

レプトンフレーバー対称性に基づく ニュートリノ模型

宮尾 光 (Coh Miyao)

九大理

Flavor Physics Workshop 2023

24th November 2023

Collaborations with K. Asai, S. Okawa, and K. Tsumura.

解決したい課題



素敵な模型と
スペシャルな手法で説明



様々な実験からの
制限のチェック

解決したい課題



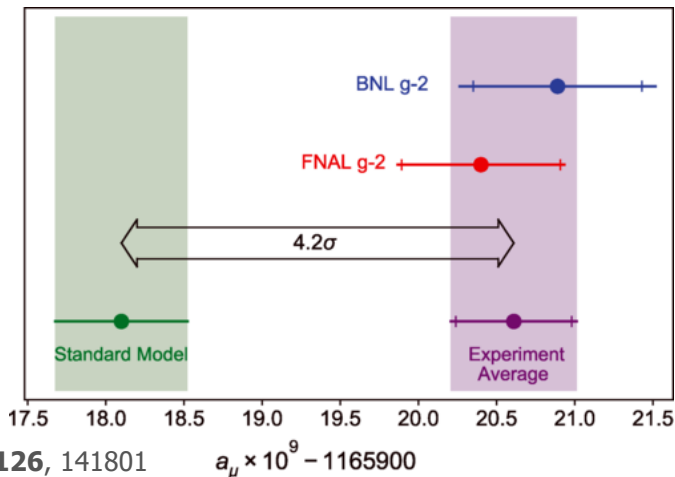
素敵な模型と
スペシャルな手法で説明



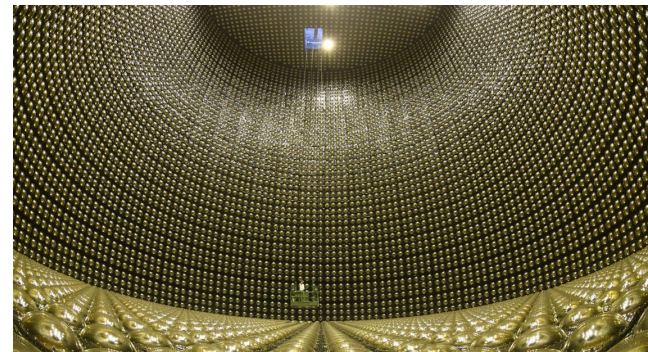
様々な実験からの
制限のチェック

解決したい課題

- ミューオン異常磁気能率(ミューオン $g-2$).
 - $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ gauge 模型で説明可能.
- ニュートリノ質量.
 - 予言を与える $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ gauge 対称性を持つ模型が存在.



Cited from
Phys. Rev. Lett. **126**, 141801



Cited from <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>

研究の目的

- 近年精密化しているニュートリノ振動実験の結果に整合する $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ gaugeモデルを調べること.
- そのモデルに基づいた, 実験では決まらないニュートリノ質量やマヨラナ位相に予言を与えること.

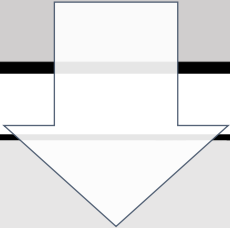
Cited from NuFIT v5.2

		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 6.4$)	
		bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range
with SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.303^{+0.012}_{-0.012}$	0.270 → 0.341	$0.303^{+0.012}_{-0.011}$	0.270 → 0.341
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.41^{+0.75}_{-0.72}$	31.31 → 35.74	$33.41^{+0.75}_{-0.72}$	31.31 → 35.74
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.451^{+0.019}_{-0.016}$	0.408 → 0.603	$0.569^{+0.016}_{-0.021}$	0.412 → 0.613
	$\theta_{23}/^\circ$	$42.2^{+1.1}_{-0.9}$	39.7 → 51.0	$49.0^{+1.0}_{-1.2}$	39.9 → 51.5
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02225^{+0.00056}_{-0.00059}$	0.02052 → 0.02398	$0.02223^{+0.00058}_{-0.00058}$	0.02048 → 0.02416
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.58^{+0.11}_{-0.11}$	8.23 → 8.91	$8.57^{+0.11}_{-0.11}$	8.23 → 8.94
	$\delta_{CP}/^\circ$	232^{+36}_{-26}	144 → 350	276^{+22}_{-29}	194 → 344
	$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.41^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.03	$7.41^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.03
	$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.507^{+0.026}_{-0.027}$	+2.427 → +2.590	$-2.486^{+0.025}_{-0.028}$	-2.570 → -2.406

解決したい課題



素敵な模型と
スペシャルな手法で説明



様々な実験からの
制限のチェック

ニュートリノ質量行列

- フレーバー基底での一般的な表示

$$\mathcal{M}_{\nu_L} = U_{\text{PMNS}} \text{diag}(m_1 \ m_2 \ m_3) U_{\text{PMNS}}^T \equiv \mathcal{M}_{\nu_L}^{\text{gen}}.$$

$$U_{\text{PMNS}} \equiv \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & & \\ & e^{\frac{i\alpha_2}{2}} & \\ & & e^{\frac{i\alpha_3}{2}} \end{pmatrix}.$$

m_i : 軽いニュートリノの質量 α_i : マヨラナ位相
 V_{ij} : 混合角とCP位相を含む成分

- シーソー機構(模型に依存する質量行列)

$$\mathcal{M}_{\nu_L} \simeq -\mathcal{M}_D \mathcal{M}_R^{-1} \mathcal{M}_D^T.$$

→ これらを比較して得られる条件式を解析.

Two Zero Texture (Minor)構造の質量行列

- 対称成分を除いて2つの0成分を持つ行列構造の分類;

$$\mathbf{B}_3: \begin{pmatrix} * & 0 & * \\ 0 & 0 & * \\ * & * & * \end{pmatrix}, \mathbf{B}_4: \begin{pmatrix} * & * & 0 \\ * & * & * \\ 0 & * & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{C}: \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & 0 & * \\ * & * & 0 \end{pmatrix}$$

- シーソー機構を通して質量行列やその逆行列が上記のような構造をとるモデルが存在.

➤ \mathcal{M}_{ν_L} が上記の構造 → Two zero texture

➤ $\mathcal{M}_{\nu_L}^{-1}$ が上記の構造 → Two zero minor

0成分と一般式の対応成分を比較して得られる2つの条件式.

→ 質量やマヨラナ位相への予言

最小U(1) $_{L_\mu-L_\tau}$ gauge模型

- 場：SM + 3世代右巻きニュートリノ N_i
+ 1つのスカラー場.
- 対称性：SM gauge \times U(1) $_{L_\mu-L_\tau}$ gauge.

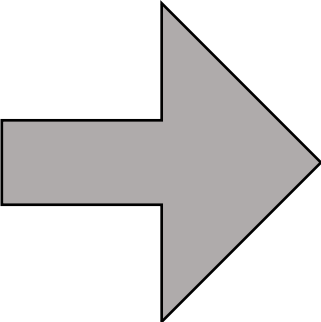
レプトン	$(\ell_e \ell_\mu \ell_\tau)$	$(e_R \mu_R \tau_R)$	$(N_e N_\mu N_\tau)$
U(1) $_{L_\mu-L_\tau}$ 電荷	(0 +1 -1)	(0 +1 -1)	(0 +1 -1)

スカラー	σ SU(2) 一重項	Φ_{+1} SU(2) 二重項	Φ_{-1} SU(2) 二重項
U(1)電荷	+1	+1	-1
行列構造	C minor	B₃ texture	B₄ texture

SM+N_i+Φ₊₁模型の解析

- **B₃ texture** : $(\mathcal{M}_{\nu L})_{[1,2],[2,2]} = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} (\mathcal{M}_\nu^{\text{gen}})_{12} = m_1 V_{11} V_{21} + m_2 e^{i\alpha_2} V_{12} V_{22} + m_3 e^{i\alpha_3} V_{13} V_{23} = 0 \quad (= (\mathcal{M}_\nu)_{12}). \\ (\mathcal{M}_\nu^{\text{gen}})_{22} = m_1 V_{21}^2 + m_2 e^{i\alpha_2} V_{22}^2 + m_3 e^{i\alpha_3} V_{23}^2 = 0 \quad (= (\mathcal{M}_\nu)_{22}). \end{array} \right.$$

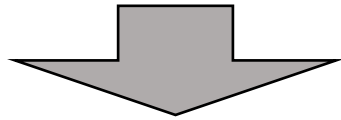

$$\left\{ \begin{array}{l} e^{i\alpha_2} \equiv \frac{m_1}{m_2} R_2(\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta) \equiv \frac{R_2}{|R_2|} \\ e^{i\alpha_3} \equiv \frac{m_1}{m_3} R_3(\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta) \equiv \frac{R_3}{|R_3|} \end{array} \right.$$

θ_{ij} : 混合角
 δ : CP位相

- 質量 2 乗差を R_i ($i = 2,3$) を用いて書き換え

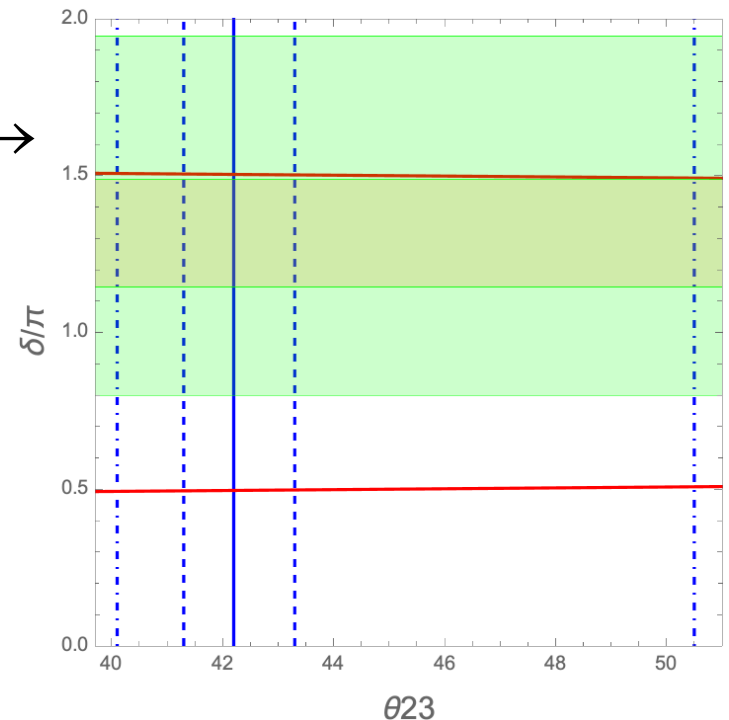
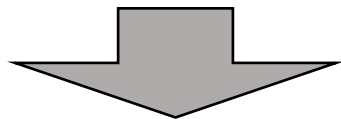
Ex. 順階層 (NO) の場合

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta m_{31}^2 = m_3^2 - m_1^2 = m_1^2 (|R_3|^2 - 1) \\ \Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2 = m_1^2 (|R_2|^2 - 1) \end{array} \right.$$



$$(|R_2|^2 - 1) = \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{31}^2} (|R_3|^2 - 1) \rightarrow$$

$\theta_{12}, \theta_{13}, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{31}^2$ を NuFITv5.2 のベストフィット値に固定し,
 δ の θ_{23} 依存性を得る.



ニュートリノ質量やマヨラナ位相が θ_{23} で書ける!

軽いニュートリノの質量

$$m_3 = \sqrt{\frac{\Delta m_{31}^2}{1 - \frac{1}{|R_3(\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{CP})|^2}}}$$

NOの場合

$$m_1 = \sqrt{m_3^2 - \Delta m_{31}^2}$$

$$m_2 = \sqrt{m_1^2 + \Delta m_{21}^2} = \sqrt{m_3^2 + \Delta m_{21}^2 - \Delta m_{31}^2}$$

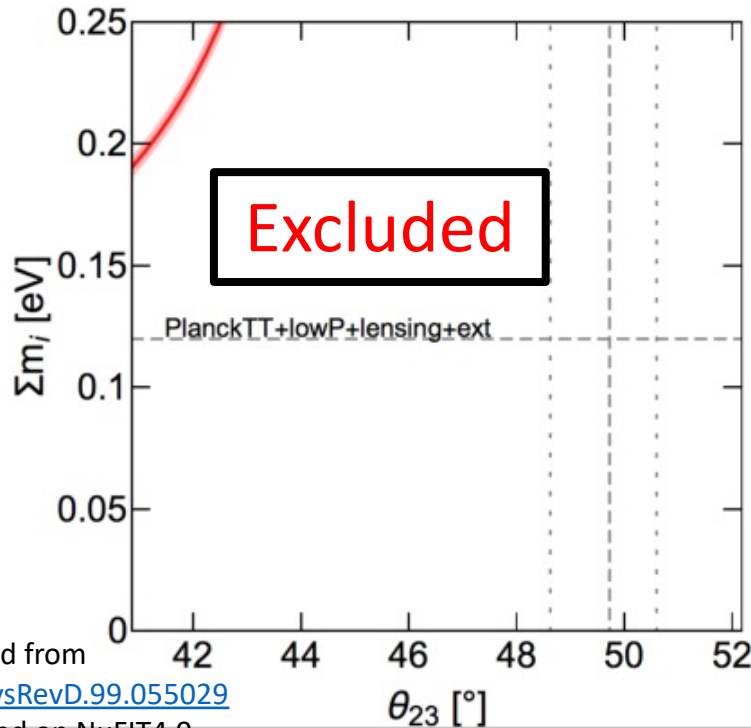
- δ を θ_{23} で書けば、変数は θ_{23} のみ。

($\theta_{12}, \theta_{13}, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{31}^2$ はNuFITv5.2のベストフィット値に固定。)

解析結果(NO)

- 先行研究

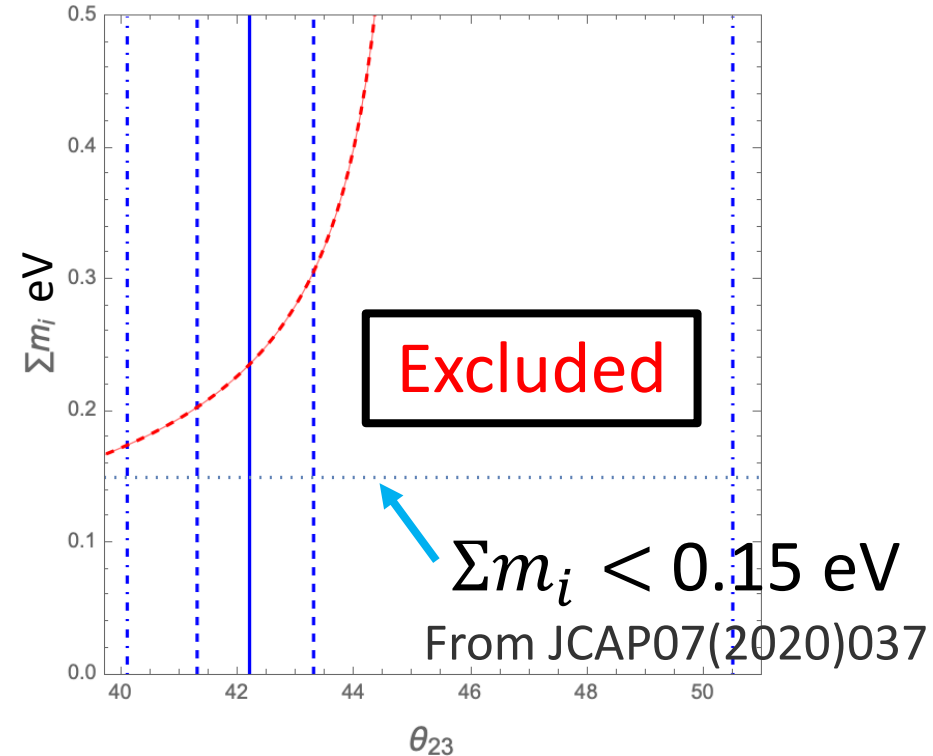
$$(e, \mu, \tau)_{NO}^{+1}, (e, \tau, \mu)_{NO}^{-1}$$



Cited from
[PhysRevD.99.055029](https://arxiv.org/abs/1907.08757)
 Based on NuFIT4.0

- 我々の結果

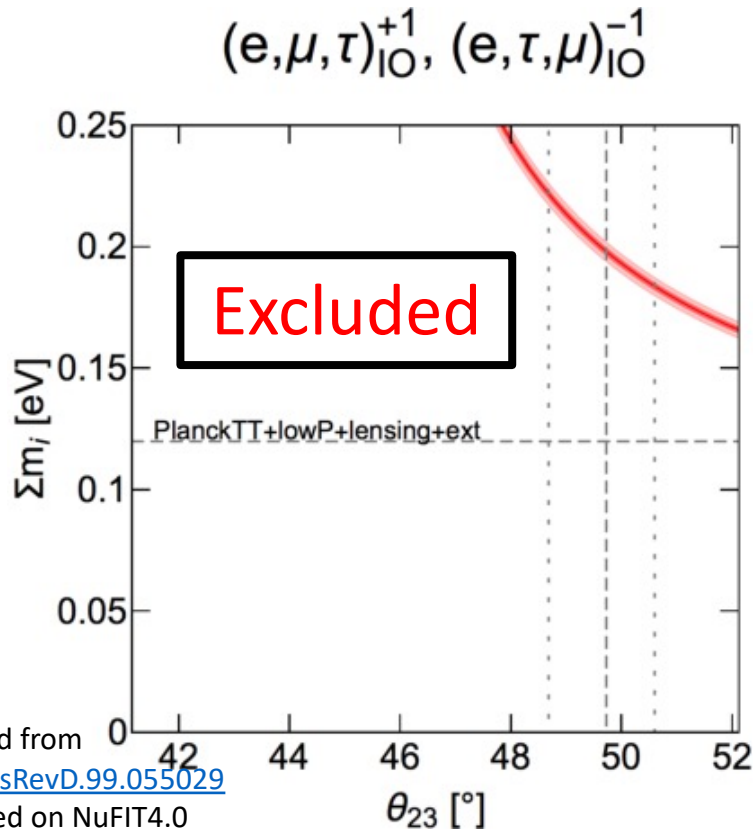
Solid : Best fit
 Dashed : 1σ
 DotDashed : 2σ
 Frame : 3σ



- θ_{23} の範囲が NuFITv5.2では左側にシフト.
- 質量和の制限が階層性を考慮した研究により緩和.

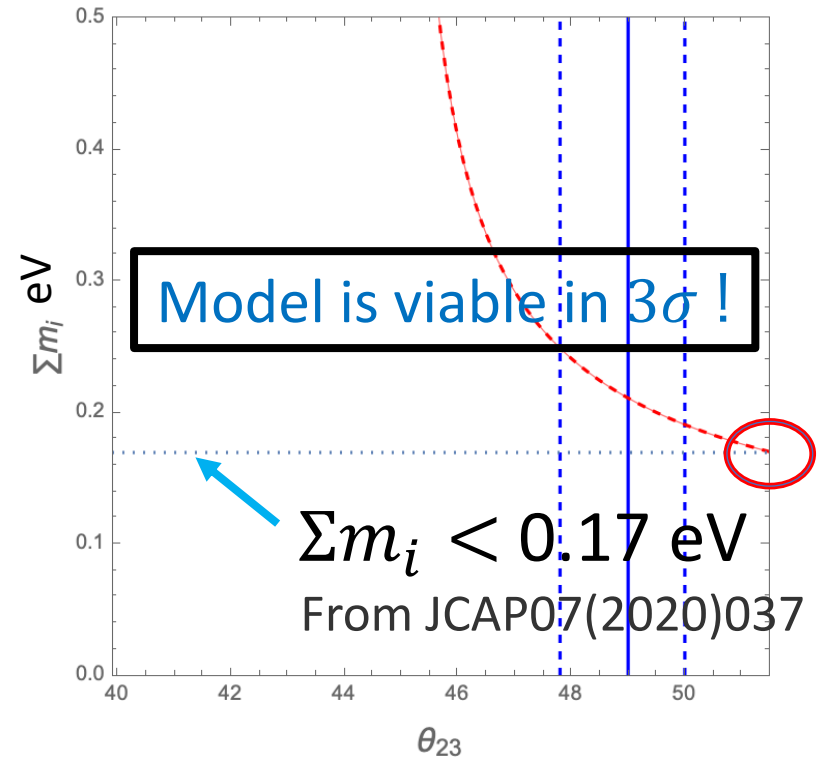
解析結果(10)

- 先行研究



- 我々の結果

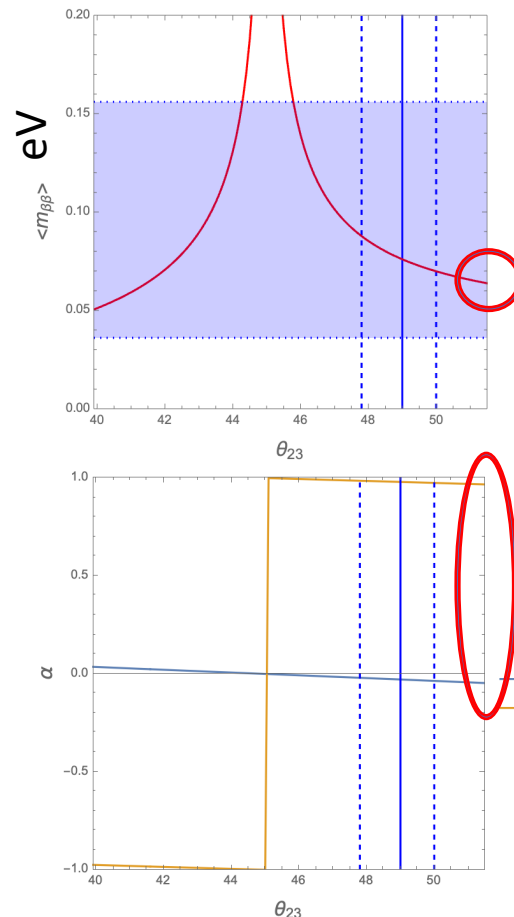
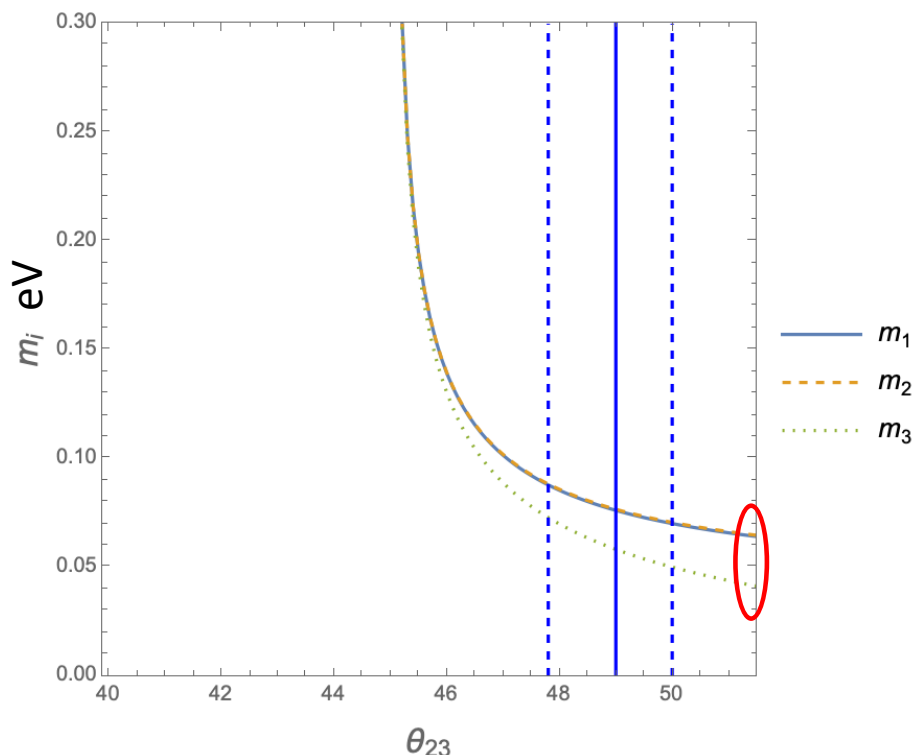
Solid : Best fit
Dashed : 1σ
DotDashed : 2σ
Frame : 3σ



- θ_{23} の範囲が NuFITv5.2では左側にシフト.
- 質量和の制限が階層性を考慮した研究により緩和.

解析結果から得られる予言

赤丸で囲まれた部分が予言値となる。



	m_1 [eV]	m_2 [eV]	m_3 [eV]	α_2/π	α_3/π	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ [eV]
\mathbf{B}_3 texture (IO)	0.064	0.065	0.041	-0.05	0.96	0.064

他の最小模型の解析結果

模型	行列構造	NO	IO
$SM + N_i + \sigma$	C minor	2σ で生存	Null
$SM + N_i + \Phi_{-1}$	B_4 texture	排除	排除

解決したい課題



素敵な模型と
スペシャルな手法で説明



様々な実験からの
制限のチェック

$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ gauge対称性に 起因する制限

- $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 対称性とSMの $U(1)_Y$ 対称性との間にはmixingがある.
- この混合はdark Zへ制限を与える物理に影響を与える.
- Coming soon...

まとめ

- $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ gauge対称性に基づく最小なニュートリノ模型をNuFITv5.2のデータに基づいて質量行列を解析.
 - $SU(2)$ 一重項スカラー σ を含む模型.
 - 順階層の場合に θ_{23} の 2σ の範囲で生存.
 - $SU(2)$ 二重項スカラー Φ を含む模型.
 - 質量行列が \mathbf{B}_3 texture構造で逆階層の場合に 3σ の点で復活.
- $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ gauge対称性に起因する制限も考えると, 生き返った $SU(2)$ 二重項スカラー Φ を含む模型に制限をつけられる.

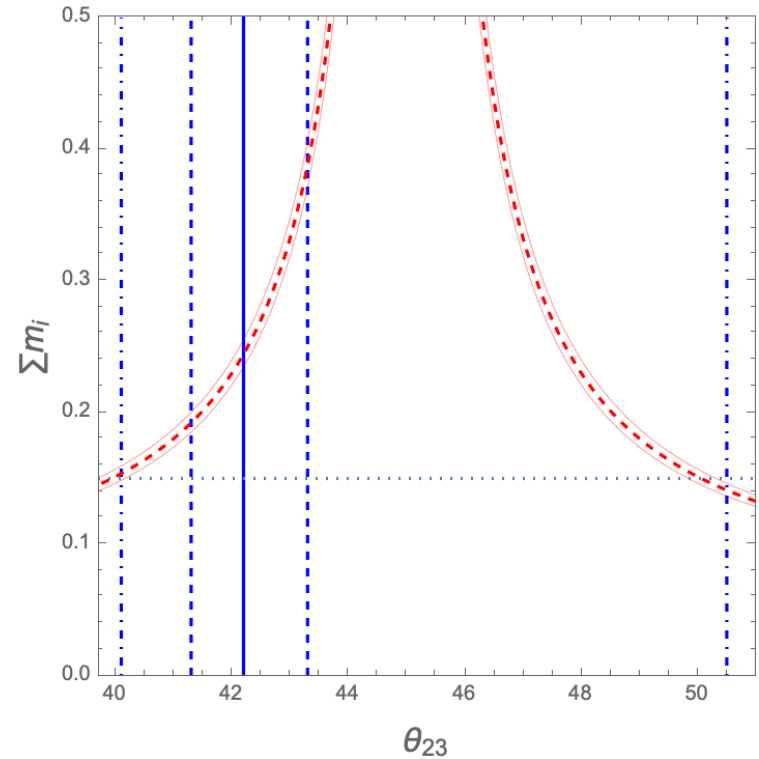
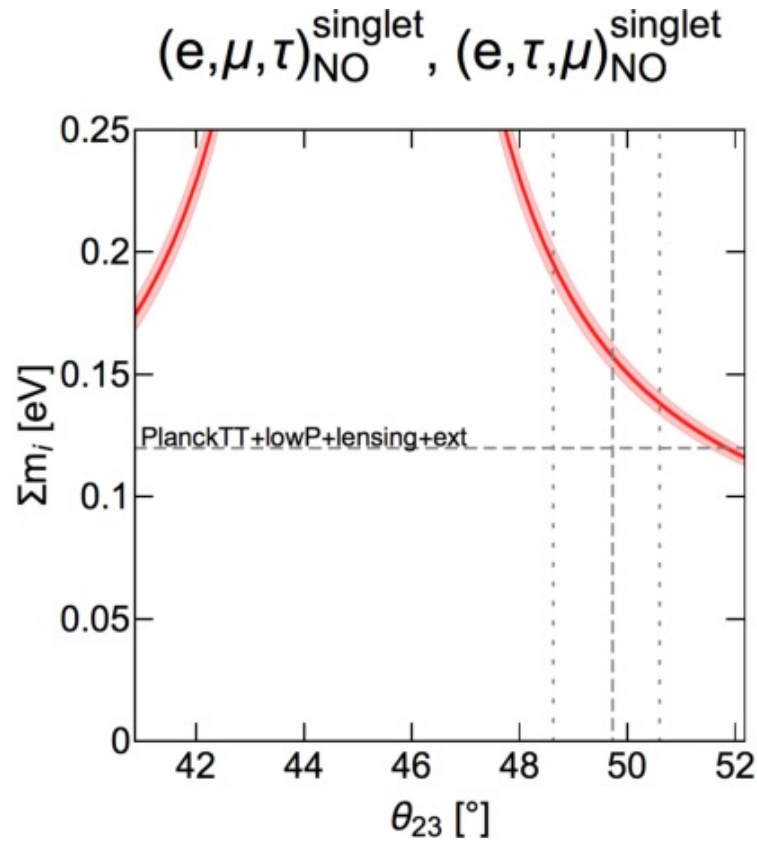
(詳細は今度発表する論文に書く予定です!)

NuFITv4.0

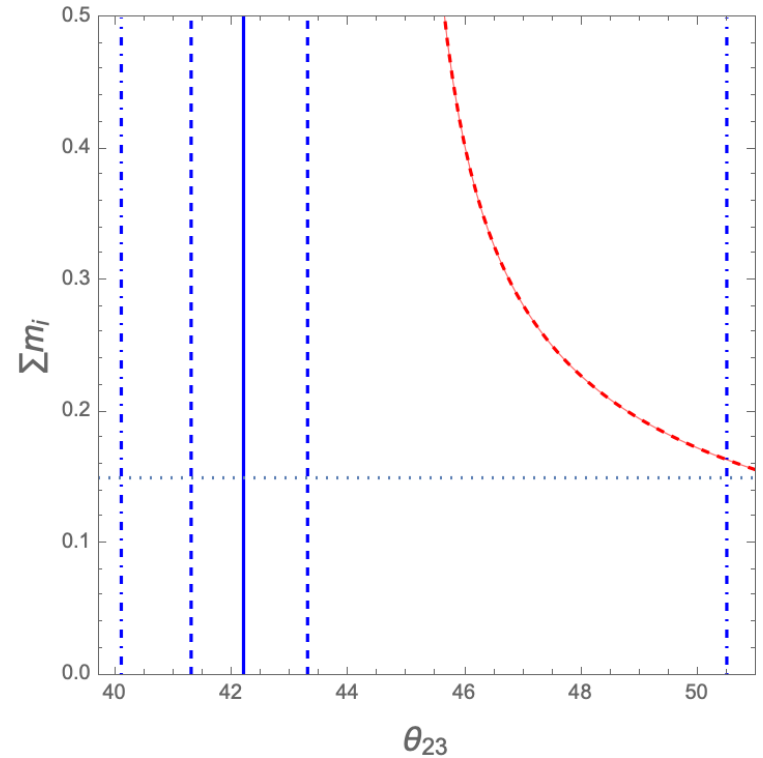
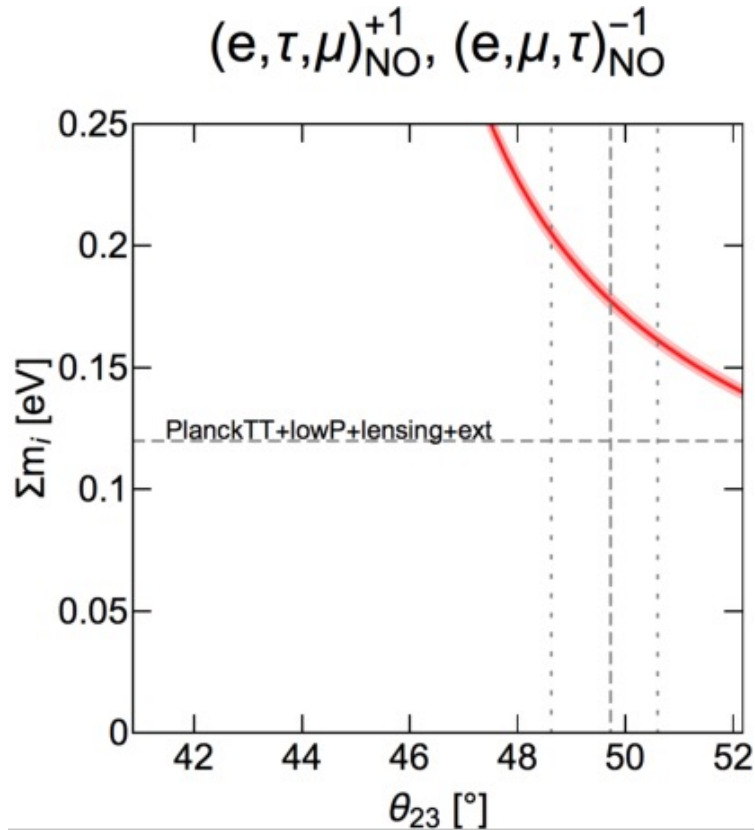
	Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 9.3$)		
	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	
with SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.310^{+0.013}_{-0.012}$	$0.275 \rightarrow 0.350$	$0.310^{+0.013}_{-0.012}$	$0.275 \rightarrow 0.350$
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.82^{+0.78}_{-0.76}$	$31.61 \rightarrow 36.27$	$33.82^{+0.78}_{-0.75}$	$31.62 \rightarrow 36.27$
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.582^{+0.015}_{-0.019}$	$0.428 \rightarrow 0.624$	$0.582^{+0.015}_{-0.018}$	$0.433 \rightarrow 0.623$
	$\theta_{23}/^\circ$	$49.7^{+0.9}_{-1.1}$	$40.9 \rightarrow 52.2$	$49.7^{+0.9}_{-1.0}$	$41.2 \rightarrow 52.1$
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02240^{+0.00065}_{-0.00066}$	$0.02044 \rightarrow 0.02437$	$0.02263^{+0.00065}_{-0.00066}$	$0.02067 \rightarrow 0.02461$
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.61^{+0.12}_{-0.13}$	$8.22 \rightarrow 8.98$	$8.65^{+0.12}_{-0.13}$	$8.27 \rightarrow 9.03$
	$\delta_{CP}/^\circ$	217^{+40}_{-28}	$135 \rightarrow 366$	280^{+25}_{-28}	$196 \rightarrow 351$
	$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.39^{+0.21}_{-0.20}$	$6.79 \rightarrow 8.01$	$7.39^{+0.21}_{-0.20}$	$6.79 \rightarrow 8.01$
	$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.525^{+0.033}_{-0.031}$	$+2.431 \rightarrow +2.622$	$-2.512^{+0.034}_{-0.031}$	$-2.606 \rightarrow -2.413$

From <http://www.nu-fit.org/?q=node/177>

C Minor (NO)

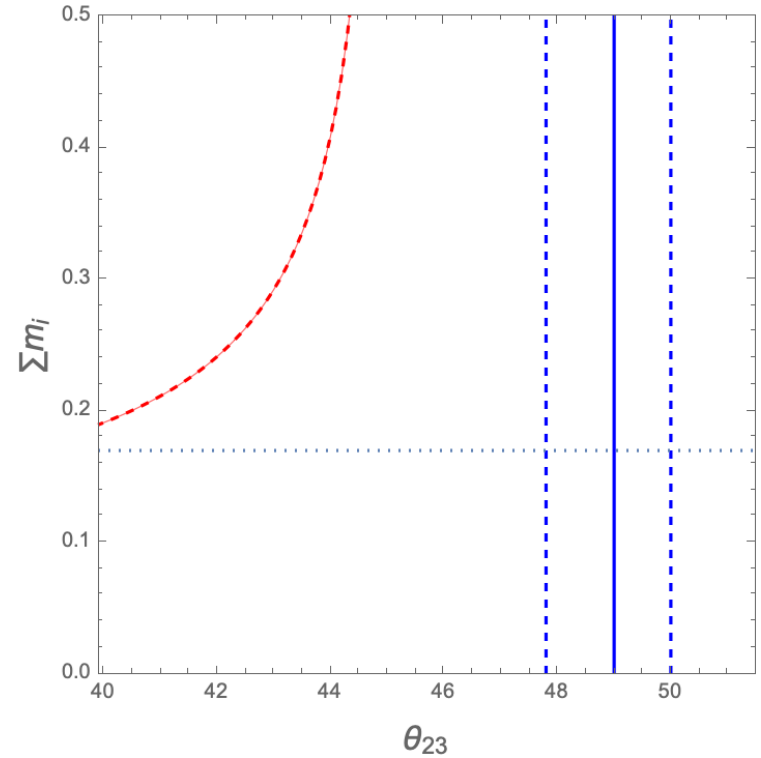
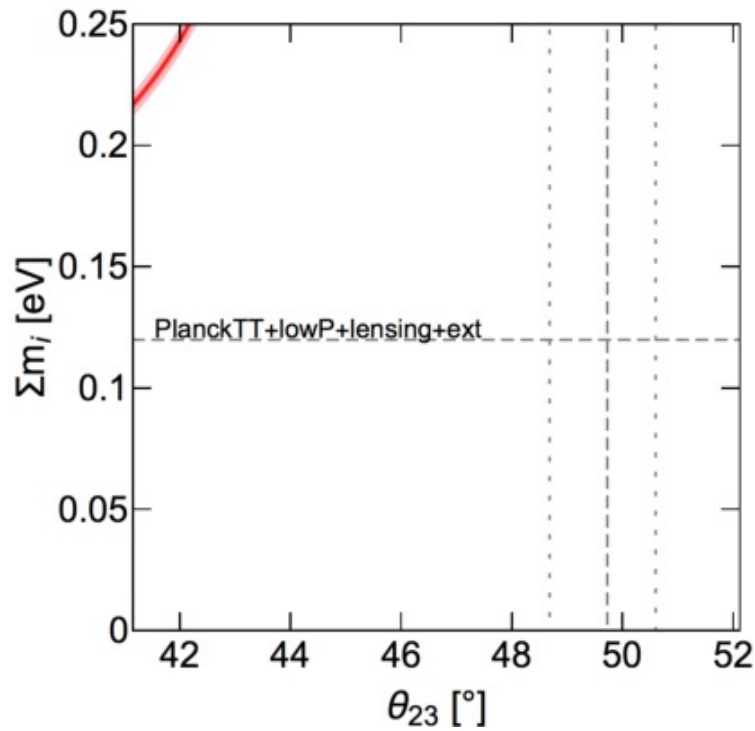


B4 Texture (NO)



B4 Texture (IO)

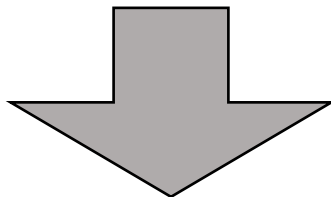
$(e, \tau, \mu)_{IO}^{+1}, (e, \mu, \tau)_{IO}^{-1}$



Z-Z' 混合

- SMの $U(1)_Y$ と $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ は以下のように混合.

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}} = -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}Z'_{\mu\nu}Z'^{\mu\nu} + \frac{1}{2}\frac{\varepsilon}{\cos\theta_W}B_{\mu\nu}Z'^{\mu\nu}$$
$$\mathcal{L}_{\varepsilon Z} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} Z_\mu & Z'_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon_Z \\ -\varepsilon_Z & m_{Z'}^2/m_Z^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z^\mu \\ Z'^\mu \end{pmatrix}$$



$$G_F \rightarrow G_F \left(1 + \varepsilon_Z^2 \frac{M_Z^2}{Q^2 + M_{Z_d}^2} \right) = G_F \left(1 + \frac{M_{Z_d}^2}{Q^2 + M_{Z_d}^2} \delta^2 \right)$$
$$s_W^2 \rightarrow s_W^2 \left(1 - \varepsilon_Z \frac{c_W}{s_W} \frac{M_Z^2}{Q^2 + M_{Z_d}^2} \right)$$

既にあるDark Zへの制限

