

将来の長基線ニュートリノ実験の 感度に関する研究

2017-05-20

第7回高エネルギー春の学校
東京工業大学 久世研究室
ベルンス・ルカス

Q.1



標準模型の宇宙

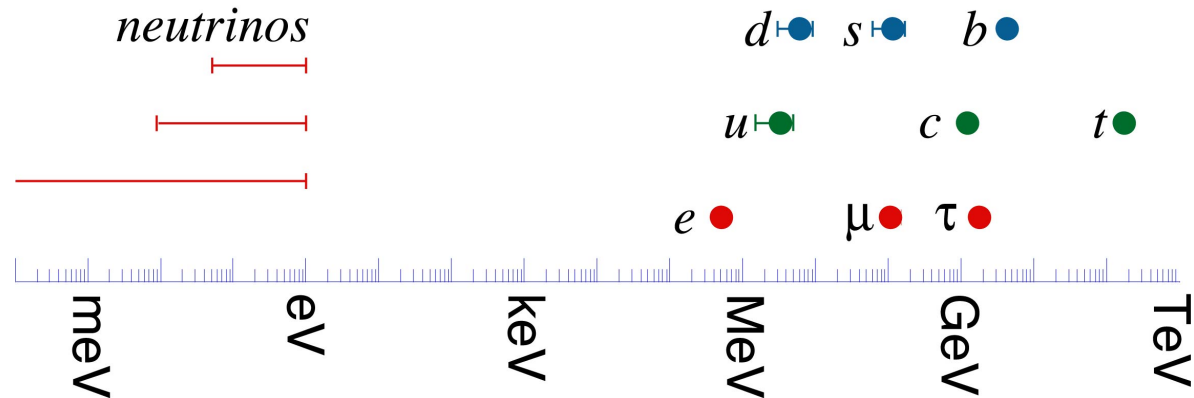
物質の量が現実の 10^{-10} 程度

現実の宇宙

Image credit: X-ray: NASA/CXC/PSU/L. Townsley et al;
Optical: UKIRT; Infrared: NASA/JPL-Caltech

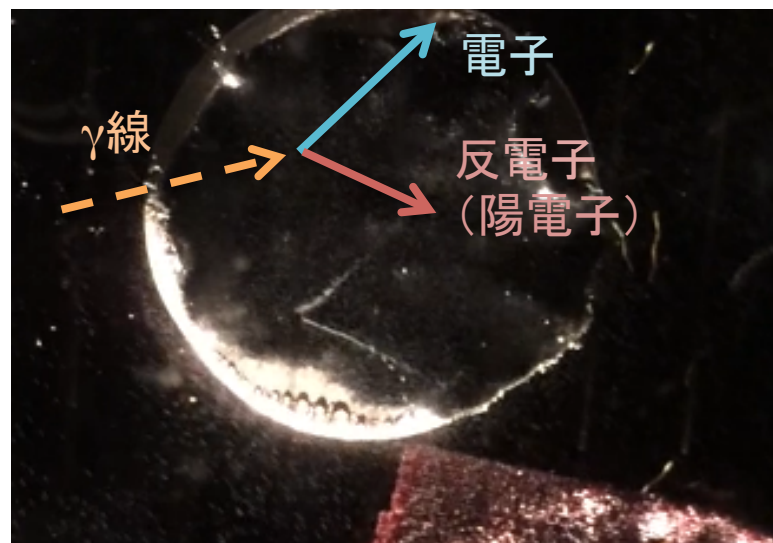
Q.2

極端に小さい
ニュートリノ質量



どうして物質が残らないか

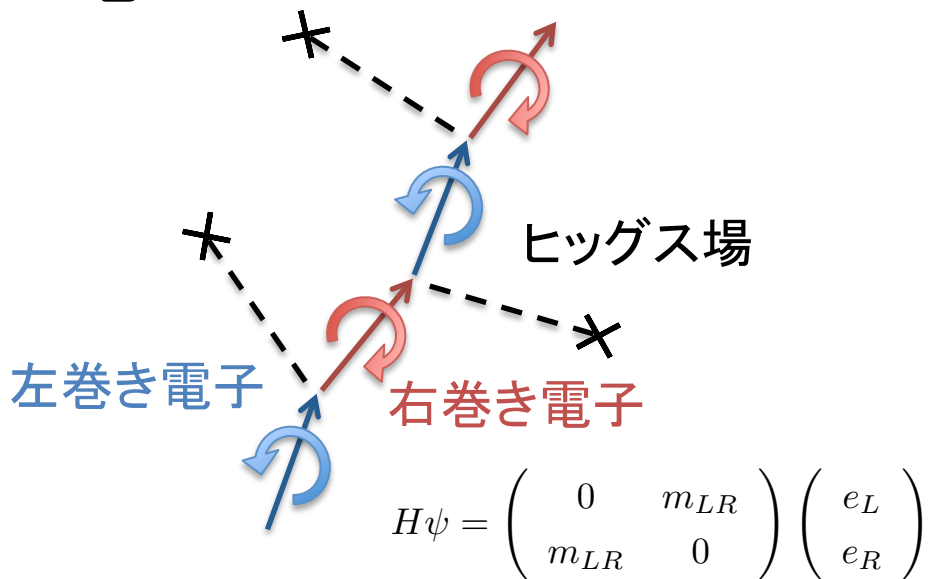
- 標準模型では粒子は常に反粒子と対生成
- 反粒子は粒子と対消滅
- 粒子と反粒子の対称性が良いので物質だけが残ることはない
- 宇宙に反物質はほぼ0
- 初期条件では説明不可 (インフレーションのため)



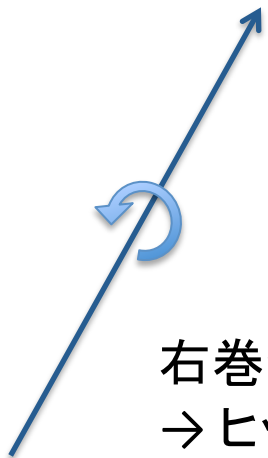
⇒ 粒子と反粒子の
振る舞いの違いを
(CP対称性の破れ)
見つけたい*

* Quark sector のCP violationでは宇宙のバリオン数非対称性は説明できない

電子



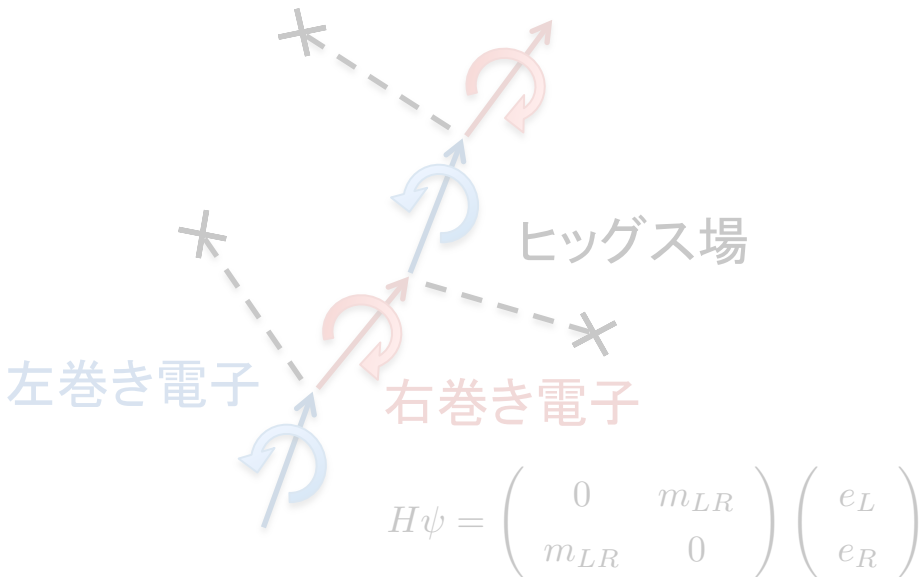
標準模型の
ニュートリノ



右巻きニュートリノが無いので
→ ヒッグス場と相互作用しない
→ 質量が無い

素粒子の
質量とは

電子

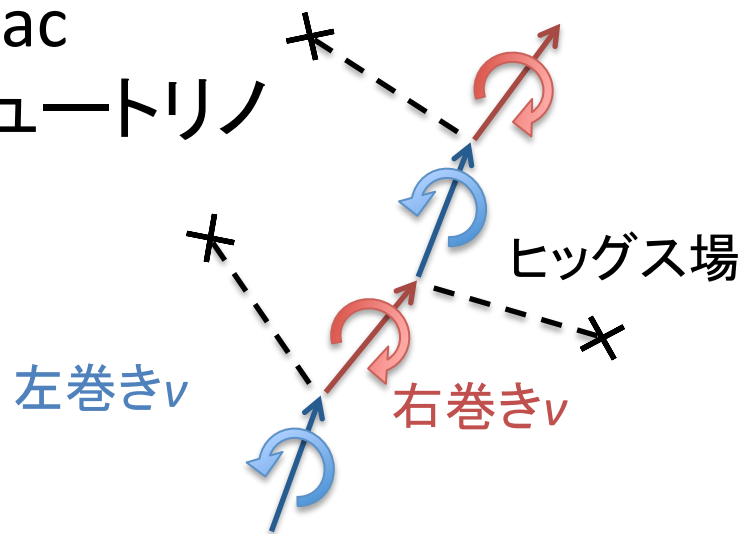


標準模型の ニュートリノ

しかしニュートリノは
質量を持っている！
(ニュートリノ振動)

右巻きニュートリノが無いので
→ ヒッグス場と相互作用しない
→ 質量が無い

Dirac ニュートリノ



ヒッグス場との結合定数が
他の粒子の1/100,000以下
→ 不自然

Majorana ニュートリノ

ヒッグス結合を他の粒子と同程度とし、
右巻きニュートリノだけ大統一スケールの
マヨラナ質量を導入(自然な仮定)

$$H\psi = \begin{pmatrix} 0 & m_{LR} \\ m_{LR} & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ N_R \end{pmatrix} \quad M \sim 10^{25} \text{ eV}$$

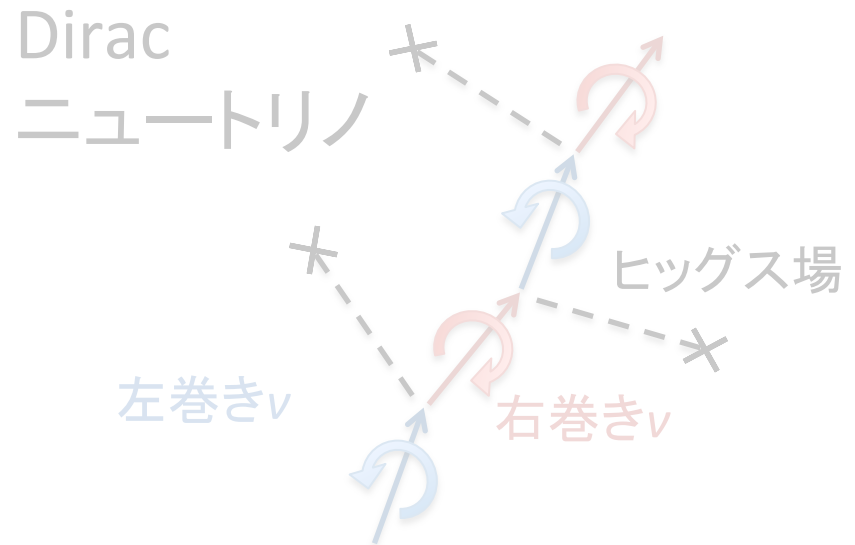
Physicalな質量は
質量行列の固有値

重いマヨナラ質量に
抑えられ、
左巻きニュートリノが
自然に軽くなる

$$|m_\nu| = m_{LR}^2 / M \\ \sim 10^{-3} \text{ eV}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & m_{LR} \\ m_{LR} & M \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} m_\nu & 0 \\ 0 & M_N \end{pmatrix}$$

宇宙初期の N_1 の崩壊で
CPが破れているなら
バリオン数の非対称性が
説明できるかもしれない
→ Leptogenesis

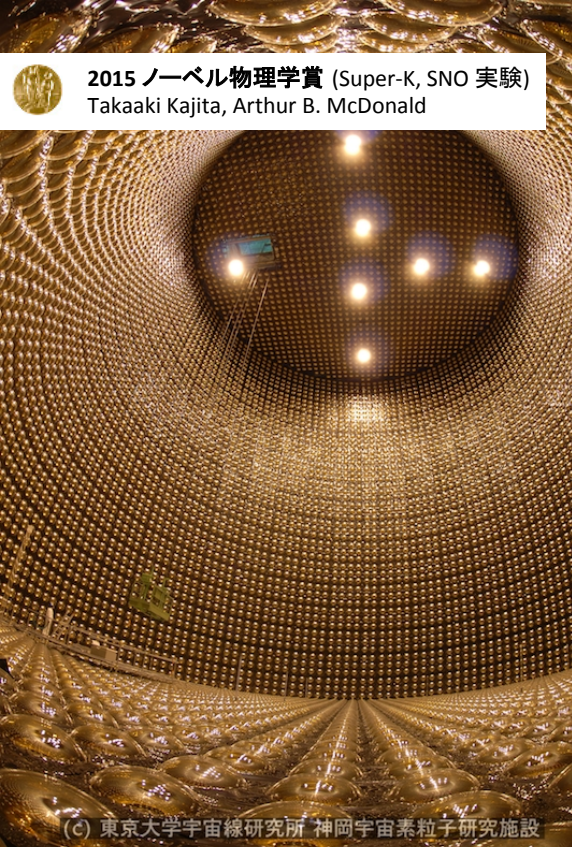


ヒッグス場との結合定数が
他の粒子の $1/100,000$ 以下
→不自然

Majorana ニュートリノ

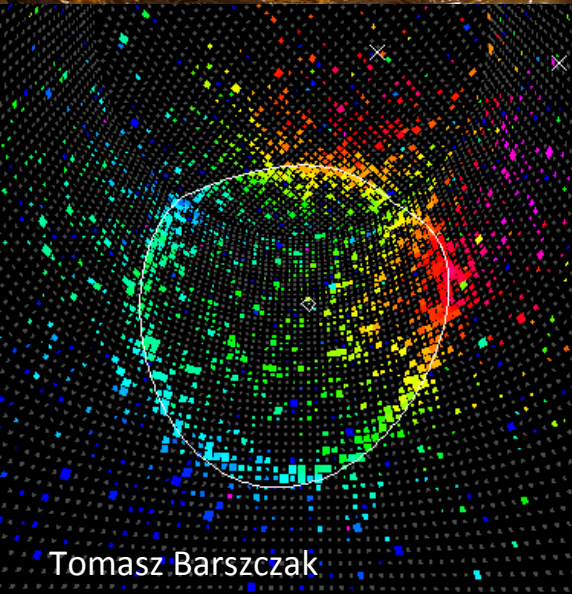
ヒッグス結合を他の粒子と同程度とし、
右巻きニュートリノだけ大統一スケールの
マヨラナ質量を導入(自然な仮定)

$$H\psi = \begin{pmatrix} 0 & m_{LR} \\ m_{LR} & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ N_R \end{pmatrix} \quad M \sim 10^{25} \text{ eV}$$



2015 ノーベル物理学賞 (Super-K, SNO 実験)
Takaaki Kajita, Arthur B. McDonald

© 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設



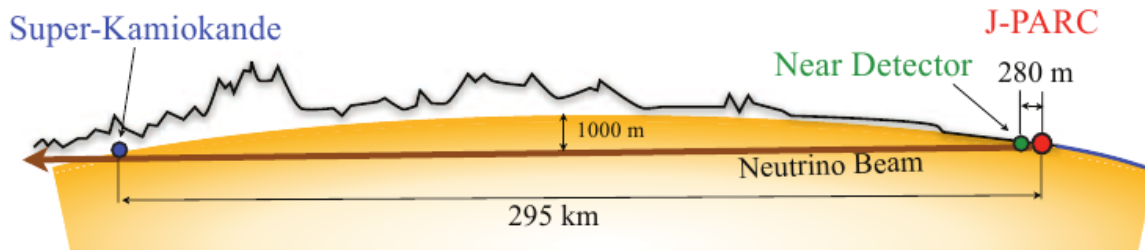
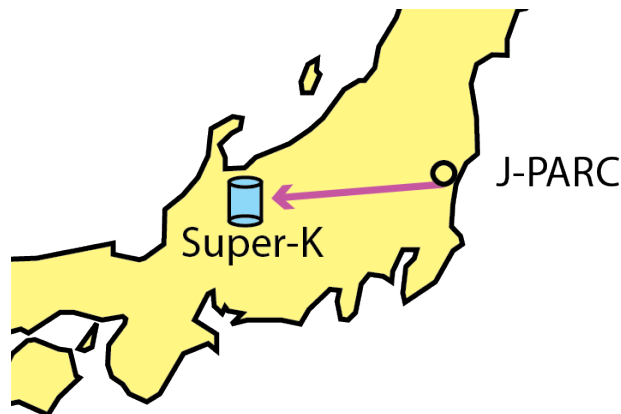
Tomasz Barszczak



T2K実験

世界11カ国から約400人の研究者のコラボレーション
2010年からデータ測定開始、将来Hyper-K計画(2027~)

J-PARC 陽子加速器





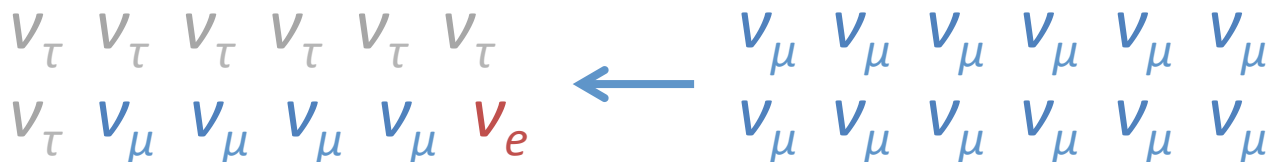
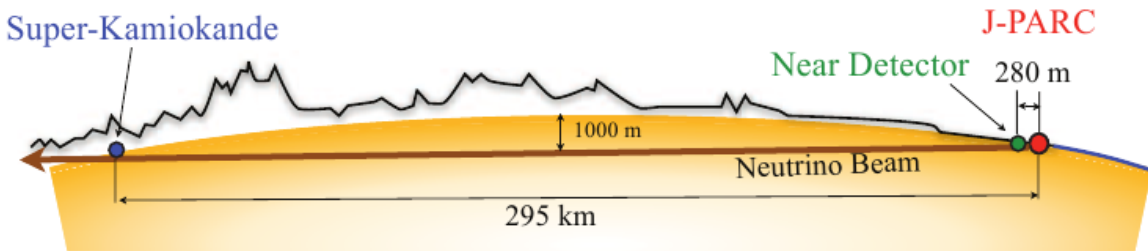
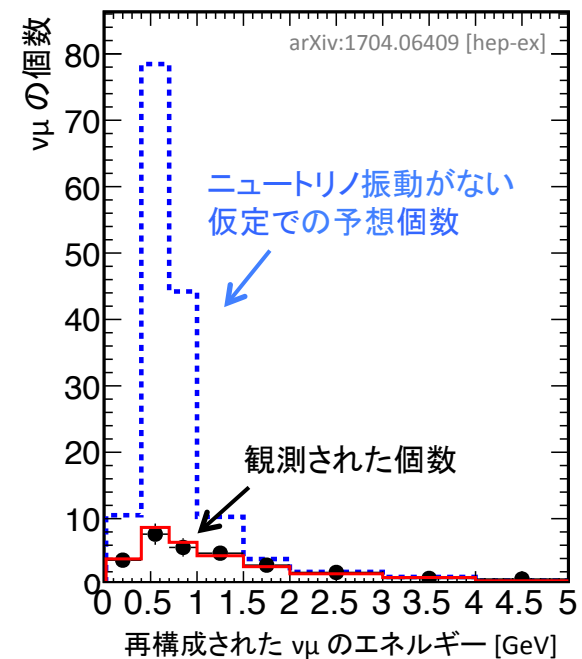
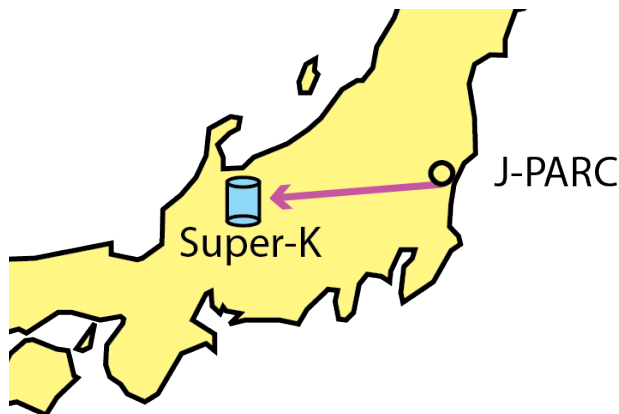
2015 ノーベル物理学賞 (Super-K, SNO 実験)
Takaaki Kajita, Arthur B. McDonald



T2K実験

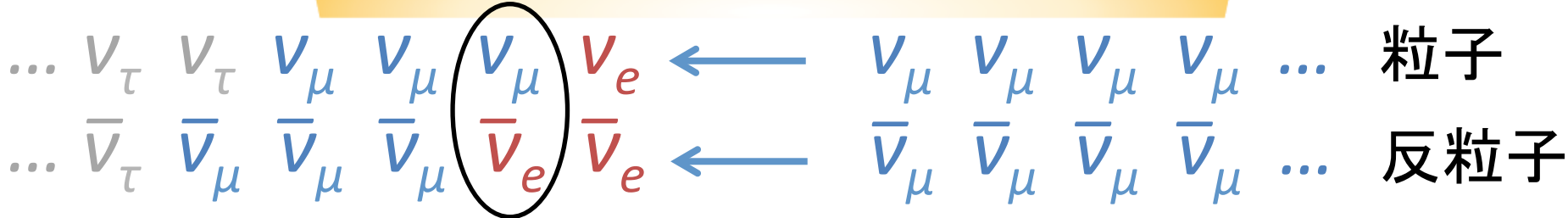
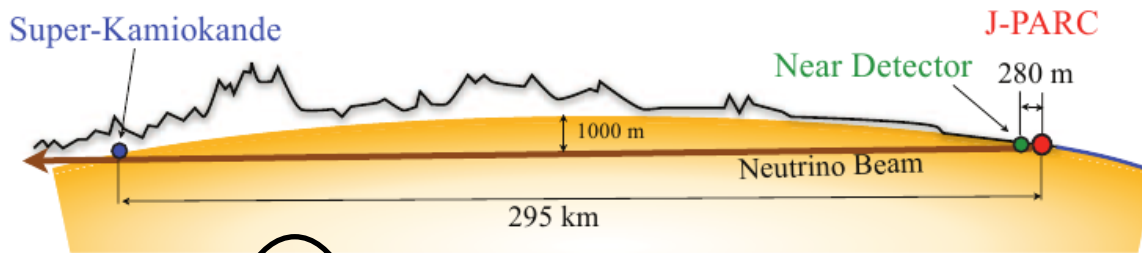
世界11カ国から約400人の研究者のコラボレーション
2010年からデータ測定開始、将来Hyper-K計画(2027~)

J-PARC 陽子加速器



ニュートリノ振動

ニュートリノ振動におけるCPの破れ



$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

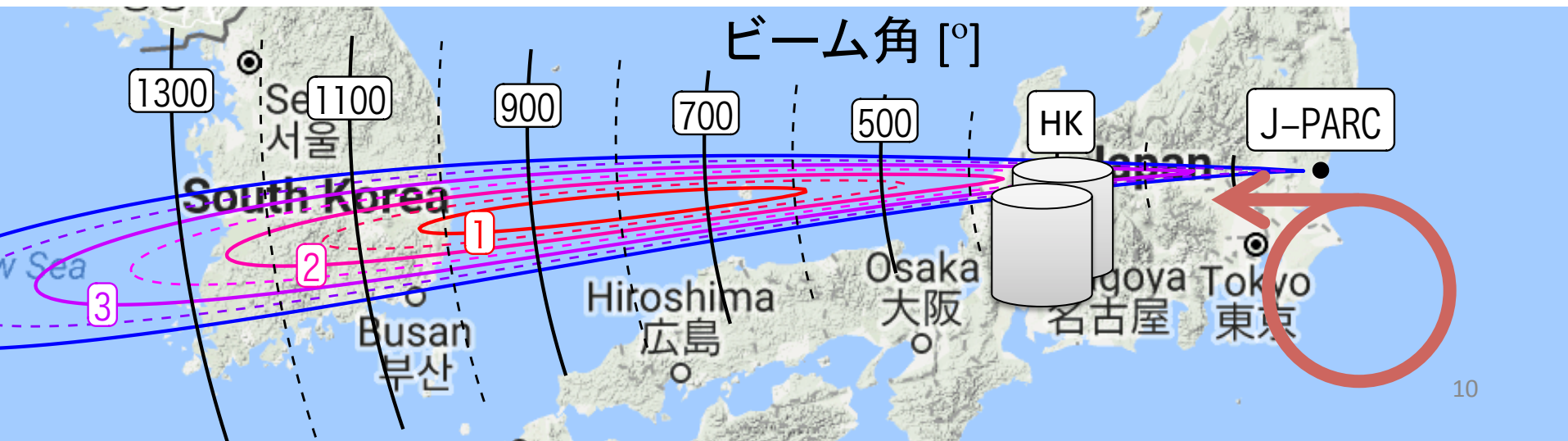
$$P_{\mu \rightarrow e} = \left| \langle \nu_e | e^{-i\hat{H}t} | \nu_\mu \rangle \right|^2$$

$$\approx P_{\text{atm}} + 2\sqrt{P_{\text{atm}}}\sqrt{P_{\text{sol}}}\cos(\Delta_{32} + \delta_{CP}) + P_{\text{sol}}$$

フレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$ 質量固有状態 ν_1, ν_2, ν_3
 重ね合せ (ユニタリ変換)
 粒子と反粒子で符号が変わる

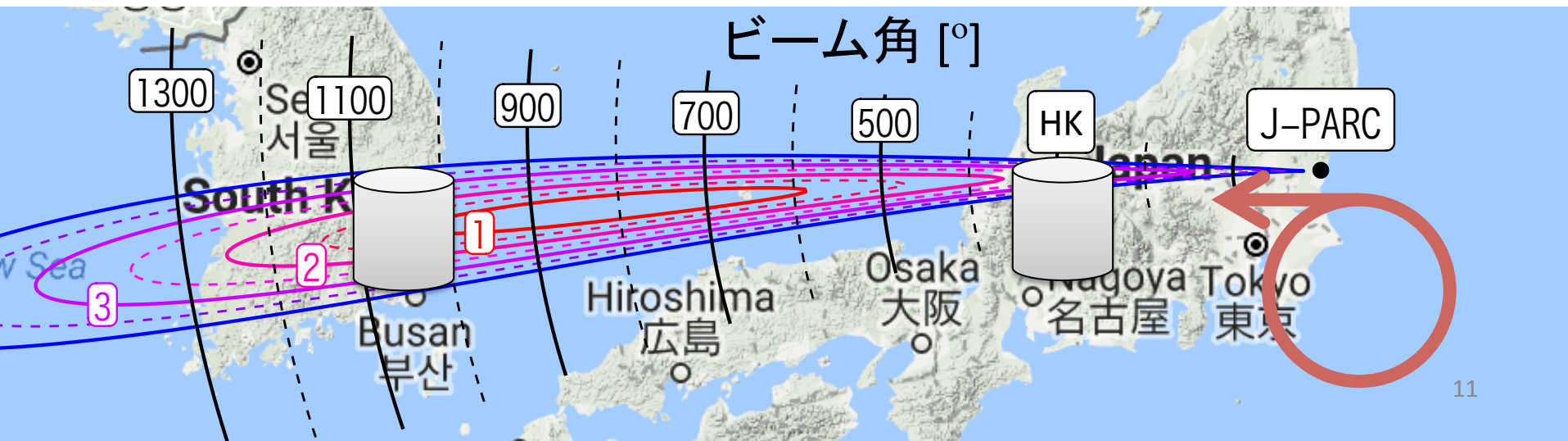
将来の実験構想

- 検出器を10x大きくする (Hyper-K)
→ 統計量を増やす



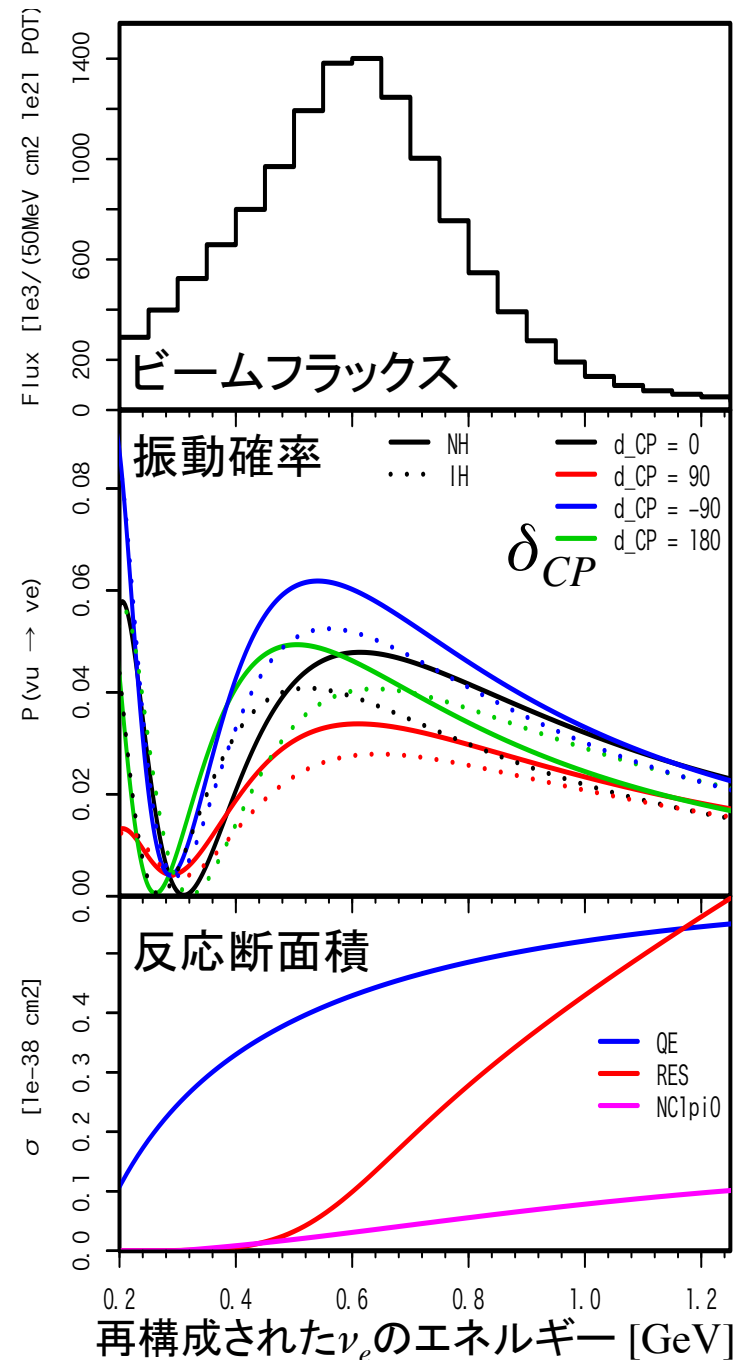
将来の実験構想

- 検出器を10x大きくする (Hyper-K)
→ 統計量を増やす
- 1つの検出器を韓国に置く (T2HKK)
→ 物質効果を大きくする
- 神岡×2 または 神岡+韓国 のどちらが良いか



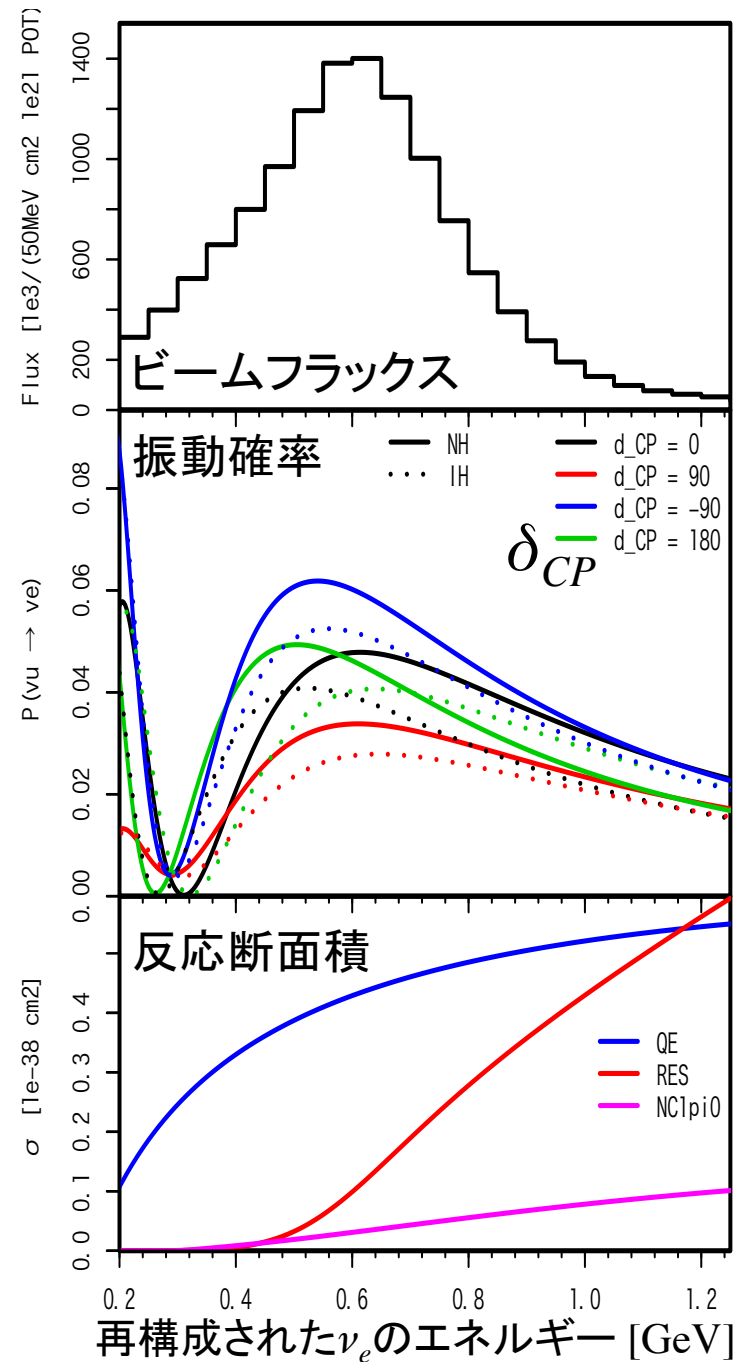
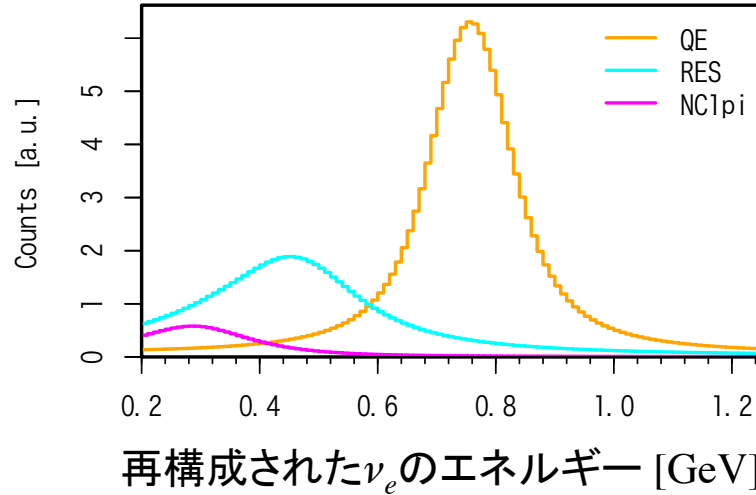
計算手法

- δ_{CP} 等への感度を計算するシステムを開発
- 系統誤差等を理解するため、既存のシミュレータ等を使わないで全て1から計算
- ビームフラックス及び反応断面積のみ外部からインプット



計算手法

検出器でのエネルギー再構成

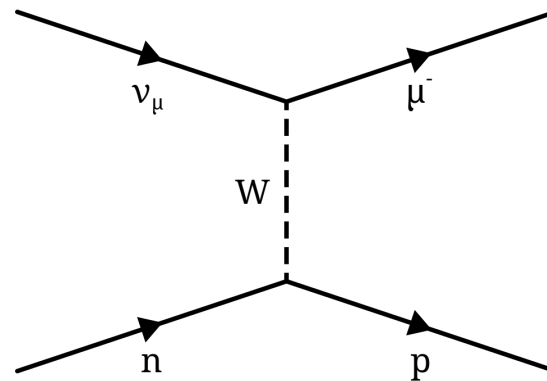
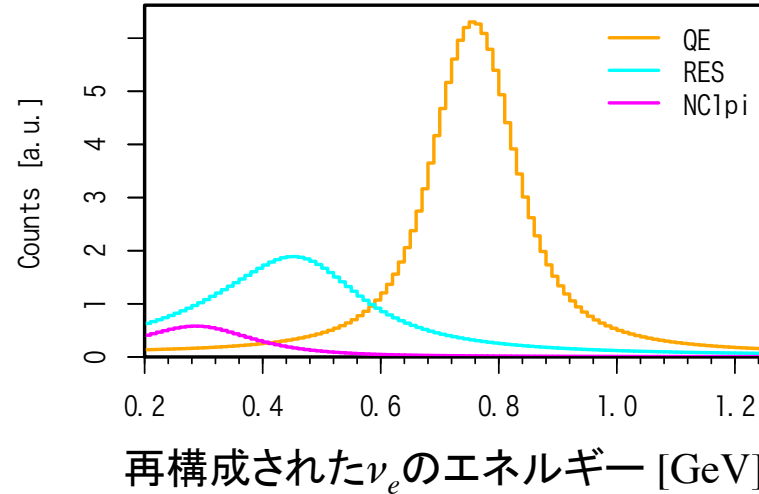


エネルギー分解能を悪くしている要因:

- 原子核中の核子是不確定性原理により ~ 200 MeVの運動量を持つ
- 検出されるのは荷電レプトンのみ
→その運動量だけで ν のエネルギーを再構成

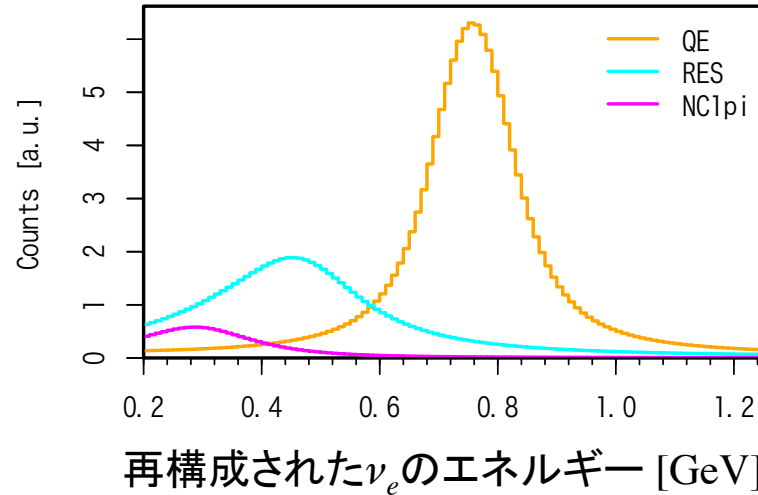
計算手法

検出器でのエネルギー再構成



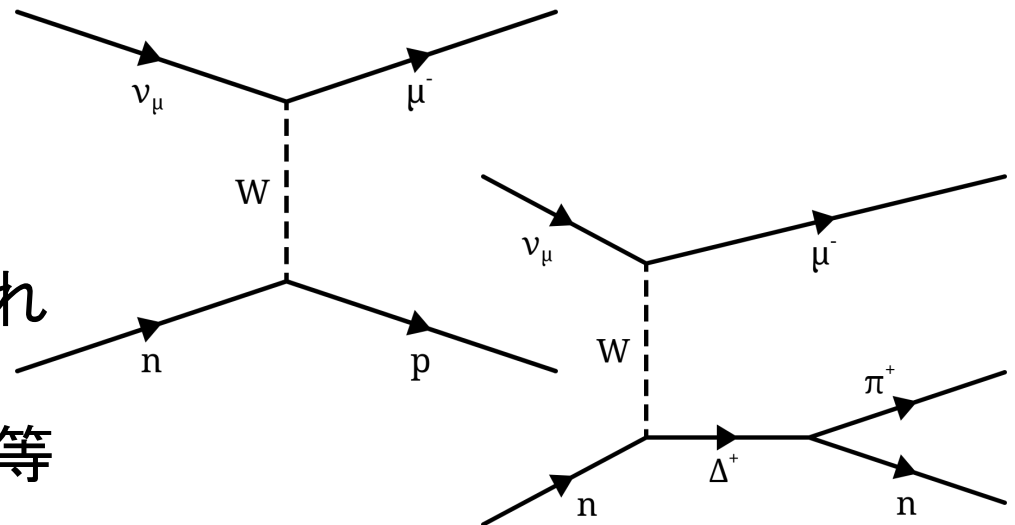
計算手法

検出器でのエネルギー再構成



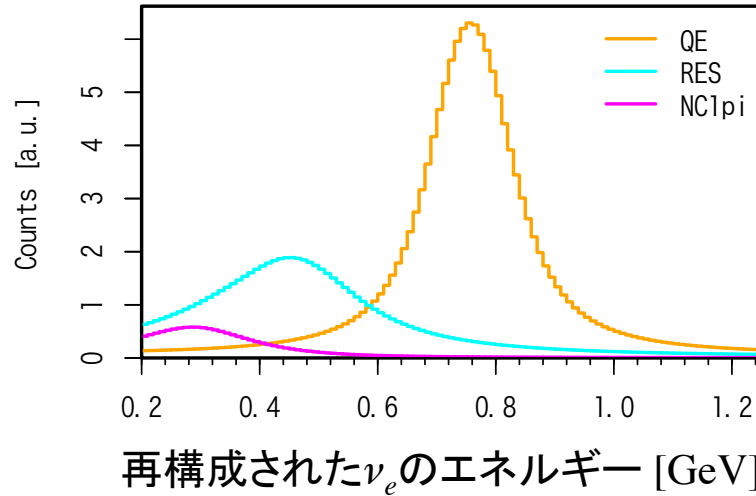
エネルギー分解能を悪くしている要因:

- 原子核中の核子是不確定性原理により ~ 200 MeVの運動量を持つ
- 検出されるのは荷電レプトンのみ
→その運動量だけで ν のエネルギーを再構成
- その他 π 中間子が生成されても検出されない場合、エネルギーが低く再構成等



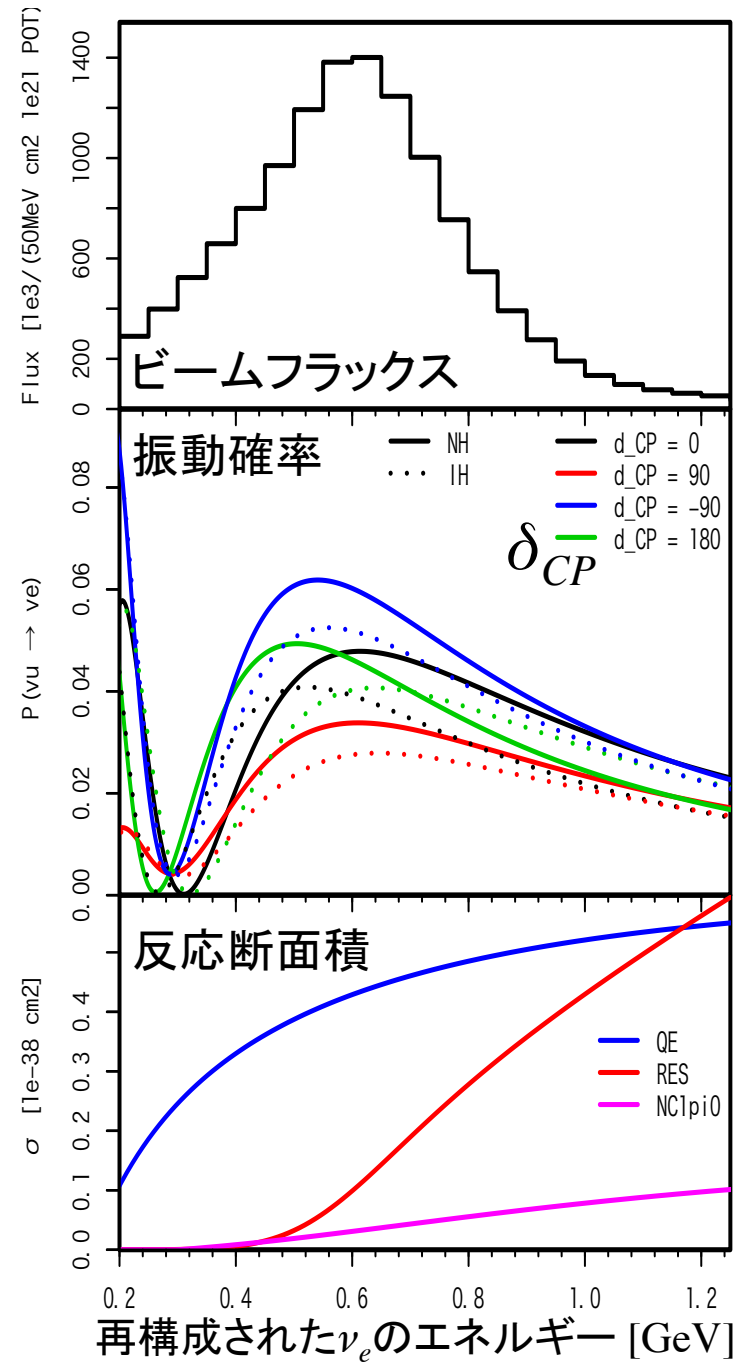
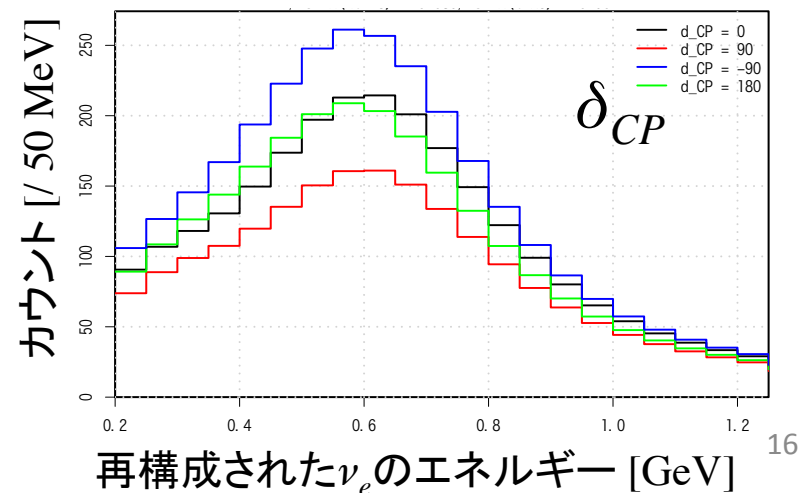
計算手法

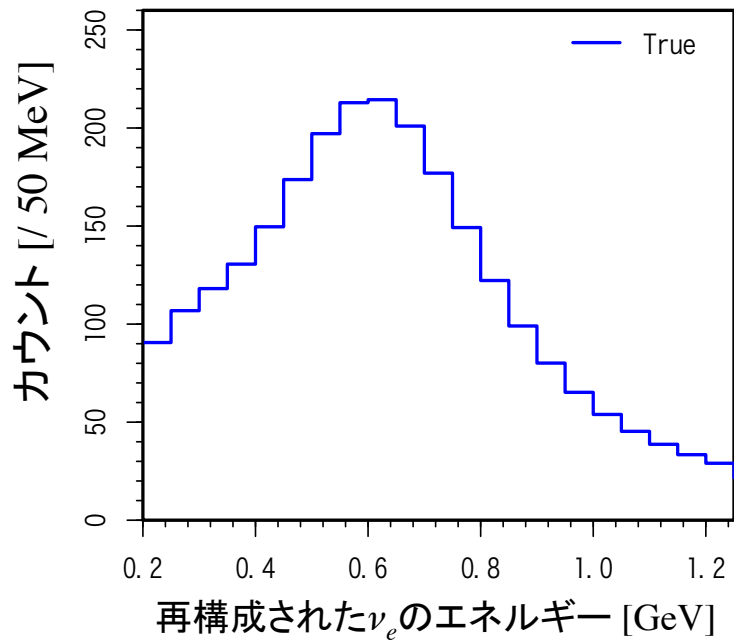
検出器でのエネルギー再構成

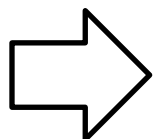


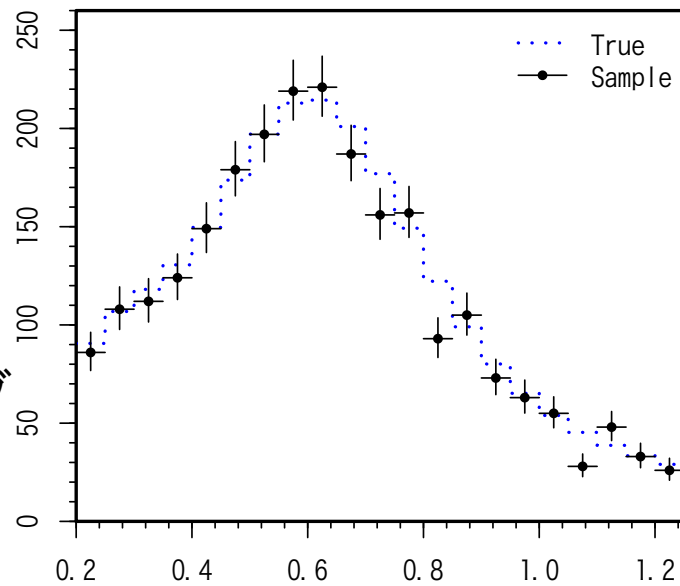
+ 各種
バック
グラウンド

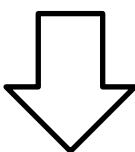
実験結果の期待値

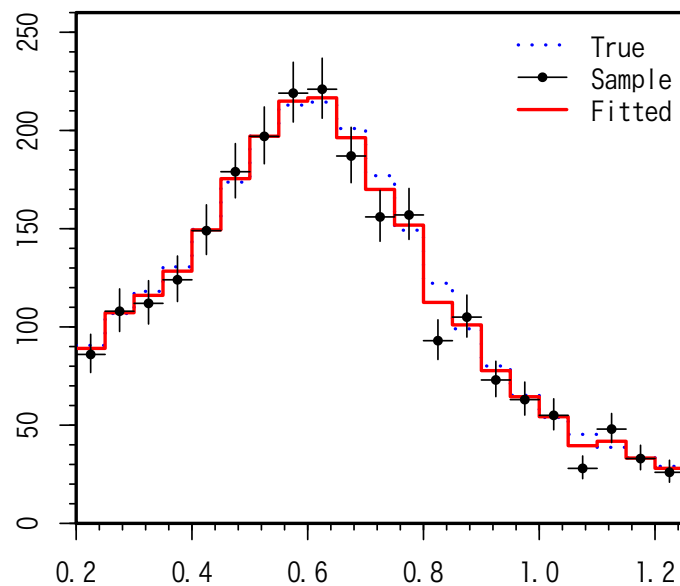





 サンプルング

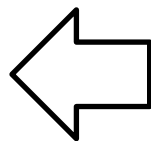


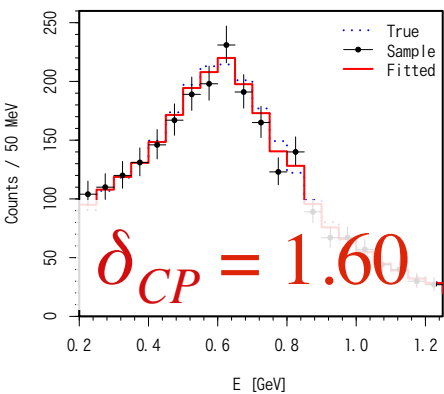
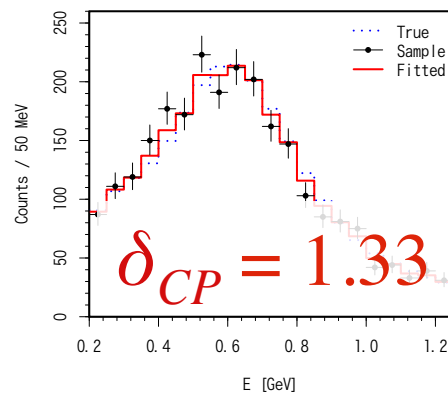
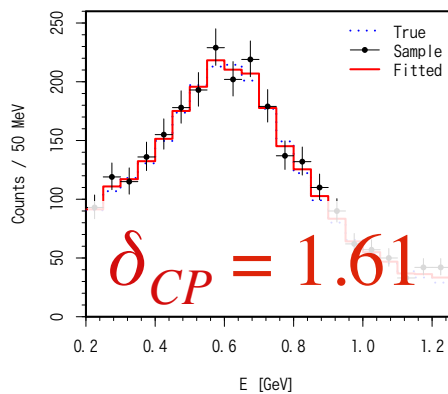
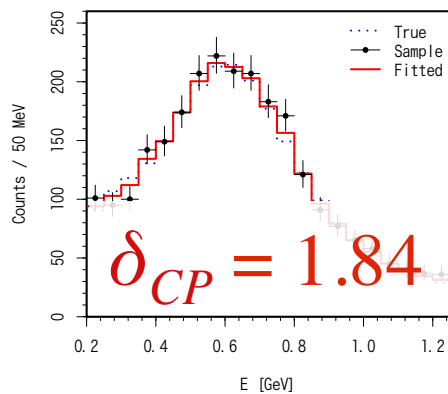
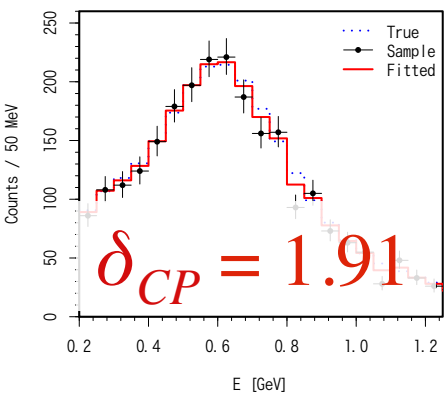

 フィッティング



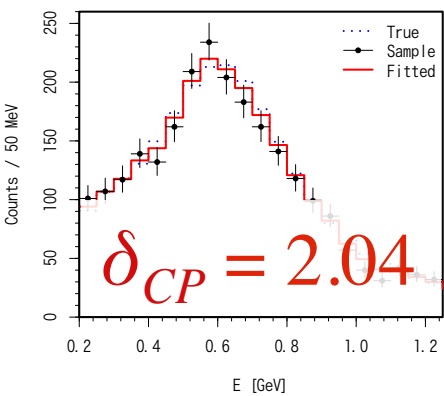
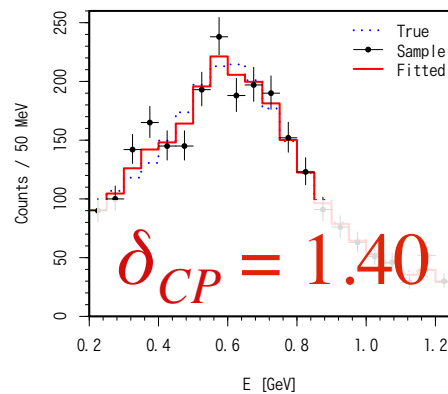
真の $\delta_{CP}, \theta_{13}, \dots$ を仮定

$\delta_{CP}, \theta_{13}, \dots$ の「測定値」

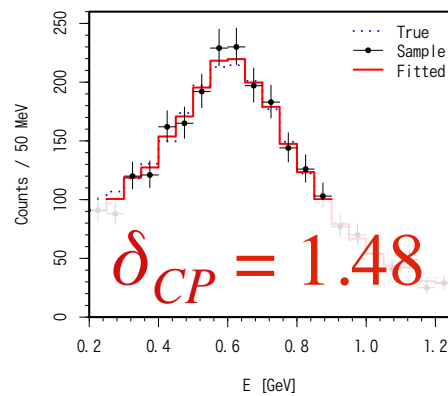


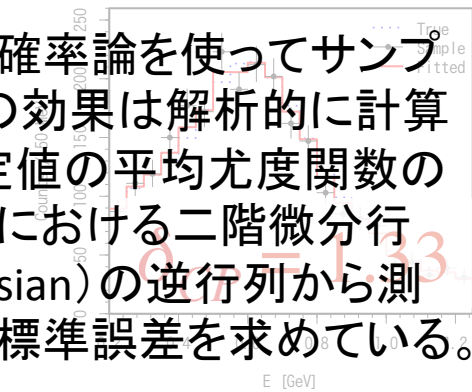
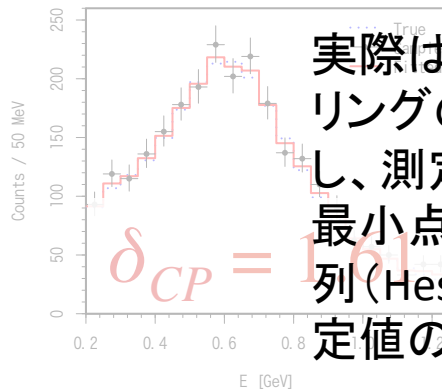
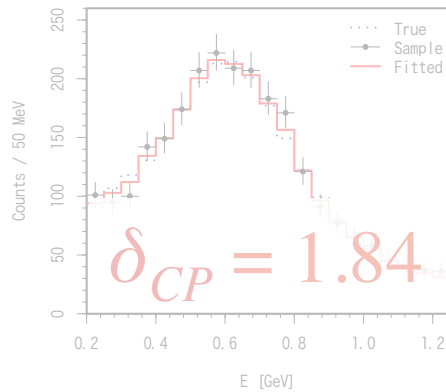
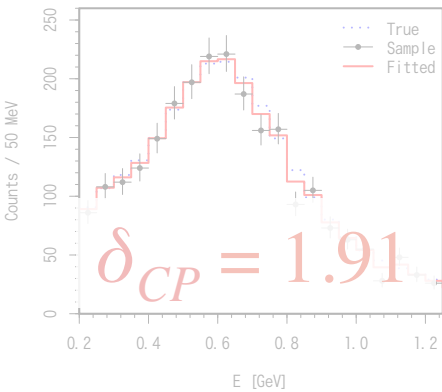


同じ真値で
実験を何度も
シミュレーション

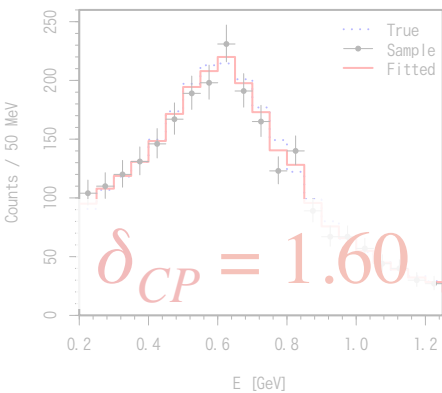


測定値の
分布を見る

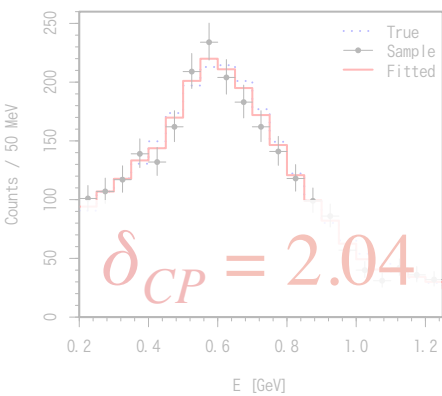
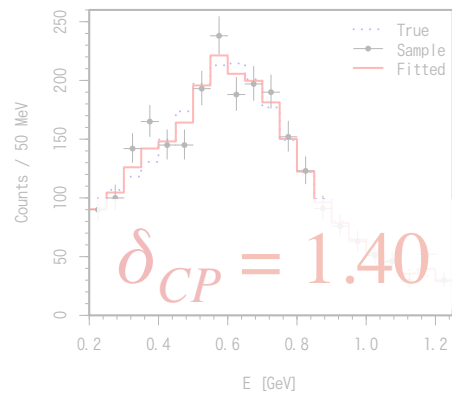
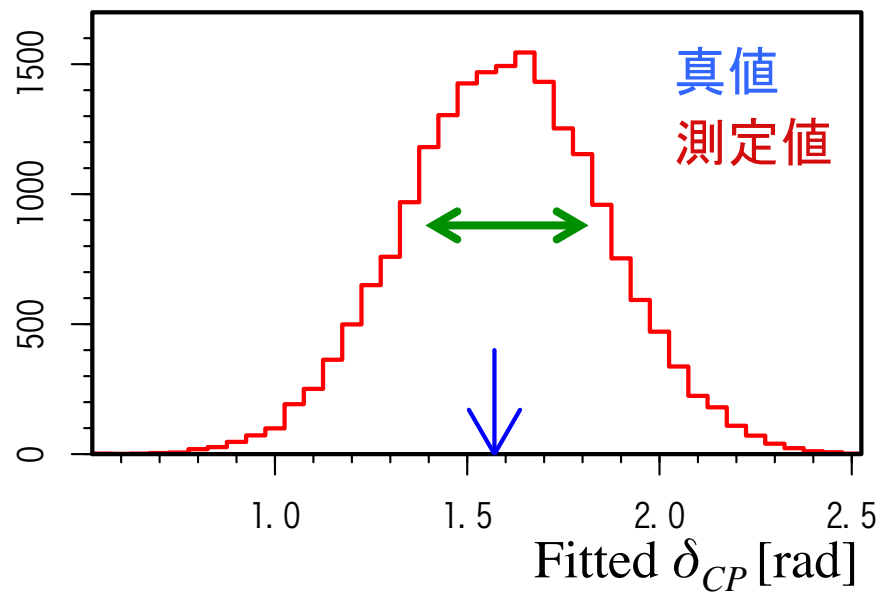




実際は確率論を使ってサンプリングの効果は解析的に計算し、測定値の平均尤度関数の最小点における二階微分行列 (Hessian) の逆行列から測定値の標準誤差を求めている。

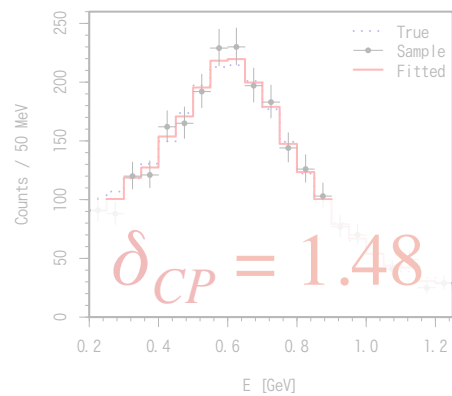


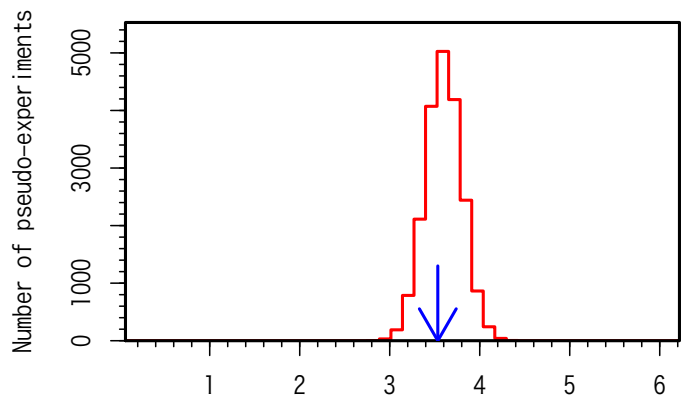
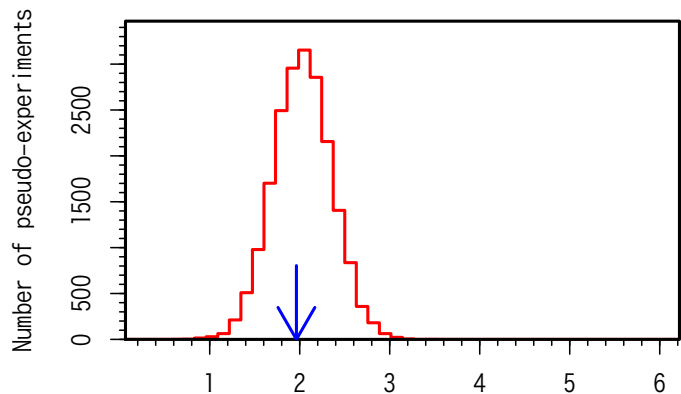
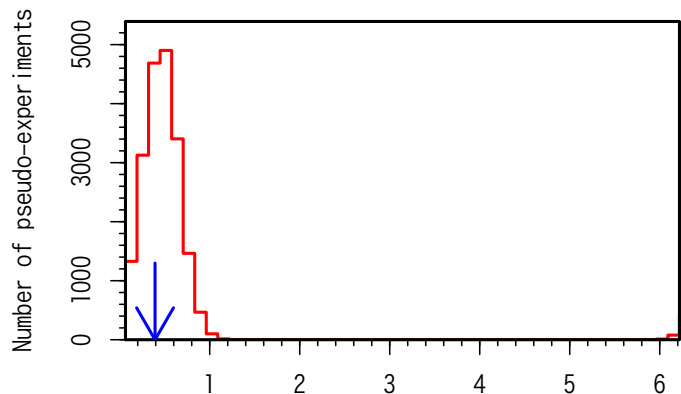
Number of pseudo-experiments



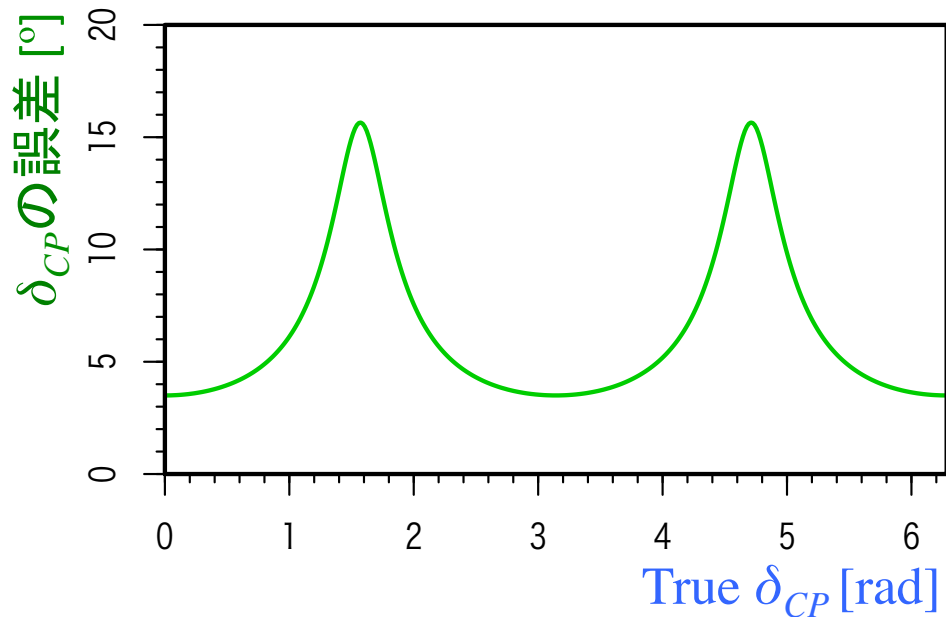
$\delta_{CP} = 1.57$
 $\sigma_{\delta_{CP}} = 0.26$

ある真値に対し、測定値の標準誤差が求まる





Fitted δ_{CP} [rad]



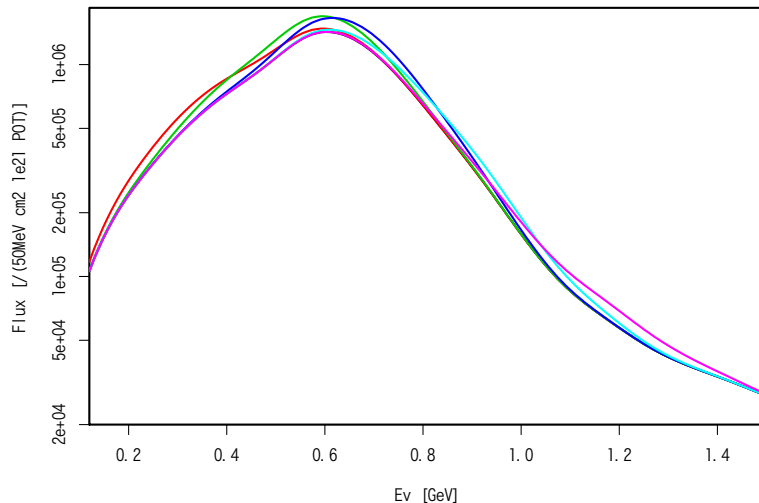
真値が分からないので、
 全ての値で測定値の誤差を計算
 (系統誤差は次のスライドで導入)

系統誤差の取扱い

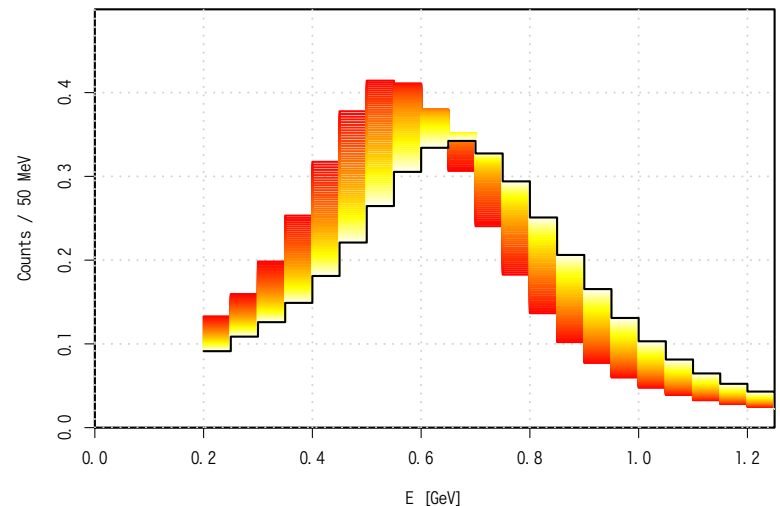
- 実際の実験では例えばニュートリノの反応断面積の真値が分からない
- ある真値を仮定し計算
→パラメータとしフィッティング
(他の実験からの制限を加えておく)
- **ビーム**、**反応断面積**、**検出器応答**に53個のパラメータ

例:

ビーム・スペクトルの系統誤差

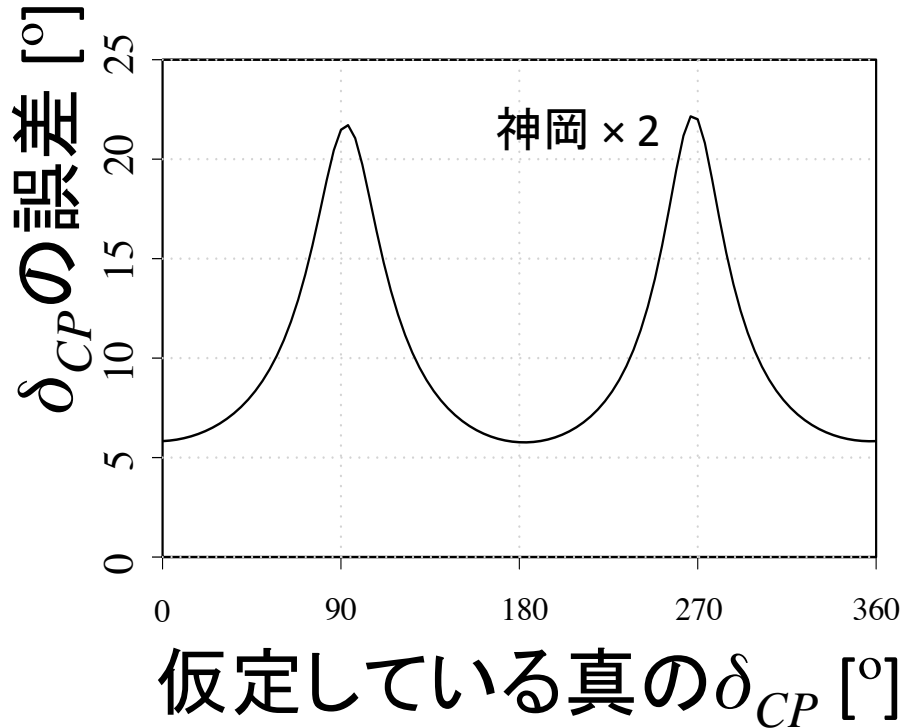


検出器のエネルギー・スケール



結果： δ_{CP} への感度

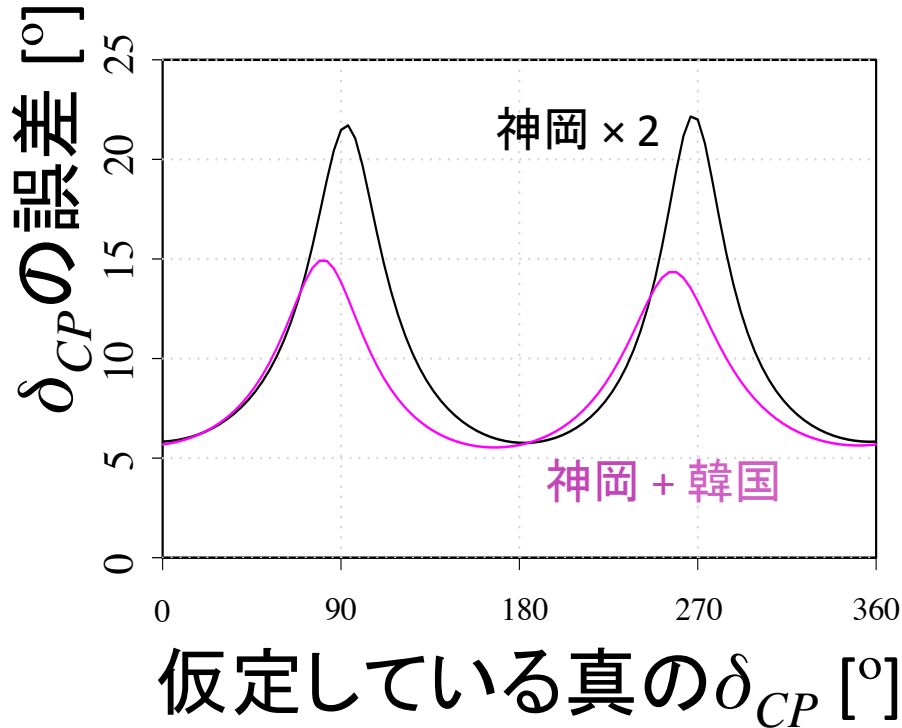
- Current best (T2K) $\sim 160^\circ$
Phys. Rev. Lett. 118, 151801 (2017)
- 検出器を大きくすることで10年で δ_{CP} が
5–22°の誤差で求まる
(主に $P_{\mu e}$ の $\sin\delta_{CP}$ 項)



$$P_{\mu \rightarrow e} \approx P_{\text{atm}} + 2\sqrt{P_{\text{atm}}}\sqrt{P_{\text{sol}}}\cos(\Delta_{32} + \delta_{CP}) + P_{\text{sol}}$$

※10年の測定を仮定

結果： δ_{CP} への感度



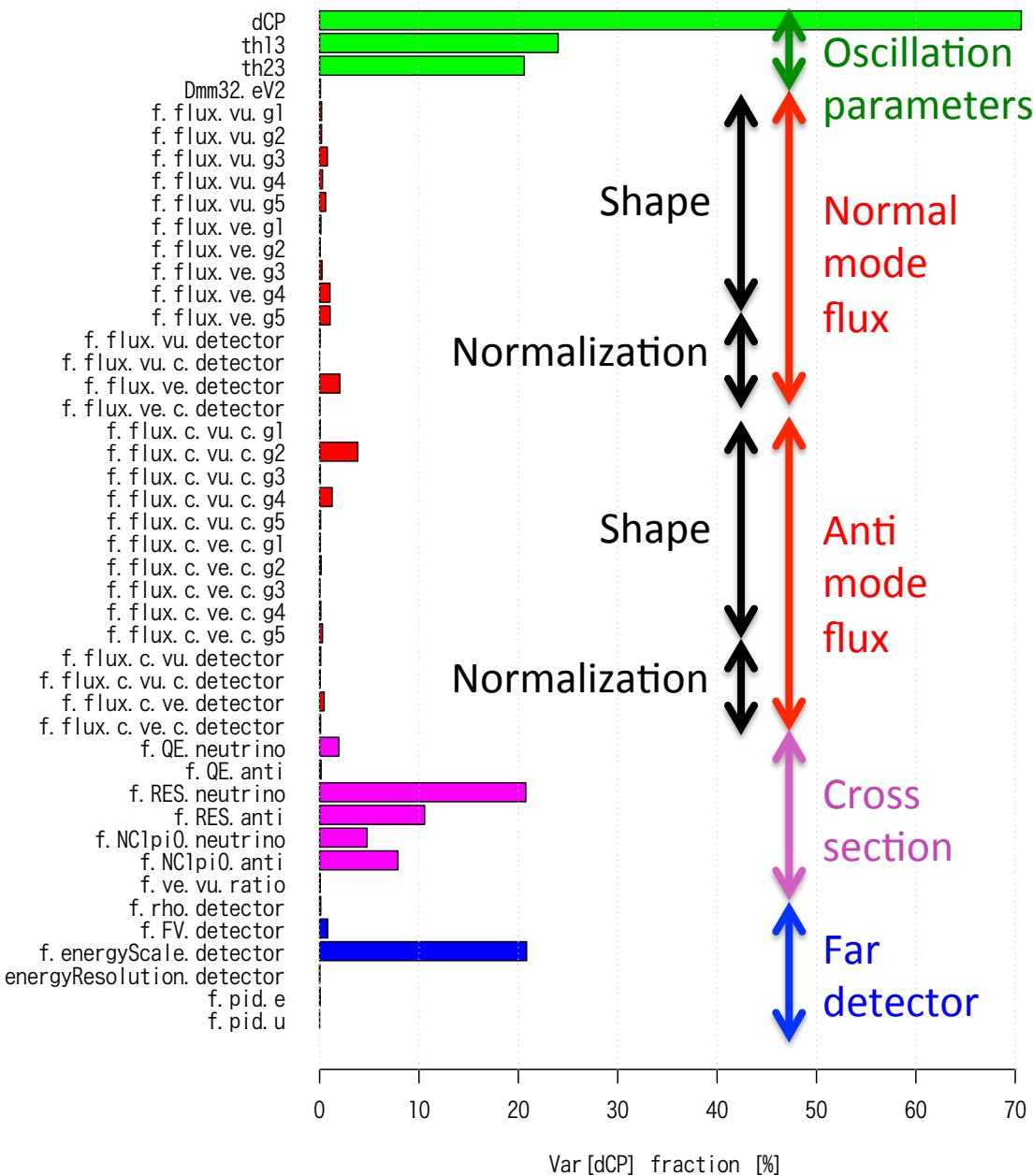
- Current best (T2K) $\sim 160^\circ$
Phys. Rev. Lett. 118, 151801 (2017)
- 検出器を大きくすることで10年で δ_{CP} が5–22°の誤差で求まる
(主に $P_{\mu e}$ の $\sin\delta_{CP}$ 項)
- 韓国に検出器を置くことで更に最大35%改善
($\cos\delta_{CP}$ 項の寄与)

$$P_{\mu \rightarrow e} \approx P_{\text{atm}} + 2\sqrt{P_{\text{atm}}}\sqrt{P_{\text{sol}}}\cos(\Delta_{32} + \delta_{CP}) + P_{\text{sol}}$$

※10年の測定を仮定

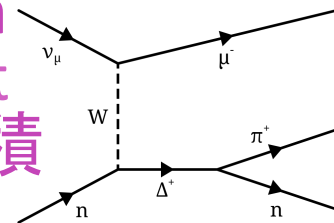
Approximate fraction of Var [dCP]

OAA = 2.5°, L = 295 km, rho = 2.6 g/cm3, FV = 374 kton
 NH, d_CP = 0.0, sin2(2th13) = 0.085, sin2(th23) = 0.50



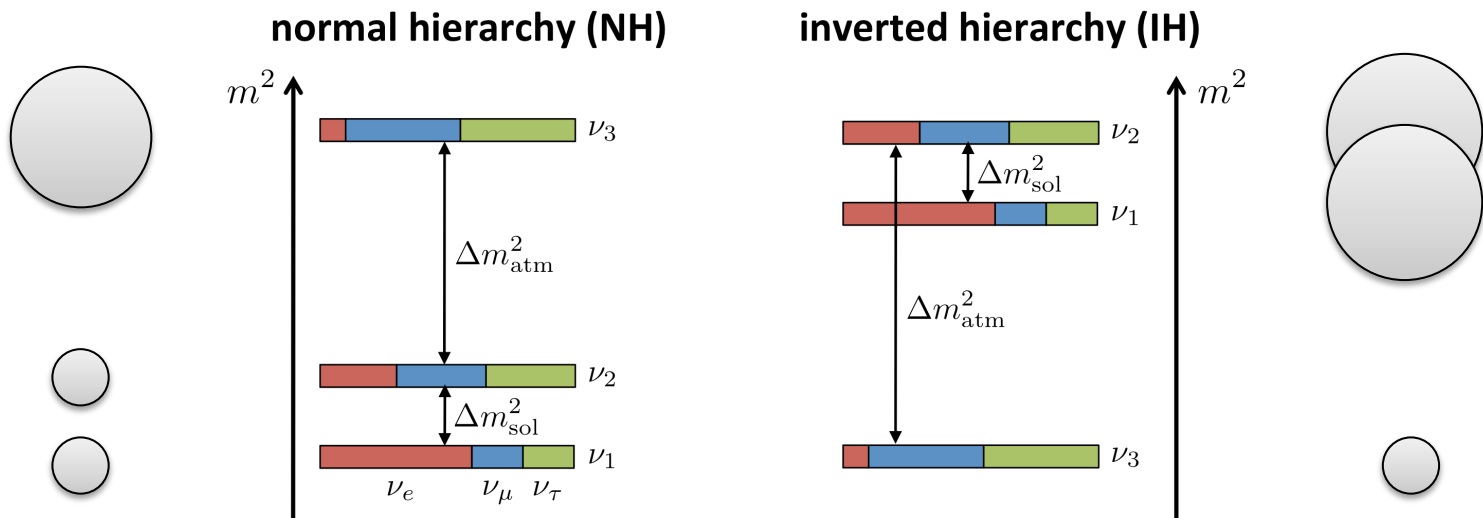
$\delta_{CP} = \pi/2$ での 主な誤差要因

- 個々のパラメータを固定した時の分散の変化から全体の誤差に占める割合を計算
- Resonant π production 及び NC1 π 反応断面積
- HyperKのエネルギースケール精度

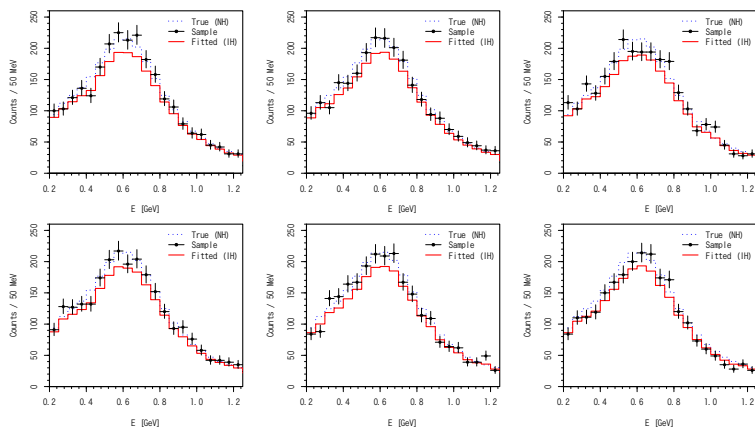
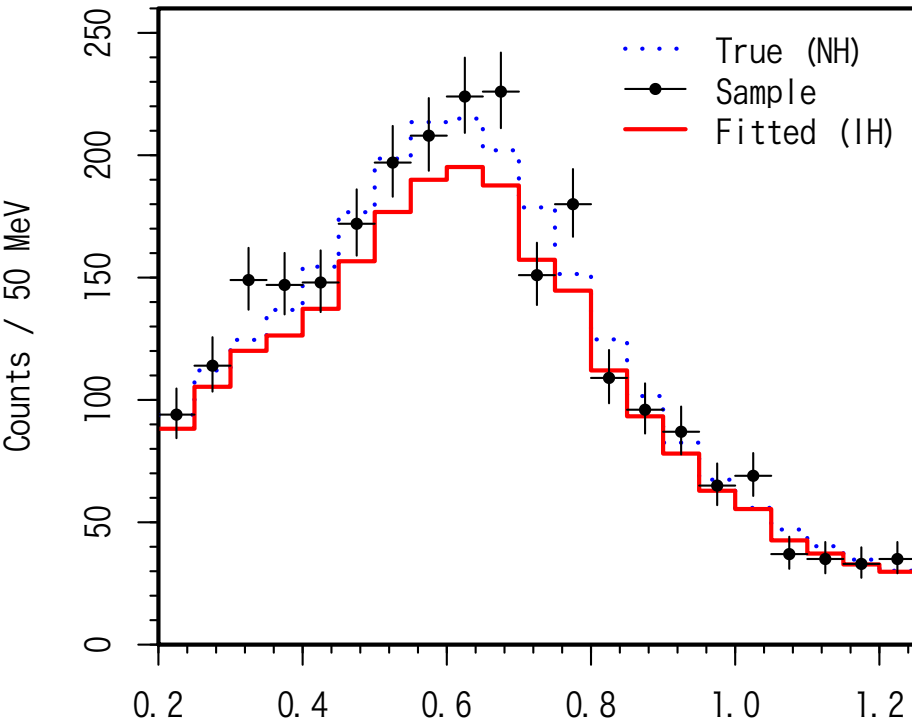


質量階層性

- 真空のニュートリノ振動確率は
 Δm_{32}^2 の符号と $\delta_{CP} \leftrightarrow \pi - \delta_{CP}$ の交換で縮退
 →質量固有状態の順序に不定性
- Majoranaニュートリノの探索や
 Leptogenesisモデルの制限にも重要
- 物質効果で縮退が解けるので、
 検出器までの距離が長い韓国の方が感度が良い



質量階層性への感度の計算

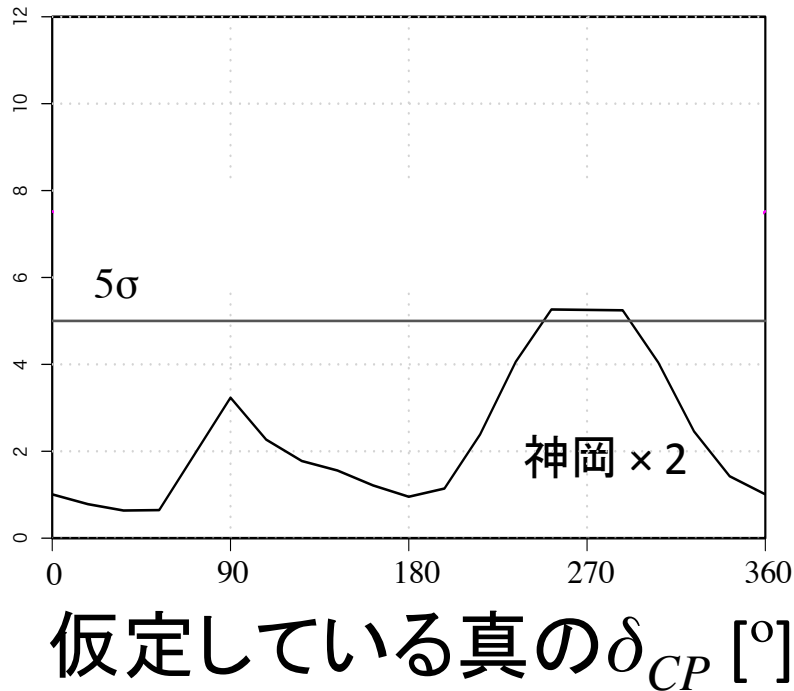


- Normal Hierarchyを仮定してサンプリング
- Inverted Hierarchyでフィッティング $\rightarrow \chi^2$
- 繰返し、平均をとる $\rightarrow \langle \chi^2 \rangle$
- $\langle \chi^2 \rangle$ が低い
 \rightarrow 階層性の違いが他のパラメータの誤差に埋もれてる
- $\langle \chi^2 \rangle$ が高い
 \rightarrow 階層性の違いに感度あり

※これも実際はサンプリングしないで確率論でそのあたりの計算を解析的にやっている 26

結果：質量階層性への感度

階層性を識別する有意性 [σ]

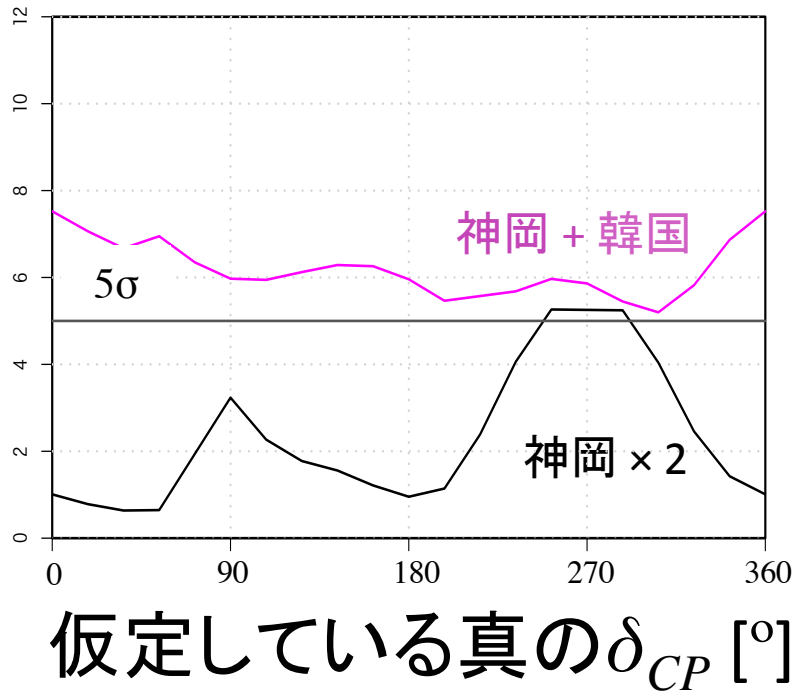


- 検出器を大きくすることだけでは基本 5σ では決まらない

※10年の測定を仮定

結果：質量階層性への感度

階層性を識別する有意性 [σ]



- 検出器を大きくすることだけでは基本 5σ では決まらない
- 韓国に置くと全ての δ_{CP} の値で 5σ 以上で決まる (物質効果による)

$$\sqrt{P_{\text{atm}}} \equiv \sin \theta_{23} \sin 2\theta_{13} \frac{\sin(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)} \Delta_{31}$$

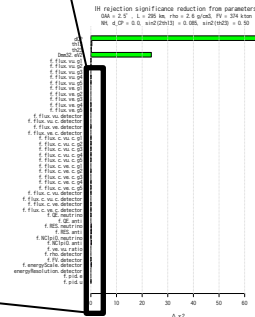
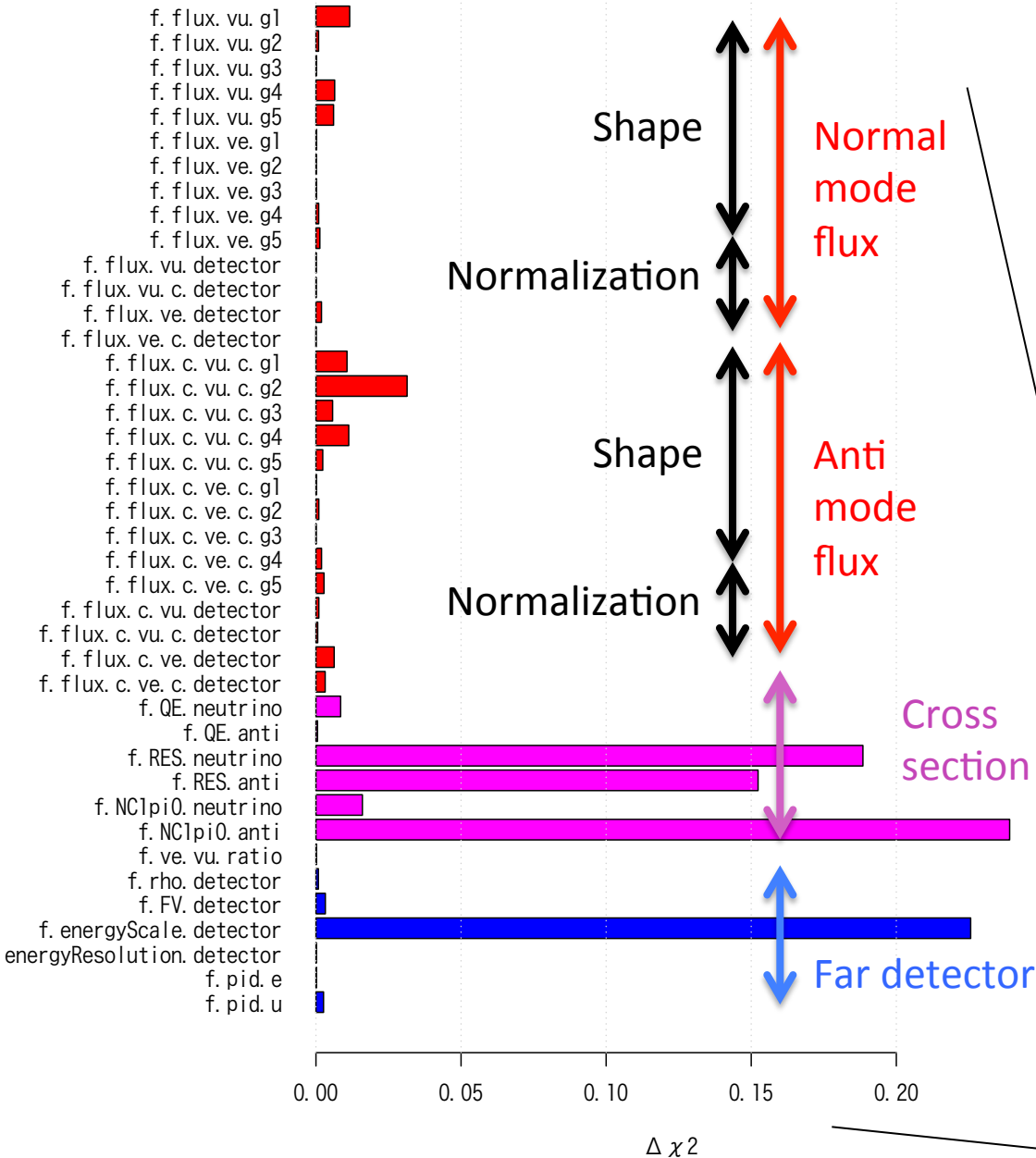
※10年の測定を仮定

IH rejection significance reduction from systematics

OAA = 2.5°, L = 295 km, rho = 2.6 g/cm3, FV = 374 kton
 NH, d_CP = 0.0, sin2(2th13) = 0.085, sin2(th23) = 0.50

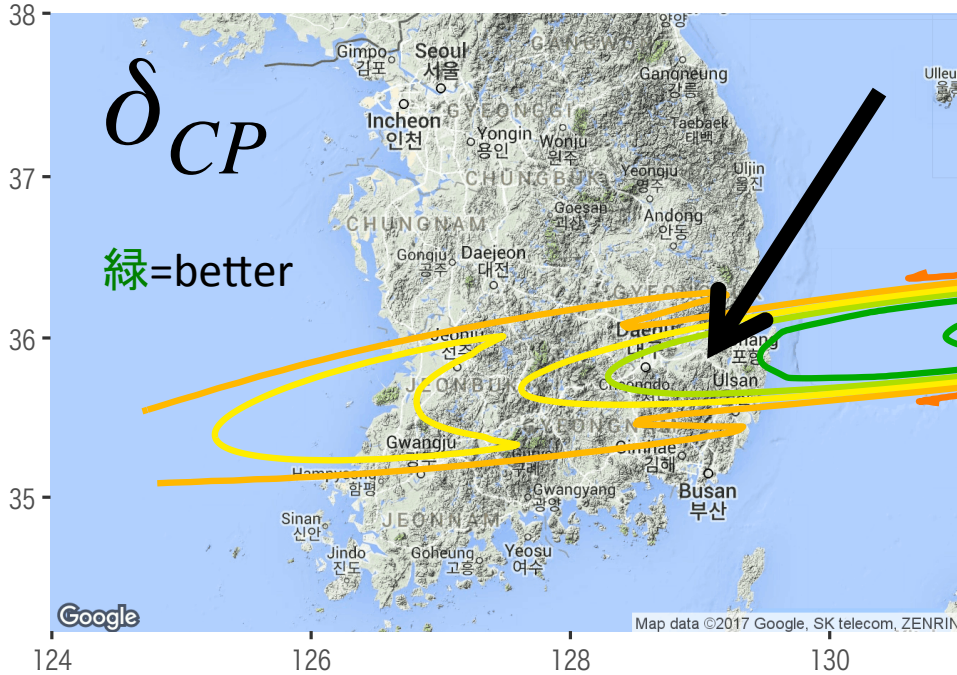
最も効いてくる 系統誤差

- 個々のパラメータを固定した時の $\Delta\chi^2$
- 振動パラメータの縮退が支配的
- Resonant π production 及び NC1 π 反応断面積
- HyperKのエネルギースケール精度



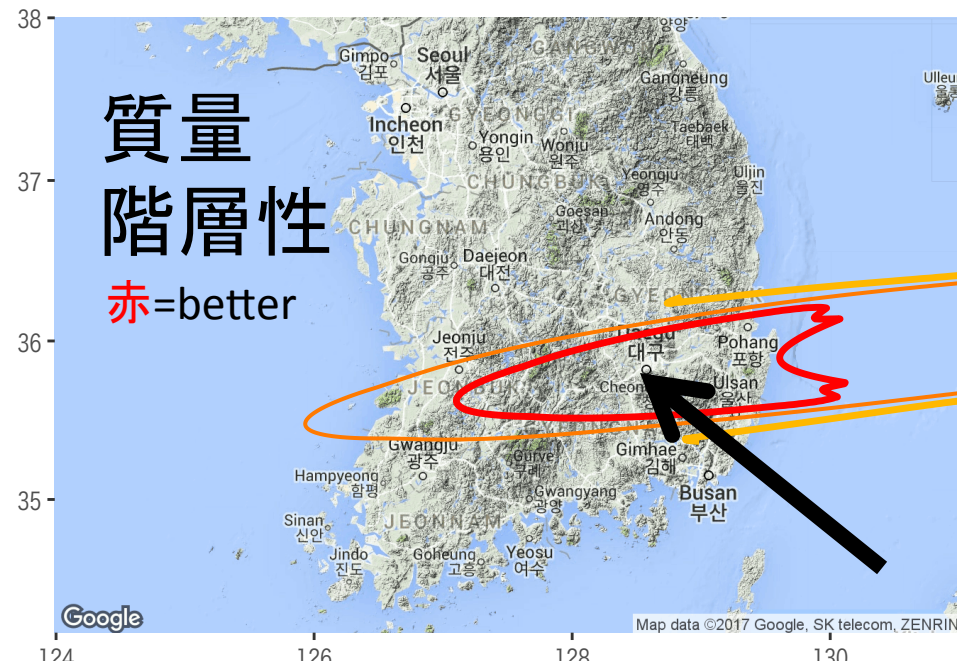
※神岡 $\delta_{CP} = 0$ の場合

dCP precision for $dCP=\pi/2$



最適な位置

地図上の各点において δ_{CP} と質量階層性への感度を計算



東岸近くの山脈が良い

まとめ

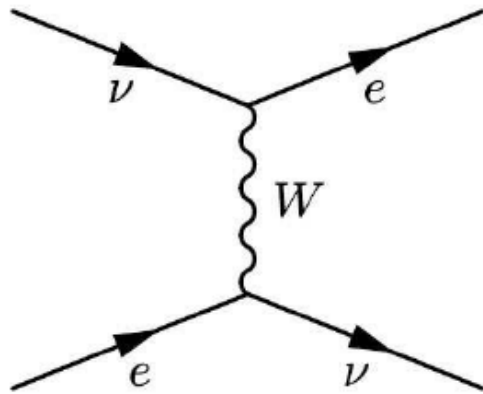
- ニュートリノ振動を正確に測定することでCP対称性の破れ等、宇宙全体を理解するため重要な効果の大きさを測定できる。
- 長基線ニュートリノ実験のシミュレータを開発。
- 計算の結果、 δ_{CP} 、質量階層性は将来の実験で以下の感度で測定可能となる。神岡+韓国が優。
- 最も効いてくる系統誤差はいずれもnon-QE断面積とエネルギースケール精度 (δ_{CP} にもよる)
- 検出器の性能向上及びビームフラックスの系統誤差の削減により感度は今後さらに向上が見込まれる。

	神岡 × 2	神岡 + 韓国
δ_{CP} の精度	5 – 22°	5 – 15°
質量階層性の決定	2 – 5 σ	> 5 σ

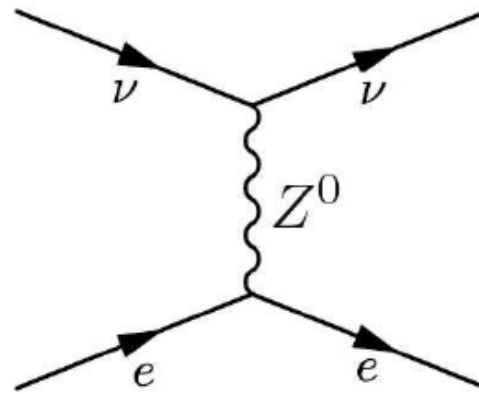
backup

物質効果 (MSW効果)

- ニュートリノは物質中で弱い相互作用により次のように前方散乱され、実効的なポテンシャルが加わる



ν_e のみ: 荷電反応



すべての ν : 中性反応

$$H = U \frac{m^2}{2E} U^\dagger + \begin{pmatrix} A_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- ν_e のみ異なる反応をするので、他の ν とのポテンシャルの差により、実効質量と混合角が変化する
- ポテンシャル $A_e = \sqrt{2}G_F n_e$ は反ニュートリノでは逆符号

遷移確率

$a \neq 0$ で質量階層性の縮退が解ける

$$\sqrt{P_{\text{atm}}} \equiv \sin \theta_{23} \sin 2\theta_{13} \frac{\sin(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)} \Delta_{31}$$

$$\sqrt{P_{\text{sol}}} \equiv \cos \theta_{23} \sin 2\theta_{12} \frac{\sin(aL)}{(aL)} \Delta_{21}$$

δ_{CP} への依存性

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) \approx P_{\text{atm}} + 2\sqrt{P_{\text{atm}}}\sqrt{P_{\text{sol}}}\cos(\Delta_{32} + \delta_{CP}) + P_{\text{sol}}$$

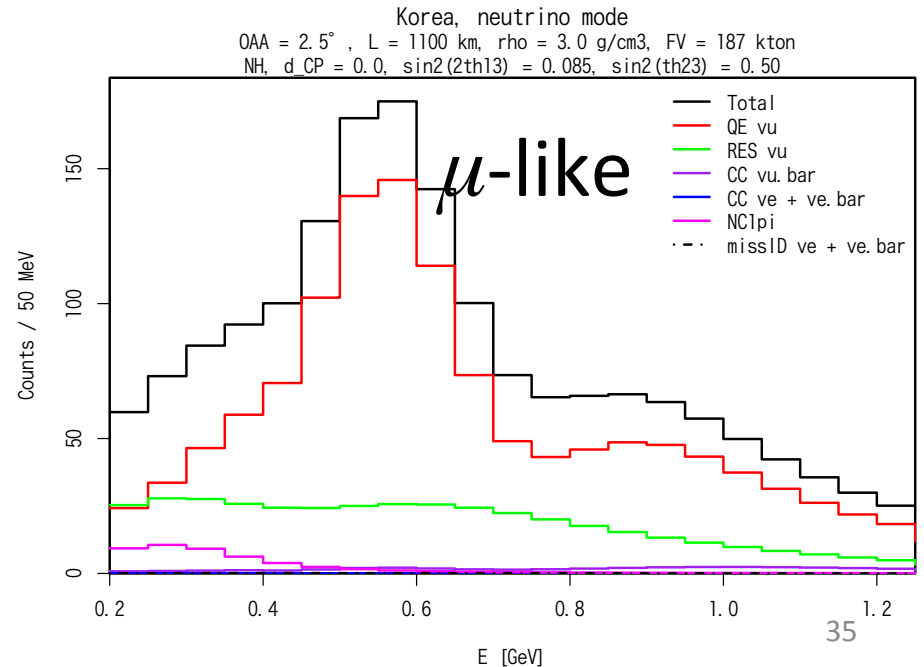
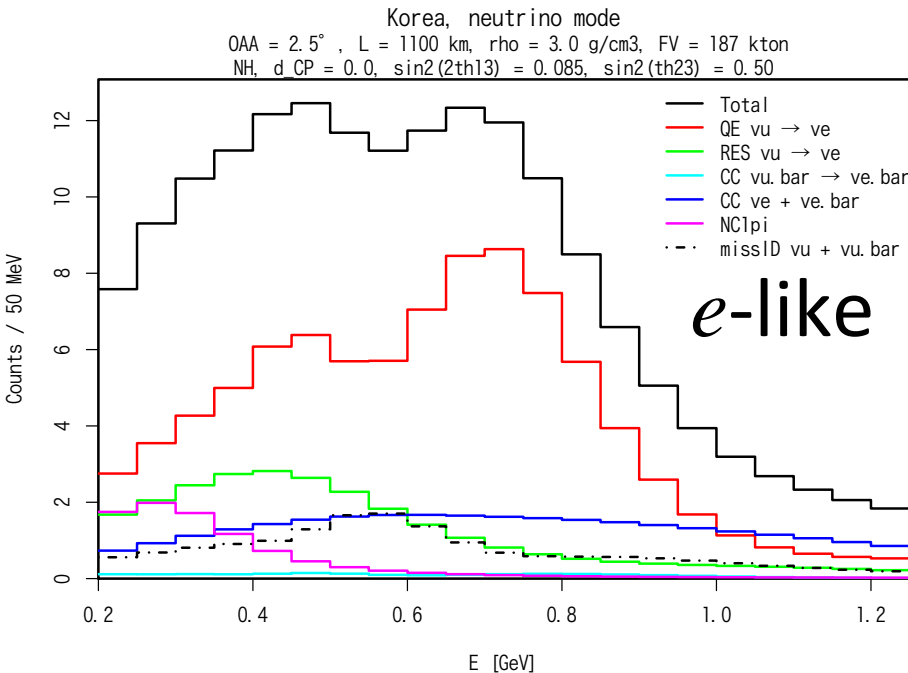
$$\Delta_{ij} \equiv \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}$$

$$a = 2A_e = \frac{G_F n_e}{\sqrt{2}}$$

$$\cos(\Delta'_{32} + \delta'_{CP}) \approx \cos(-\Delta_{32} + \pi - \delta_{CP}) = -\cos(\Delta_{32} + \delta_{CP})$$

Background

- ビームに含まれる ν_e , ν_e bar
- ν_μ , ν_μ bar をmissID
- NC1 π で π^0 をmissID
- ν_e , ν_e bar をmissID
- NC1 π で π^\pm をmissID

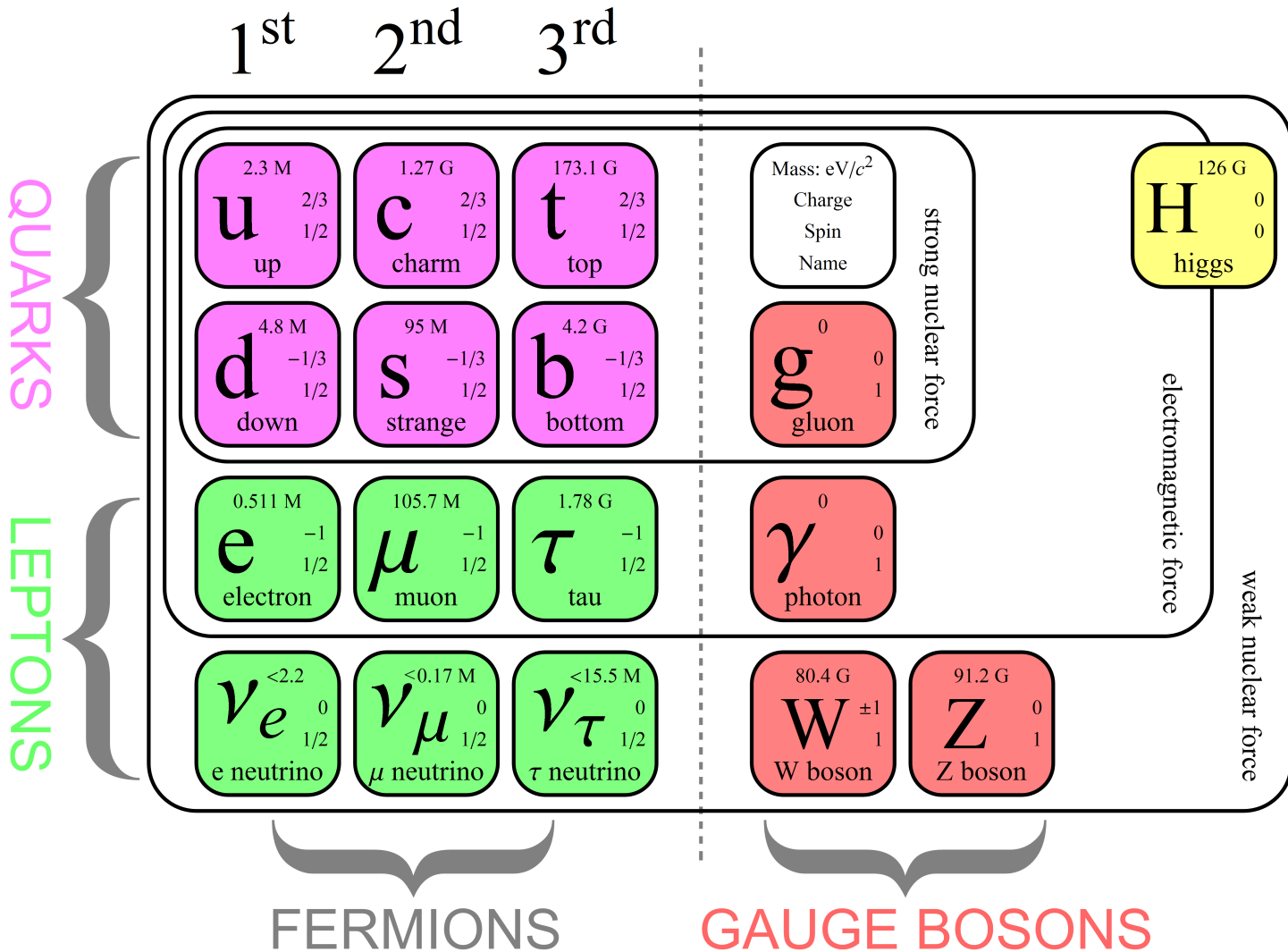


実験パラメータ

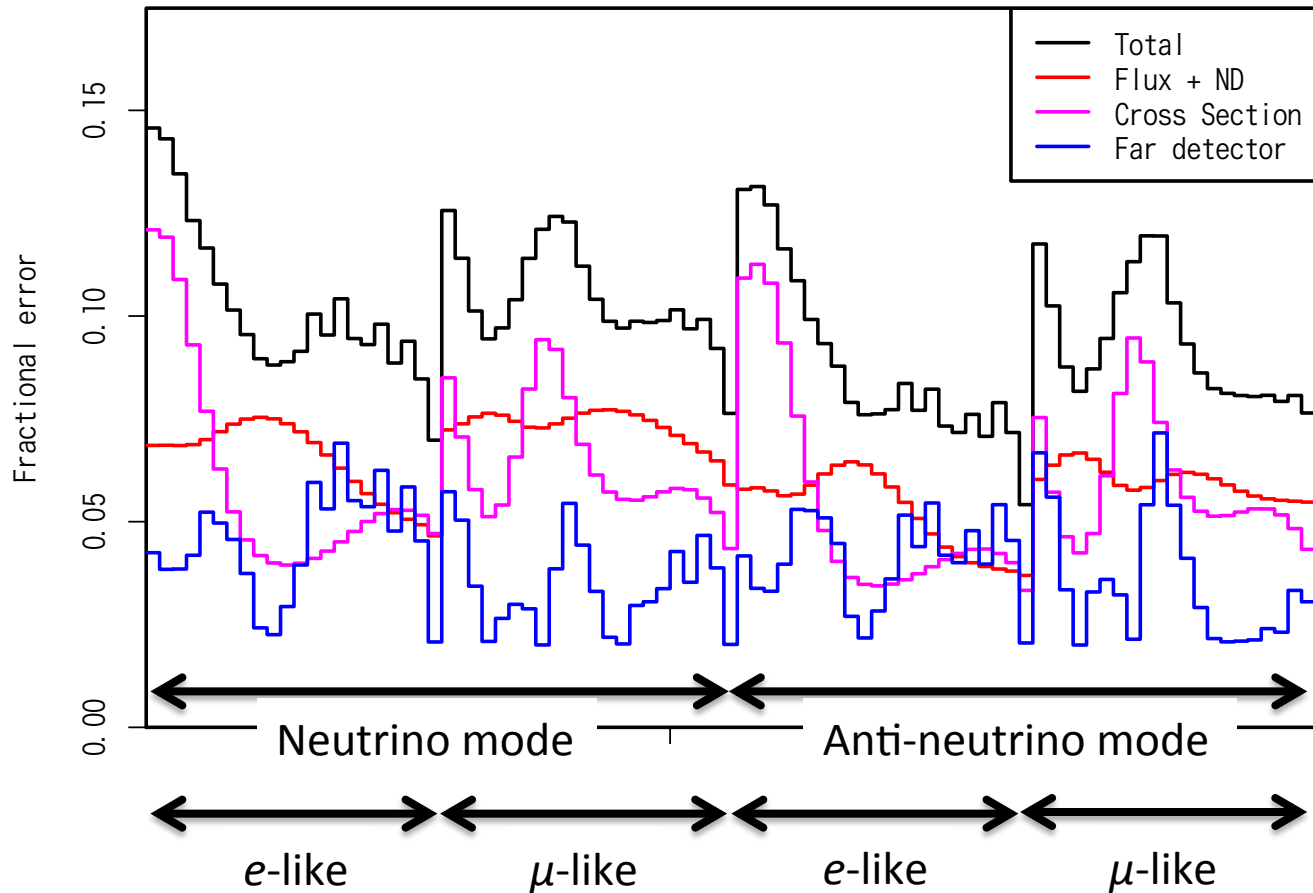
Parameter	$\sin^2 2\theta_{13}$	$\sin^2 \theta_{23}$	δ_{CP}	Δm_{32}^2	mass hierarchy	$\sin^2 2\theta_{12}$	Δm_{12}^2
Nominal	0.085	0.50	0	$2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	NH or IH	0.8704	$7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
Treatment	Fitted	Fitted	Fitted	Fitted	Fixed	Fixed	Fixed

- 検出器あたりの有効体積 187 kton
- ベースライン 295 km (神岡) 1100 km (韓国)
- 韓国におけるビーム角 1.5°
- 質量密度 [g/cm^3] 2.6 (神岡) 3.0 (韓国)
- ビームエネルギー 1.3 MW
- 積分ビームパワー $1.3 \text{ MW} \times 10 \times 10^7 \text{ sec}$

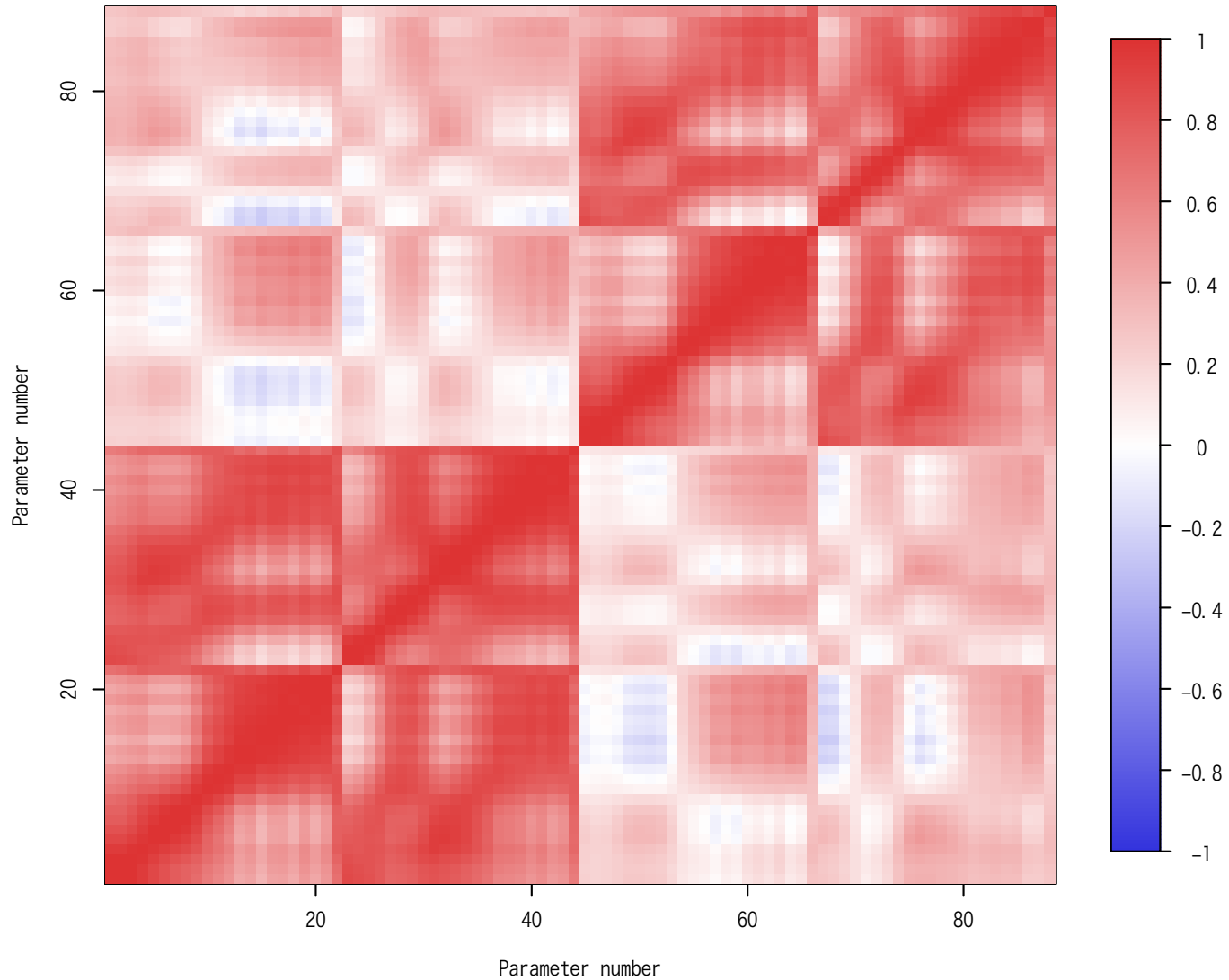
素粒子物理学の標準模型



Binごとの誤差と起源

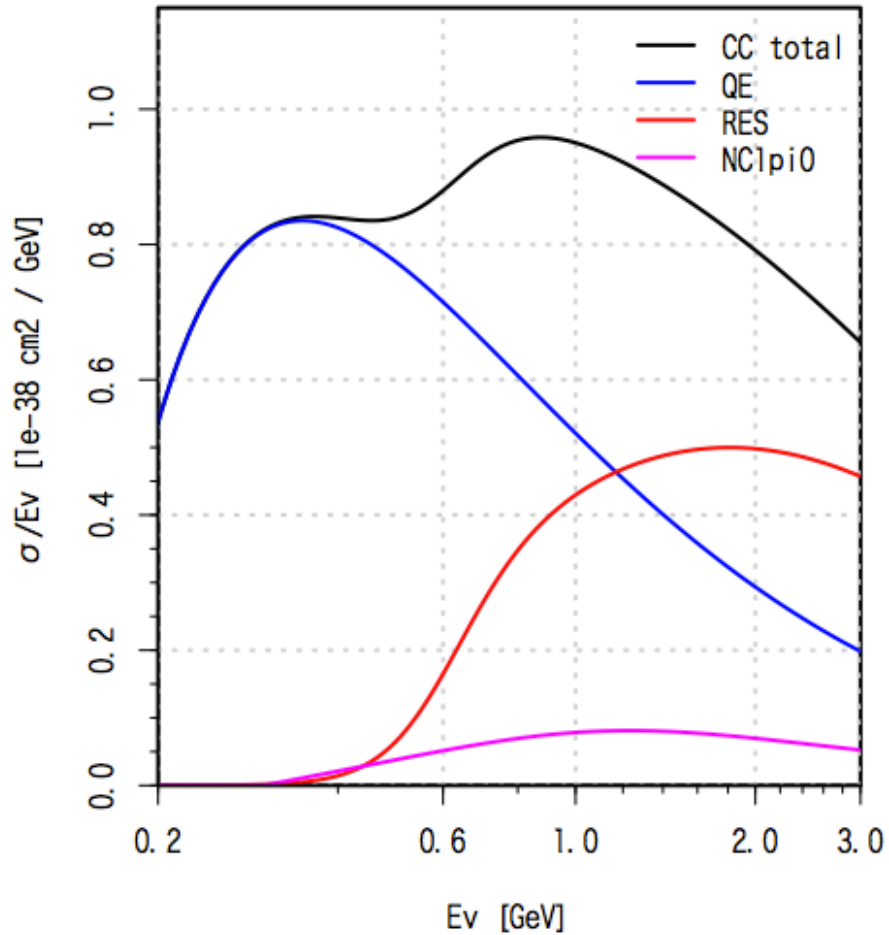


Binごとの誤差の相関

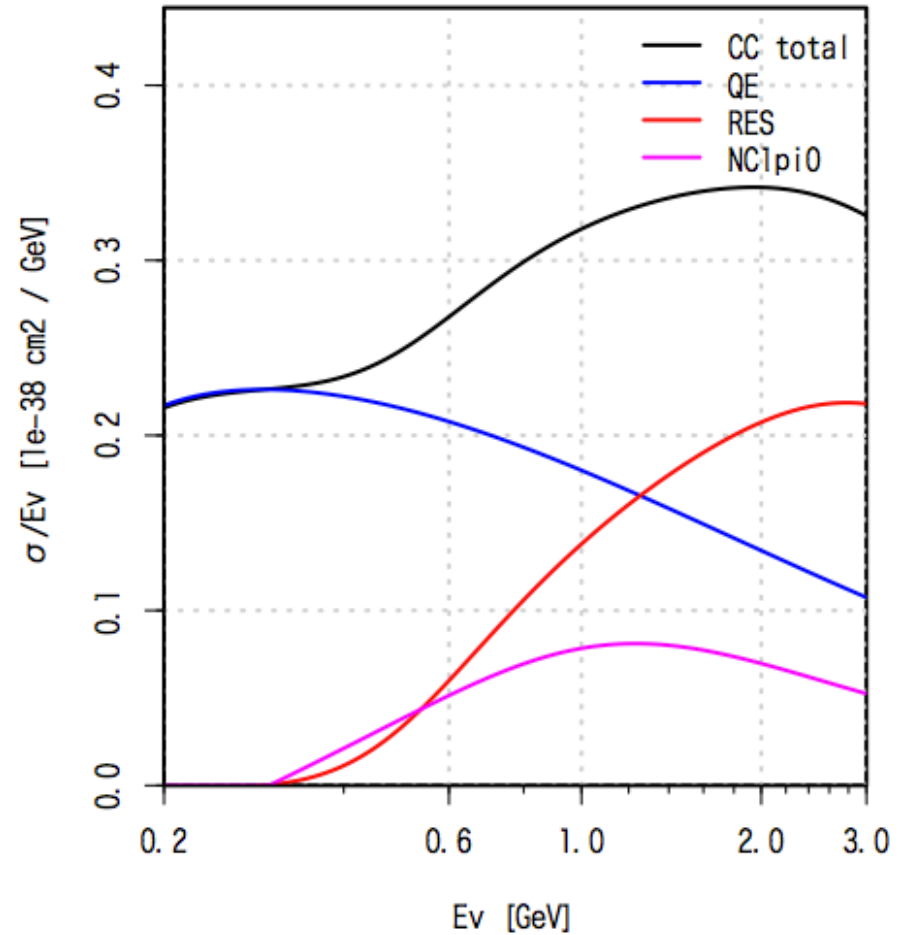


反応断面積

Neutrino cross sections



Anti-neutrino cross sections



NC1 π cross section の決定

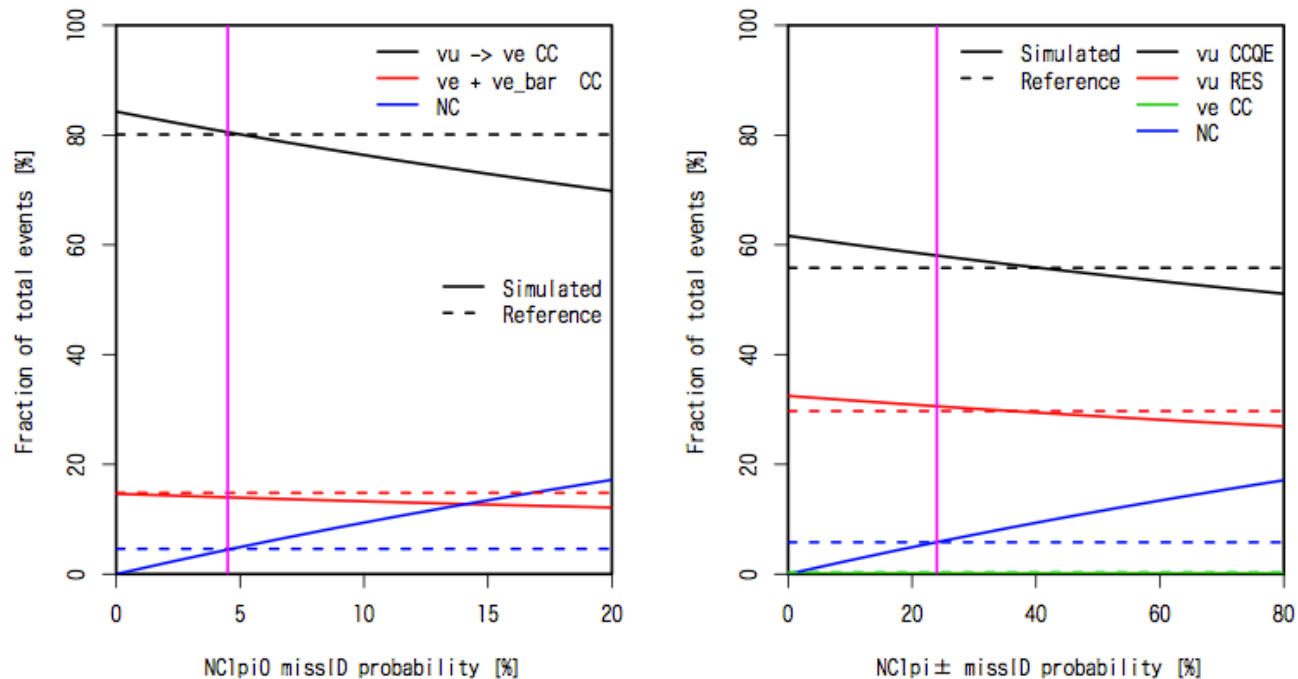


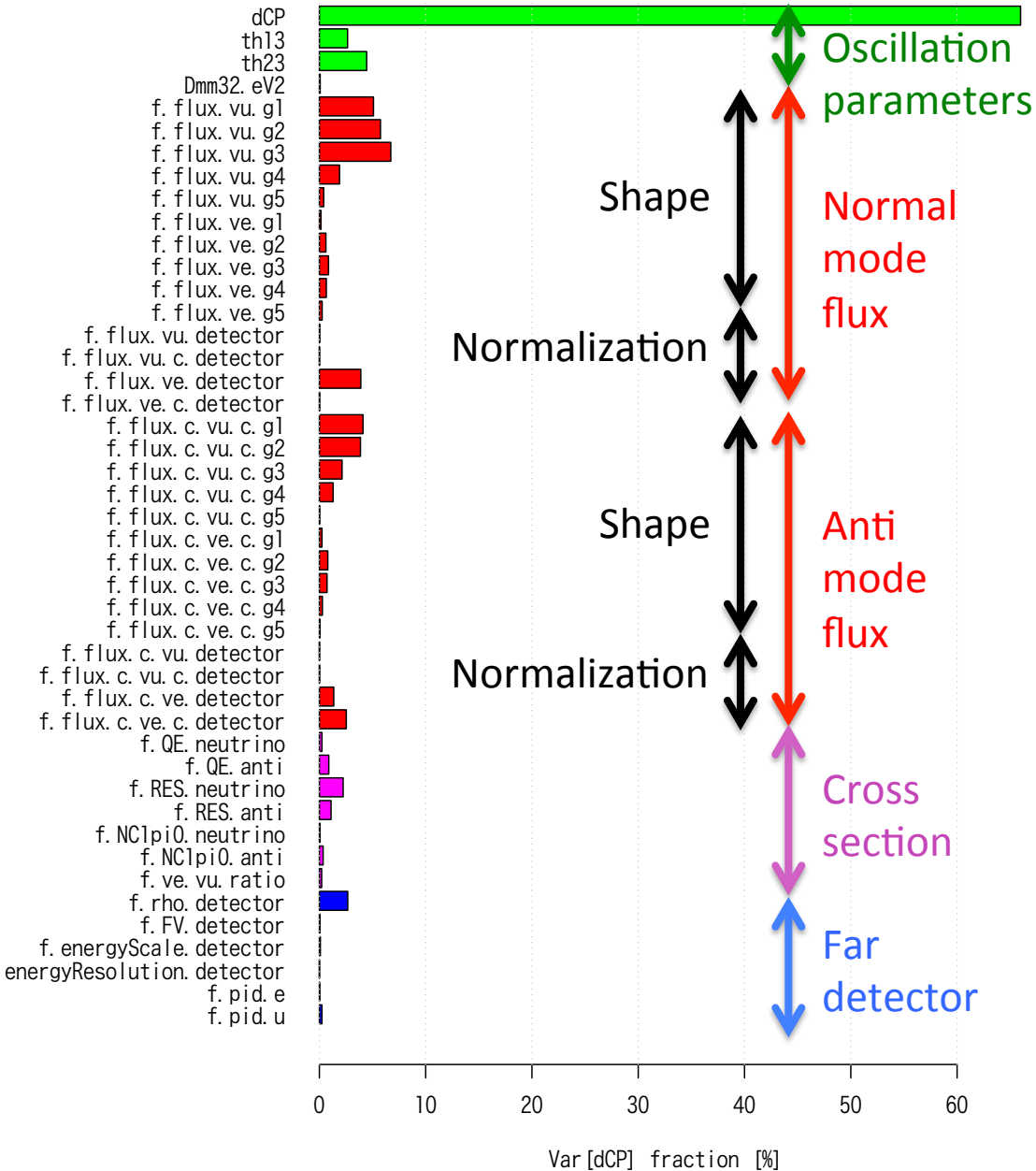
Figure 4.9: Left (right): expected total event fractions for the appearance (disappearance) channel. Dashed lines are calculated from the best fit event numbers given in the T2K appearance [3] (disappearance [2]) analyses. The horizontal lines in magenta are the missID probabilities chosen for this work, from the intersection point of the solid and dashed lines for the NC estimates.

系統誤差

Parameter class	Prior constraint	# of params	
Flux normalization [4]			
wrong-sign components	8%	4*	} 検出器ごとに 独立
same-sign components	5.7%	4*	
Flux shape for same-sign components	5.7%	20	
Cross section			
QE	3%	2	
RES [16]	20%	2	
NC1 π [32]	33%	2	
antisymmetric ν_μ/ν_e ratio [4]	2%	1	
Detector response			
matter density [17]	6%	1*	} 検出器ごとに 独立
fiducial volume	2%	1*	
energy scale	2%	1*	
energy resolution	2%	1*	

Approximate fraction of Var [dCP]
 OAA = 2.5°, L = 295 km, rho = 2.6 g/cm3, FV = 374 kton
 NH, d_CP = 0.0, sin2(2th13) = 0.085, sin2(th23) = 0.50

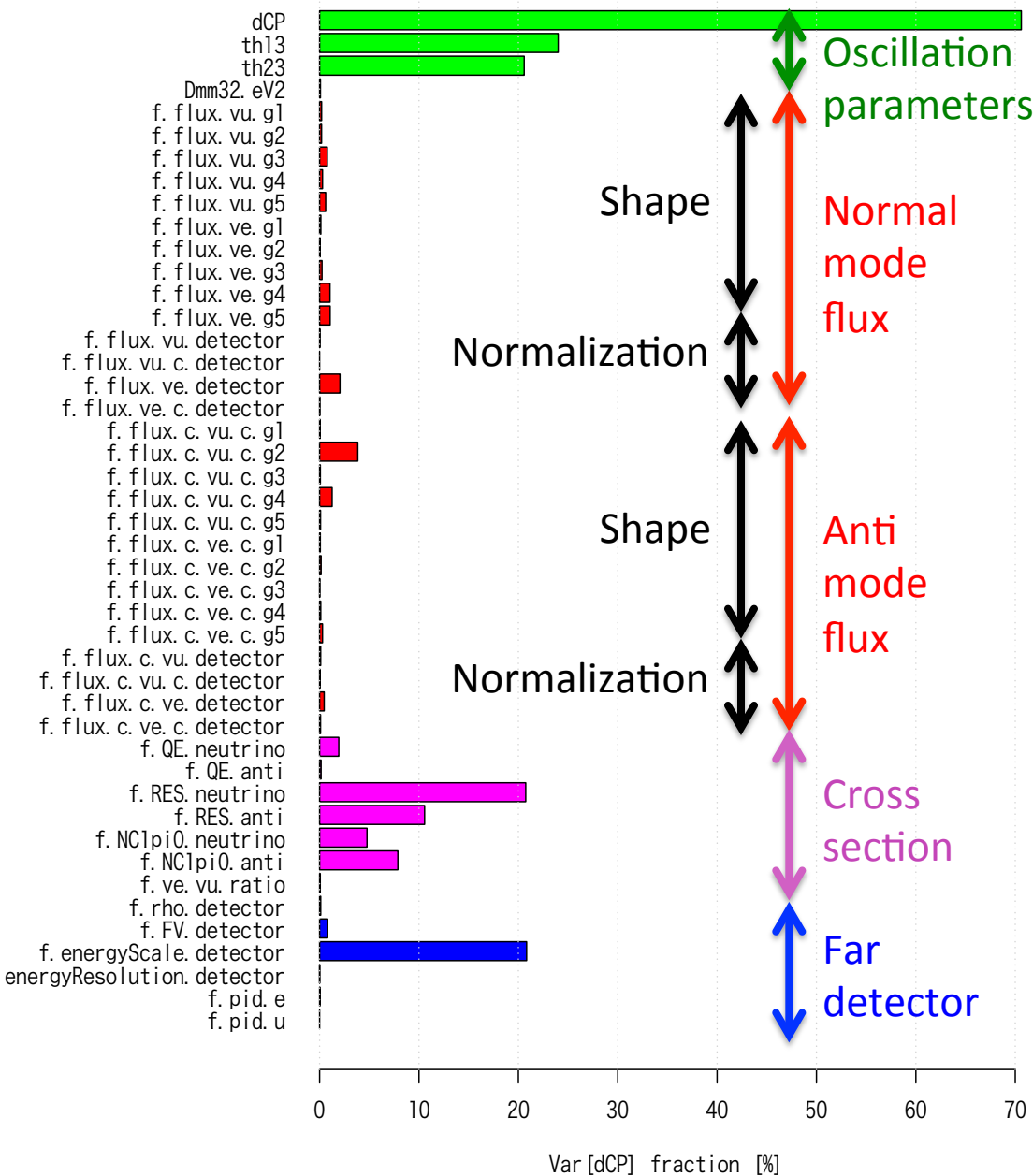
$\delta_{CP} = 0$ での 主な誤差要因



- ν_μ flux shape
- ν_e flux norm.
- Resonant π scattering cross section
- Earth matter density

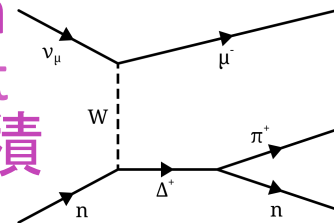
Approximate fraction of Var [dCP]

OAA = 2.5°, L = 295 km, rho = 2.6 g/cm3, FV = 374 kton
 NH, d_CP = 0.0, sin2(2th13) = 0.085, sin2(th23) = 0.50



$\delta_{CP} = \pi/2$ での 主な誤差要因

- 個々のパラメータを固定した時の分散の変化から全体の誤差に占める割合を計算
- Resonant π production 及び NC1 π 反応断面積
- HyperKのエネルギースケール精度



MC simulation of Fermi Motion

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

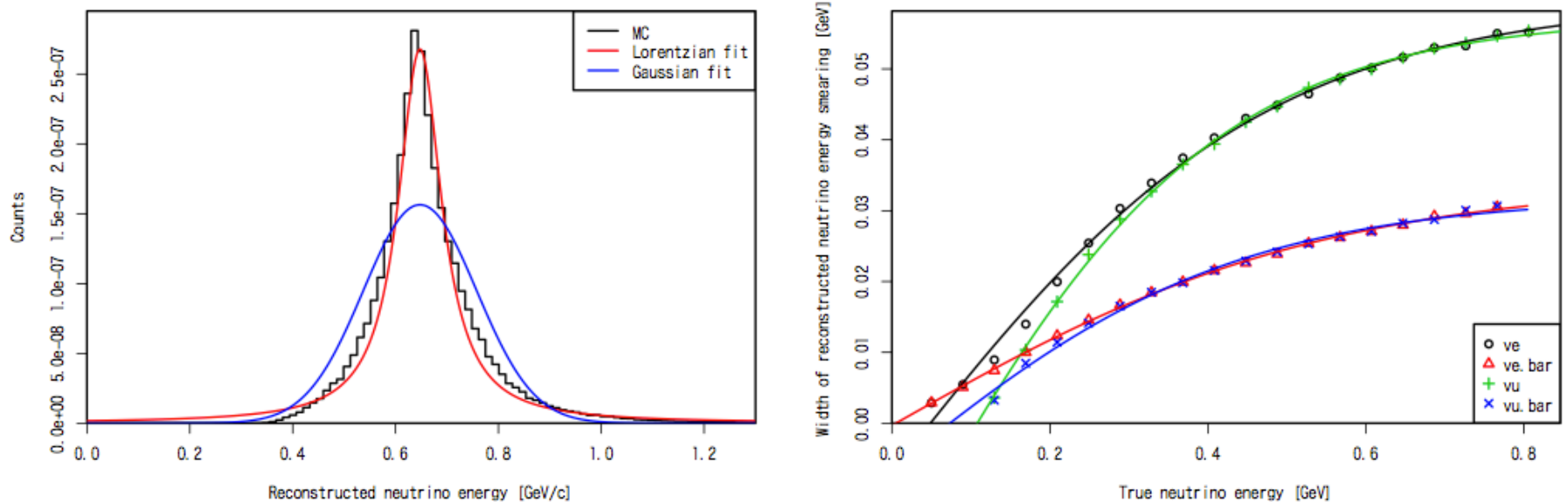
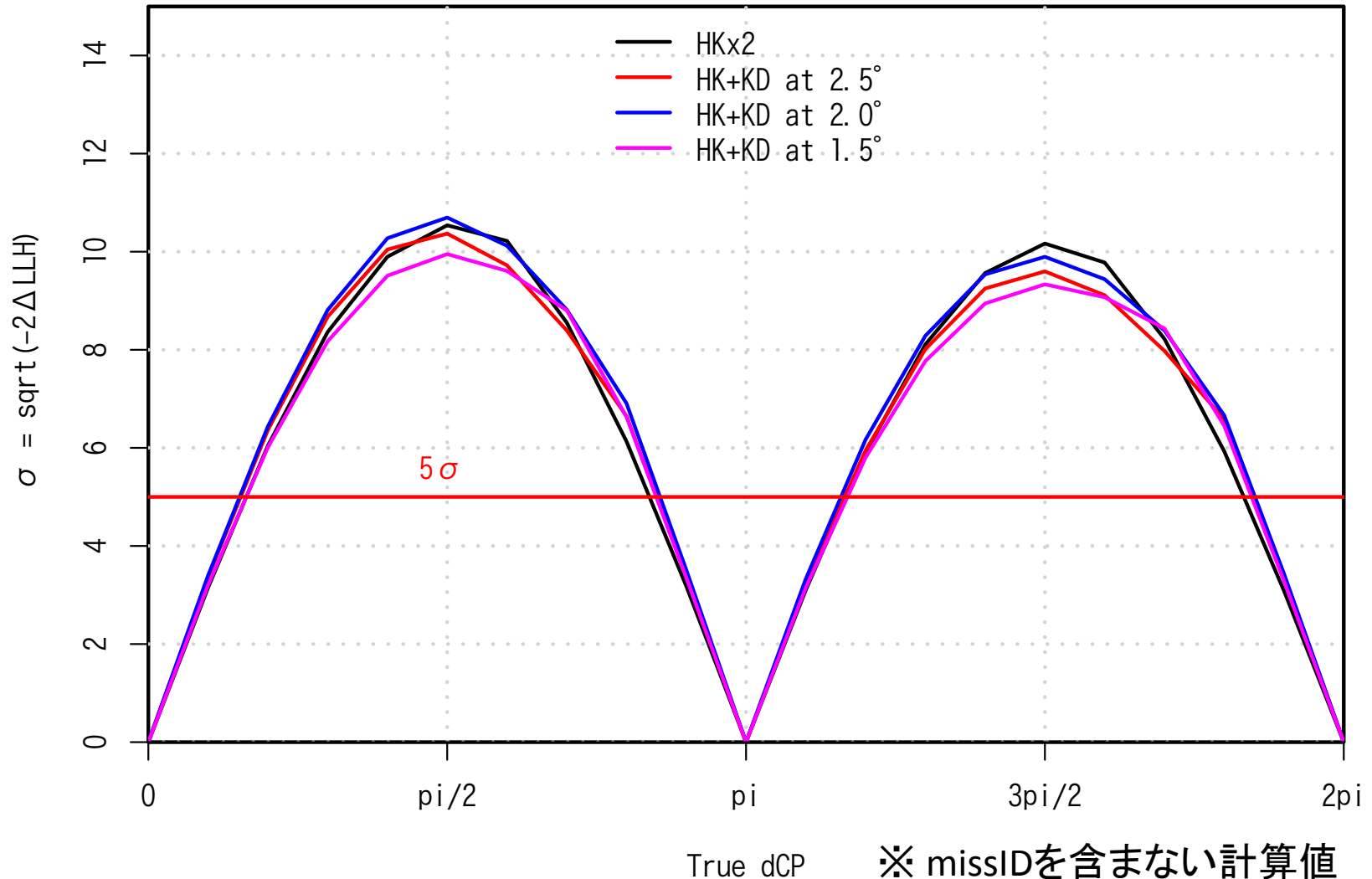


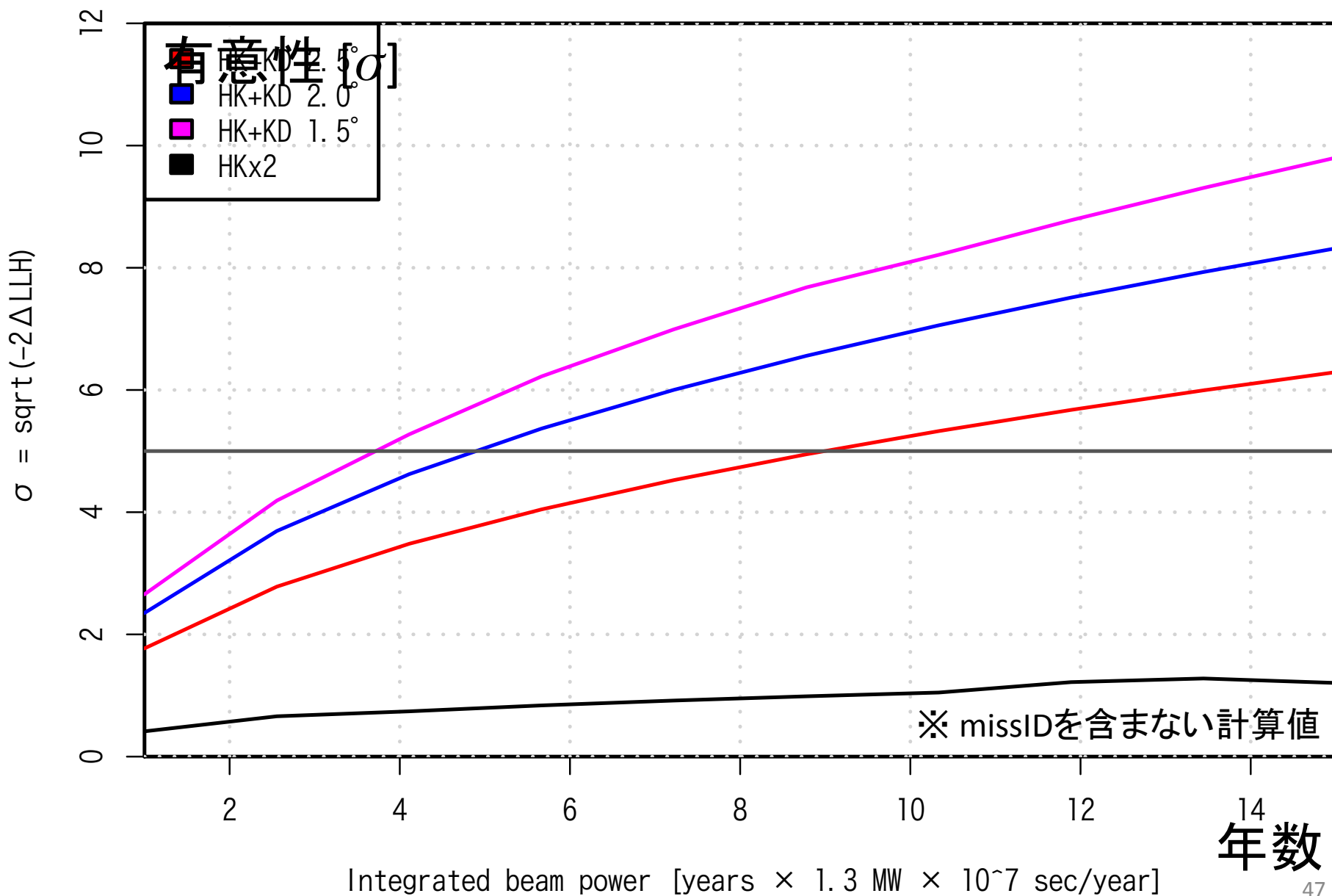
Figure 4.7: Left: Distribution of reconstructed neutrino energy for true $E_\nu = 0.65$ GeV. The colored lines are different fits to the MC simulation result. Right: Dependence of the Lorentzian smearing width due to Fermi motion by true incident neutrino energy. The different shapes correspond to the different neutrino species. Solid lines are fits with hyperbolic tangent functions.

CP対称性の破れへの感度

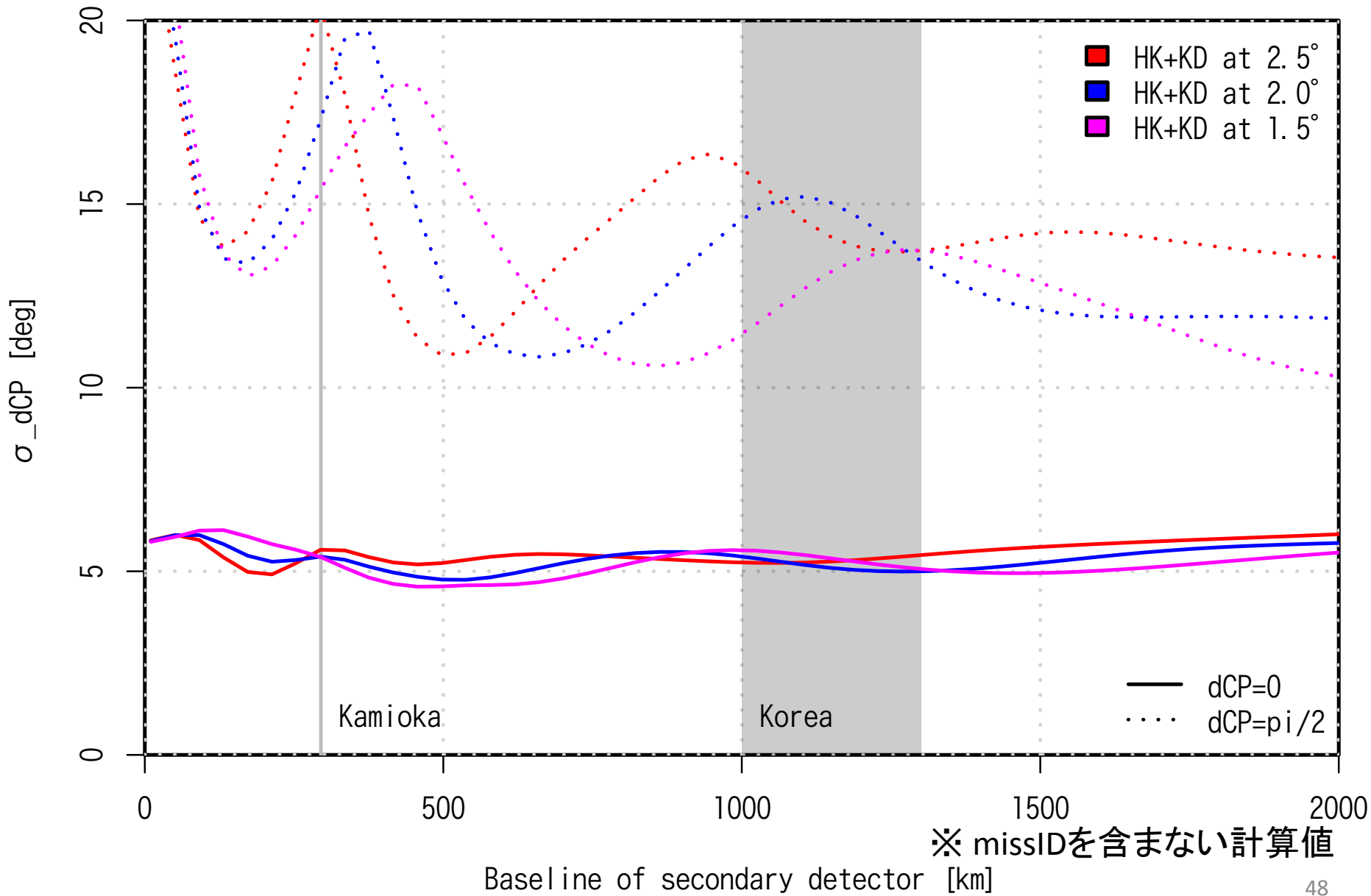
Significance to exclude $\sin(dCP)=0$



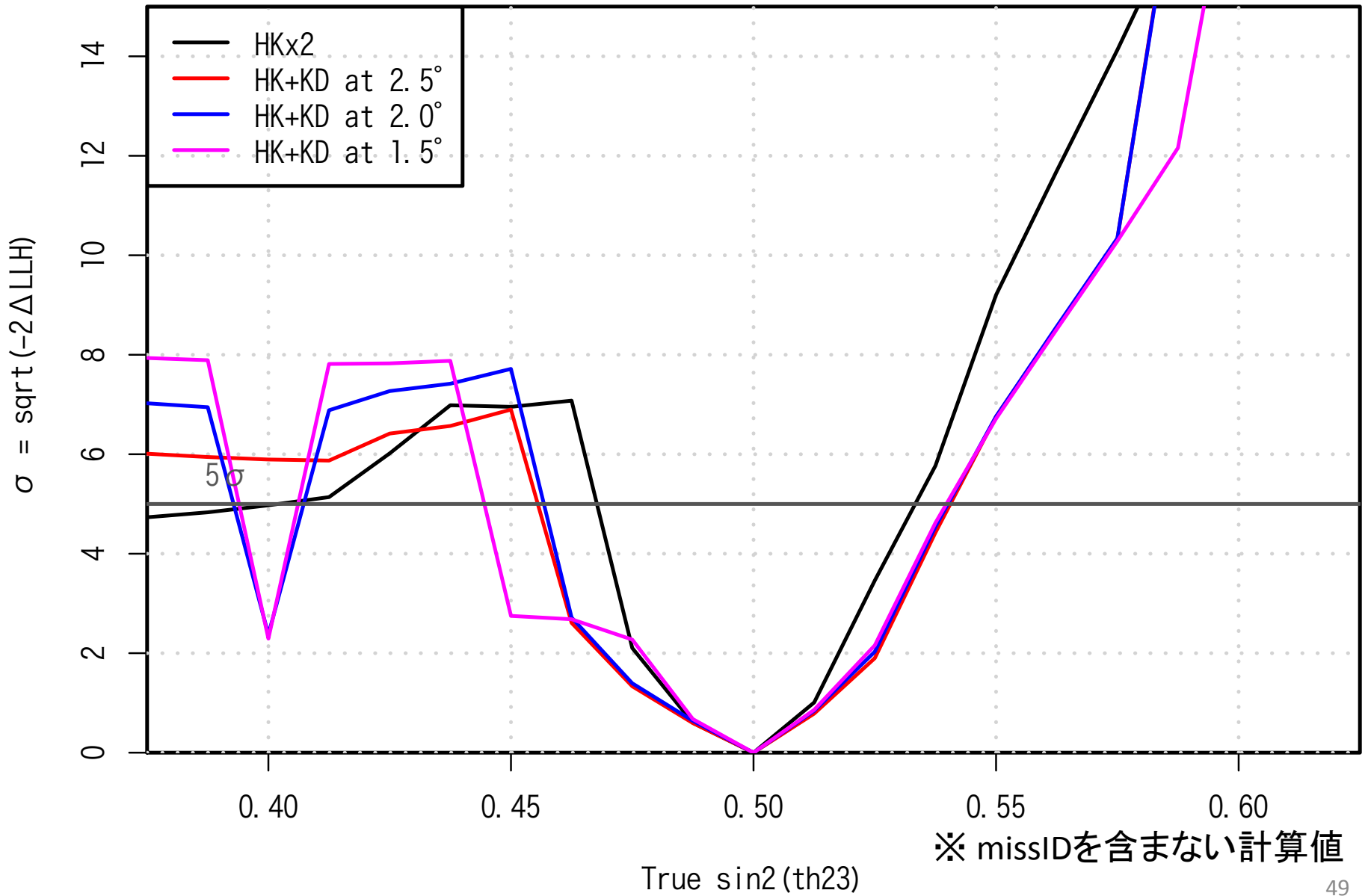
Wrong mass hierarchy rejection significance (true = NH, dCP = 0)



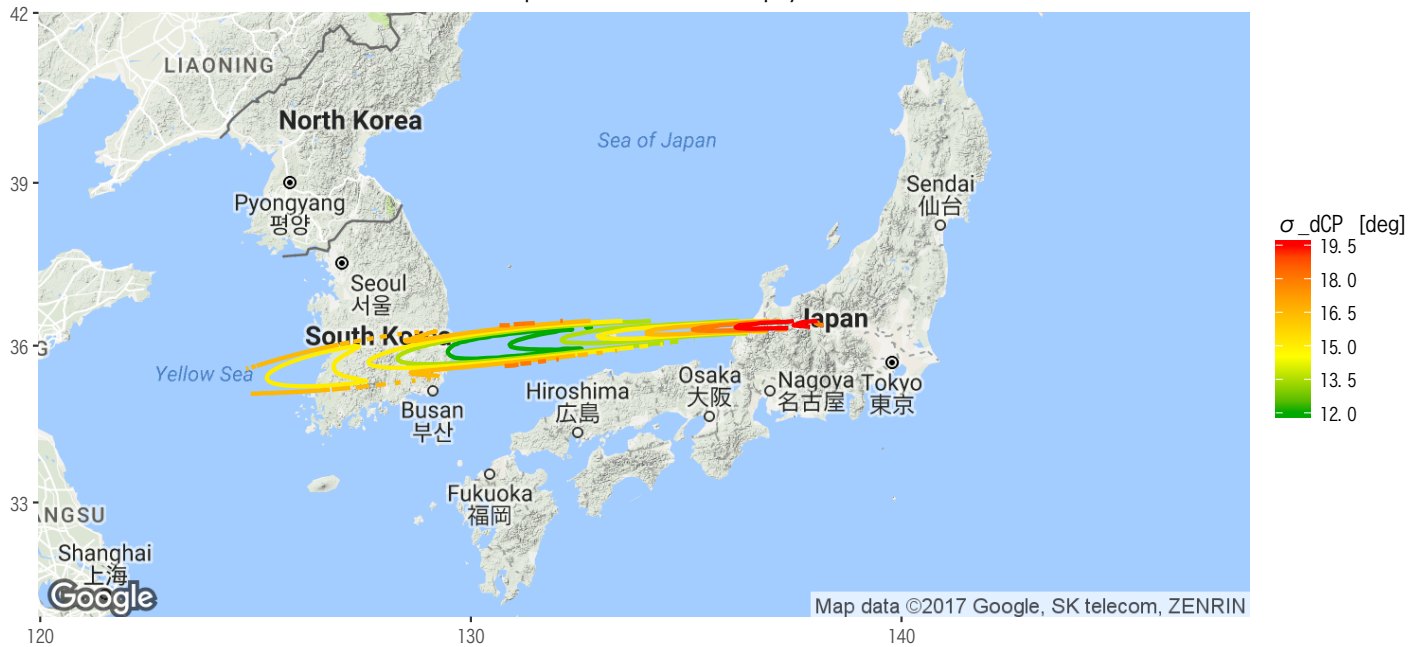
Secondary detector baseline dependence



Wrong octant rejection significance (NH)



dCP precision for $dCP=\pi/2$



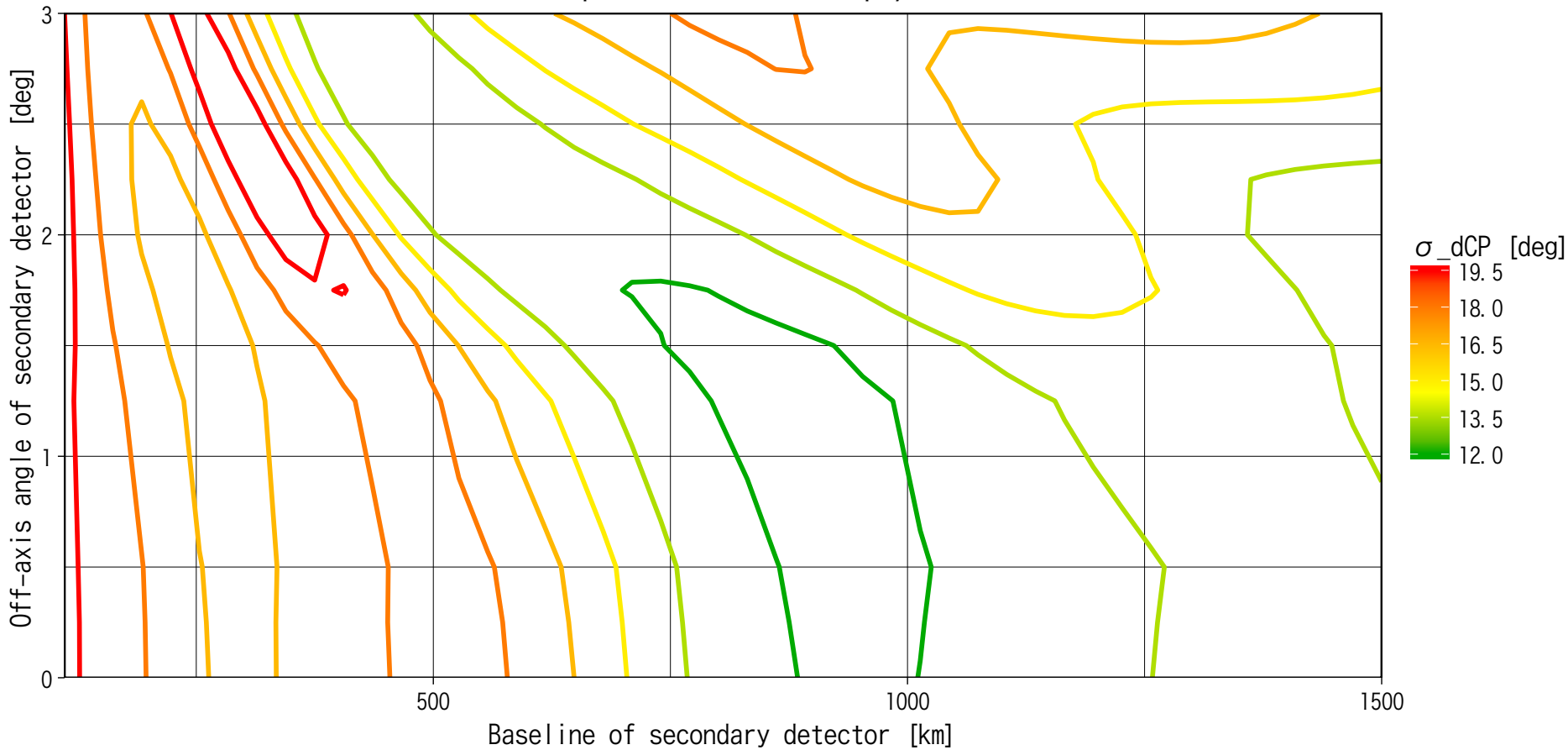
Best location

Significance to MH (true NH)



まない計算値

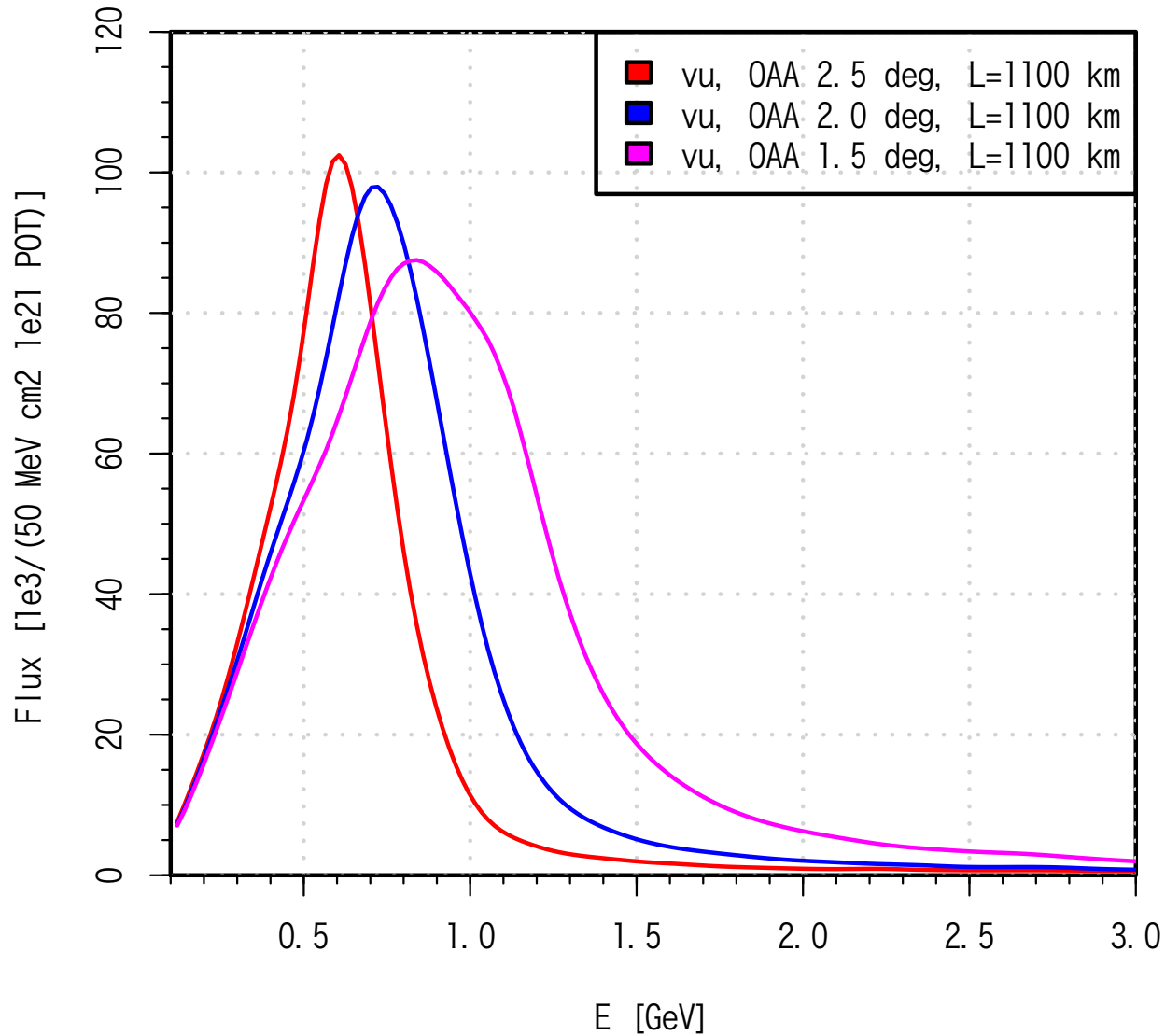
dCP precision for dCP=pi/2



※ missIDを含まない計算値

ビーム・フラックス

Expected neutrino mode spectrum



ビームスペクトルの系統誤差モデル

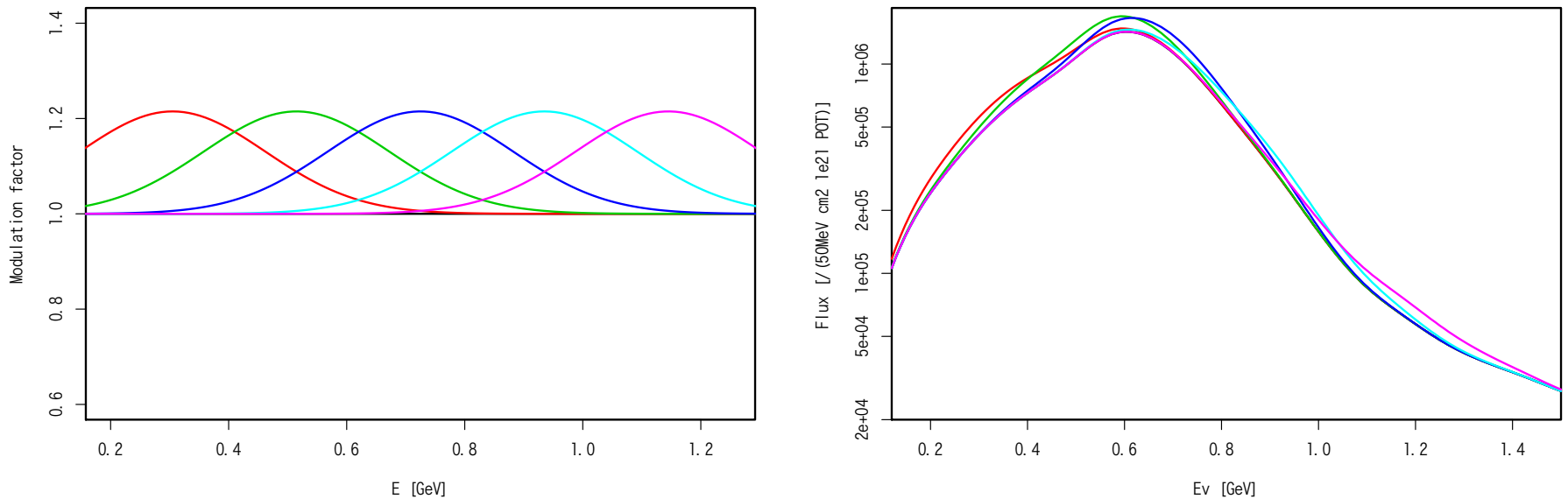
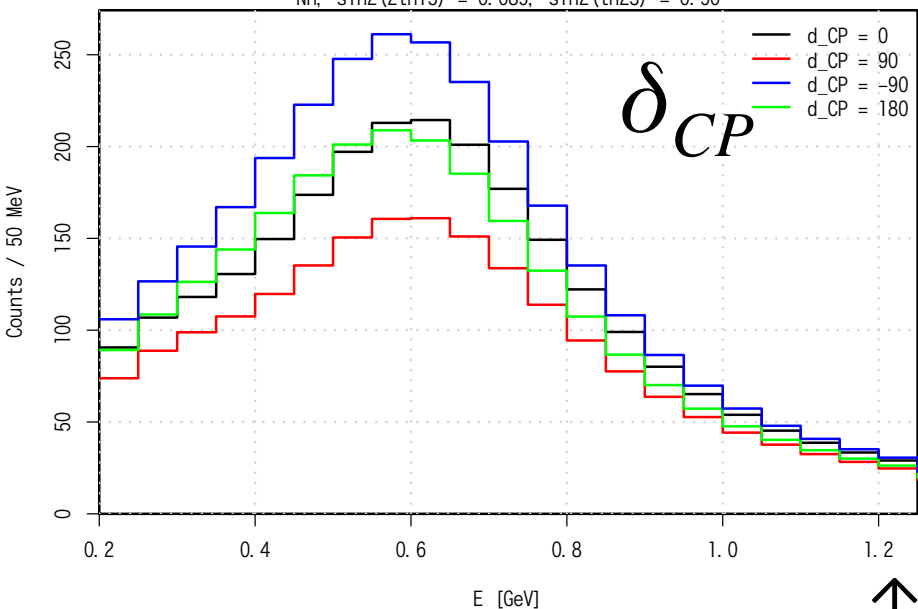
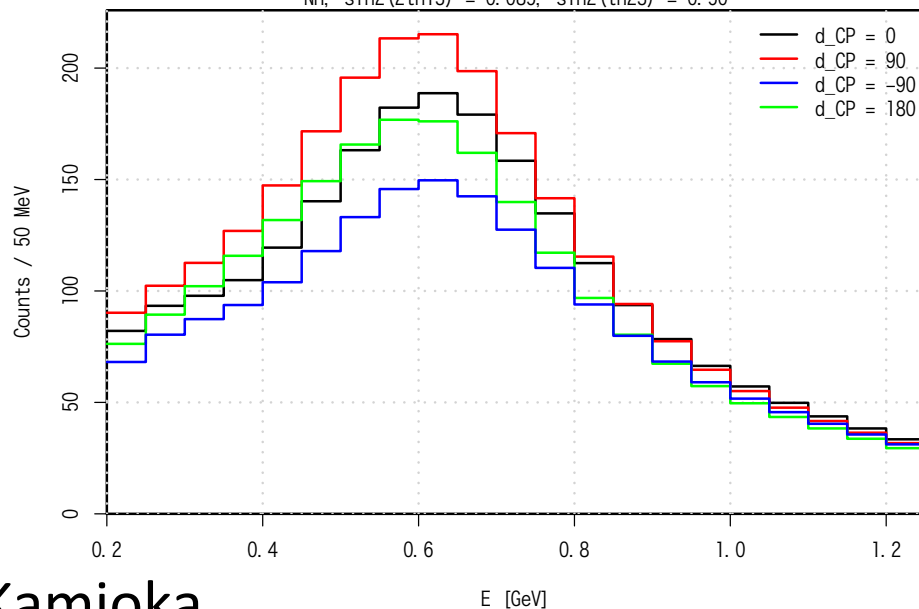


Figure 4.10: Multiplicative modulation factors to simulate systematic uncertainties in the beam. Left: each color represents an example choice of +20% for a single modulation factor. Right: The modulated beam shape in logarithmic scale. The colors correspond to the modulation factors in the left plot.

Kamioka, neutrino mode
 OAA = 2.5° , L = 295 km, rho = 2.6 g/cm³, FV = 187 kton
 NH, sin²(2th13) = 0.085, sin²(th23) = 0.50



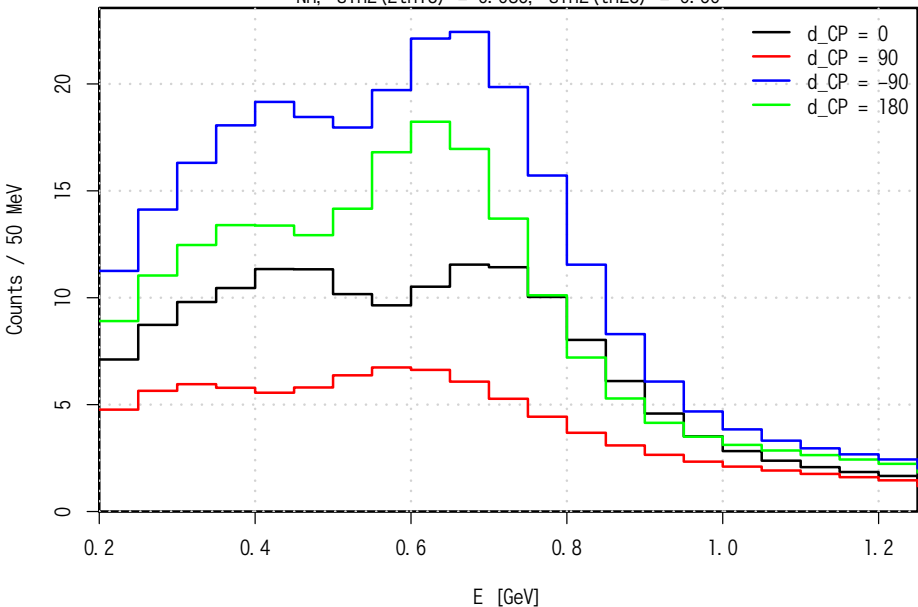
Kamioka, anti-neutrino mode
 OAA = 2.5° , L = 295 km, rho = 2.6 g/cm³, FV = 187 kton
 NH, sin²(2th13) = 0.085, sin²(th23) = 0.50



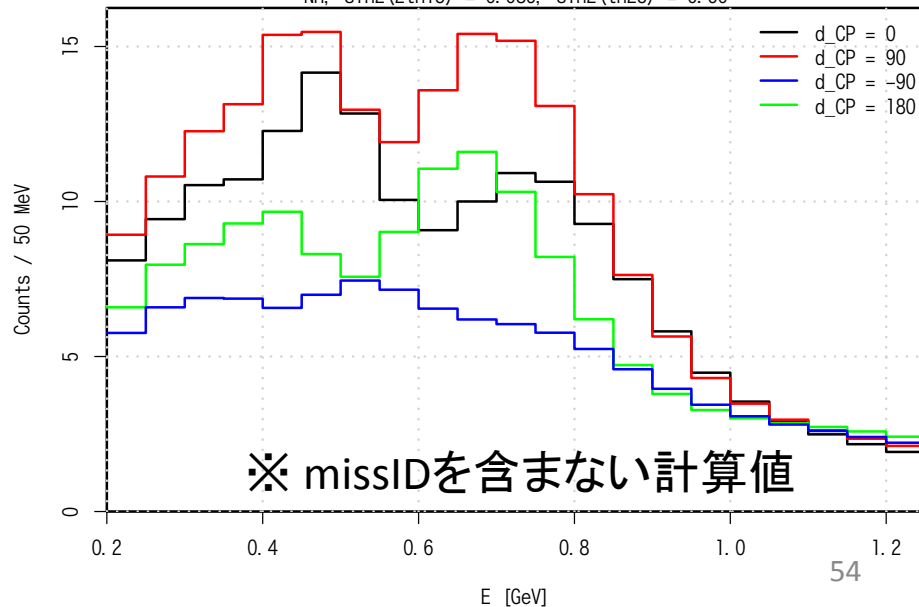
↑ Kamioka

↓ Korea

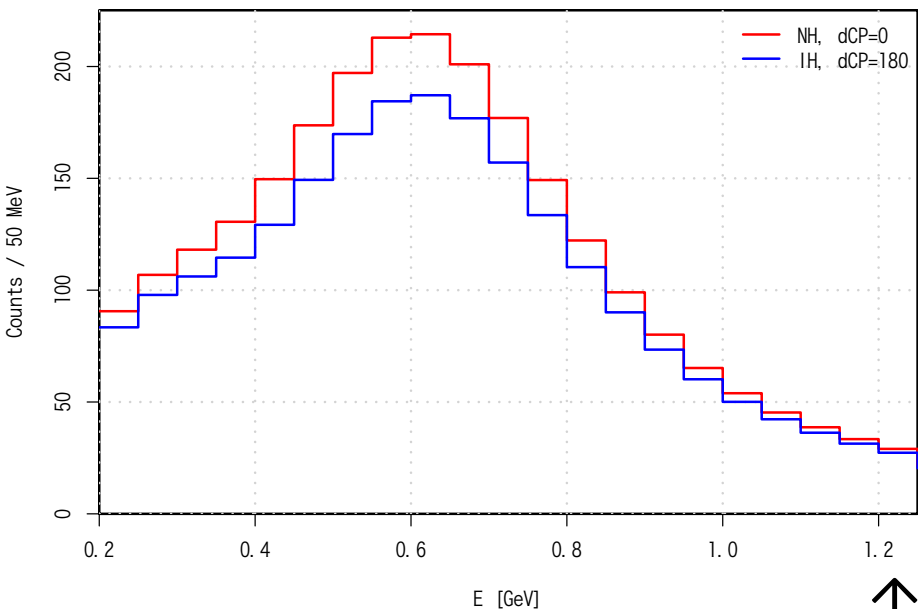
Korea, neutrino mode
 OAA = 2.5° , L = 1100 km, rho = 3.0 g/cm³, FV = 187 kton
 NH, sin²(2th13) = 0.085, sin²(th23) = 0.50



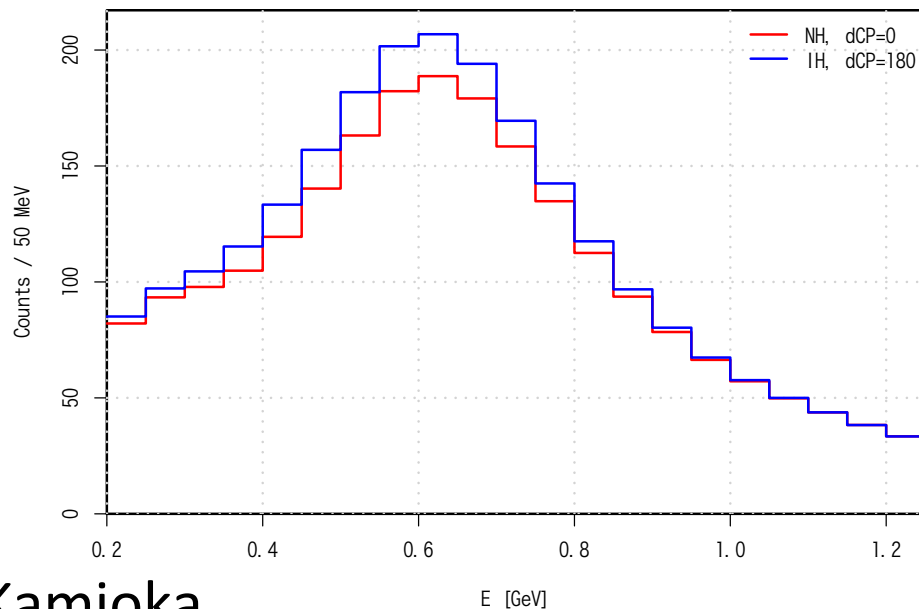
Korea, anti-neutrino mode
 OAA = 2.5° , L = 1100 km, rho = 3.0 g/cm³, FV = 187 kton
 NH, sin²(2th13) = 0.085, sin²(th23) = 0.50



Kamioka, neutrino mode

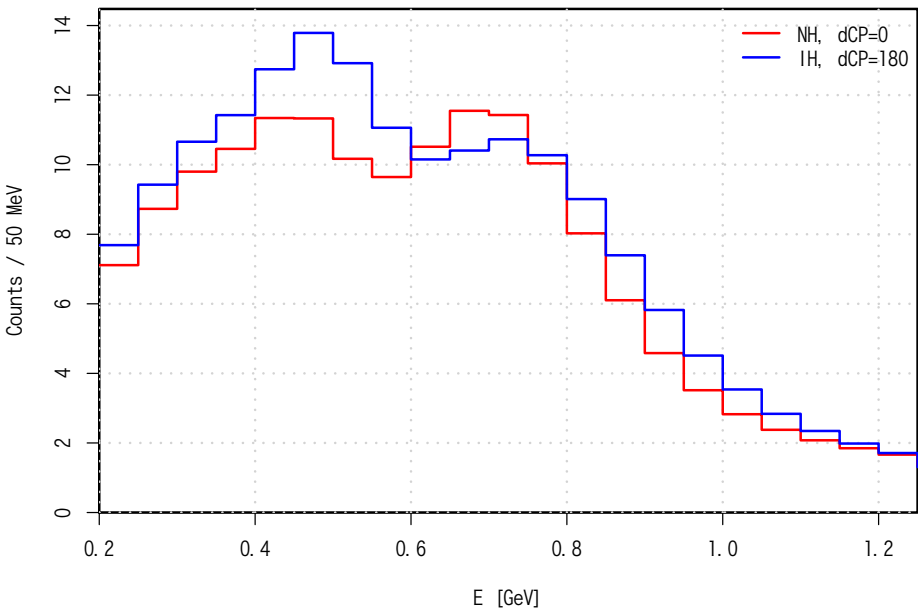


Kamioka, anti-neutrino mode

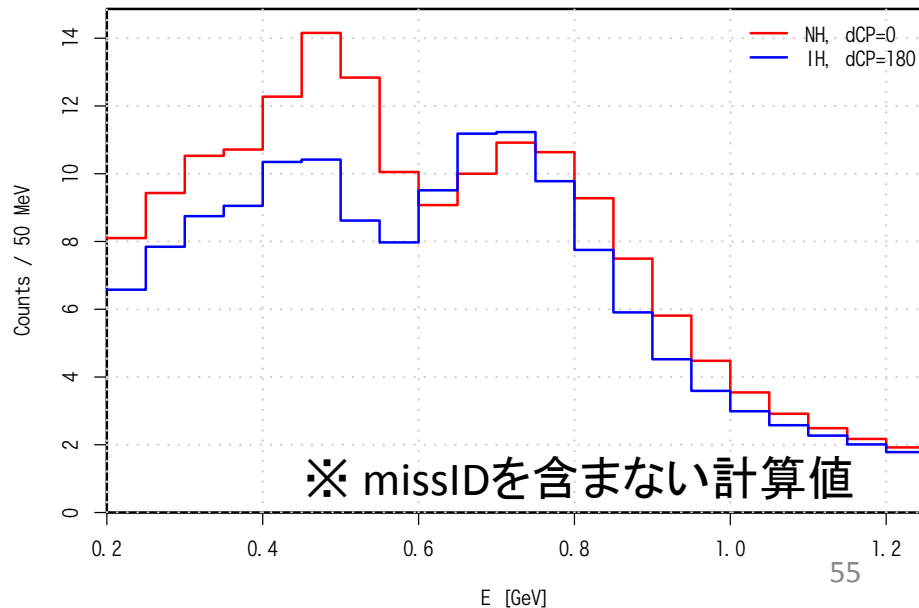


質量階層性 ↑ Kamioka
↓ Korea

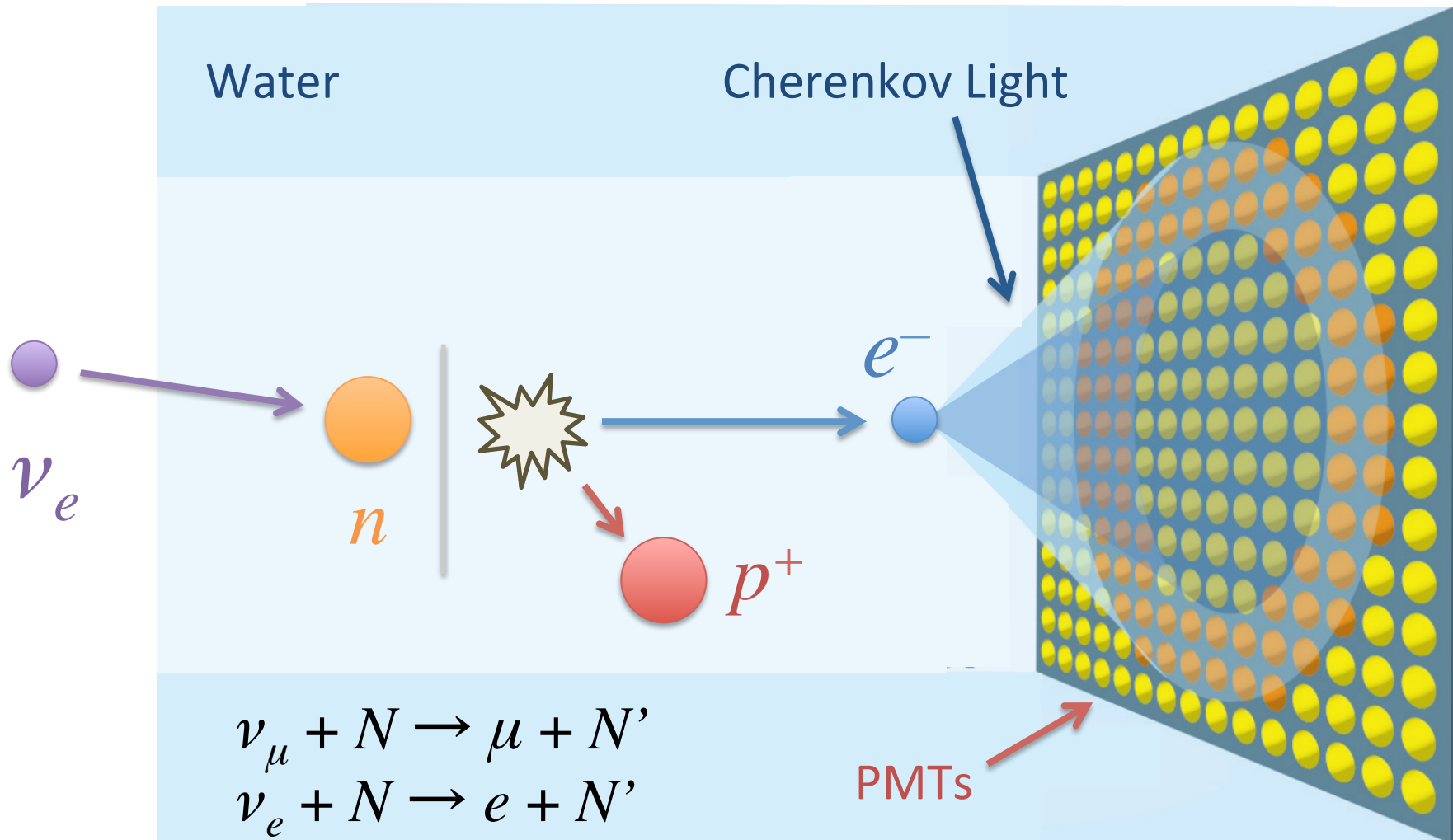
Korea, neutrino mode



Korea, anti-neutrino mode

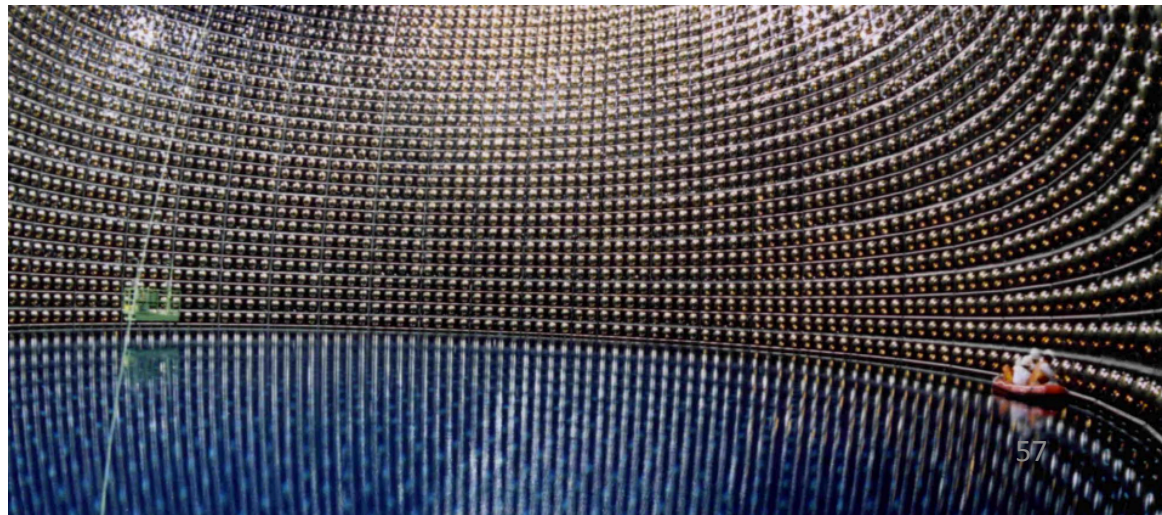
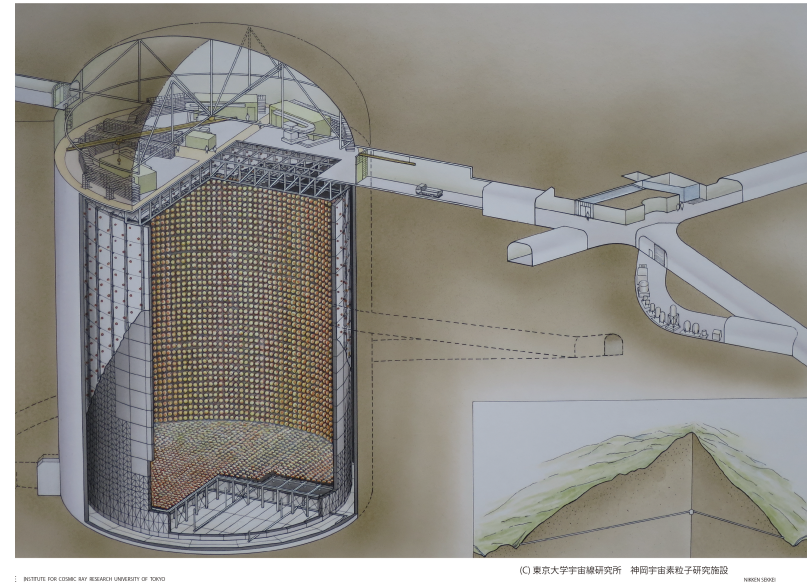


Detection Mechanism

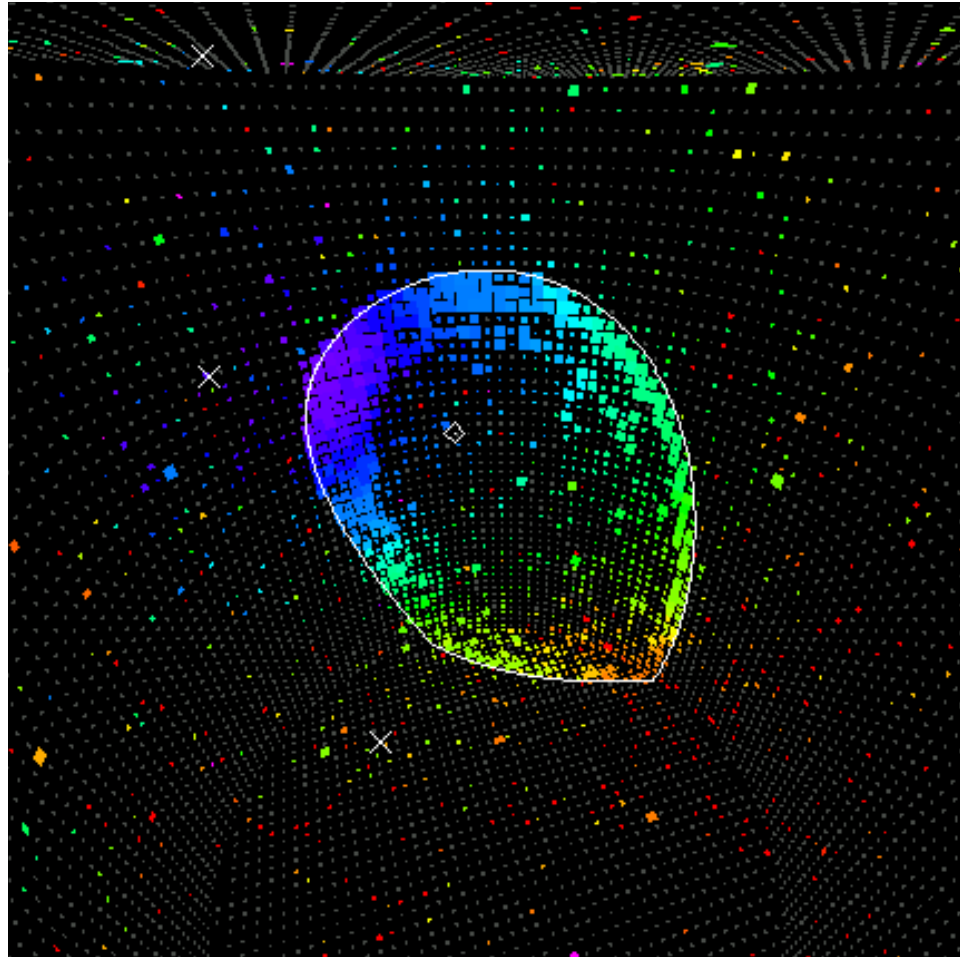


Super Kamiokande Detector

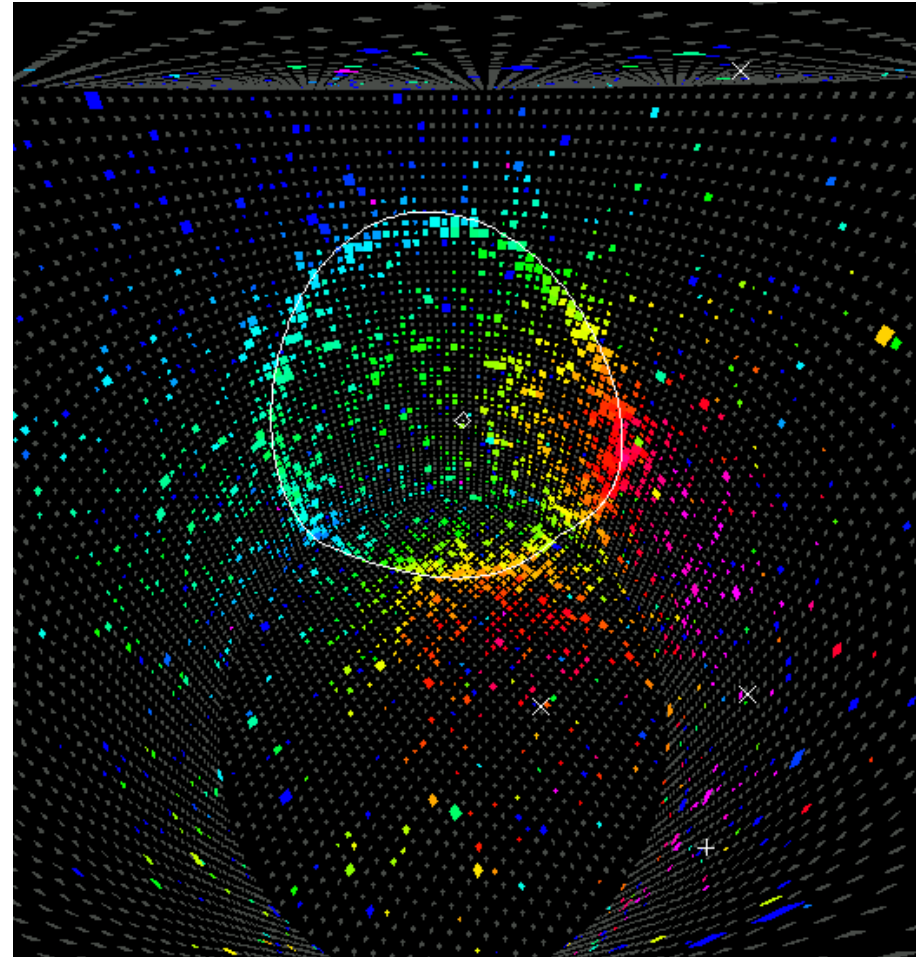
- Water Cherenkov detector
- 39.3 m diameter
41.4 m tall
50 kton pure water
- ~ 11,000 PMTs
- Data:
535 days
> 4000 events



↓ μ -like: crisp

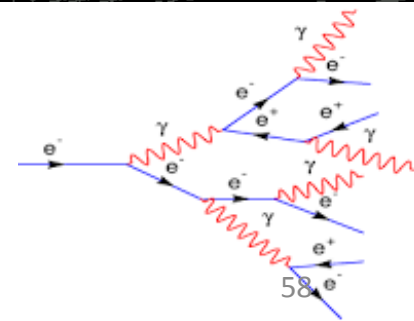


↓ e -like: blurred



MUON
NEUTRINO
..... muon

ELECTRON
NEUTRINO
..... electron
shower



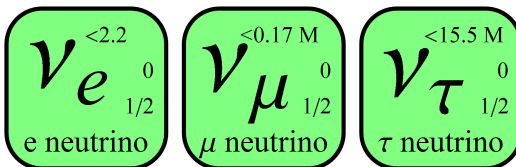
ニュートリノ混合

- 弱い相互作用によって生成されるニュートリノはエネルギー(質量)固有状態ではない

フレーバー
固有状態

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

質量
固有状態
 ν_1, ν_2, ν_3



重ね合せ
(ユニタリ変換)

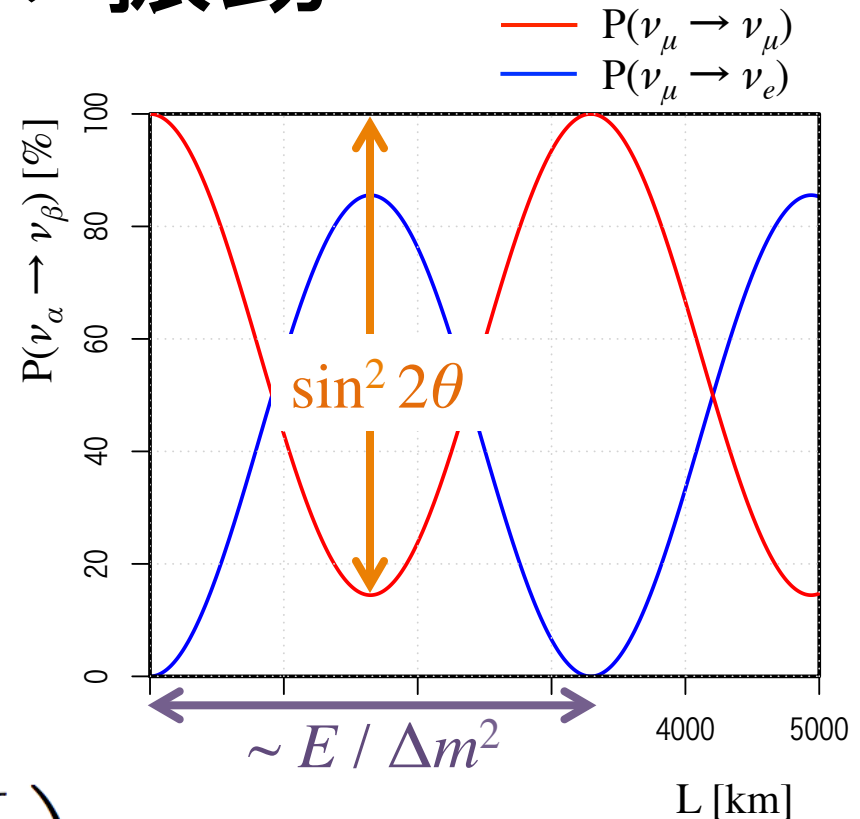
→ 時間発展するとフレーバーが変わる

ニュートリノ振動

- 2世代に単純化すると

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

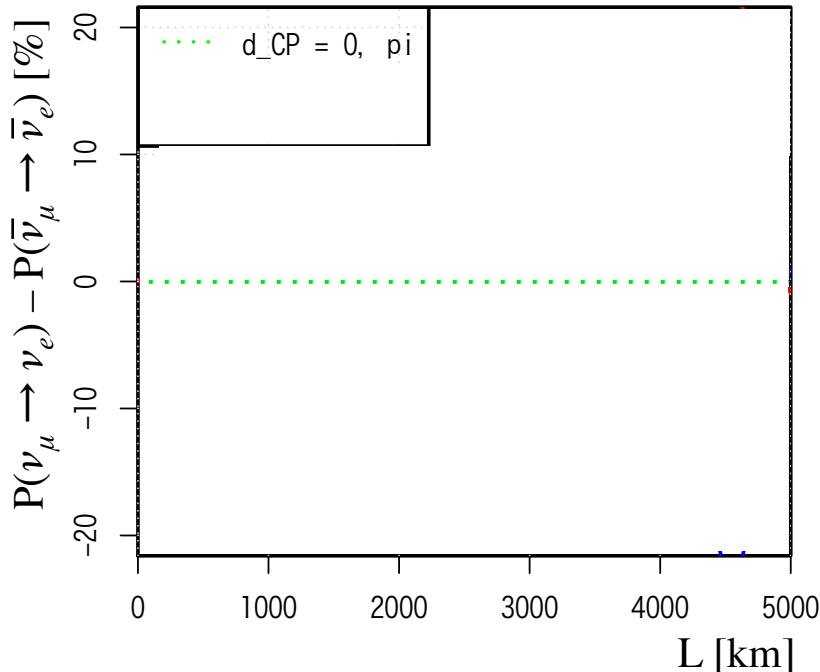
$$\begin{aligned} P_{\mu \rightarrow e} &= \left| \langle \nu_e | e^{-i\hat{H}t} | \nu_\mu \rangle \right|^2 \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right) \end{aligned}$$



3世代ニュートリノ振動におけるCPの破れ

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij} \\ s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij} \end{array}$$

ν_μ ニュートリノと反 μ ニュートリノの振動確率の差



- 振動パラメータ

$$\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}, \delta_{CP}, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2$$

- δ_{CP} の値と

Δm_{32}^2 の符号が未確定

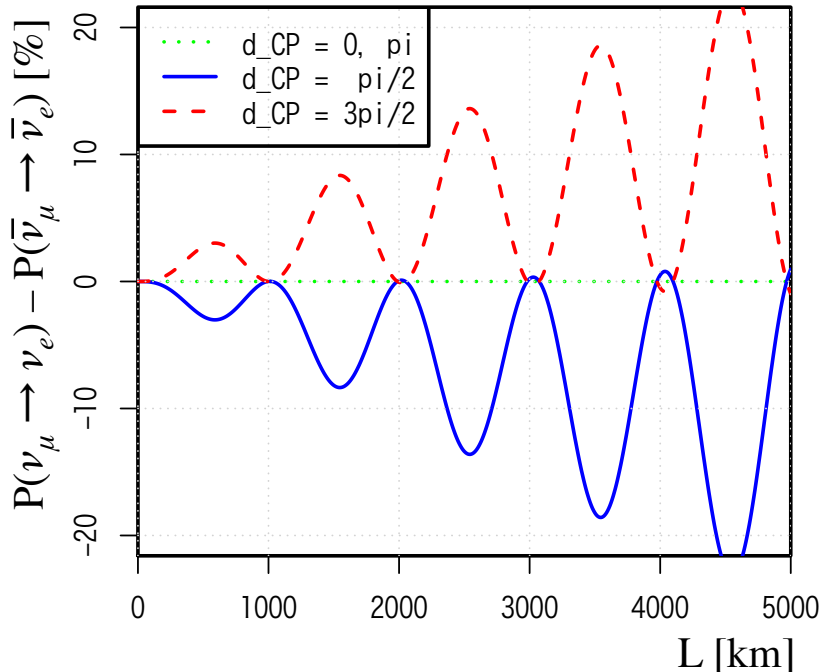
- $\sin \delta_{CP} \neq 0$ なら

CPが破れている(←)

3世代ニュートリノ振動におけるCPの破れ

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij} \\ s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij} \end{array}$$

ν_μ ニュートリノと反 μ ニュートリノの振動確率の差



• 振動パラメータ

$\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}, \delta_{CP}, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2$

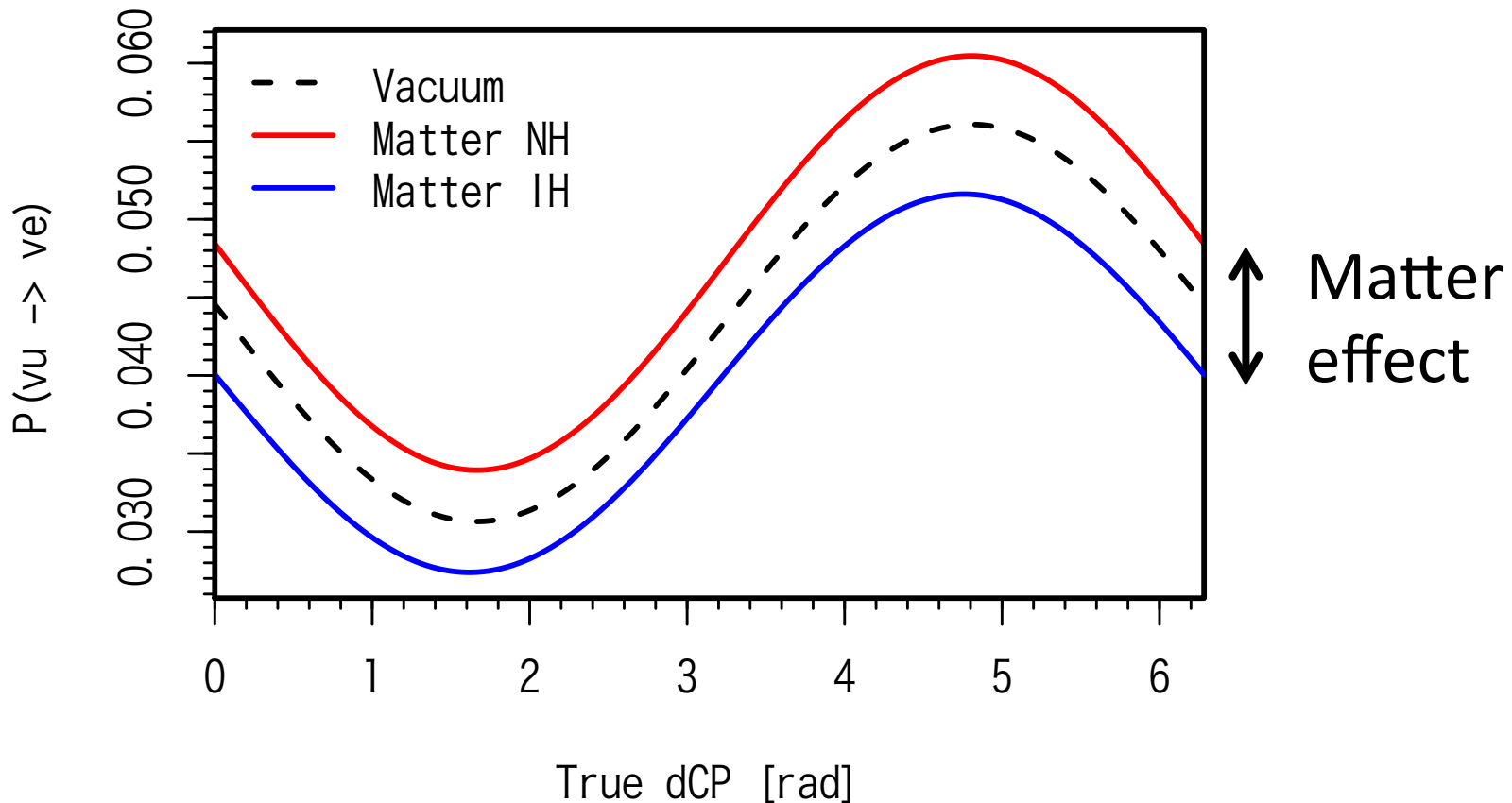
• δ_{CP} の値と

Δm_{32}^2 の符号が未確定

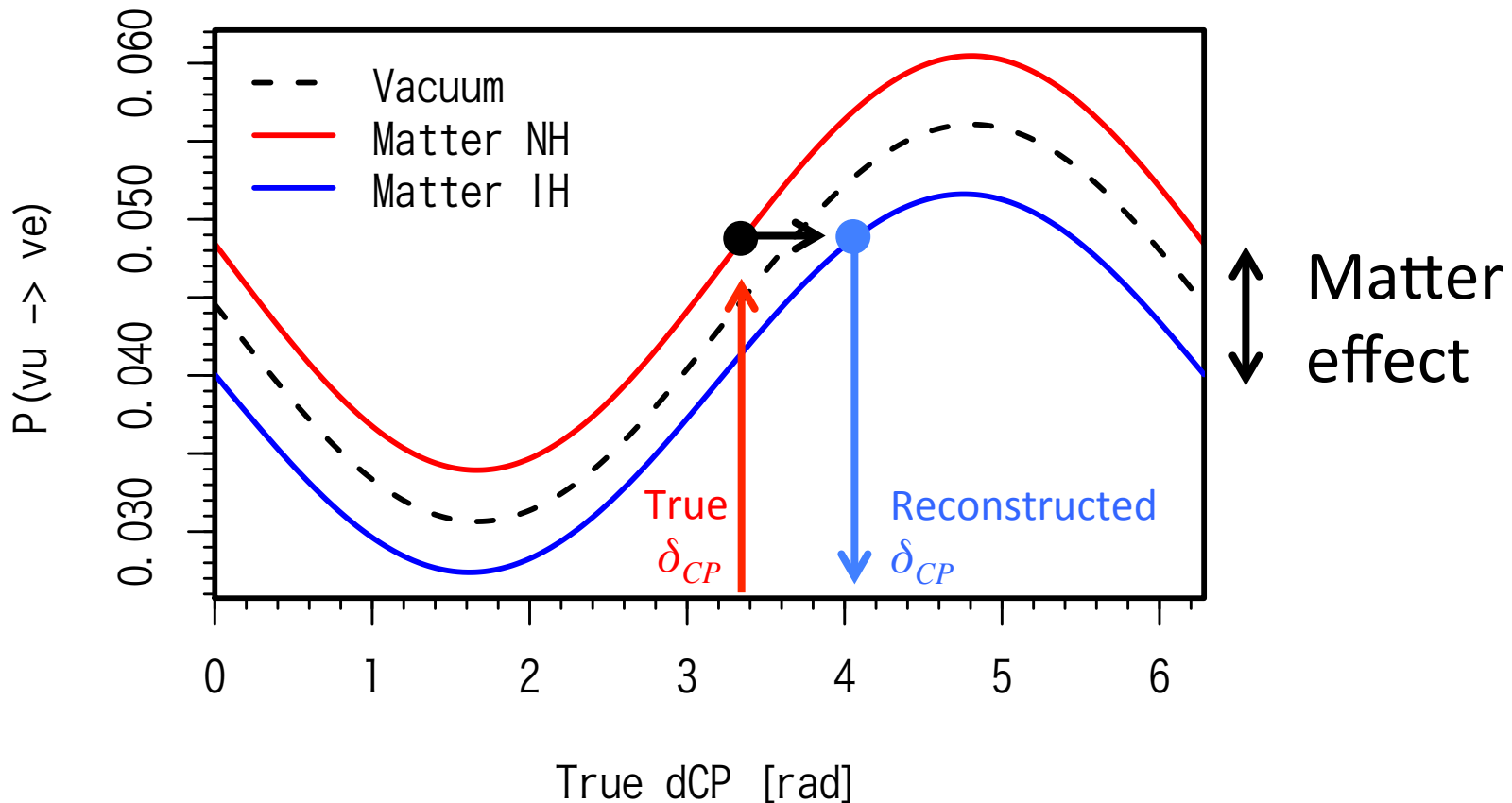
• $\sin \delta_{CP} \neq 0$ なら

CPが破れている(←)

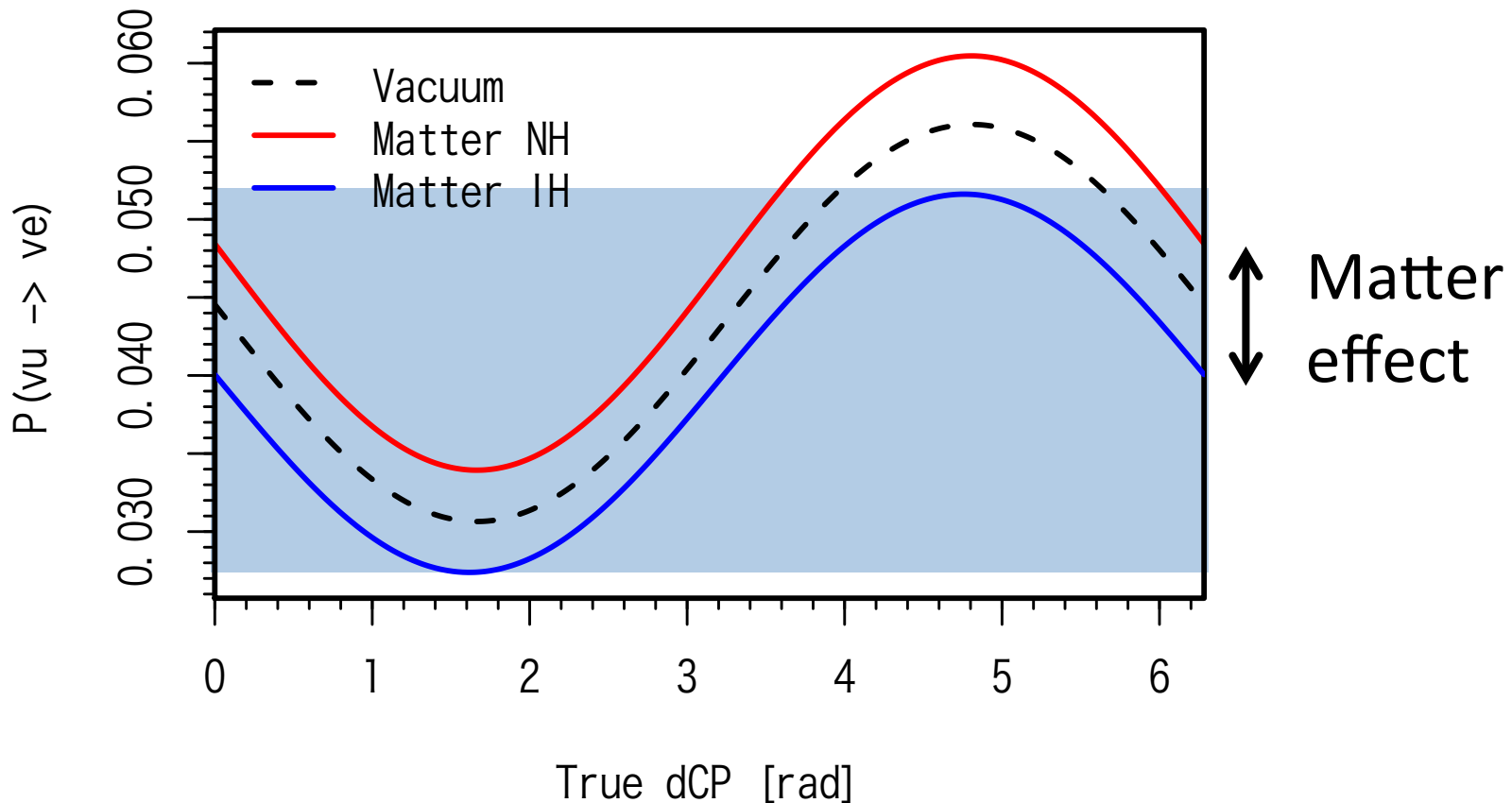
$\delta_{CP} = 3\pi/2$ に於ける 質量階層に対する感度の起源



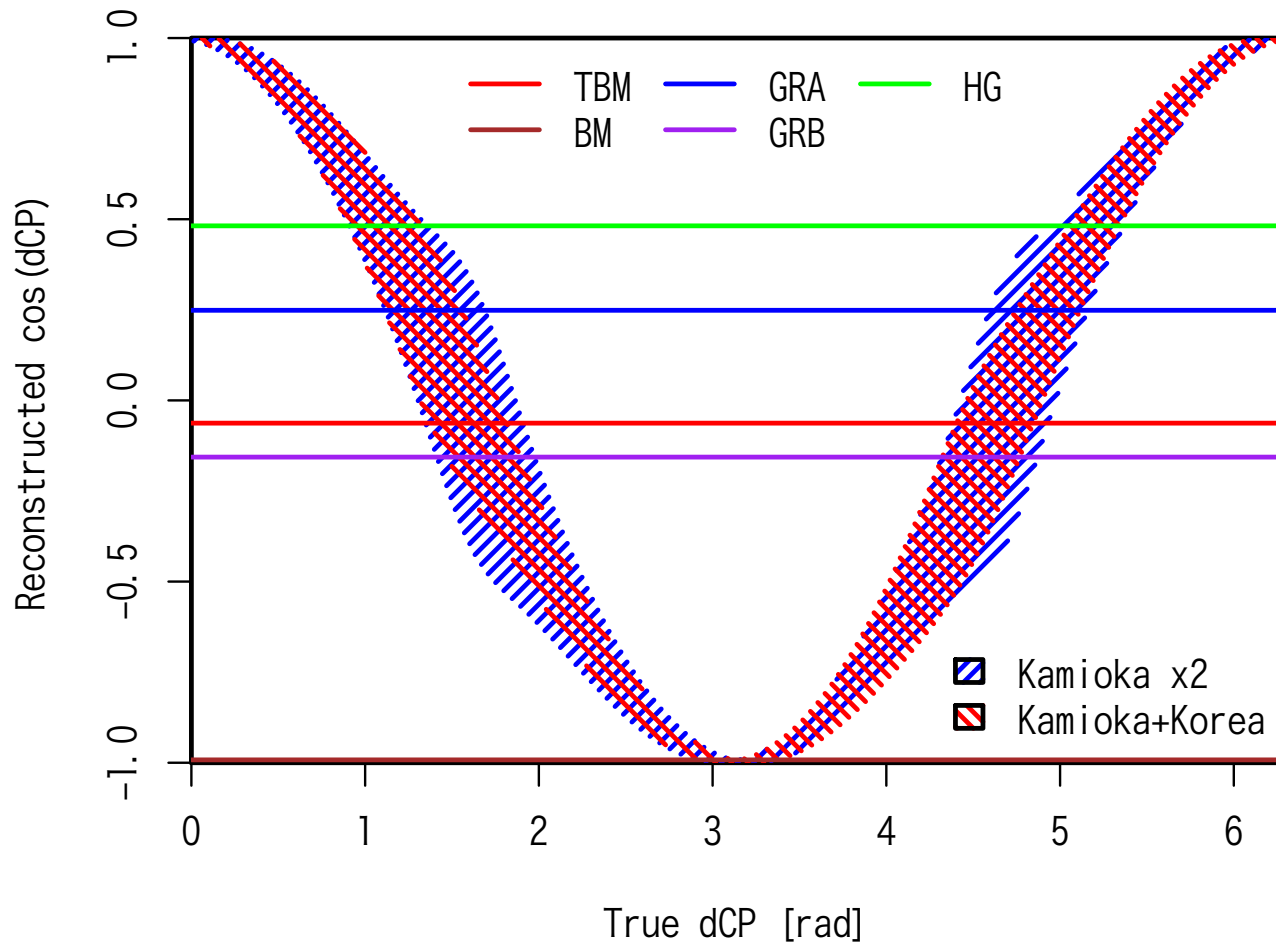
$\delta_{CP} = 3\pi/2$ に於ける 質量階層に対する感度の起源



$\delta_{CP} = 3\pi/2$ に於ける 質量階層に対する感度の起源



Rejecting flavor symmetries



dCP prediction from
10.1016/j.nuclphysb.2015.03.026

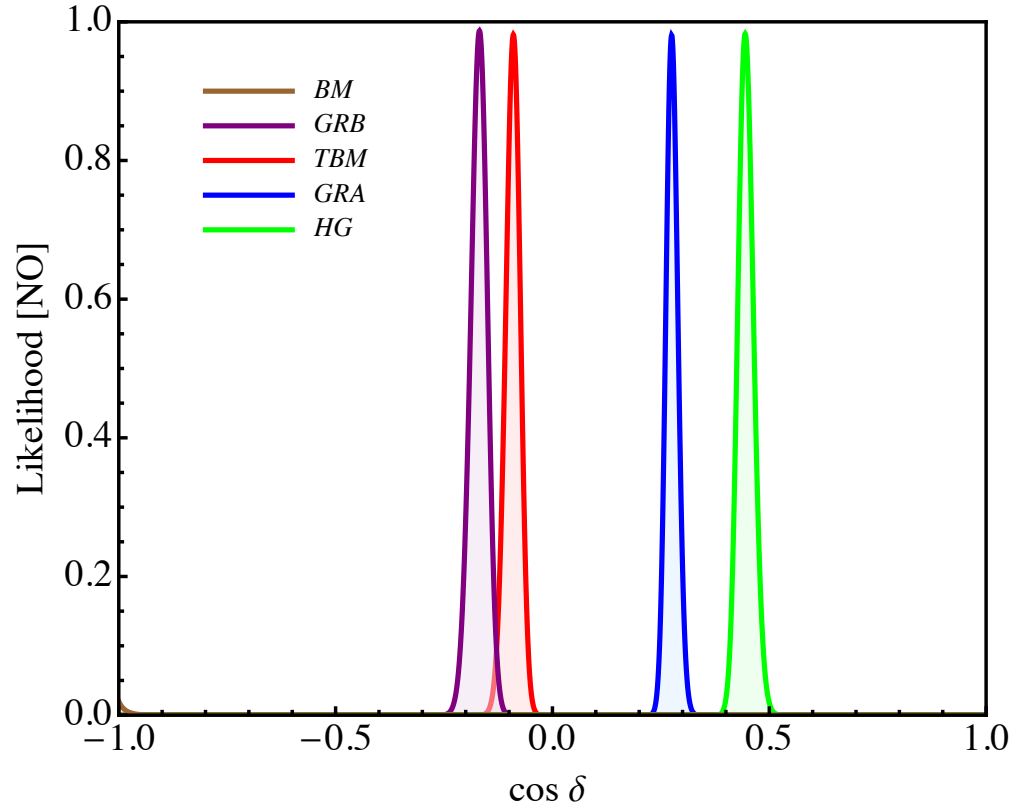


FIG. 6: The likelihood function versus $\cos \delta_{CP}$ for normal ordering neutrino mass spectrum for different types of flavor symmetries assuming the prospective 1σ uncertainties in the determination of the neutrino mixing angles [22].

arXiv:1611.06118v1 [hep-ex]
 10.1016/j.nuclphysb.2015.03.026