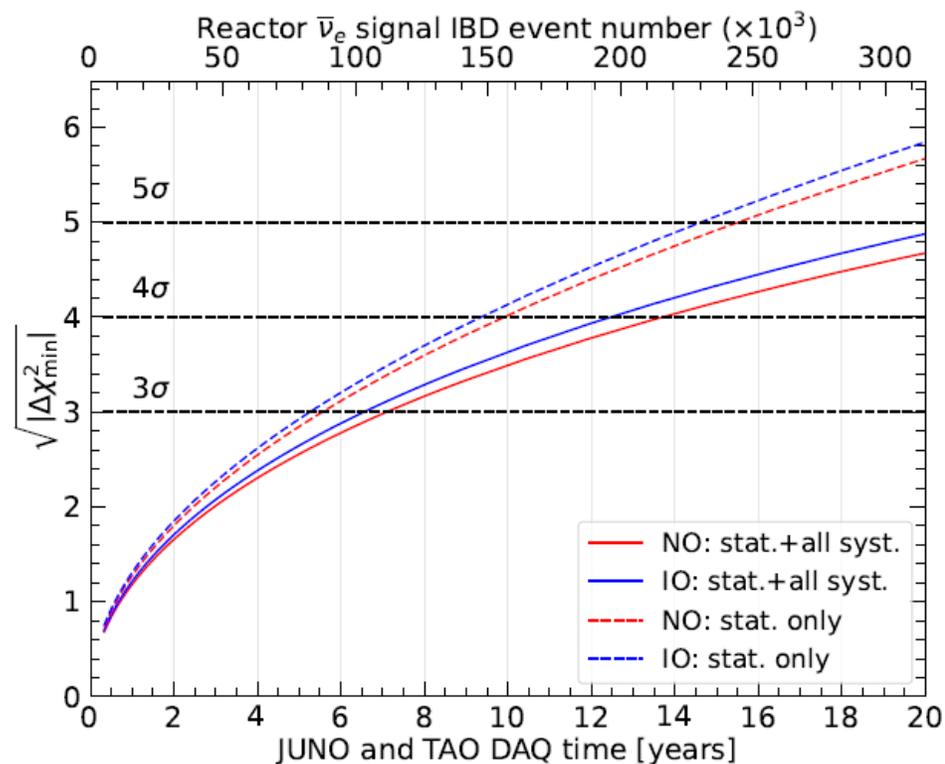


# JUNO実験の期待感度

- 6年で3 $\sigma$ で質量順序を測定。
- そのほかの振動パラメータも精密測定。

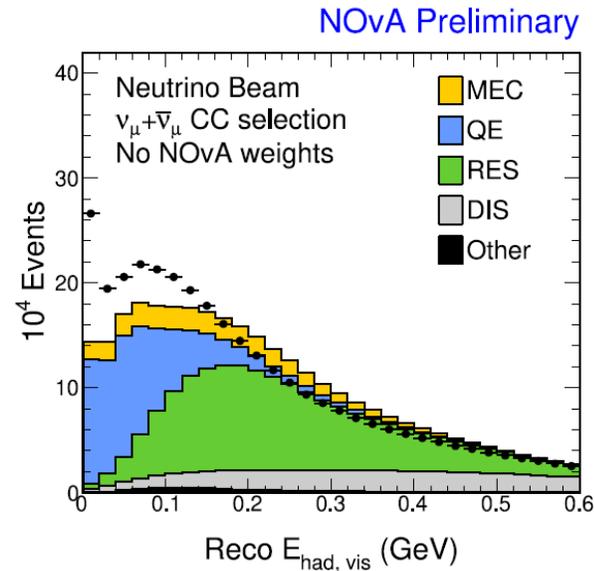
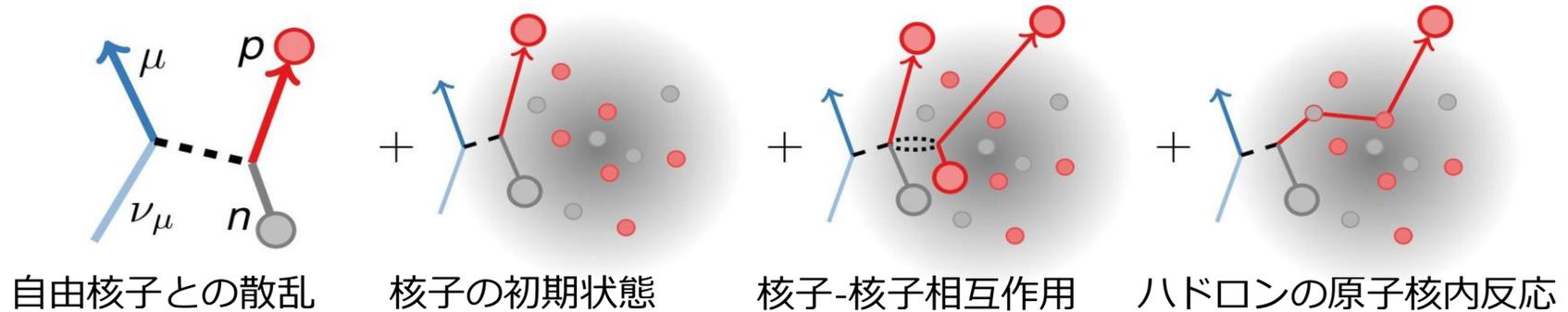
$$\mathcal{P}(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13}(\cos^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{31} + \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{32}) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta_{21},$$

Jun Cao, Neutrino 2024

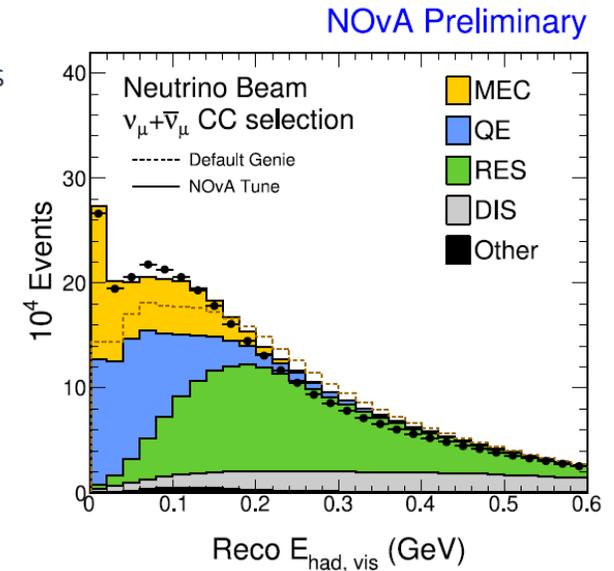
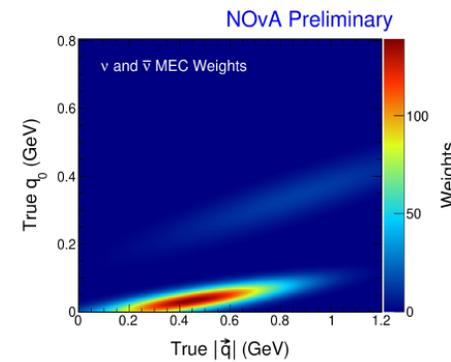


# 将来のニュートリノ振動実験についての所見

- 実はニュートリノ原子核反応はわからないことだらけ。  
(We don't know what we don't know.)
- これまでのニュートリノ振動実験はわからないなりに何とかモデル化して系統誤差を評価しているが、怪しいことが多い。

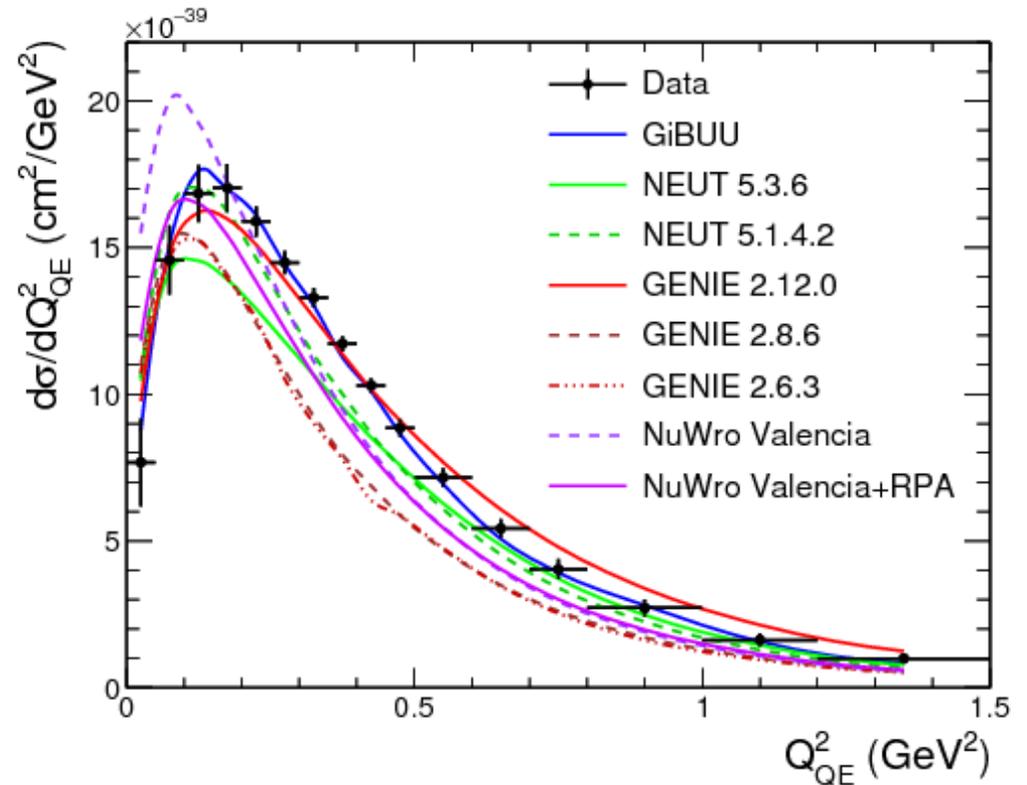
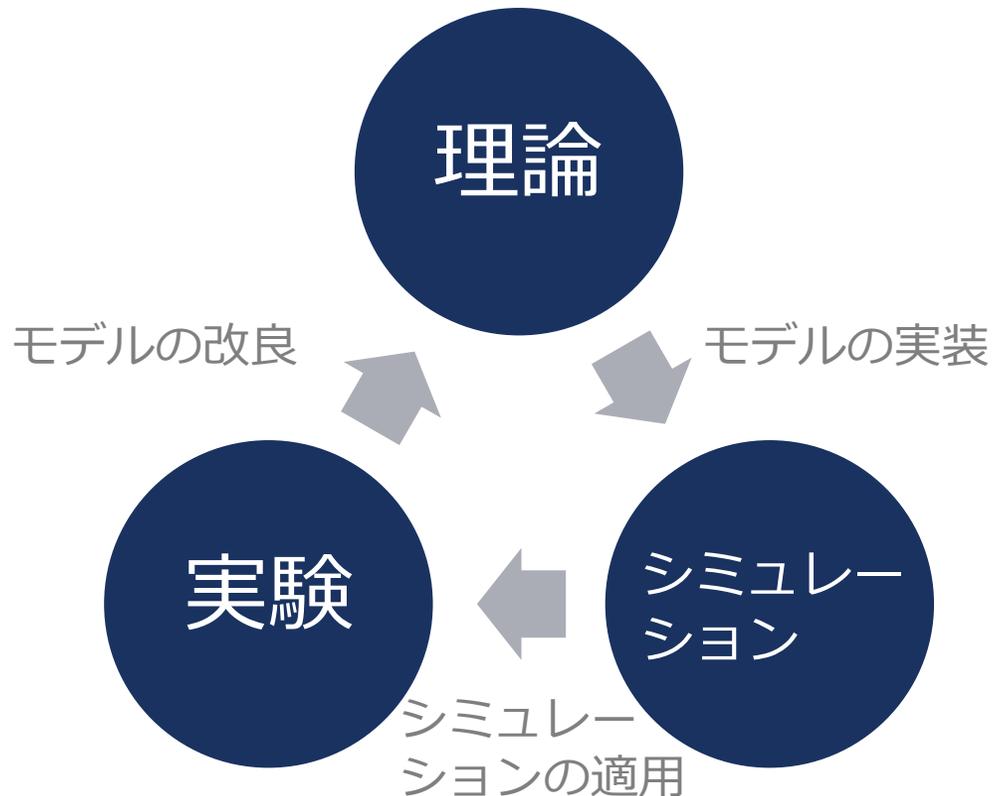


Fitted double-Gaussian weights  
applied to true CC MEC



# 将来のニュートリノ振動実験についての所見

- ハイパーカミオカンデ実験やDUNE実験では数年のデータ取得で系統誤差が支配的になる。
- ニュートリノ原子核反応についての正確な理解とモデル化が必要。



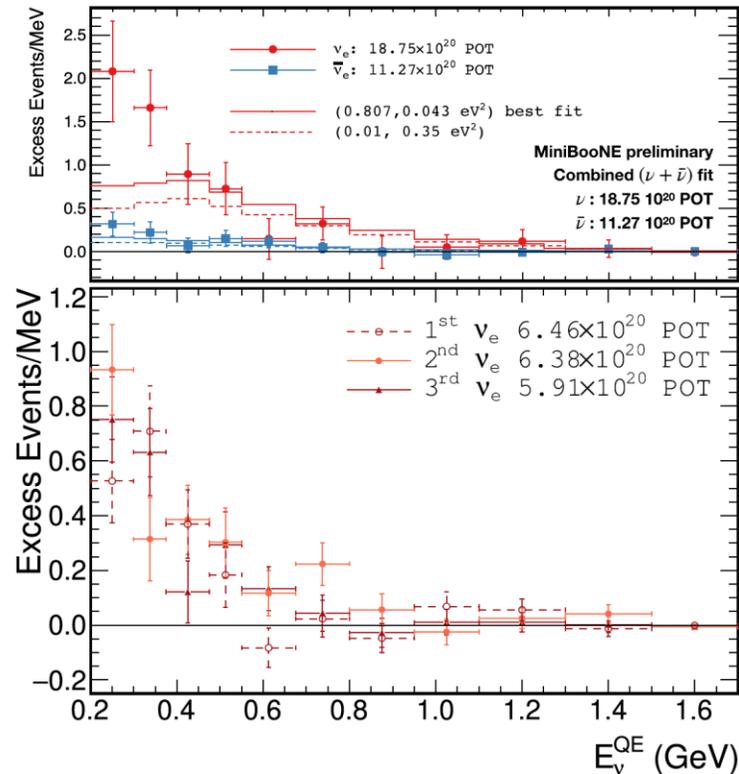
# まとめ

- ニュートリノ振動の精密測定によりニュートリノの多くの性質が明らかになったが依然として謎が残されている。
  - CP対称性は破れているか?
  - 混合角 $\theta_{23}$ は最大混合か?
  - 質量順序は標準順序か逆順序か?
- T2K実験、スーパーカミオカンデ実験、NOvA実験により測定が進められているが、決定的な結論が得られていない。
- 10年以内にハイパーカミオカンデ実験、DUNE実験、JUNO実験により測定精度が大幅に改良され、謎が解決することが期待される。
- 系統誤差が支配的になるため、ニュートリノ原子核反応の正確な理解が鍵を握ることになると思う。

# おまけ (ステライルニュートリノ)

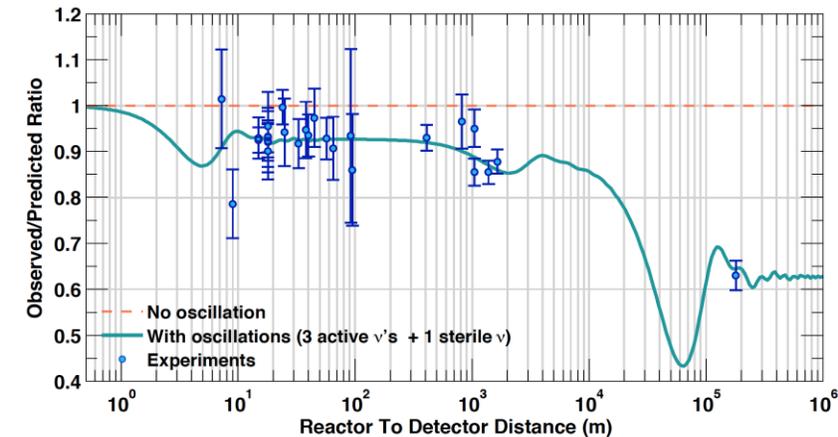
- MiniBooNEでの $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出現や原子炉での $\bar{\nu}_e$ 消失など多くのアノマリーが報告されている。
- それぞれを別々にステライルニュートリノで説明することができても、多くアノマリーを同時に説明することができない。
- Fermilabの短基線ニュートリノプログラムや日本のJSNS<sup>2</sup>での検証が待たれる。

MiniBooNEでの $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出現アノマリー



A.A. Aguilar-Arevalo et al. [MiniBooNE],  
Phys. Rev. D 103 (2021) 052002

原子炉での $\bar{\nu}_e$ 消失アノマリー



G. Mention et al.  
Phys. Rev. D 83, 073006 (2011)