



# Modulus $\tau$ linking leptonic CP violation to baryon asymmetry in modular $A_4$ invariant flavor model

吉田 貴裕 (新潟大 → 開志専門職大)

Based on: JHEP 07 (2021) 184

in collaboration with 岡田 寛 (APCTP)

清水 勇介 (広島大)

谷本 盛光 (新潟大)

2022/7/10 第49回 北陸信越地区素粒子論グループ研究会 @オンライン

# Introduction

- SMでは同じ charge を持ち、質量の異なる3世代のフェルミオンが存在する

3世代のクォークは混合している

クォーク混合行列 (CKM行列)

$$|V_{CKM}| \sim \begin{pmatrix} 0.97401 \pm 0.00011 & 0.22650 \pm 0.00048 & 0.00361^{+0.00011}_{-0.00009} \\ 0.22636 \pm 0.00048 & 0.97320 \pm 0.00011 & 0.04053^{+0.00083}_{-0.00061} \\ 0.00854^{+0.00023}_{-0.00016} & 0.03978^{+0.00082}_{-0.00060} & 0.999172^{+0.000024}_{-0.000035} \end{pmatrix}$$

PDG (2020)

3世代のニュートリノは混合している

ニュートリノ混合行列 (PMNS行列)

$$|U_{PMNS}| \sim \begin{pmatrix} 0.801 \rightarrow 0.845 & 0.513 \rightarrow 0.579 & 0.143 \rightarrow 0.155 \\ 0.234 \rightarrow 0.500 & 0.471 \rightarrow 0.689 & 0.637 \rightarrow 0.776 \\ 0.271 \rightarrow 0.525 & 0.477 \rightarrow 0.694 & 0.613 \rightarrow 0.756 \end{pmatrix}$$

NuFIT 5.0 (2020)

	1st	2nd	3rd
Quarks	up <i>u</i>	charm <i>c</i>	top <i>t</i>
	down <i>d</i>	strange <i>s</i>	bottom <i>b</i>
Leptons	electron neutrino <i>ν<sub>e</sub></i>	mu neutrino <i>ν<sub>μ</sub></i>	tau neutrino <i>ν<sub>τ</sub></i>
	electron <i>e</i>	muon <i>μ</i>	tauon <i>τ</i>

# Introduction

標準模型ではYukawa相互作用項がフェルミオンの質量と混合の起源になっている

$$\mathcal{L} = -F^\psi \bar{\psi}_L H \psi_R + h.c.$$



$$M_\psi = F^\psi \langle H \rangle$$

– フレーバー構造の背後にある物理は？

➡ 世代間の対称性によってYukawa couplings を関係付けることができる (フレーバー対称性)

**Non-Abelian discrete symmetries** ( $S_3, A_4, S_4, A_5, \dots$ )は典型的なニュートリノ混合パターンをよく説明する

[Altarelli & Feruglio (2010); Ishimori, Kobayashi, Ohki, Okada, Shimizu & Tanimoto (2010); King & Luhn (2013); King, Merle, Morisi, Shimizu & Tanimoto (2014) . . .]

# Introduction

- このような非可換離散対称性の起源が余剰次元のコンパクト化に伴う **モジュラー対称性** によって説明できるのではないかと  
ということが提案された [Feruglio 1706.08749]

## クォークやレプトンの混合角、質量、CP位相を説明できる

T. Kobayashi, K. Tanaka and T. H. Tatsuishi, Phys. Rev. D 98 (2018) no.1, 016004  
J. T. Penedo and S. T. Petcov, Nucl. Phys. B 939 (2019) 292  
J. C. Criado and F. Feruglio, SciPost Phys. 5 (2018) no.5, 042  
T. Kobayashi, N. Omoto, Y. Shimizu, K. Takagi, M. Tanimoto and T. H. Tatsuishi, JHEP 11 (2018), 196  
P. P. Novichkov, J. T. Penedo, S. T. Petcov and A. V. Titov, JHEP 04 (2019), 005  
P. P. Novichkov, J. T. Penedo, S. T. Petcov and A. V. Titov, JHEP 04 (2019), 174  
F. J. de Anda, S. F. King and E. Perdomo, Phys. Rev. D 101 (2020) no.1, 015028  
H. Okada and M. Tanimoto, Phys. Lett. B 791 (2019), 54-61  
T. Kobayashi, Y. Shimizu, K. Takagi, M. Tanimoto, T. H. Tatsuishi and H. Uchida, Phys. Lett. B 794 (2019), 114-121  
P. P. Novichkov, S. T. Petcov and M. Tanimoto, Phys. Lett. B 793 (2019), 247-258  
G. J. Ding, S. F. King and X. G. Liu, Phys. Rev. D 100 (2019) no.11, 115005  
T. Nomura and H. Okada, Phys. Lett. B 797 (2019), 134799  
P. P. Novichkov, J. T. Penedo, S. T. Petcov and A. V. Titov, JHEP 07 (2019), 165  
H. Okada and M. Tanimoto, arXiv:1905.13421.  
I. de Medeiros Varzielas, S. F. King and Y. L. Zhou, Phys. Rev. D 101 (2020) no.5, 055033  
X. G. Liu and G. J. Ding, JHEP08 (2019), 134  
H. Okada and Y. Orikasa, Phys. Rev. D 100 (2019) no.11, 115037  
T. Kobayashi, Y. Shimizu, K. Takagi, M. Tanimoto and T. H. Tatsuishi, JHEP 02 (2020), 097  
G. J. Ding, S. F. King and X. G. Liu, JHEP 09 (2019), 074  
S. F. King and Y. L. Zhou, Phys. Rev. D 101 (2020) no.1, 015001  
M. C. Chen, S. Ramos-Sánchez and M. Ratz, Phys. Lett. B 801 (2020), 135153 , Any more...

# Introduction

- 宇宙バリオン数非対称性 (BAU)

$$Y_B = \frac{n_B}{s} = \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{s}$$

$n_b, n_{\bar{b}}$  : バリオン, 反バリオンの数密度  
 $s$  : エントロピー密度

- ビッグバン元素合成 (BBN) による軽元素合成のため、宇宙の温度が  $O(1)$  MeV のとき

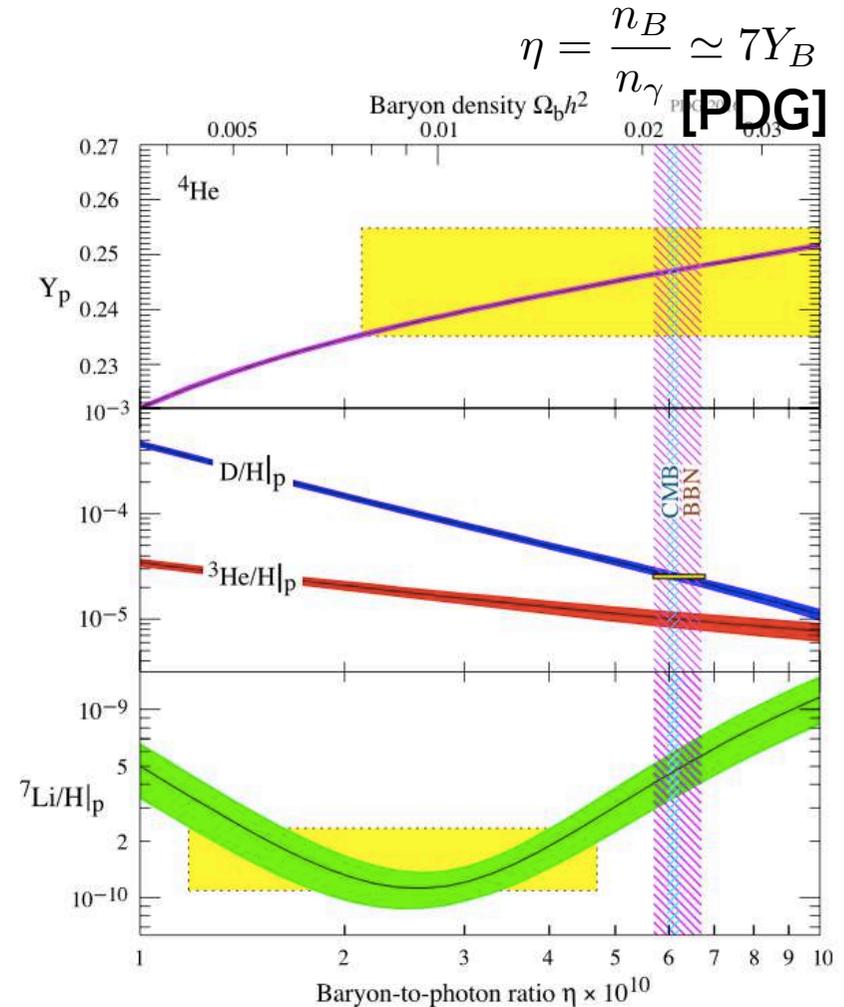
$Y_B \neq 0$  が必要

軽元素残存量からの予言値 (マゼンタの斜線)

- 宇宙背景輻射 (CMB) による観測値

$$Y_B^{obs} = (0.852 - 0.888) \times 10^{-10}$$

[ Planck 2018 ]



# Introduction

## バリオン数生成

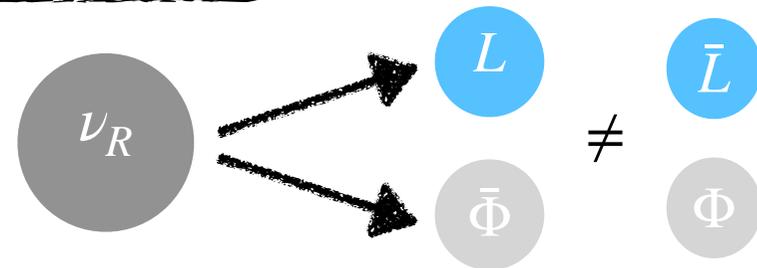
### サハロフの3条件

[A. D. Sakharov (1967)]

1. バリオン数の破れ
2. C対称性とCP対称性が破れている
3. 熱平衡状態からのずれ

標準模型では  
実現できない

SM + 右巻きニュートリノ  $\nu_R$



### Leptogenesis

[M.Fukugita and T.Yanagida (1986)]

1.  $\rightarrow$  マヨラナ質量項により破れている  
レプトン数がスファレロン過程により部分的にバリオン数に転化
2.  $\rightarrow$  ニュートリノの湯川相互作用によりCP対称性が破れている
3.  $\rightarrow$   $\nu_R$ の崩壊過程が熱平衡からずれることで実現

# Introduction

- モジュラー対称性を課した模型においてレプトン数生成を考える
  - モジュラス  $\tau$  がレプトンセクターCPの破れとBAUの起源となる



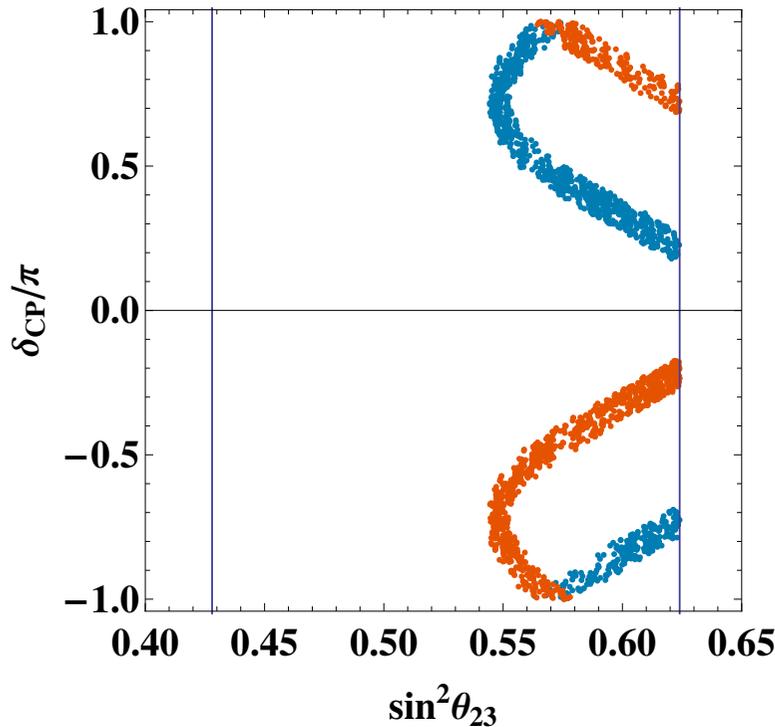
- モジュラー対称性を持つ模型でのレプトン数生成の先行研究

Asaka, Heo, Tatsuishi, TY (2019) ; Wang, Zhou (2019);  
Behera, Mishra, Singirala, Mohanta (2020); Kashav, Verma (2021);

# Introduction

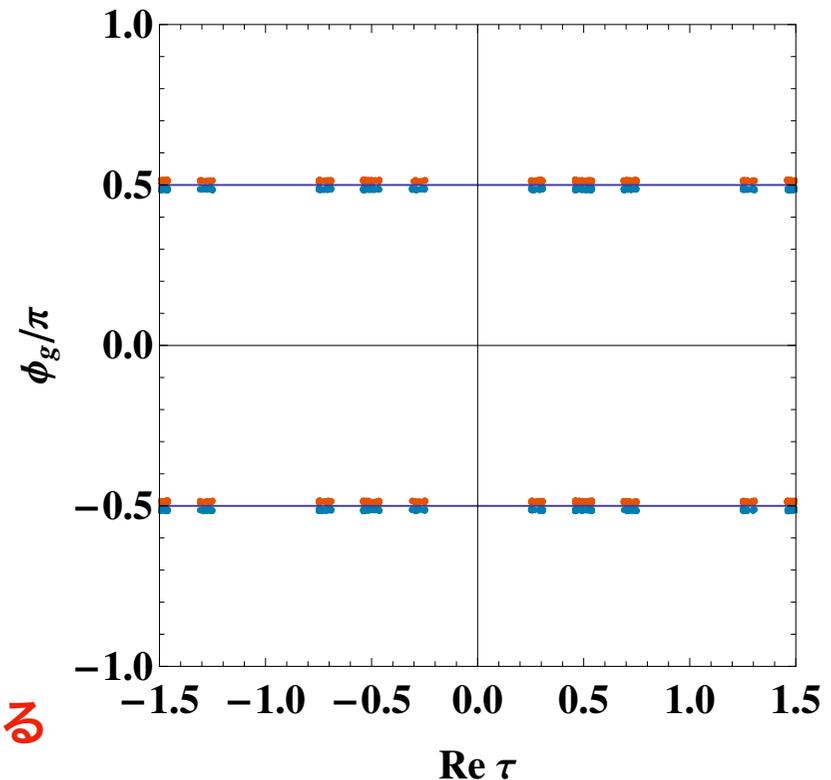
$$M_D = v_u \begin{pmatrix} 2g_1 Y_1 & (-g_1 + g_2) Y_3 & (-g_1 - g_2) Y_2 \\ (-g_1 - g_2) Y_3 & 2g_1 Y_2 & (-g_1 + g_2) Y_1 \\ (-g_1 + g_2) Y_2 & (-g_1 - g_2) Y_1 & 2g_1 Y_3 \end{pmatrix}_R$$

先行研究の結果 [ Asaka, Heo, Tatsuishi, TY ]



- $Y_B > 0$
- $Y_B < 0$

バリオン数  $Y_B$  の符号と  
ニュートリノ混合角  $\theta_{23}$ , ディラック位相  $\delta_{CP}$   
との間に相関



$$g_2/g_1 = g e^{i\phi_g}$$

$\tau$  ではなく, 模型の複素パラメータ  
がバリオン数の正負と関係

理論のCP対称性は複素パラメータで破れている

# Introduction

モジュラス  $\tau$  が真空期待値を持つことで、モジュラー対称性とCP対称性の両方が自発的に破れるような理論を考えたい。



generalized CP symmetry

[Grimus, Lavoura (2003)]



- generalized CP symmetry を課した モジュラーA<sub>4</sub>対称性を持つシーソー模型を考える
- 振動実験の結果と合うようなパラメータ空間を調査
- レプトン数生成機構によってBAUを説明可能か調べる
- 検討した模型が预言するneutrinoの性質について紹介する

# Outline

---

1. Introduction
2. Modular Symmetry
3. Model
4. Results
5. Summary

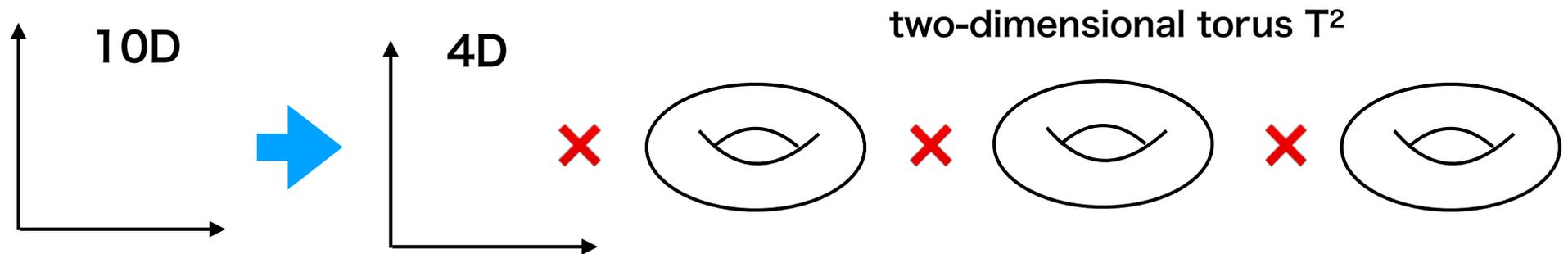
---

# Modular Symmetry

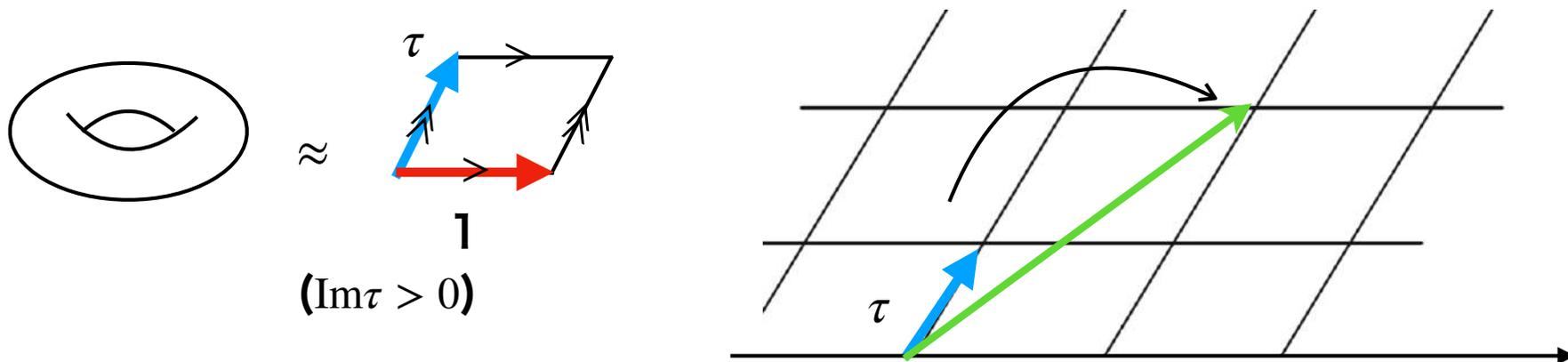
# モジュラー変換

背景にsuperstring理論を考える。

10次元から4次元の理論を構成する際に、余分な6次元はコンパクト化する必要がある。



2次元トーラスはモジュラス  $\tau$  で特徴付けられる。



複素数  $\tau$  を格子上的の別の点に移す変換 = モジュラー変換

# Modular群

- モジュラー群はモジュラス  $\tau$  に作用する変換群  $\gamma$  として定義される。

$$\tau \rightarrow \tau' = \gamma\tau = \frac{a\tau + b}{c\tau + d}, \quad \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in PSL(2, \mathbb{Z})$$

$$PSL(2, \mathbb{Z}) = SL(2, \mathbb{Z}) / \{I, -I\} \quad SL(2, \mathbb{Z}) = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \mid a, b, c, d \in \mathbb{Z}, \quad ad - bc = 1 \right\}$$

I : unit matrix

- モジュラー群の生成子  $S, T$

$$S : \tau \rightarrow -\frac{1}{\tau} \quad S = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \quad T : \tau \rightarrow \tau + 1 \quad T = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Finite quotient subgroup

$$\Gamma_N = \{S, T \mid S^2 = \mathbf{1}, (ST)^3 = \mathbf{1}, T^N = \mathbf{1}\}$$

$$\Gamma_2 \cong S_3, \Gamma_3 \cong A_4, \Gamma_4 \cong S_4, \Gamma_5 \cong A_5$$

# Modular transformation

chiral superfieldが受ける変換 S. Ferrara, D. Lust, A. Shapere, S. Theisen, Phys. Lett. B225,4(1989)

$$\phi^{(I)} \rightarrow (c\tau + d)^{-k_I} \rho^{(I)}(\gamma) \phi^{(I)}$$

$$\gamma \in \Gamma_N$$

$-k_I, k$  : modular weight

modular form of modular weight  $k$

$\phi^{(I)}, f(\tau)$  : representation of  $\Gamma_N$

$\rho(\gamma), \rho^{(I)}(\gamma)$  : unitary repre-

sentation matrix of  $\Gamma_N$

$$f(\tau) \rightarrow (c\tau + d)^k \rho(\gamma) f(\tau)$$

$\Gamma_N$ の変換のもとで不変なsuperpotential

$$W = \sum_n f(\tau) \phi^{(I_1)} \phi^{(I_2)} \dots \phi^{(I_n)}$$

$$k - (k_{I_1} + k_{I_2} + \dots + k_{I_n}) = -1$$

$$\rho \times \rho^{(I_1)} \times \rho^{(I_2)} \times \dots \times \rho^{(I_n)} \ni 1 \quad \text{of } \Gamma_N$$

# Modular form

Dedekind Eta function を使うと weight  $k = 2$  の modular form が作れる

**Dedekind Eta function :**  $\eta(\tau) = q^{1/24} \prod_{n=1}^{\infty} (1 - q^n), \quad q \equiv e^{i2\pi\tau}$

$$\eta(-1/\tau) = \sqrt{-i\tau} \eta(\tau)$$

$$\eta(\tau + 1) = e^{\pi i/12} \eta(\tau)$$

**weight  $k = 2$  の modular form ( $A_4$  triplet)** F. Feruglio, [arXiv : 1706.08749]

$$Y_1(\tau) = \frac{i}{2\pi} \left( \frac{\eta'(\tau/3)}{\eta(\tau/3)} + \frac{\eta'((\tau+1)/3)}{\eta((\tau+1)/3)} + \frac{\eta'((\tau+2)/3)}{\eta((\tau+2)/3)} - \frac{27\eta'(3\tau)}{\eta(3\tau)} \right)$$

$$Y_2(\tau) = \frac{-i}{\pi} \left( \frac{\eta'(\tau/3)}{\eta(\tau/3)} + \omega^2 \frac{\eta'((\tau+1)/3)}{\eta((\tau+1)/3)} + \omega \frac{\eta'((\tau+2)/3)}{\eta((\tau+2)/3)} \right)$$

$$Y_3(\tau) = \frac{-i}{\pi} \left( \frac{\eta'(\tau/3)}{\eta(\tau/3)} + \omega \frac{\eta'((\tau+1)/3)}{\eta((\tau+1)/3)} + \omega^2 \frac{\eta'((\tau+2)/3)}{\eta((\tau+2)/3)} \right)$$

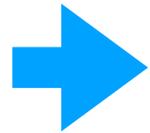
$$Y^{A_4} = \begin{pmatrix} Y_1(\tau) \\ Y_2(\tau) \\ Y_3(\tau) \end{pmatrix} \quad \omega = e^{2\pi i/3}$$

$$Y_1(\tau) = 1 + 12q + 36q^2 + 12q^3 + \dots$$

$$Y_2(\tau) = -6q^{1/3} (1 + 7q + 8q^2 + \dots)$$

$$Y_3(\tau) = -18q^{2/3} (1 + 2q + 5q^2 + \dots)$$

## CP不変な理論から出発する

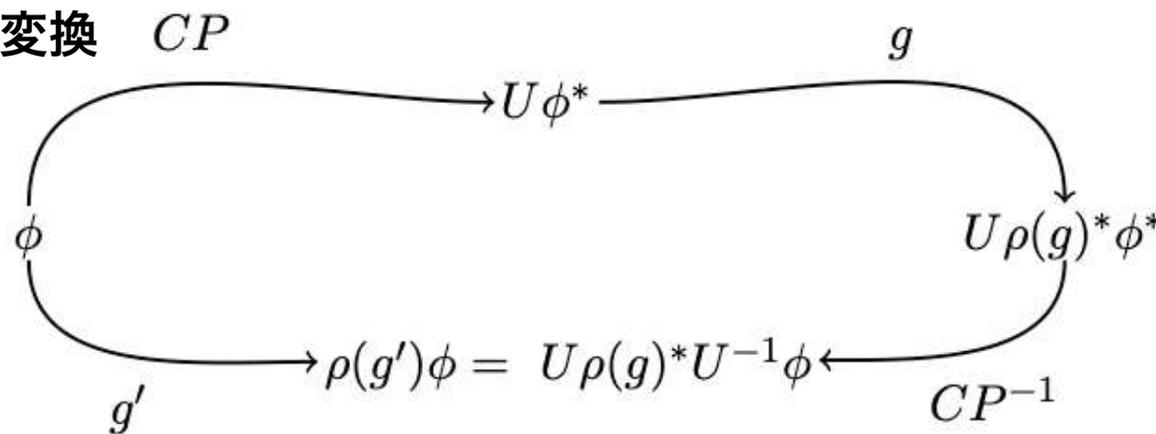


モジュラス  $\tau$  が VEV を持つとモジュラー, CP対称性が破れる

[Novichkov, Penedo, Petcov, Titov (2019)]

By arXiv: 1211.6953  
[Holthausen, Lindner, Schmidt (2014)]

離散群上のCP変換



$$\phi \xrightarrow{G} \rho(g)\phi, \quad g \in G.$$

モジュラー群上での変換

$$\begin{aligned} \psi(x) &\xrightarrow{CP} \mathbf{X}_r \bar{\psi}(x_P) \xrightarrow{\gamma} (c\tau^* + d)^{-k} \mathbf{X}_r \rho_r^*(\gamma) \bar{\psi}(x_P) \\ &\xrightarrow{CP^{-1}} (c\tau_{CP^{-1}}^* + d)^{-k} \mathbf{X}_r \rho_r^*(\gamma) \mathbf{X}_r^{-1} \psi(x), \quad \mathbf{X}_r \rho_r^*(\gamma) \mathbf{X}_r^{-1} = \left( \frac{c'\tau + d'}{c\tau_{CP^{-1}}^* + d} \right)^{-k} \rho_r(\gamma'). \end{aligned}$$

$$\tau \xrightarrow{CP} -\tau^*, \quad \psi(x) \xrightarrow{CP} \mathbf{X}_r \bar{\psi}(x_P), \quad \mathbf{Y}_r^{(k)}(\tau) \xrightarrow{CP} \mathbf{Y}_r^{(k)}(-\tau^*) = \mathbf{X}_r \mathbf{Y}_r^{(k)*}(\tau)$$

where  $\mathbf{X}_r = \mathbb{1}_r$

例) 質量行列

$$M_E(\tau) =$$

$$v_d \begin{pmatrix} \alpha_e & 0 & 0 \\ 0 & \beta_e & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_1(\tau) & Y_3(\tau) & Y_2(\tau) \\ Y_2^{(4)}(\tau) & Y_1^{(4)}(\tau) & Y_3^{(4)}(\tau) \\ Y_3^{(6)}(\tau) + g_e Y_3'^{(6)}(\tau) & Y_2^{(6)}(\tau) + g_e Y_2'^{(6)}(\tau) & Y_1^{(6)}(\tau) + g_e Y_1'^{(6)}(\tau) \end{pmatrix}_{RL}$$

$$M_E(\tau) \xrightarrow{CP} M_E(-\tau^*) = M_E^*(\tau) =$$

$$v_d \begin{pmatrix} \alpha_e & 0 & 0 \\ 0 & \beta_e & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_1(\tau)^* & Y_3(\tau)^* & Y_2(\tau)^* \\ Y_2^{(4)}(\tau)^* & Y_1^{(4)}(\tau)^* & Y_3^{(4)}(\tau)^* \\ Y_3^{(6)}(\tau)^* + g_e^* Y_3'^{(6)}(\tau)^* & Y_2^{(6)}(\tau)^* + g_e^* Y_2'^{(6)}(\tau)^* & Y_1^{(6)}(\tau)^* + g_e^* Y_1'^{(6)}(\tau)^* \end{pmatrix}_{RL}$$

CP不変だったら  $\tau \xrightarrow{CP} -\tau^* = \tau$

$\text{Re } \tau = 0$ , が自明にそのような点

この時  $Y_r^{(k)}(\tau)^* = Y_r^{(k)}(\tau)$

$M_E(\tau) = M_E^*(\tau)$  となるためには,  $g_e$ は実となる

質量行列に現れる係数は  $\tau$  以外は実数

---

# Model

# モジュラーA<sub>4</sub>不変な模型

	$L$	$(e^c, \mu^c, \tau^c)$	$N^c$	$H_u$	$H_d$	$Y_3^{(k)}$
SU(2)	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
$A_4$	<b>3</b>	<b>(1, 1'', 1')</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>
weight	-1	$(k_e, k_\mu, k_\tau)$	-1	0	0	$k$

$$(k_e = -1, k_\mu = -3, k_\tau = -5)$$

Representations and weights for MSSM fields and relevant modular forms of weight  $k$ .

H. Okada, Y. Shimizu, M. Tanimoto, TY

[JHEP07 \(2021\) 184](#)

## superpotentials

$$w_E = \alpha_e e^c H_d Y_3^{(2)} L + \beta_e \mu^c H_d Y_3^{(4)} L + \gamma_e \tau^c H_d Y_3^{(6)} L + \gamma'_e \tau^c H_d Y_{3'}^{(6)} L,$$

$$w_D = \gamma_\nu \underline{N^c H_u Y_3^{(2)}} L + \gamma'_\nu \underline{N^c H_u Y_3^{(2)}} L,$$

$$w_N = \Lambda N^c N^c Y_3^{(2)}. \quad \text{symmetric} \quad \text{anti-symmetric}$$

$\Lambda$ : 右巻きニュートリノの質量スケール

## Modular forms with higher weight (A<sub>4</sub>)

$$Y_1^{(4)}(\tau) = Y_1(\tau)^2 + 2Y_2(\tau)Y_3(\tau), \quad Y_{1'}^{(4)}(\tau) = Y_3(\tau)^2 + 2Y_1(\tau)Y_2(\tau),$$

$$Y_{1''}^{(4)}(\tau) = Y_2(\tau)^2 + 2Y_1(\tau)Y_3(\tau) = 0, \quad Y_3^{(4)}(\tau) = \begin{pmatrix} Y_1^{(4)}(\tau) \\ Y_2^{(4)}(\tau) \\ Y_3^{(4)}(\tau) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_1(\tau)^2 - Y_2(\tau)Y_3(\tau) \\ Y_3(\tau)^2 - Y_1(\tau)Y_2(\tau) \\ Y_2(\tau)^2 - Y_1(\tau)Y_3(\tau) \end{pmatrix}.$$

$$Y_1^{(6)} = Y_1^3 + Y_2^3 + Y_3^3 - 3Y_1Y_2Y_3,$$

$$Y_3^{(6)} \equiv \begin{pmatrix} Y_1^{(6)} \\ Y_2^{(6)} \\ Y_3^{(6)} \end{pmatrix} = (Y_1^2 + 2Y_2Y_3) \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{pmatrix}, \quad Y_{3'}^{(6)} \equiv \begin{pmatrix} Y_1'^{(6)} \\ Y_2'^{(6)} \\ Y_3'^{(6)} \end{pmatrix} = (Y_3^2 + 2Y_1Y_2) \begin{pmatrix} Y_3 \\ Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix}.$$

# Mass matrices

$$M_E(\tau) =$$

$$v_d \begin{pmatrix} \alpha_e & 0 & 0 \\ 0 & \beta_e & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_1(\tau) & Y_3(\tau) & Y_2(\tau) \\ Y_2^{(4)}(\tau) & Y_1^{(4)}(\tau) & Y_3^{(4)}(\tau) \\ Y_3^{(6)}(\tau) + g_e Y_3'^{(6)}(\tau) & Y_2^{(6)}(\tau) + g_e Y_2'^{(6)}(\tau) & Y_1^{(6)}(\tau) + g_e Y_1'^{(6)}(\tau) \end{pmatrix}_{RL},$$

$$M_D = \gamma_\nu v_u \begin{pmatrix} 2Y_1 & (-1 + g_D)Y_3 & (-1 - g_D)Y_2 \\ (-1 - g_D)Y_3 & 2Y_2 & (-1 + g_D)Y_1 \\ (-1 + g_D)Y_2 & (-1 - g_D)Y_1 & 2Y_3 \end{pmatrix}_{RL},$$

$$M_N = \Lambda \begin{pmatrix} 2Y_1 & -Y_3 & -Y_2 \\ -Y_3 & 2Y_2 & -Y_1 \\ -Y_2 & -Y_1 & 2Y_3 \end{pmatrix}_{RR}.$$

Seesaw mechanism

$$M_\nu = M_D^T M_N^{-1} M_D$$

# 模型のパラメータ

模型には複素 1 個, 実8個のパラメータが存在する.

$$\tau, \gamma_D, \gamma_D'/\gamma_D = g_D, \Lambda, \alpha_e, \beta_e, \gamma_e, \gamma_e', \nu_u/\nu_d$$

complex

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta_{cp}} \\ -c_{23}s_{12} - s_{23}s_{13}c_{12}e^{i\delta_{cp}} & c_{23}c_{12} - s_{23}s_{13}s_{12}e^{i\delta_{cp}} & s_{23}c_{13} \\ s_{23}s_{12} - c_{23}s_{13}c_{12}e^{i\delta_{cp}} & -s_{23}c_{12} - c_{23}s_{13}s_{12}e^{i\delta_{cp}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\alpha_{21}}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\frac{\alpha_{31}}{2}} \end{pmatrix}$$

ニュートリノ振動実験, charged lepton 質量を条件として課す

observable	best fit $\pm 1\sigma$ for NH	best fit $\pm 1\sigma$ for IH
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.573^{+0.016}_{-0.020}$	$0.575^{+0.016}_{-0.019}$
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02219^{+0.00062}_{-0.00063}$	$0.02238^{+0.00063}_{-0.00062}$
$\Delta m_{\text{sol}}^2$	$7.42^{+0.21}_{-0.20} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$	$7.42^{+0.21}_{-0.20} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
$\Delta m_{\text{atm}}^2$	$2.517^{+0.026}_{-0.028} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	$-2.498^{+0.028}_{-0.028} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

$$\begin{aligned} \Sigma m_\nu &< 120 \text{ meV} \\ m_e &= 0.5110 \text{ MeV} \\ m_\mu &= 105.7 \text{ MeV} \\ m_\tau &= 1777 \text{ MeV} \end{aligned}$$

NuFIT5.0

---

# Results

# Best fit point

## Best fit point

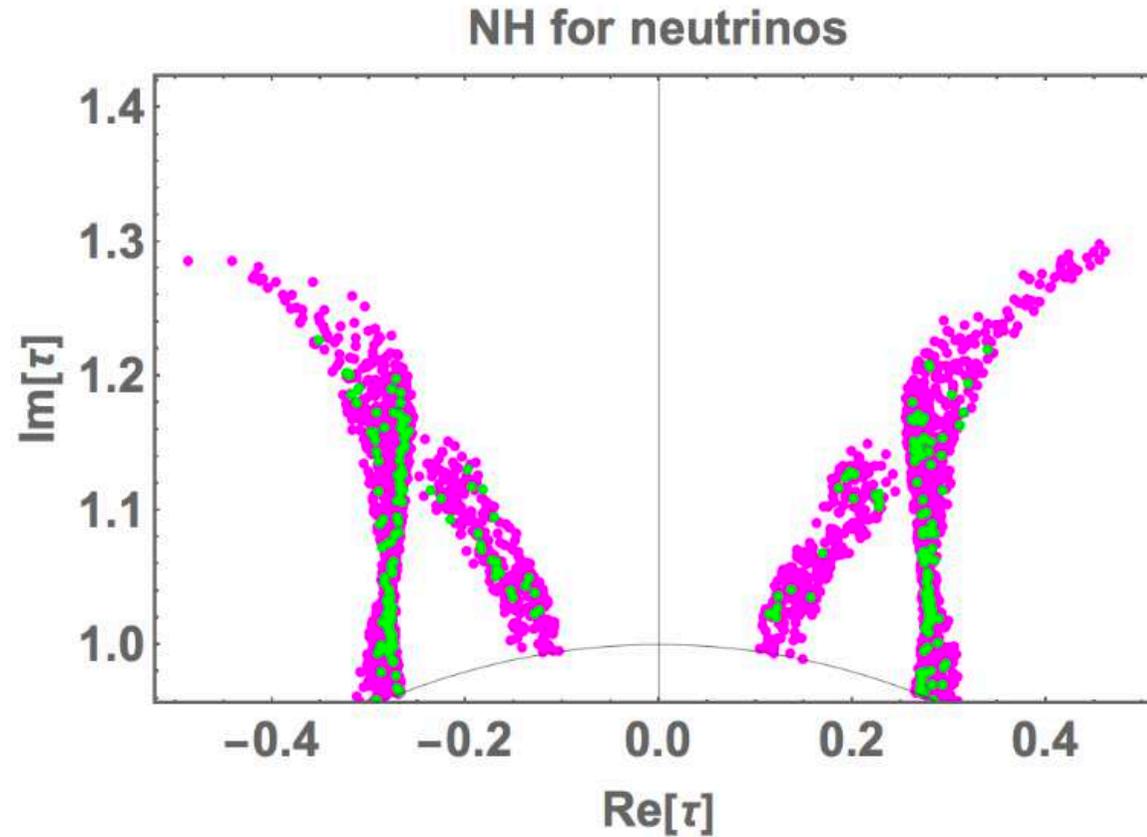
	NH	IH
$\tau$	$-0.2637 + 1.1549 i$	$0.4984 + 1.1553 i$
$g_D$	-1.29	1.74
$g_e$	-1.01	$1.68 \times 10^{-7}$
$\beta_e/\alpha_e$	$4.66 \times 10^{-2}$	$3.64 \times 10^{-2}$
$\gamma_e/\alpha_e$	11.9	$7.35 \times 10^{-4}$
$\sin^2 \theta_{12}$	0.305	0.309
$\sin^2 \theta_{23}$	0.571	0.494
$\sin^2 \theta_{13}$	0.0220	0.0222
$\delta_{CP}$	$317^\circ$	$300^\circ$
$[\alpha_{21}, \alpha_{31}]$	$[189^\circ, 64^\circ]$	$[116^\circ, 270^\circ]$
$\sum m_i$	67.3 meV	145 meV
$\langle m_{ee} \rangle$	0.18 meV	35.5 meV
$\sqrt{\chi^2}$	1.39	4.27

IHはallowed region がほぼない.

NHの場合を紹介

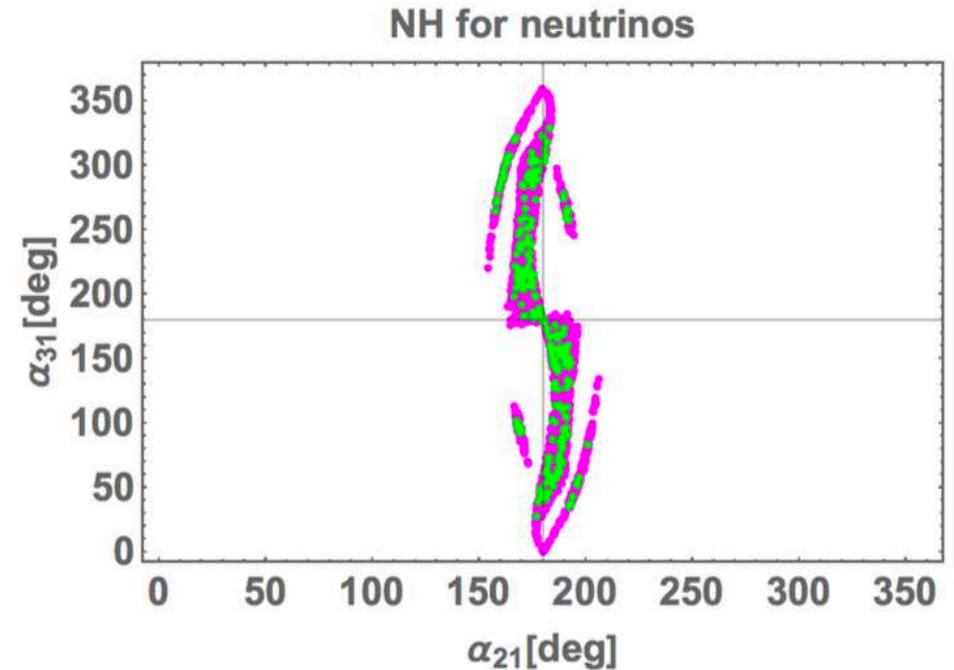
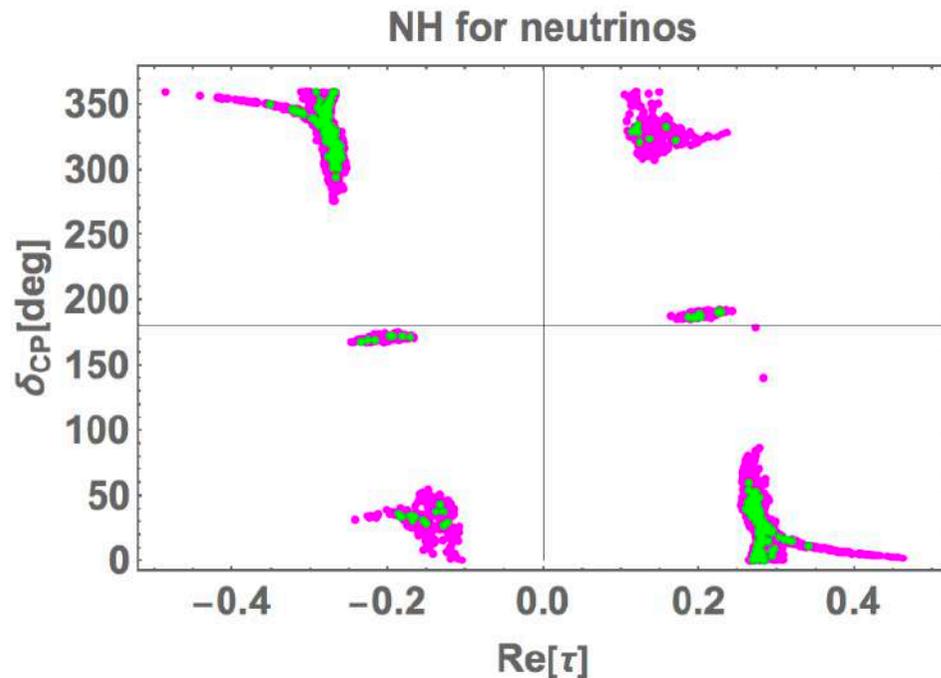
# Region of $\tau$

ニュートリノ振動実験とのフィットと  $\sqrt{\chi^2} = 3$  で一致する領域



# CP phases

ニュートリノ振動実験とのフィットと $\sqrt{\chi^2} = 3$ で一致する領域

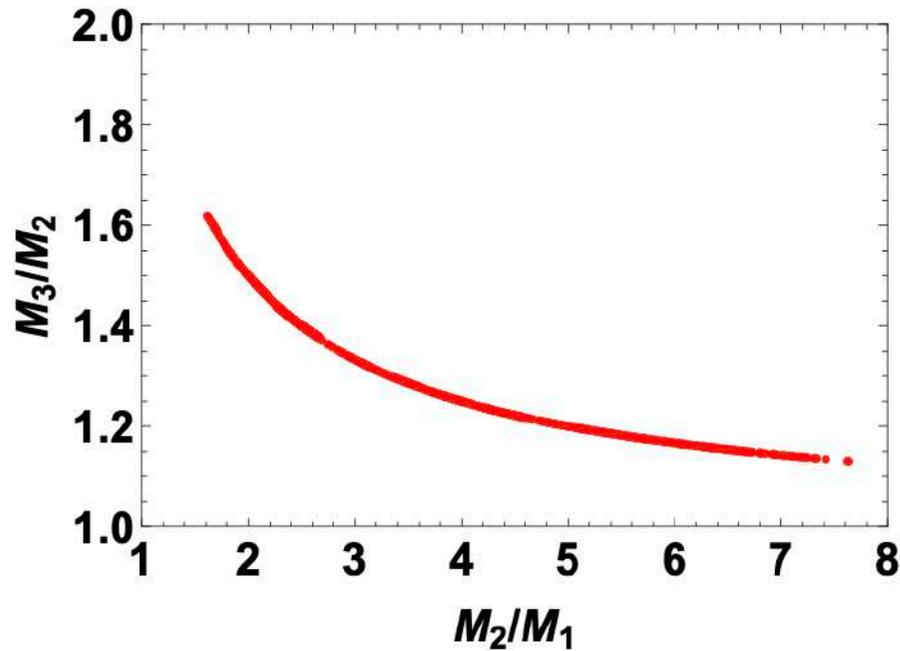


Green :  $\sqrt{\chi^2} \leq 2$     Magenta :  $\sqrt{\chi^2} \leq 3$

Delta CP :  $[0^\circ, 80^\circ], [170^\circ, 175^\circ], [185^\circ, 190^\circ], [280^\circ, 360^\circ]$

Majorana phases :  $\alpha_{21} \sim 180^\circ$

# Mass hierarchy of $N_1$ 's



Mass ratios

$$M_2/M_1 \sim [1.5, 7.6]$$

$$M_3/M_2 \sim [1.1, 1.6]$$

Large washout

$$\tilde{m}_1 \sim [40, 42] \text{ meV}, [59, 70] \text{ meV}$$

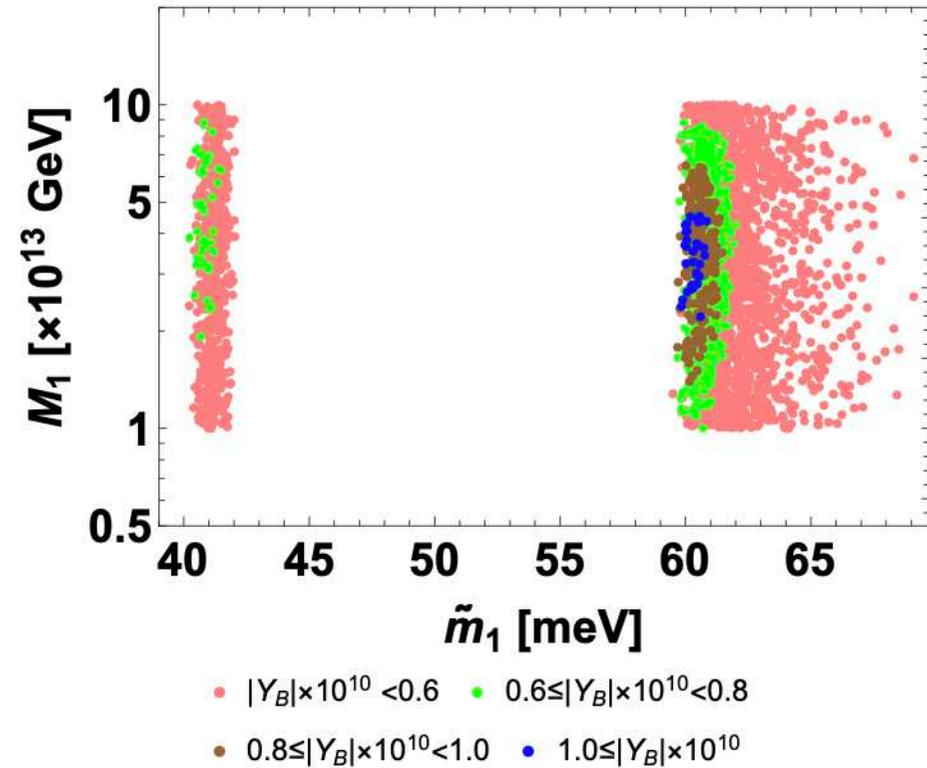
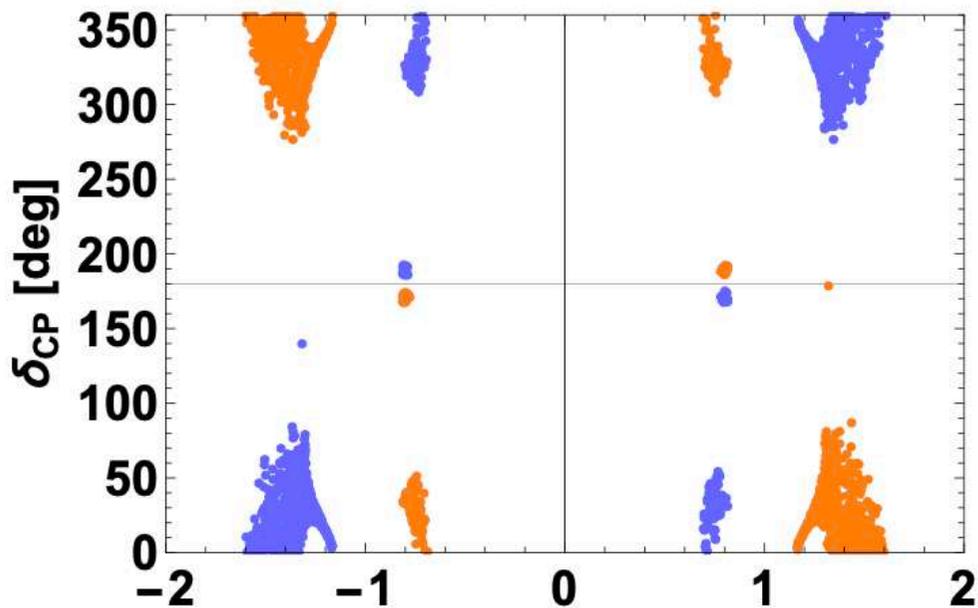
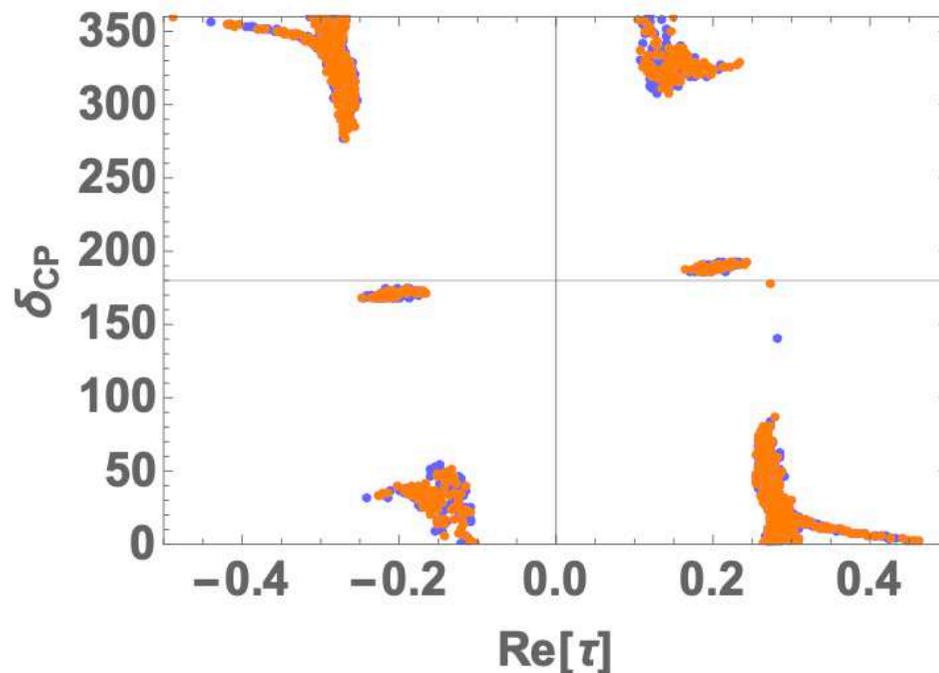
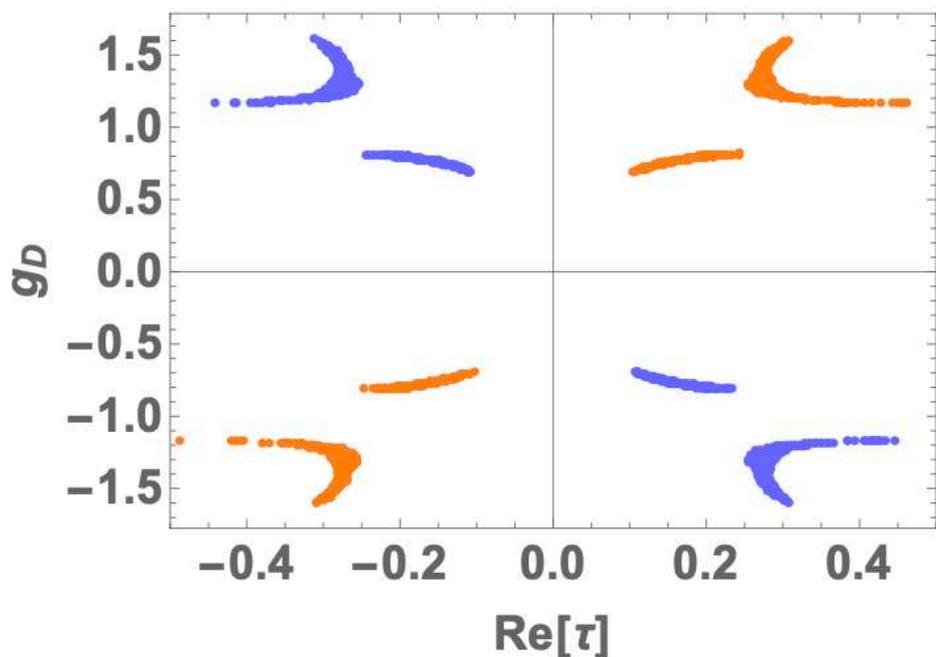


Figure 11. Plot of  $\tilde{m}_1$  and  $M_1$  for each  $|Y_B|$ .



Heavy right-handed neutrinos are needed

# $\tau$ and the sign of $Y_B$

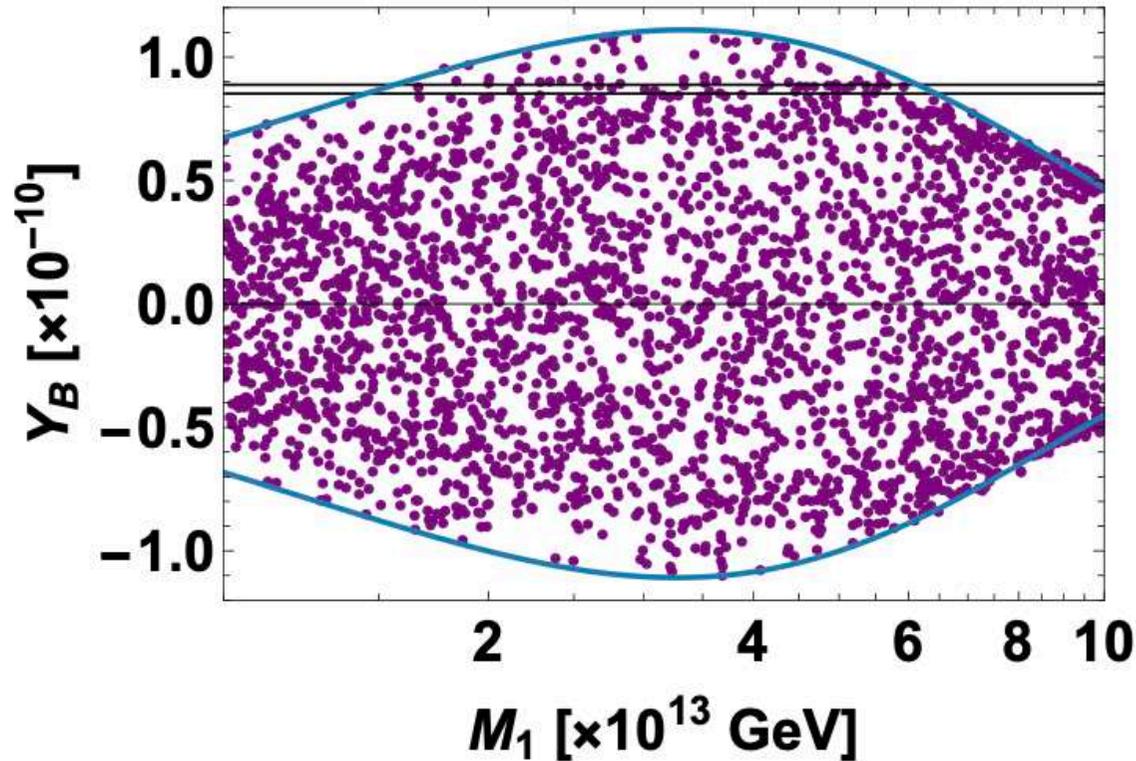


Orange : positive  $Y_B$

Magenta : Negative  $Y_B$

The sign of  $Y_B$  depends on both the sign of  $\text{Re}[\tau]$  and the sign of  $g_D$

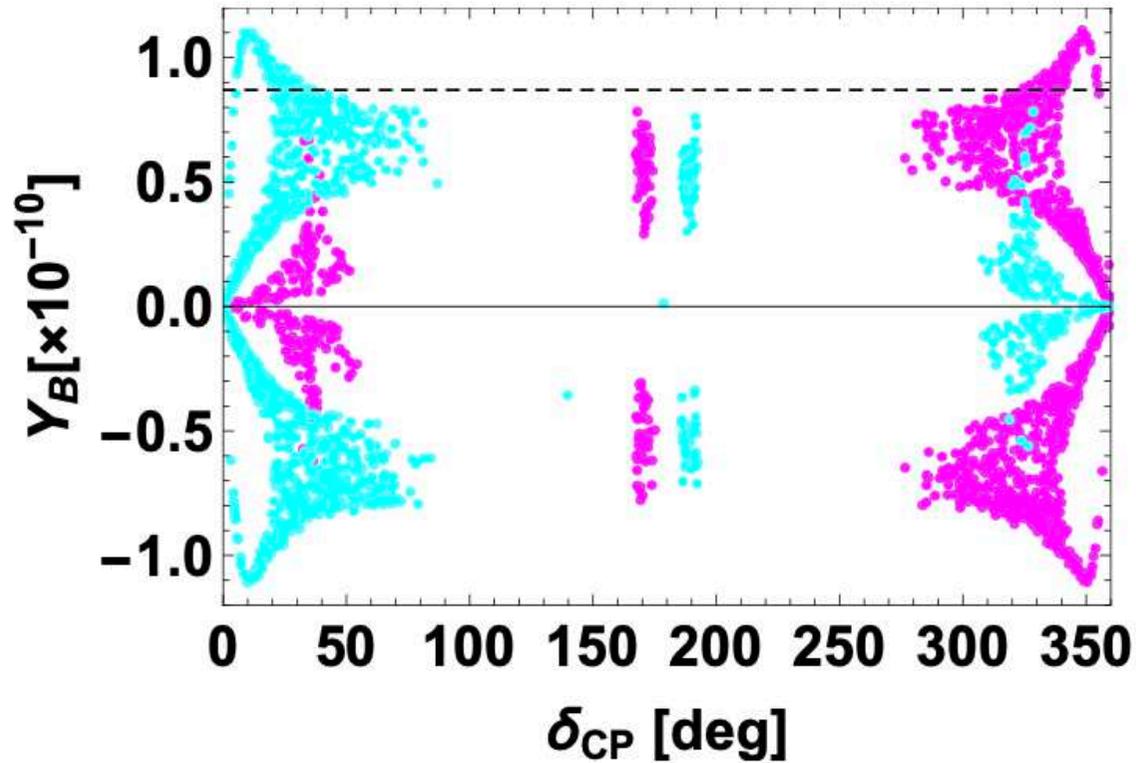
# The magnitude of $Y_B$



- 黒線: 観測値  $Y_B = (0.852 - 0.888) \times 10^{-10}$

BAUを説明するために必要な質量 :  $M_1 \sim (1.5 - 6.5) \times 10^{13} \text{ GeV}$

# The correlation between $\delta_{CP}$ and $Y_B$



Cyan :  $\text{Re}[\tau] > 0$

Magenta :  $\text{Re}[\tau] < 0$

← Central value of observed  $Y_B$

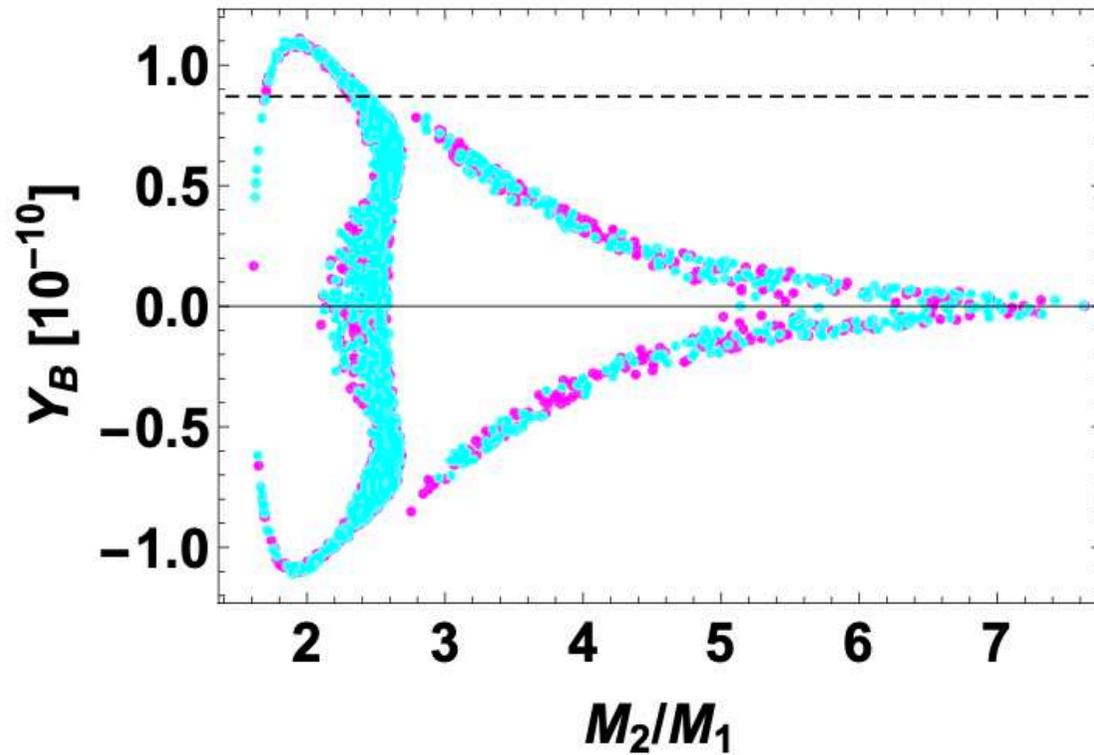
$M_1 \sim 3.36 \times 10^{13} \text{ GeV}$

$Y_B$ 観測値を説明するディラック位相は

$5^\circ < \delta_{CP} < 50^\circ$ , この時,  $\text{Re}[\tau] > 0$ .

$310^\circ < \delta_{CP} < 355^\circ$ , この時,  $\text{Re}[\tau] < 0$ .

# The magnitude of $Y_B$



Cyan :  $\text{Re}[\tau] > 0$

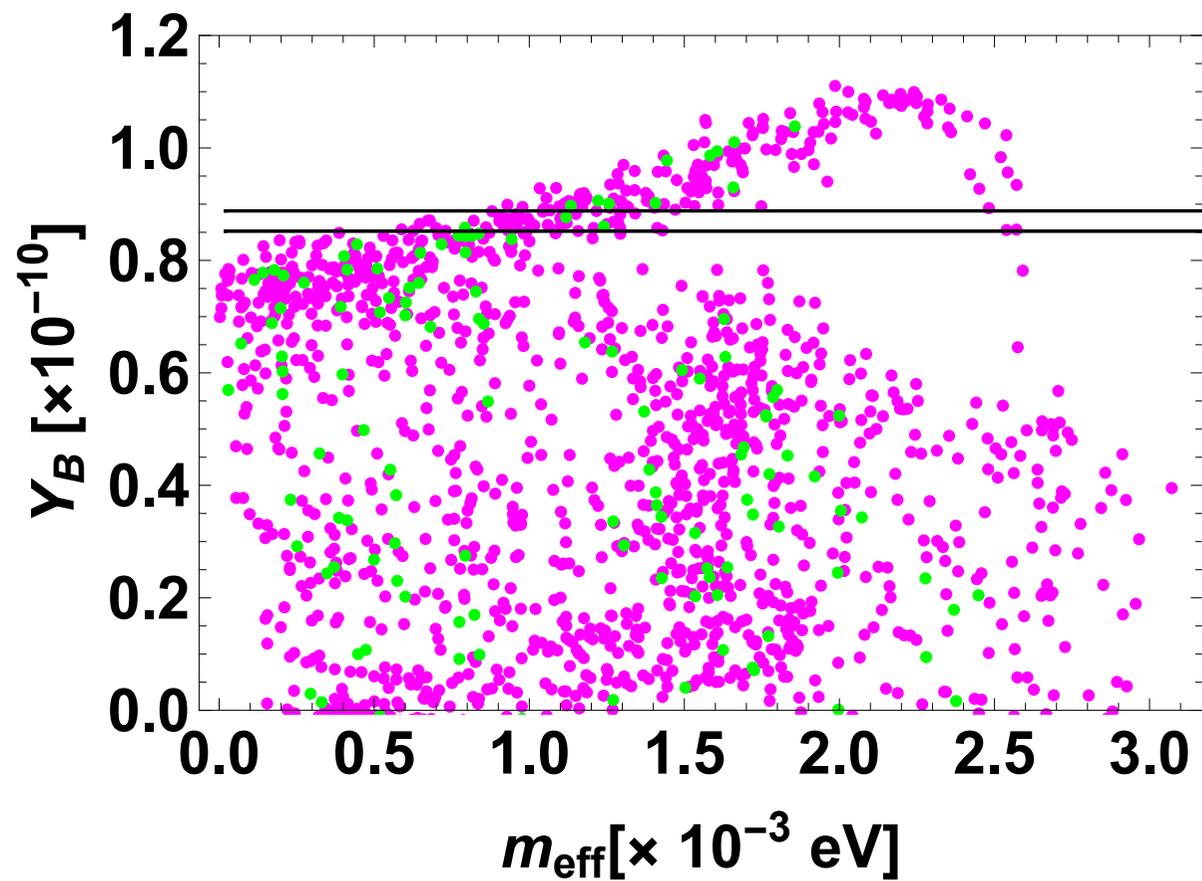
Magenta :  $\text{Re}[\tau] < 0$

← Central value of observed  $Y_B$

$$M_1 \sim 3.36 \times 10^{13} \text{Gev}$$

$M_2/M_1 \sim [1.6, 2.5]$  :  
質量比がこの時だけ説明可能

# $0\nu\beta\beta$ 崩壊の有効質量



$m_{\text{eff}} = 0.5 \sim 2.5 \text{ meV}$ を予言

---

# Summary

## Summary

- Generalized CP symmetryを課した モジュラー $A_4$ モデルを検討した.
- ニュートリノ振動実験結果と一致するパラメータ領域を示した.
- 宇宙バリオン数の観測を説明可能な領域が存在することを示した.
  - バリオン数生成量を説明する右巻きニュートリノ質量は  
 $M_1 \sim (1.5 - 6.5) \times 10^{13} \text{Gev}$  かつ, 世代間の質量比が $M_2/M_1 \sim [1.5, 2.5]$   
( $M_3/M_2 \sim [1.4, 1.6]$ ).
- バリオン数生成を説明する時ディラック位相が  $\begin{cases} 5^\circ < \delta_{\text{CP}} < 50^\circ \\ 310^\circ < \delta_{\text{CP}} < 355^\circ \end{cases}$   
 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の $m_{\text{eff}} = 0.5 \sim 2.5 \text{ meV}$ を予言