

長基線実験における ニュートリノ振動感度の研究

本間芽糸, 小汐由介, 日野陽太, 坂下健^A, Megan Friend^A, 池田一得^B
岡大理, KEK素核研^A, 東大宇宙線研^B

2024年3月18日 日本物理学会 春季大会

長基線ニュートリノ振動実験

長基線ニュートリノ実験で説明が期待されるニュートリノ振動パラメータ

複素位相 δ_{CP}

質量階層性 (Δm_{23}^2 の符号)

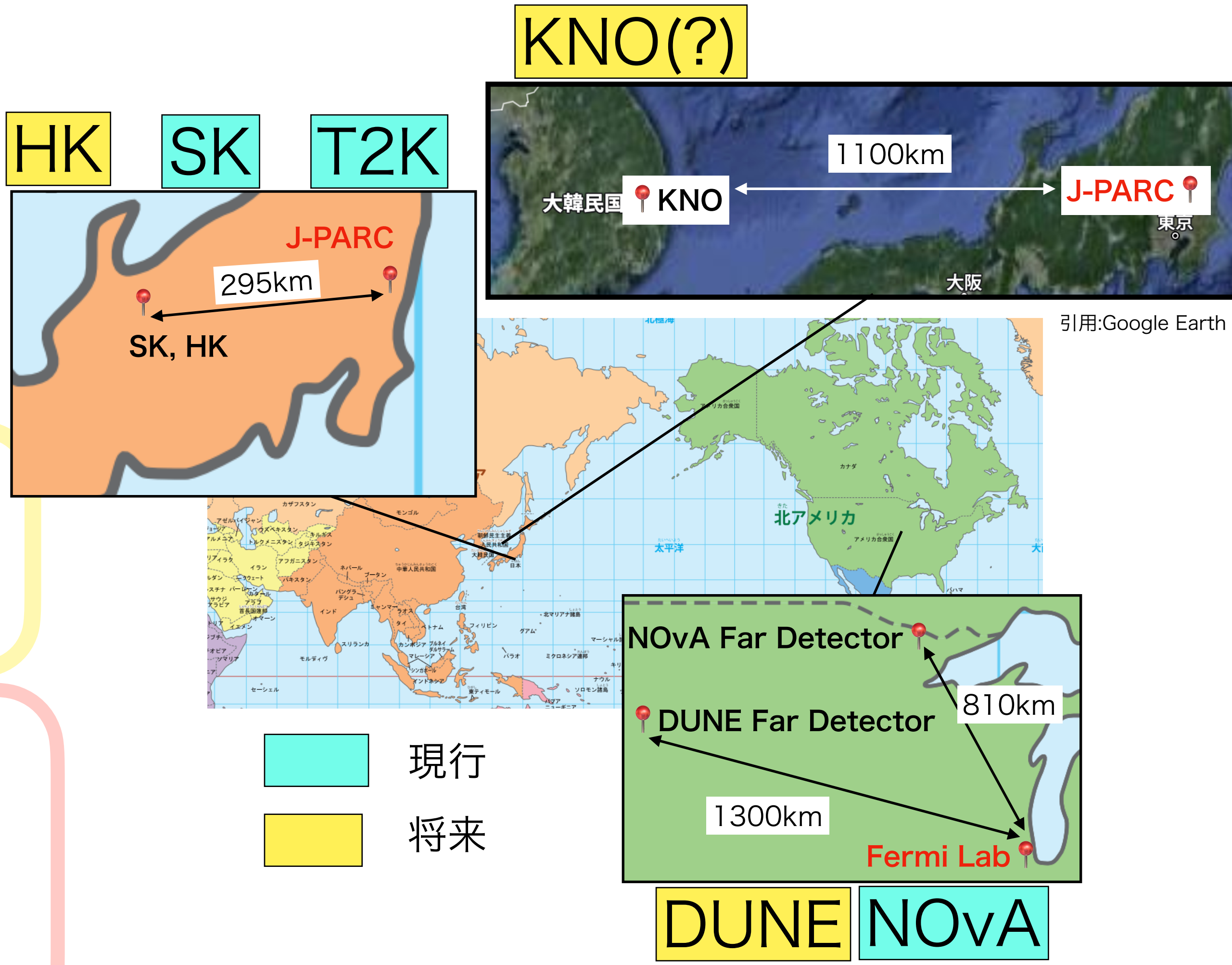
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad \updownarrow \quad |\Delta m_{32}^2|$$

$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 0.1 \sin 2\theta_{13} \sin \delta_{CP}$ の測定により
複素位相 δ_{CP} の精密測定が可能

飛行距離Lの異なる長基線実験を組み合わせることで
物質効果から Δm_{23}^2 の符号を決定できる

$$A_{\text{sym}} \sim \mp 4AL \pm \frac{0.1 \sin \delta_{CP}}{\sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13}}$$

傾きが負：順階層 $m_1 < m_2 < m_3$
傾きが正：逆階層 $m_3 < m_1 < m_2$



特徴

- 元々はT2K実験やHK実験の将来計画のために開発された振動パラメータの調査に特化したシミュレーションツール
- 振動パラメータの感度見積りの計算原理がシンプル

系統誤差が共分散行列で表され、複雑な振動解析を行わずに振動パラメータ感度のフィットを非常に高速に行うことができる

本研究では、統計誤差のみを考慮することによって、長基線ニュートリノ実験で解明できる振動パラメータの将来感度の見積りを行う

本研究のモチベーション

現在計画されている将来実験, さらに次の世代の長基線ニュートリノ実験の可能性を探る
→実験を計画する際の1つの指標となり得る

- J-PARC MR Beam Power : 現在0.76MW, 将来1.3MW, 3.2MW

引用:H. Hotchi et al., JPS Conf. Proc. 8, 012008 (2015)

- $\nu : \bar{\nu} = 1:3$

- 振動パラメータ (input)

質量階層性	順階層
$\sin^2(2\theta_{12})$	0.845
$\sin^2(\theta_{23})$	0.500
$\sin^2(2\theta_{13})$	0.0914
Δm_{21}^2	$7.41 \times 10^{-5} \text{eV}^2$
Δm_{32}^2	$2.433 \times 10^{-3} \text{eV}^2$

引用:PDG2023 14. Neutrino Masses, Mixing, and Oscillations, T2K-TN-151

以上の設定で δ_{CP} の精度を見積もる

Simple Fitter 感度見積りの手順

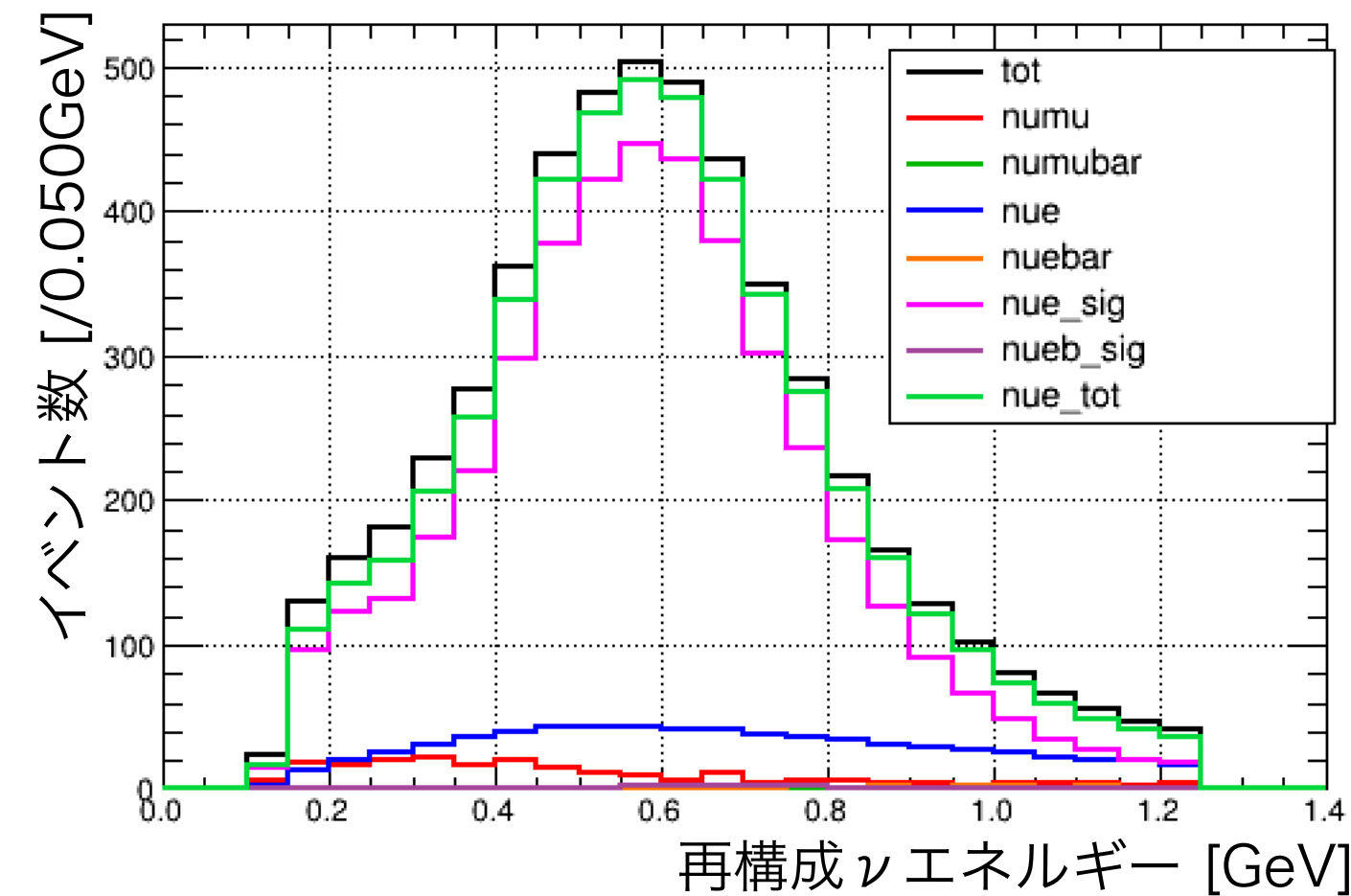
5

Step 1

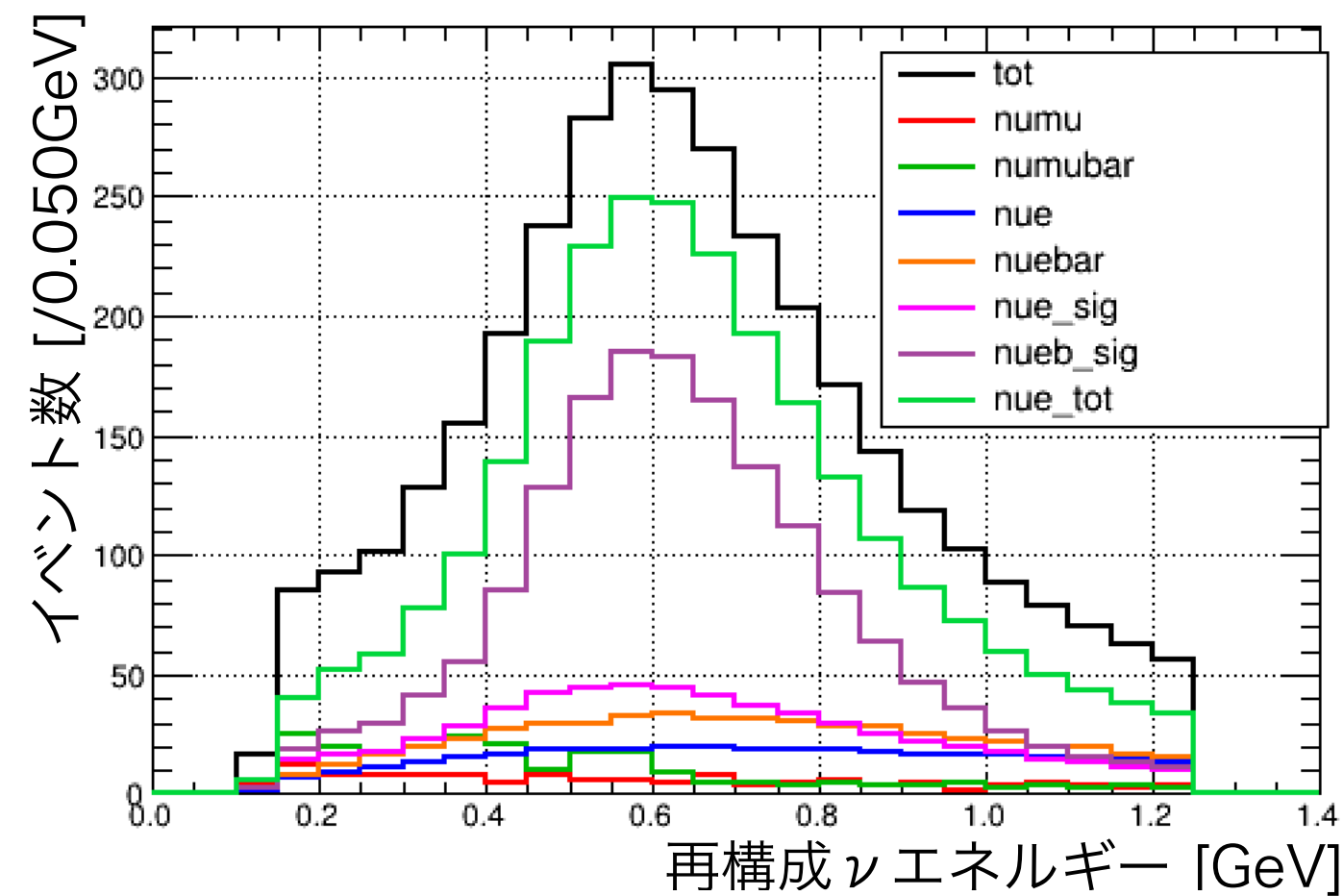
振動パラメータの値を設定し、その値を用いて真の再構成エネルギー
スペクトルを作成

$$\delta_{CP} = -90[\text{deg}], \sin^2(2\theta_{13}) = 0.0914$$

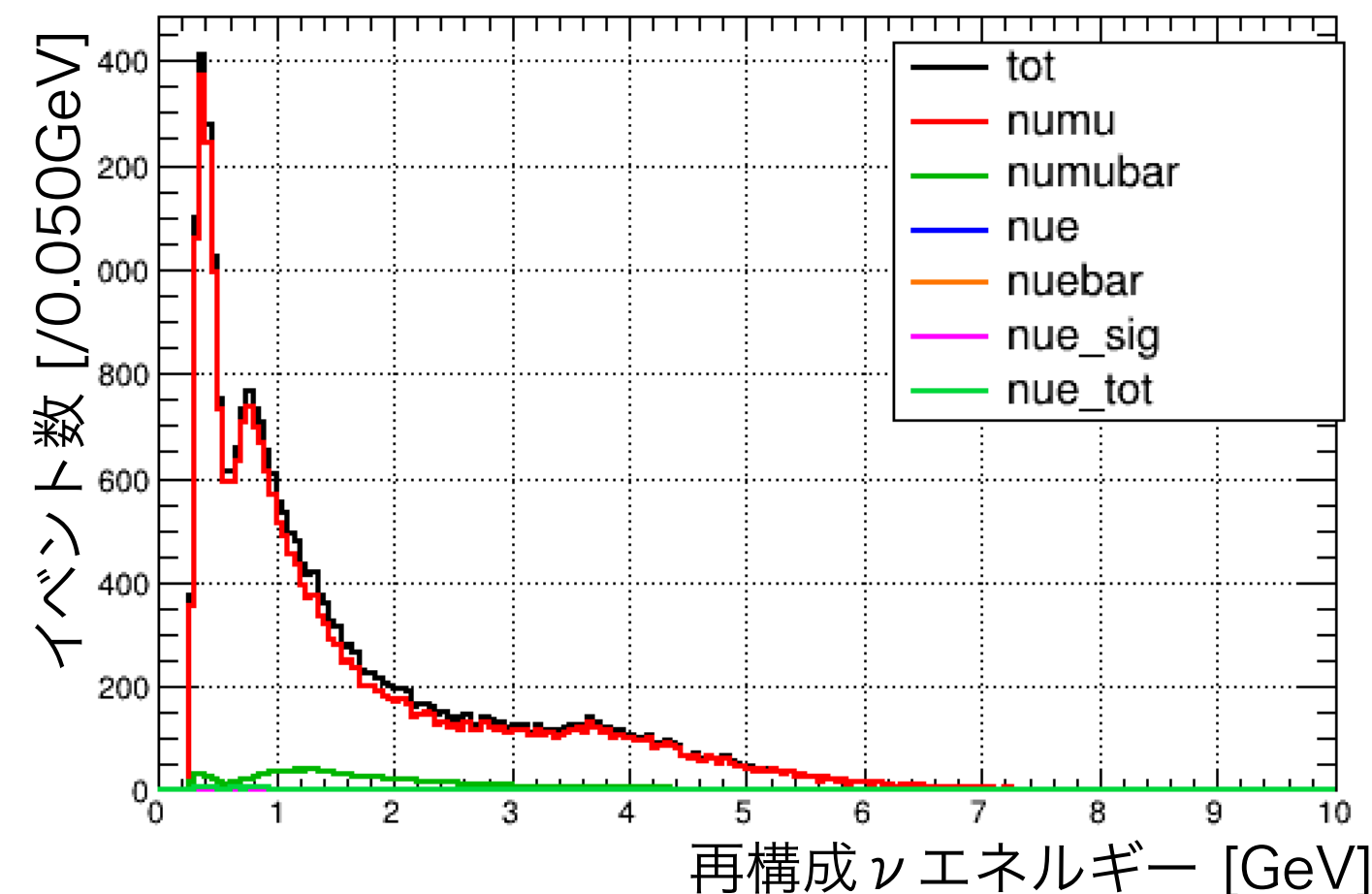
App ν mode



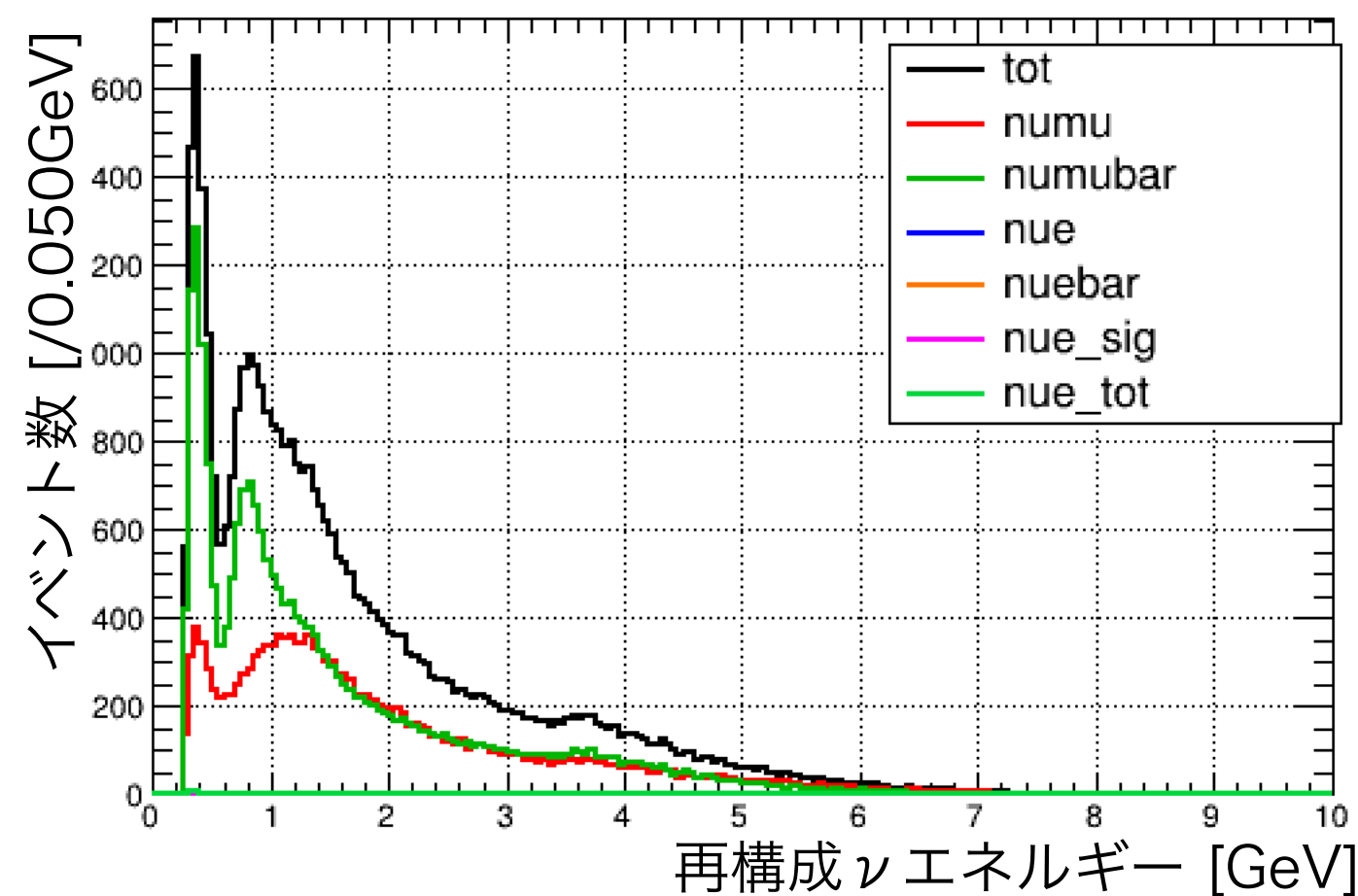
App $\bar{\nu}$ mode



Dis ν mode



Dis $\bar{\nu}$ mode



Step 2

真の再構成エネルギースペクトル

各エネルギービンでのイベント数を比較し χ^2 を求める

試行振動パラメータを用いて計算した
再構成エネルギースペクトル

試行振動パラメータの範囲

$$-180 \leq \delta_{CP} \leq 180 [\text{deg}]$$

$$0.03 \leq \sin^2(2\theta_{13}) \leq 0.17$$

χ^2 定義

$$\chi^2 = \chi_{\text{T2K}}^2 + \chi_{\text{react}}^2$$

引用:T2K-TN-151,
X. Ji, W. Gu, X. Qian, H. Wei, and C. Zhang,
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 961, 163677 (2020).

ポアソン分布の負の対数尤度

$$\chi_{\text{T2K}}^2 = \{-2 \ln L\}_{\nu, app} + \{-2 \ln L\}_{\nu, dis} + \{-2 \ln L\}_{\bar{\nu}, app} + \{-2 \ln L\}_{\bar{\nu}, dis}$$

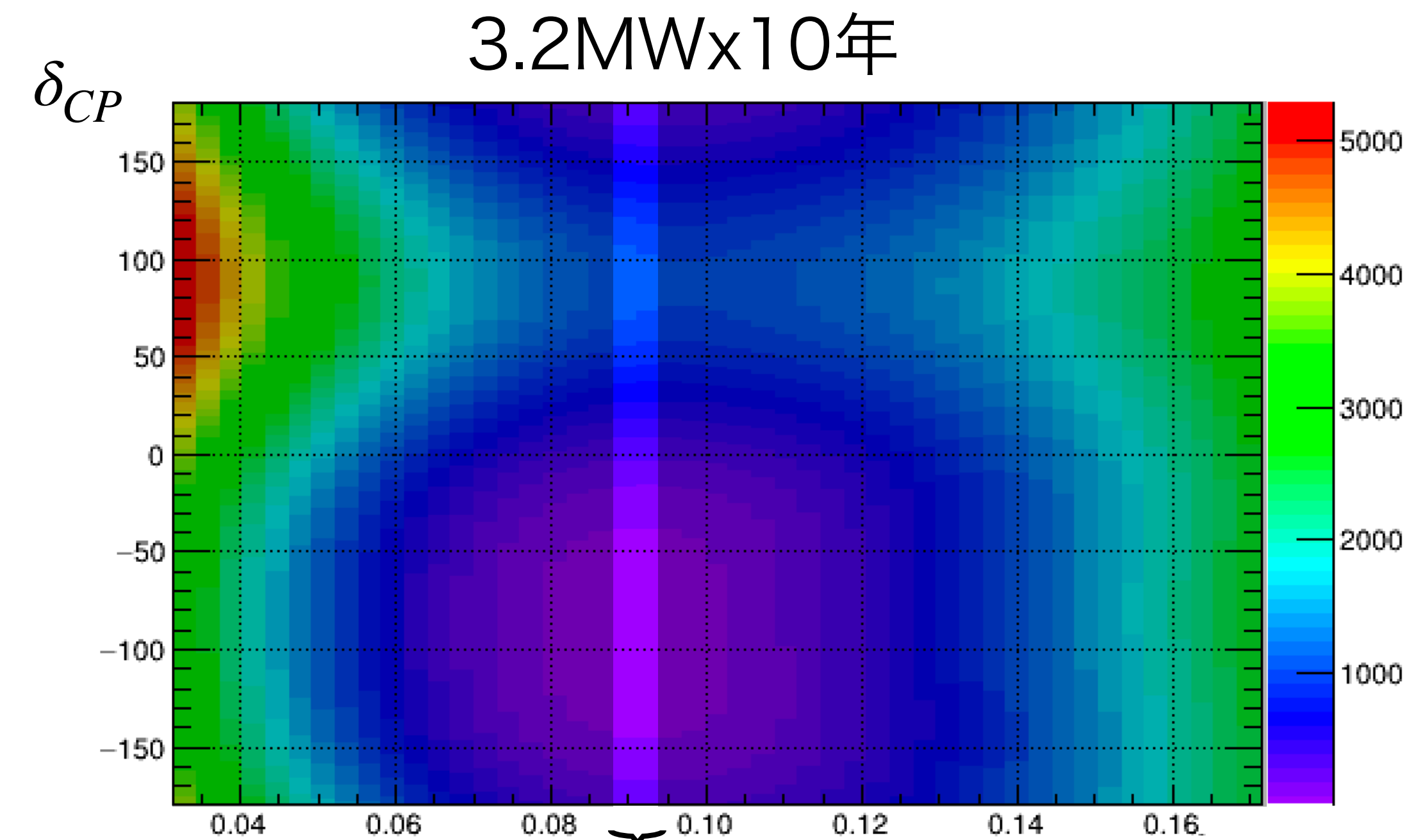
$$-2 \ln L = \sum_{\text{energybin } i} \left(N_{\text{true}, i} - N_{\text{test}, i} + N_{\text{test}, i} \ln \frac{N_{\text{test}, i}}{N_{\text{true}, i}} \right)$$

原子炉実験による $\sin^2(2\theta_{13})$ の範囲の制約

$$\chi_{\text{react}}^2 = \frac{(\sin^2 2\theta_{13} - \sin^2 2\theta'_{13})^2}{\sigma^2}$$

$$\text{true : } \sin^2 2\theta_{13} = 0.0914$$

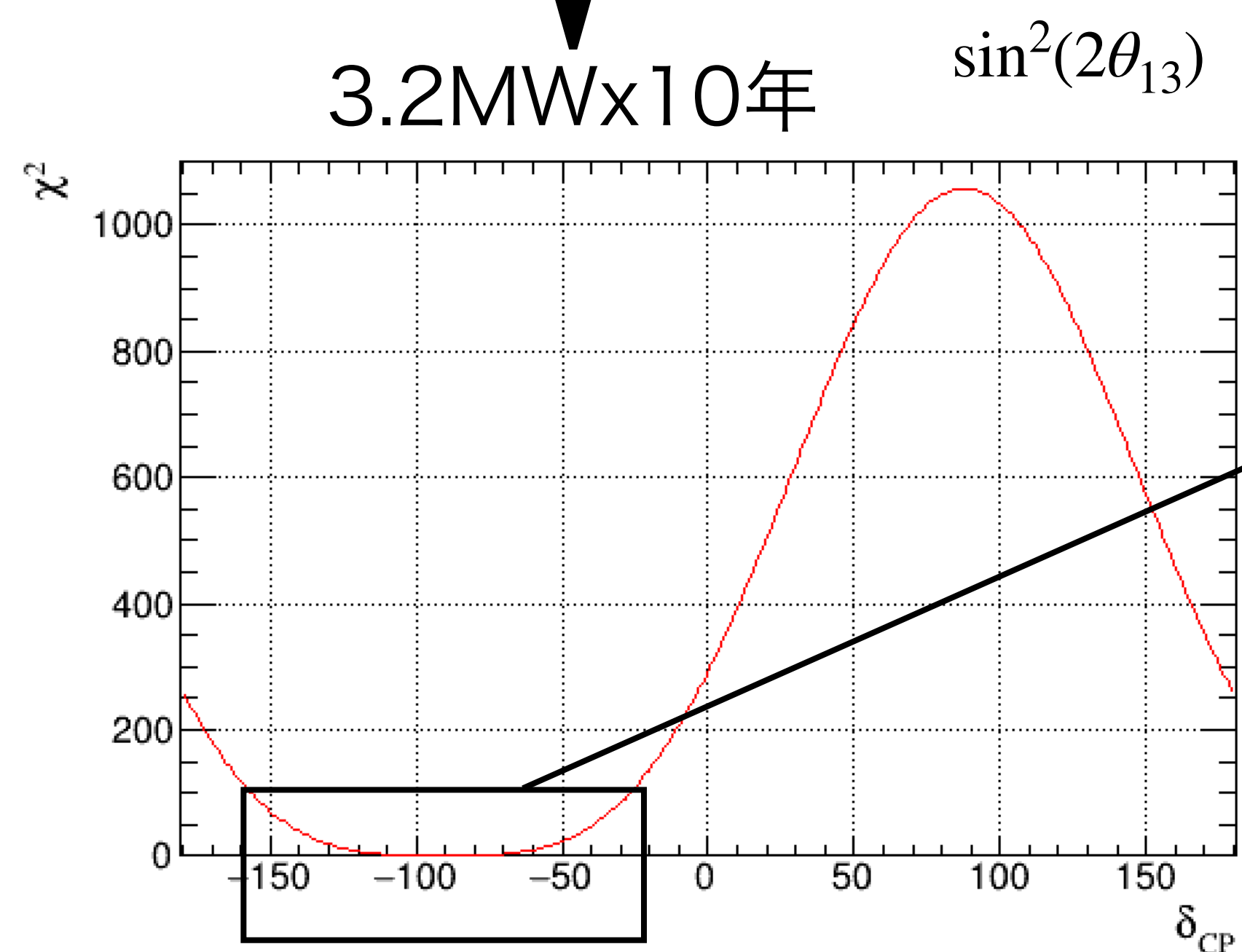
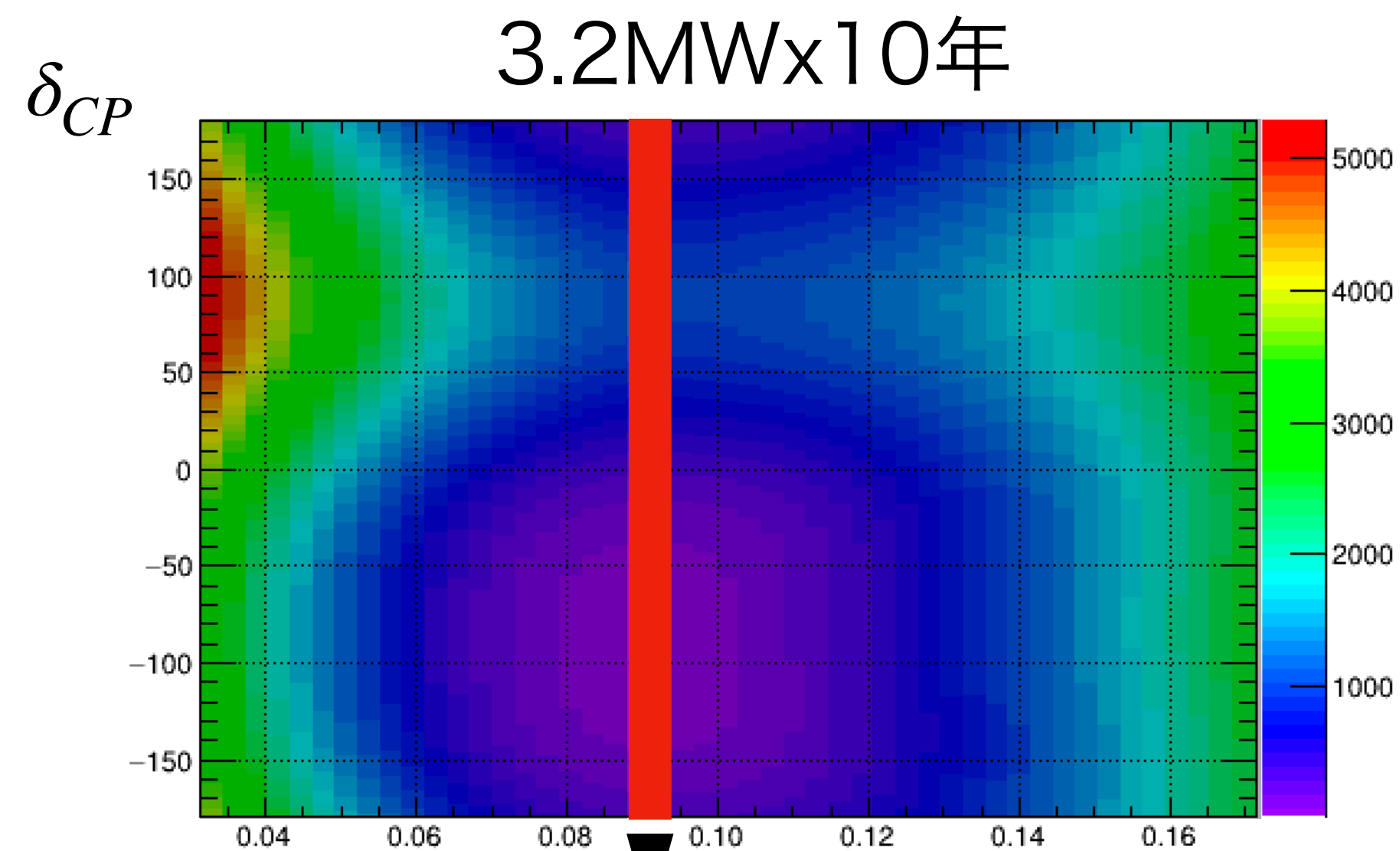
$$\sigma = 0.0027$$



原子炉実験の測定精度3% : $\sin^2 2\theta_{13} - \sigma < \sin^2(2\theta'_{13}) < \sin^2 2\theta_{13} + \sigma$ $\sin^2(2\theta_{13})$

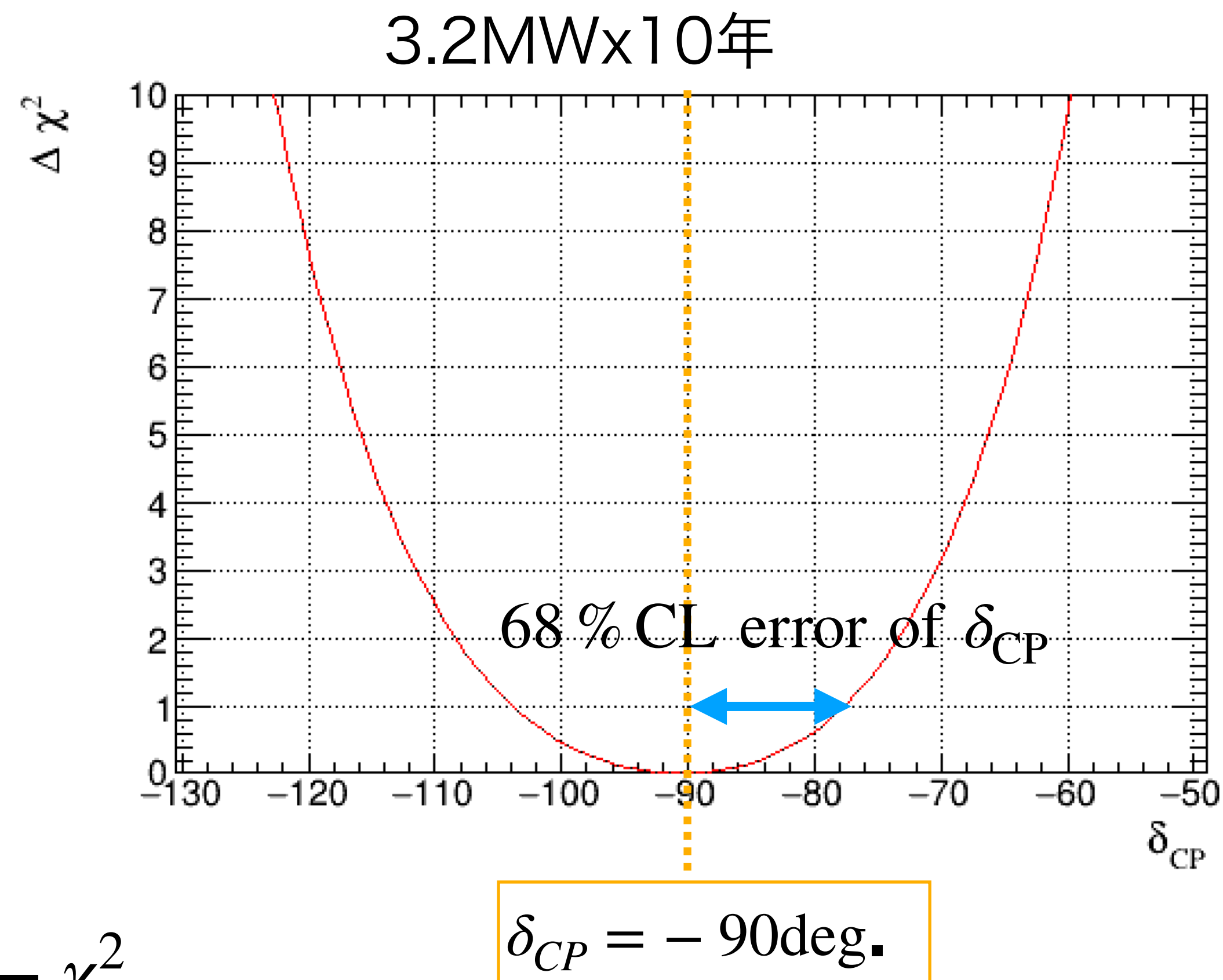
1次元 $\Delta\chi^2$ マップ

7



$$\Delta\chi^2 = \chi^2 - \chi_{min}^2$$

$\sin^2(2\theta_{13})$ の測定範囲内で χ^2 の平均をとり, 各 δ_{CP} での $\Delta\chi^2$ を表示させる



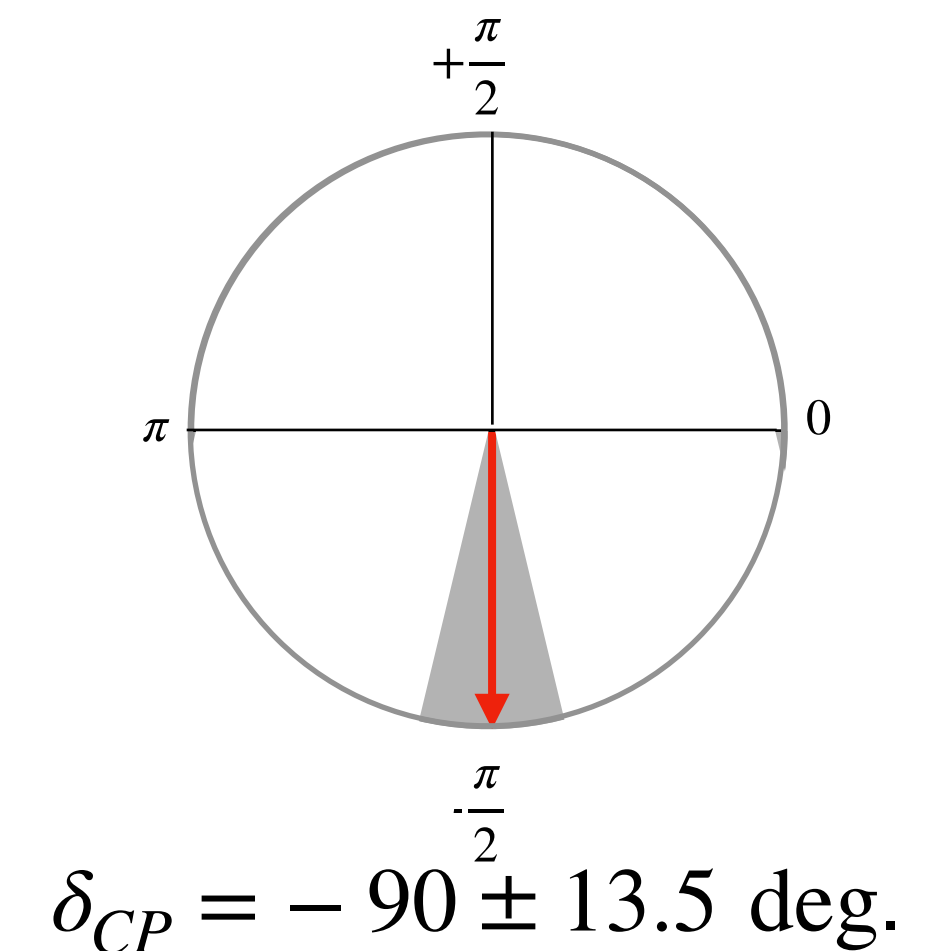
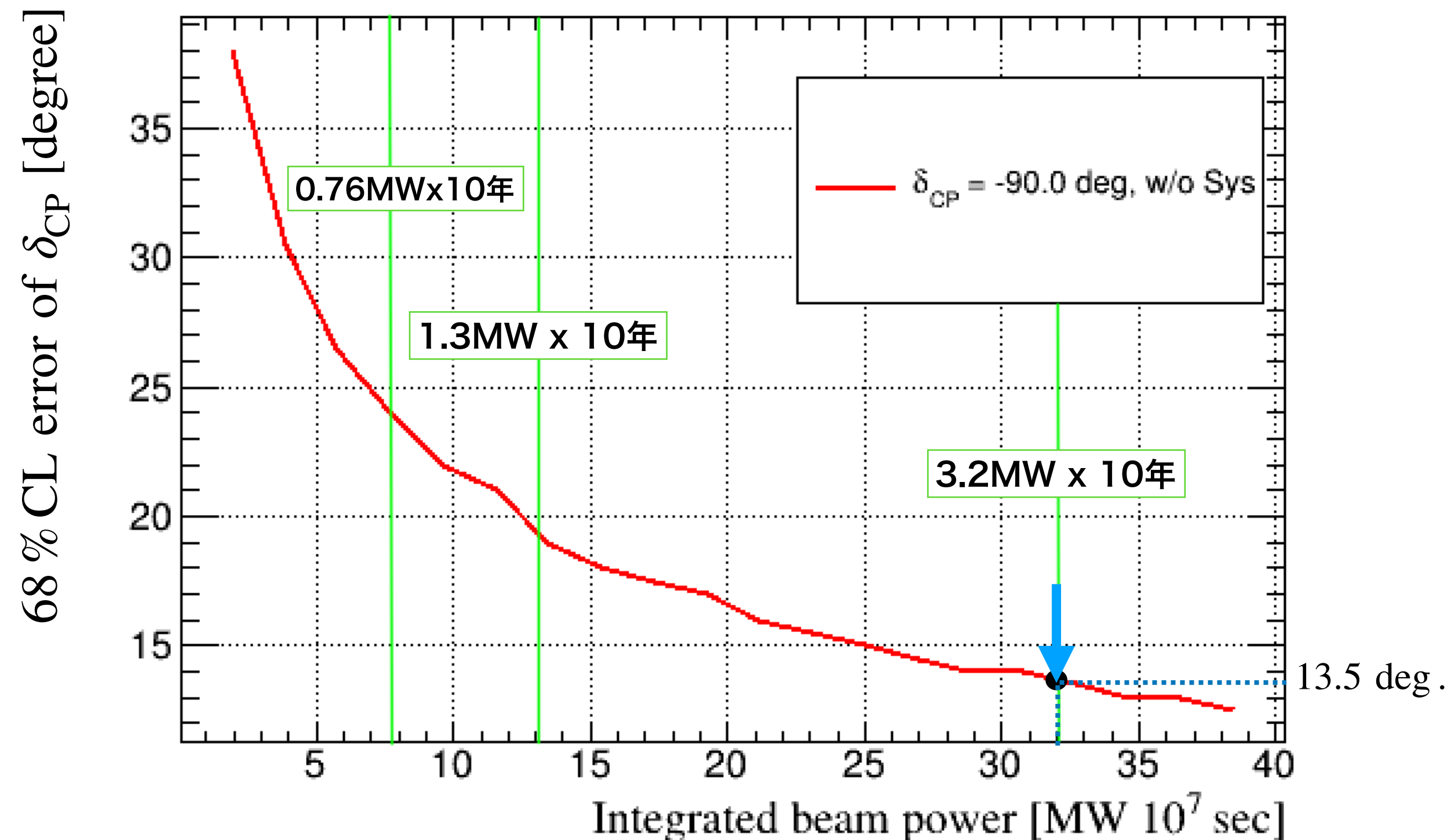
δ_{CP} の将来感度の見積もり(考察)

$\delta_{CP} = -90\text{deg.}$ と仮定した時の δ_{CP} の測定精度の見積り

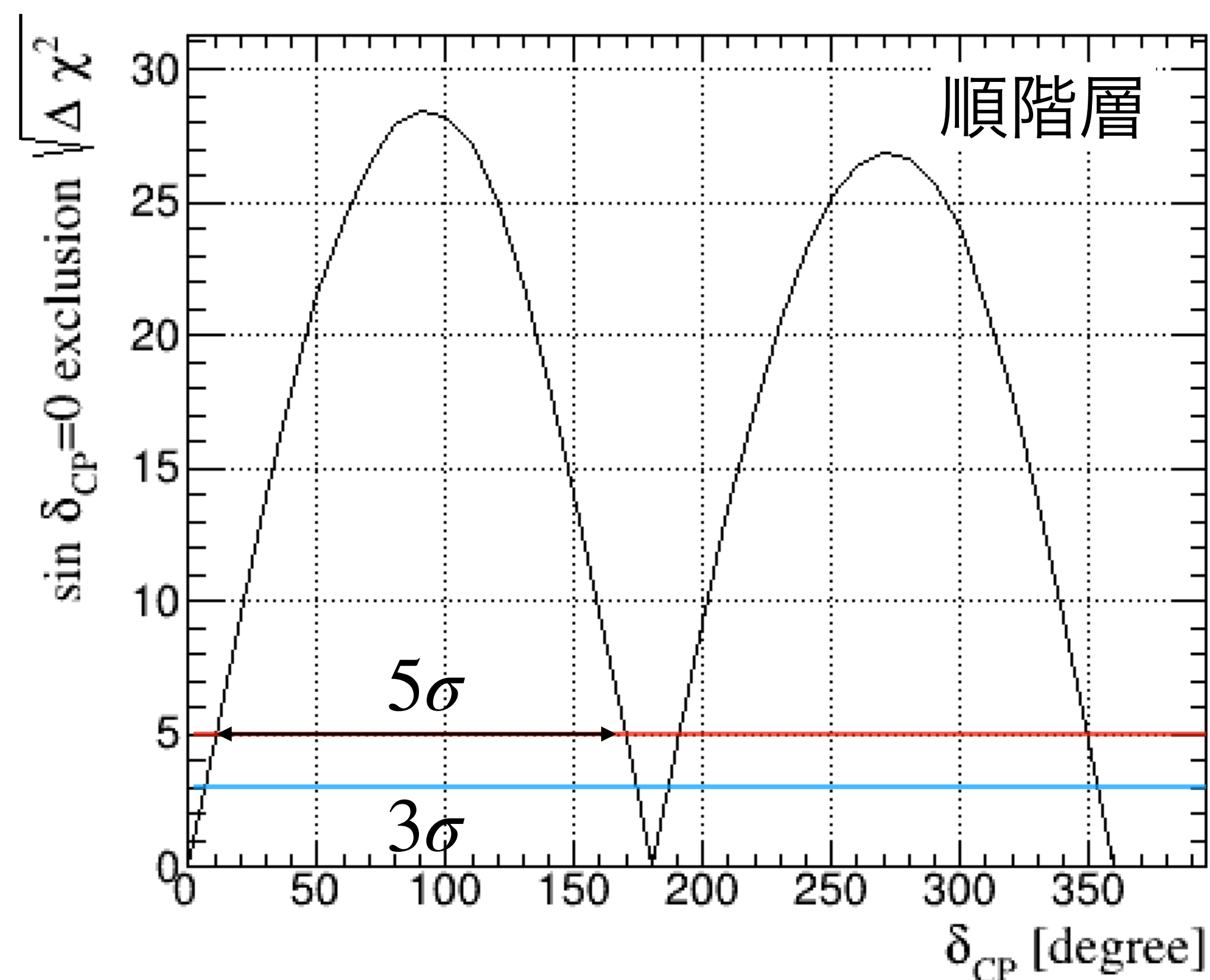
- J-PARCビームパワーとPOT(protons on target)の関係 引用:K. Abe et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 053C02 (2015)

ビームパワー3.2MWで10年観測(ビームタイムは1年の1/3 ~ 10^7sec) $\leftrightarrow 55.9 \times 10^{22}$ POT

- 90 deg. 以内の誤差で測定できれば, $\delta_{CP} = 0, \pi$ つまり $\sin \delta_{CP} = 0$ を棄却できる
- 将来的にビームパワーが3.2MWまで増強され, 10年運転した場合, 68 % CLの精度で $\delta_{CP} = -90 \pm 13.5 \text{ deg.}$ まで絞ることができる



- δ_{CP} のインプット値は0～360 deg.
- 3.2MWで10年運転した場合,
順階層： 5σ での探索領域は0～180deg.の範囲で89%をカバーする
- 質量階層性は $\sin \delta_{CP}$ の符号を変えるのみ $\rightarrow \delta_{CP}$ の感度にはほぼ影響しないため順階層と逆階層のplotは同じ形



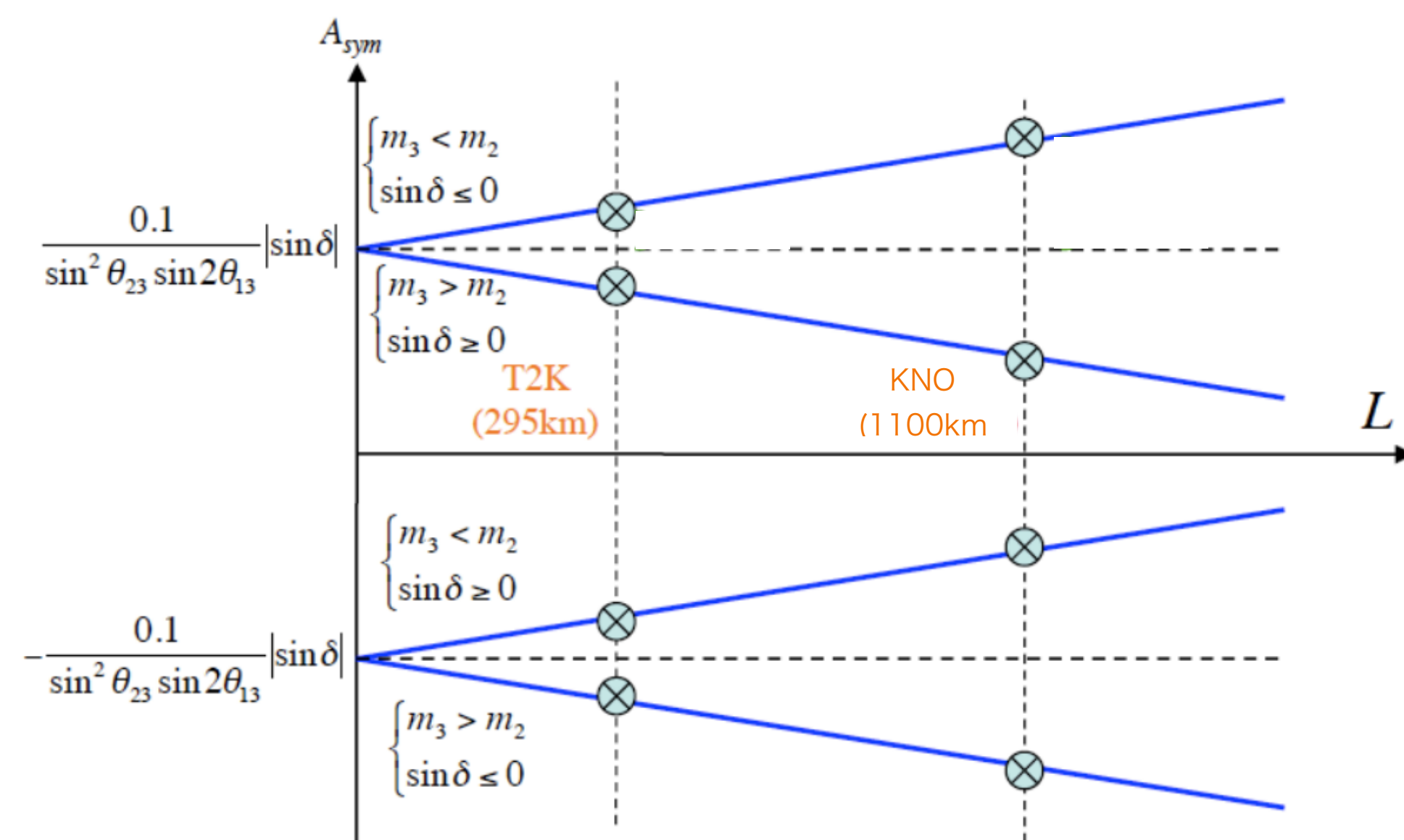
(今後) 質量階層性の決定

10

- 飛行距離(L)の異なる長基線実験(KNO? + HK)を組み合わせることで、質量階層性(Δm_{23}^2 の符号)を決定することができる

$$A_{sym} = \frac{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)}{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)} \sim \mp \frac{4\sqrt{2}}{\pi} G_F N_e L \pm \frac{0.1 |\sin \delta_{CP}|}{\sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13}}$$

傾きが負：順階層 $m_1 < m_2 < m_3$
傾きが正：逆階層 $m_3 < m_1 < m_2$



G_F : フェルミ定数
 N_e : 通過する物質の電子密度

(今後) 質量階層性の決定

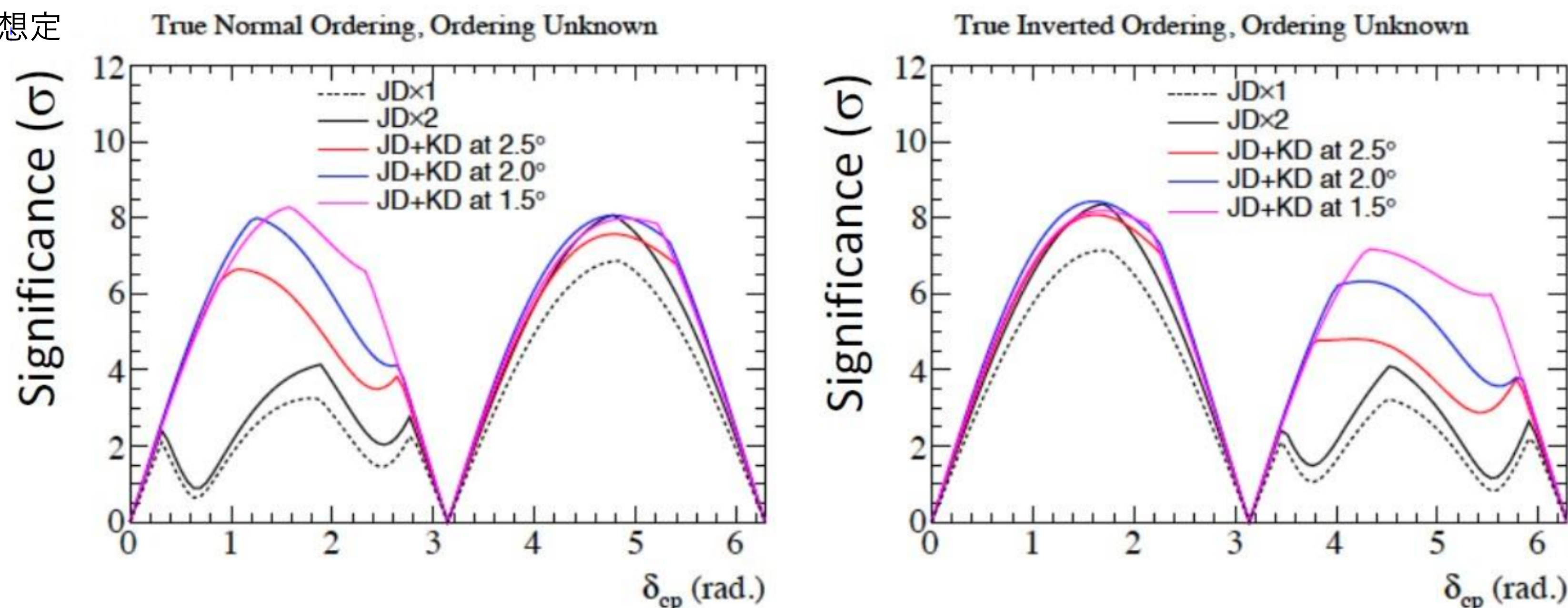
11

- 飛行距離(L)の異なる長基線実験(KNO? + HK)を組み合わせることで、質量階層性(Δm_{23}^2 の符号)を決定することができる

$$A_{sym} = \frac{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)}{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)} \sim \boxed{\mp} \frac{4\sqrt{2}}{\pi} G_F N_e L \pm \frac{0.1 |\sin \delta_{CP}|}{\sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13}}$$

傾きが負：順階層 $m_1 < m_2 < m_3$
傾きが正：逆階層 $m_3 < m_1 < m_2$

1.3MW x 10年を想定



G_F ：フェルミ定数

N_e ：通過する物質の電子密度

引用: Current Status and Prospects of Korea Neutrino Observatory(KNO), Intae Yu, Sunkyunwan University, Sep 29, 2022, NNN22 Workshop @ Hida City

将来的にJ-PARCビームパワーが3.2MWまで増強された場合の感度計算を行なった

- $\delta_{CP} = -90\text{deg.}$ と仮定した場合

3.2MWで10年運転した場合, 68 % CLの精度で $\delta_{CP} = -90 \pm 13.5 \text{ deg.}$ まで絞ることができる

- CP対称性の破れの感度見積り

5σ での探索領域は0~180deg.の範囲で89%をカバーする

今後はSimple Fitterで飛行距離の異なる長基線実験の感度計算の実装を行う