

# CP Theory II

清水 勇介 (広島大学)

2018年2月24日

第31回ニュートリノ研究会@ICRR



# 概要

## 1. 導入

- レプトンセクターのCPの破れ

## 2. レプトン模型

- ニュートリノ振動実験を再現するminimalな模型
- CPの破れと宇宙のバリオン非対称

## 3. GUT模型におけるCPの破れ

## 4. まとめ

# 1. 導入

- 素粒子標準模型  $SU(3)_Q \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Particle	First	Second	Third	Mixing matrix
Quark	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ $u_R^c$ $d_R^c$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$ $c_R^c$ $s_R^c$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$ $t_R^c$ $b_R^c$	CKM matrix (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa)
Lepton	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$ $e_R^c$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$ $\mu_R^c$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$ $\tau_R^c$	PMNS matrix (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata)

## - 世代の謎

- 素粒子の質量は世代ごとに違う
- 素粒子の世代混合はレプトンとクォークで大きく異なっている

- ニュートリノの質量二乗差

$$\Delta m_{\text{sol}}^2 \equiv m_2^2 - m_1^2, \quad |\Delta m_{\text{atm}}^2| \equiv |m_3^2 - m_1^2|.$$

- ニュートリノの質量階層性

- 順階層性 (NH)  $\rightarrow m_1 < m_2 < m_3$
- 逆階層性 (IH)  $\rightarrow m_3 < m_1 < m_2$
- 縮退型 (QD)  $\rightarrow m_1 \sim m_2 \sim m_3$

- Higgs機構を通じて標準模型のフェルミオンは質量を獲得する

$$\mathcal{L}_Y = y\bar{\psi}_L H \psi_R \rightarrow y\langle H \rangle \bar{\psi}_L \psi_R = m_f \bar{\psi}_L \psi_R.$$

標準模型では、右巻きニュートリノが存在しないため、  
ニュートリノは質量を持つことができない

## シーソー機構

Minkowski '77; Gell-Mann, Ramond, Slansky; Yanagida; Glashow; Mohapatra, Senjanovic '79

- 右巻きマヨラナニュートリノを3世代導入する

$$M = \begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D^T & M_N \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{対角化}} M_\nu \simeq -M_D^T M_N^{-1} M_D$$

- $M_N \gg M_D$  ならば、左巻きマヨラナニュートリノは小ささがゼロではない質量を獲得する

## レプトンの世代混合行列 (PMNS行列)

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

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

- $\delta_{\text{CP}}$ : ディラック位相、 $\alpha, \beta$ : マヨラナ位相

- レプトンとクォークの世代混合の違い

- レプトンの世代混合：PMNS行列

$$|U_{\text{PMNS}}| \simeq \begin{pmatrix} 0.825 & 0.545 & 0.148 \\ 0.462 & 0.587 & 0.665 \\ 0.326 & 0.598 & 0.732 \end{pmatrix}$$

レプトンの世代混合は  $\theta_{13}$  を除いて大きい

$$\sin \theta_{13} \simeq 0.148$$

- クォークの世代混合：CKM行列 (PDG 2014)

$$|V_{\text{CKM}}| \simeq \begin{pmatrix} 0.974 & 0.225 & 0.00355 \\ 0.225 & 0.973 & 0.0414 \\ 0.00886 & 0.0405 & 0.999 \end{pmatrix}$$

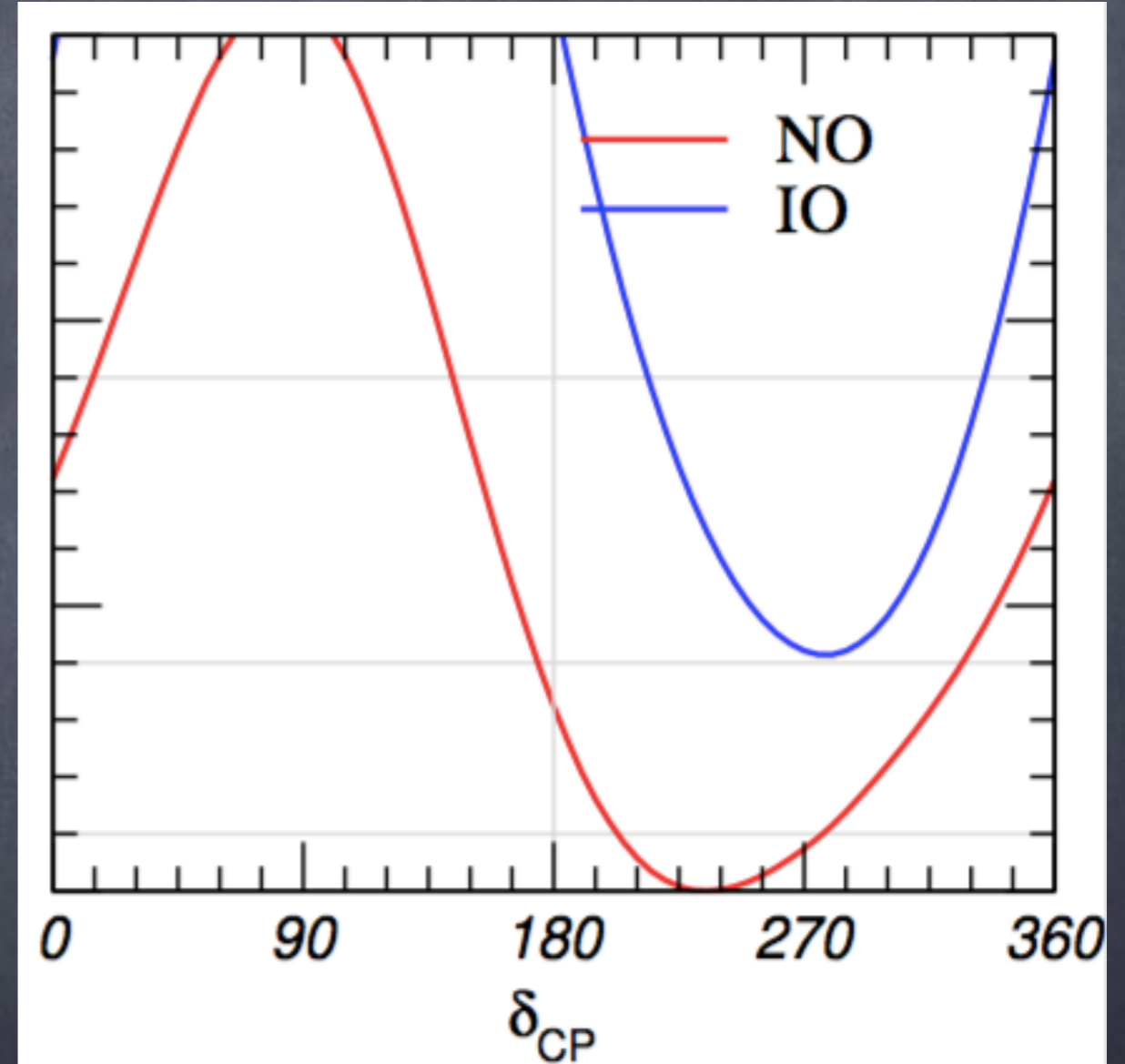
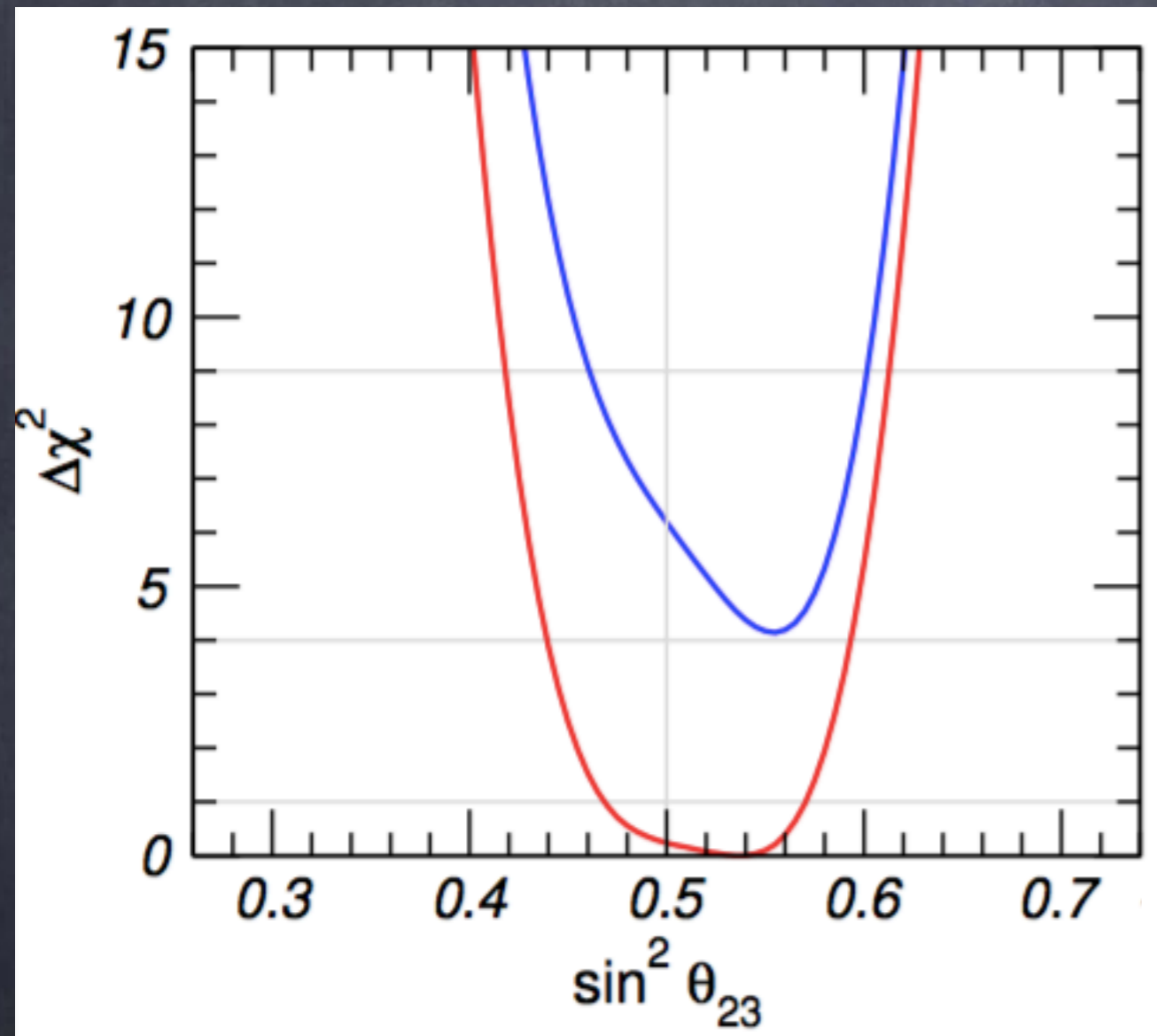
クォークの世代混合はカビボ角  $\lambda_C$  を除いて小さい

$$\lambda_C \simeq 0.225$$

- レプトンとクォークの世代混合は関係する？  $\sin \theta_{13} \simeq \frac{\lambda_C}{\sqrt{2}}$

- レプトンセクターのCPの破れ

- NuFIT 3.2 (2018) のデータ



- $\delta_{CP} \simeq -90^\circ$  ( $270^\circ$ ), 順階層性を示唆
- $\theta_{23}$  は maximal  $\rightarrow$  谷本さんのトーク

## 2. レプトン模型

- ニュートリノ振動実験を再現するminimalな模型 (Texture Zero)
- 右巻きマヨラナニュートリノを2つ導入した模型:  $(N_1, N_2)$

P. H. Frampton, S. L. Glashow and T. Yanagida, Phys. Lett. B548 (2002) 119.

$$M_D = \begin{pmatrix} a & 0 \\ b & e \\ 0 & f \end{pmatrix}_{LR}, \quad M_N = \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ b & M_2 \end{pmatrix}_{RR}$$

ニュートリノの質量階層性が順階層の場合

$$U_{e3} \simeq \frac{m_2}{2m_3} = \frac{\sqrt{\Delta m_{\text{sol}}^2}}{2\sqrt{\Delta m_{\text{atm}}^2}} \simeq 0.086$$

$$U_{e3}^{\text{exp}} \simeq 0.15$$



## 2. レプトン模型

- ニュートリノ振動実験を再現するminimalな模型 (Occam's Razor)
- 右巻きマヨラナニュートリノを2つ導入した模型： $(N_1, N_2)$

K. Harigaya, M. Ibe and T. T. Yanagida, Phys. Rev. D86 (2012) 013002.

ニュートリノの質量行列が逆階層性るとき成功した

$$M_D = \begin{pmatrix} 0 & d \\ b & 0 \\ c & f \end{pmatrix}_{LR}, \quad M_N = \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ b & M_2 \end{pmatrix}_{RR}$$
$$M_\nu = -M_D M_N^{-1} M_D^T = - \begin{pmatrix} \frac{d^2}{M_2} & 0 & \frac{df}{M_2} \\ 0 & \frac{b^2}{M_1} & \frac{bc}{M_1} \\ \frac{df}{M_2} & \frac{bc}{M_1} & \frac{c^2}{M_1} + \frac{f^2}{M_2} \end{pmatrix}$$

実パラメータは4つ、位相のパラメータが1つだけ → 5つの実験値

$$\text{予言： } \delta_{CP} = \pm \frac{\pi}{2}$$

- ニュートリノの質量階層性が順階層となるminimalな模型を探る

Y. S., K. Takagi and M. Tanimoto, JHEP 1711 (2017) 201; Phys. Lett. B778 (2018) 6.

- 荷電レプトンの質量行列は対角化された基底
- 2つの右巻きマヨラナニュートリノを導入
- 右巻きマヨラナニュートリノの質量行列：

$$M_N = \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix} = M_0 \begin{pmatrix} p^{-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- ディラックニュートリノの質量行列（一般形）：

$$M_D = vY_\nu = v \begin{pmatrix} a & d \\ b & e \\ c & f \end{pmatrix}$$

- ニュートリノの質量階層性が順階層となるminimalな模型を探る

Y. S., K. Takagi and M. Tanimoto, JHEP 1711 (2017) 201; Phys. Lett. B778 (2018) 6.

## Tri-bimaximal (TBM) 混合行列

$$V_{\text{TBM}} = \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

↑ この列を保つ対称性：Tri-maximal混合

TM<sub>1</sub>

$$M_D = v \begin{pmatrix} \frac{b+c}{2} & \frac{e+f}{2} \\ b & e \\ c & f \end{pmatrix}$$

4つの実パラメータと2つの位相

- ニュートリノの質量階層性が順階層となるminimalな模型

フレーバー対称性  $S_4$  を導入する (Indirect Approach) ← 谷本さんのトーク

Y. S., K. Takagi and M. Tanimoto, JHEP 1711 (2017) 201.

$$\mathcal{L}_y = y_{\text{atm}} \phi_{\text{atm}} \bar{L} H N_1 / \Lambda + y_{\text{sol}} \phi_{\text{sol}} \bar{L} H N_2 / \Lambda$$

$\phi_{\text{atm}}, \phi_{\text{sol}} : S_4$  の3'表現のflavon (スカラー場)

$L : S_4$  の3'表現の左巻きレプトン     $H : S_4$  の1表現のヒッグス場

$N_1, N_2 : S_4$  の1表現の右巻きマヨラナニュートリノ

$\Lambda$  : 理論のカットオフスケール

$S_4$  群が  $Z_2 (1, SU)$  に破れる

$$\langle \phi_{\text{atm}} \rangle \sim \begin{pmatrix} \frac{b+c}{2} \\ c \\ b \end{pmatrix}, \quad \langle \phi_{\text{sol}} \rangle \sim \begin{pmatrix} \frac{e+f}{2} \\ f \\ e \end{pmatrix}, \quad SU = US = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -1 & 2 & 2 \\ 2 & -1 & 2 \\ 2 & 2 & -1 \end{pmatrix}$$

$S_4$  群のかけ算則 :  $\phi(3') \bar{L}(3') = \phi_1 \bar{L}_1 + \phi_2 \bar{L}_3 + \phi_3 \bar{L}_2$

- ニュートリノの質量階層性が順階層となるminimalな模型

Y. S., K. Takagi and M. Tanimoto, JHEP 1711 (2017) 201; Phys. Lett. B778 (2018) 6.

- minimalなスキームを得るためにパラメータをさらに少なくする

$$(I) \ b + c = 0, \quad (II) \ c = 0, \quad (III) \ b = 0$$

$$M_D = vY_\nu = \begin{cases} v \begin{pmatrix} 0 & \frac{e+f}{2} \\ b & e \\ -b & f \end{pmatrix} & (I) \ b + c = 0 \\ v \begin{pmatrix} \frac{b}{2} & \frac{e+f}{2} \\ b & e \\ 0 & f \end{pmatrix} & (II) \ c = 0 \\ v \begin{pmatrix} \frac{c}{2} & \frac{e+f}{2} \\ 0 & e \\ c & f \end{pmatrix} & (III) \ b = 0 \end{cases}$$

3つの実パラメータと1つの位相 → CP位相が予言できる

- ニュートリノの質量階層性が順階層となるminimalな模型

Y. S., K. Takagi and M. Tanimoto, JHEP 1711 (2017) 201; Phys. Lett. B778 (2018) 6.

- minimalなスキームを得るためにパラメータをさらに少なくする

$$(I) \quad b + c = 0 : \quad M_D = vY_\nu = v \begin{pmatrix} 0 & \frac{e+f}{2} \\ b & e \\ -b & f \end{pmatrix}$$

ニュートリノ質量行列をTBM行列で回した行列  $\hat{M}_\nu$  :

$$\hat{M}_\nu = -\frac{f^2 v^2}{M_0} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{4}(k+1)^2 & -\frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{2}}(k^2-1) \\ 0 & -\frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{2}}(k^2-1) & 2B^2 p e^{2i\phi_B} + \frac{1}{2}(k-1)^2 \end{pmatrix}$$

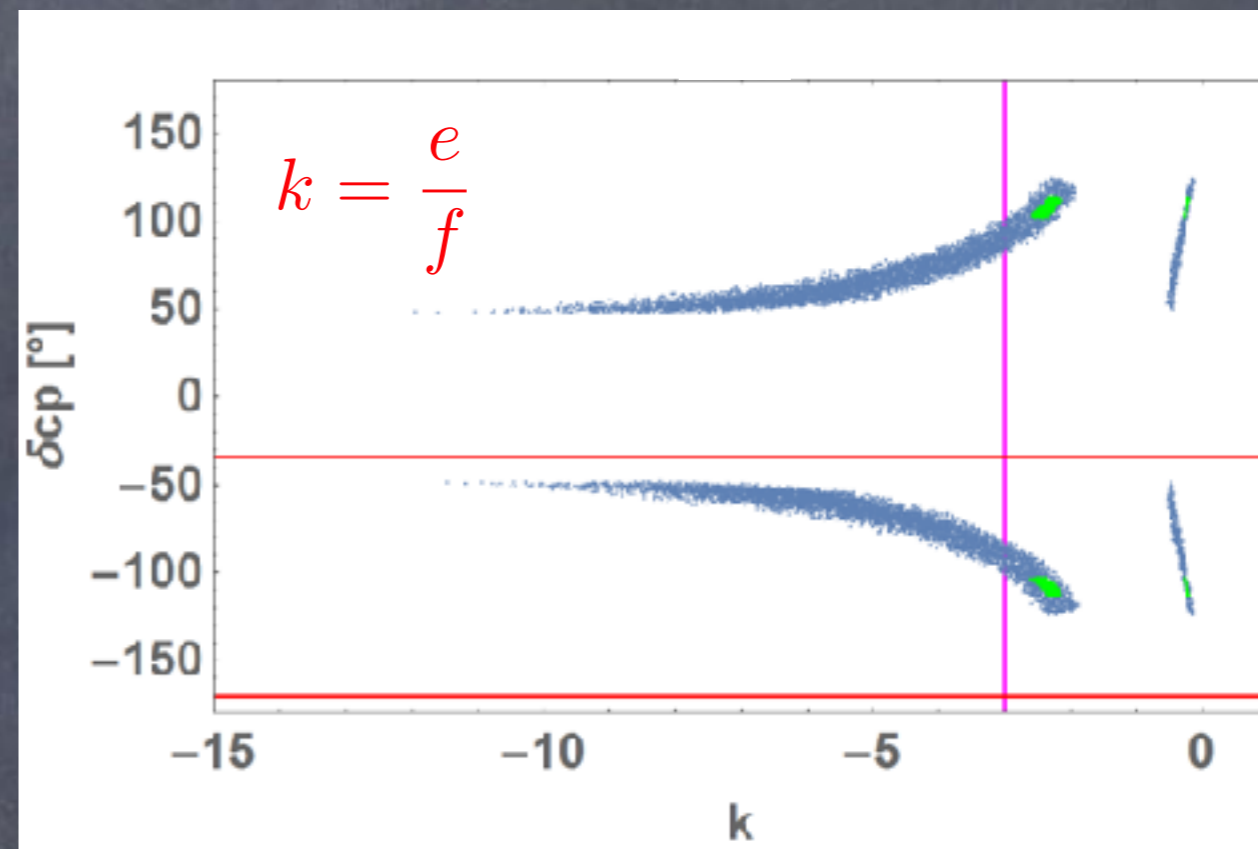
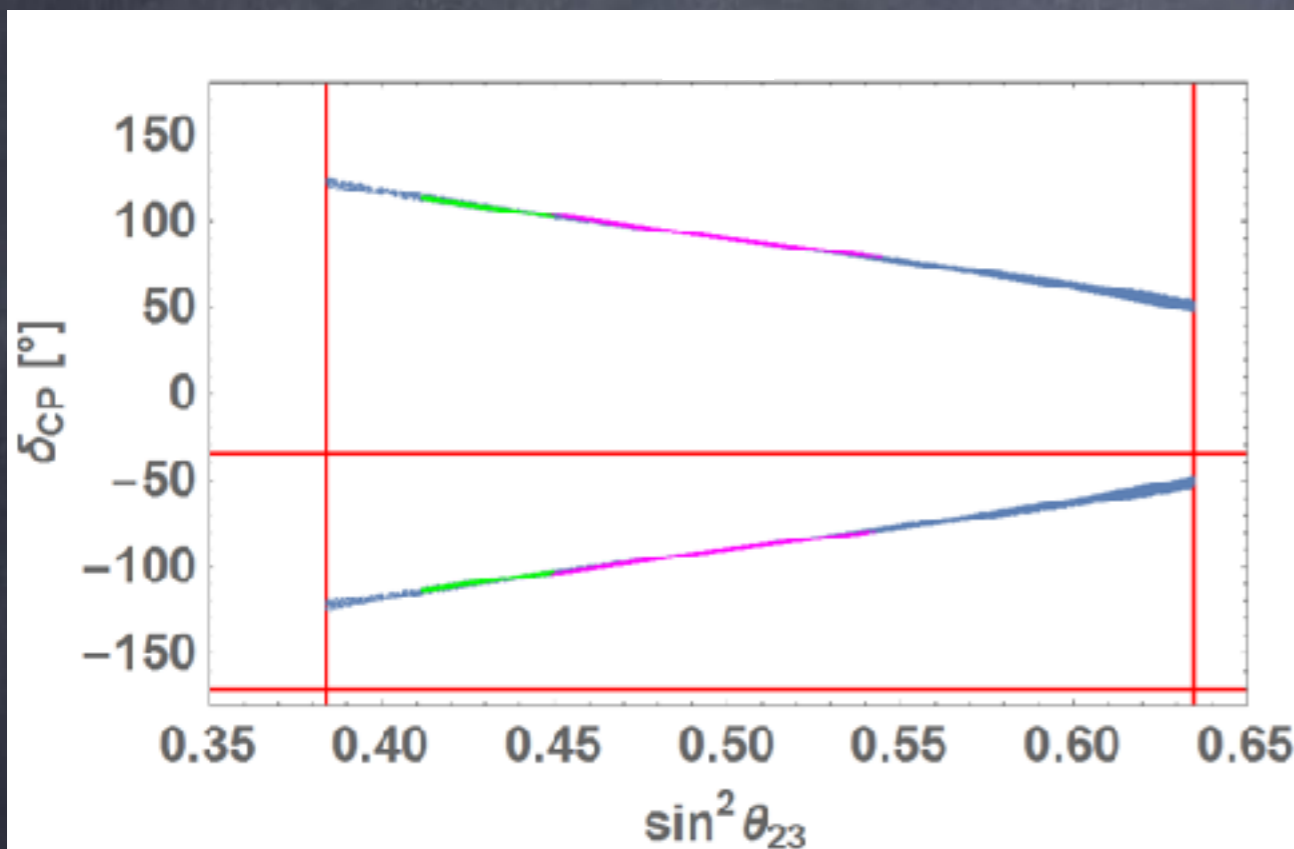
$$\frac{e}{f} = k, \quad \arg[b] = \phi_B, \quad \frac{b}{f} = B e^{i\phi_B}$$

k, Bは実パラメータ

- ニュートリノの質量階層性が順階層となるminimalな模型

Y. S., K. Takagi and M. Tanimoto, JHEP 1711 (2017) 201; Phys. Lett. B778 (2018) 6.

- 数値解析:



青色：実験の3 $\sigma$       緑色：実験の1 $\sigma$       紫色：Kingらの模型 (k=-3)

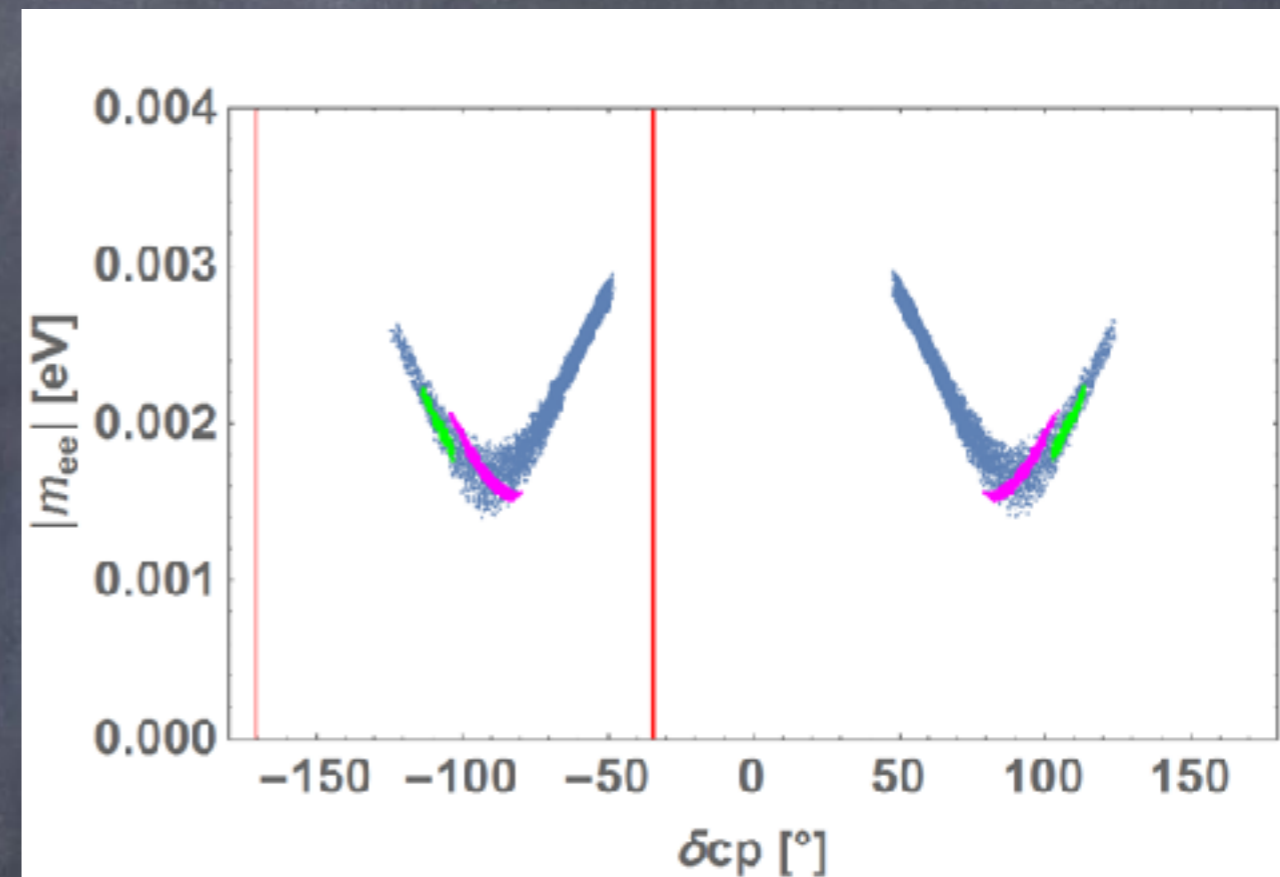
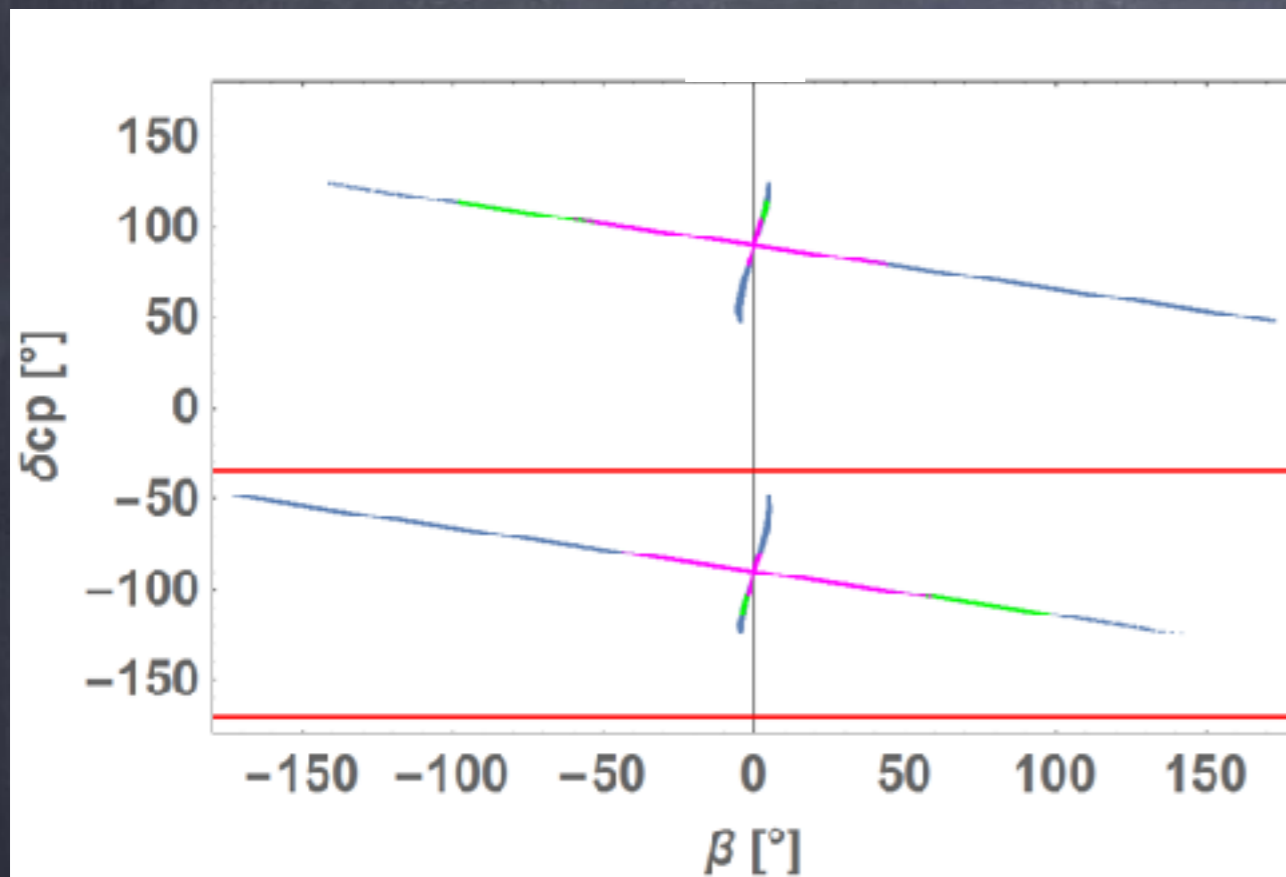
縦の赤線：実験の3 $\sigma$       横の赤線：T2K実験の2 $\sigma$

$\delta_{CP} \simeq \pm \frac{\pi}{2} \rightarrow$  符号は決まらない  $\rightarrow$  レプトジェネシス

- ニュートリノの質量階層性が順階層となるminimalな模型

Y. S., K. Takagi and M. Tanimoto, JHEP 1711 (2017) 201; Phys. Lett. B778 (2018) 6.

- 数値解析:



青色 : 実験の $3\sigma$       緑色 : 実験の $1\sigma$       紫色 : Kingらの模型 ( $k=-3$ )

赤線 : T2K実験の $2\sigma$

模型の位相パラメータは1つなのでディラック位相とマヨラナ位相に相関がある

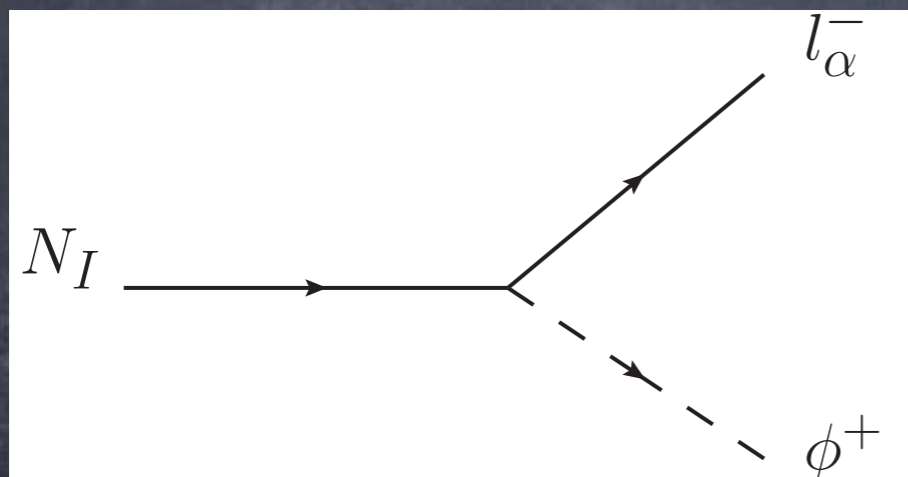


## - CPの破れとバリオン非対称性

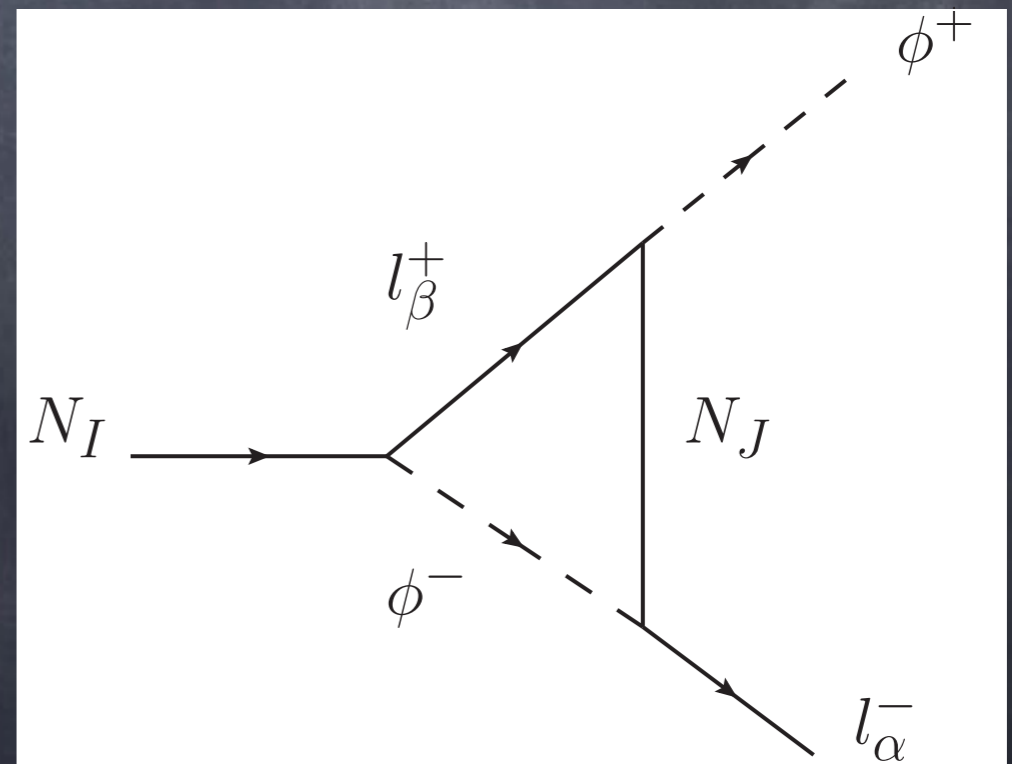
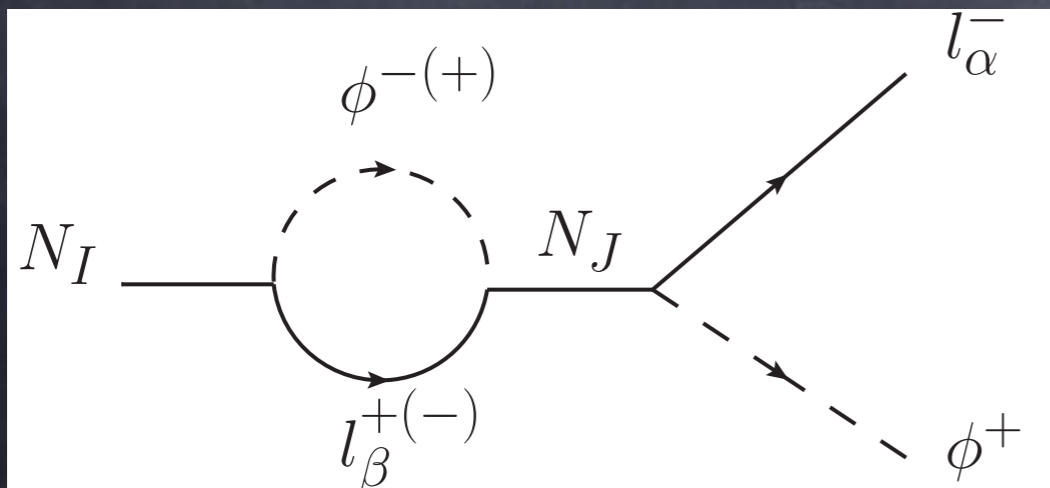
- 右巻きマヨラナニュートリノを加えたラグランジアン:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + i\bar{N}_I \gamma^\mu \partial_\mu N_I - \left( (Y_\nu)_{\alpha I} \bar{L}_\alpha \tilde{H} N_I + \frac{M_I}{2} \bar{N}_I^c N_I + h.c. \right)$$

- 右巻きマヨラナニュートリノの崩壊



$$L_\alpha = \begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ l_\alpha^- \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{H} = i\tau_2 H = \begin{pmatrix} \phi^{0*} \\ -\phi^- \end{pmatrix}$$

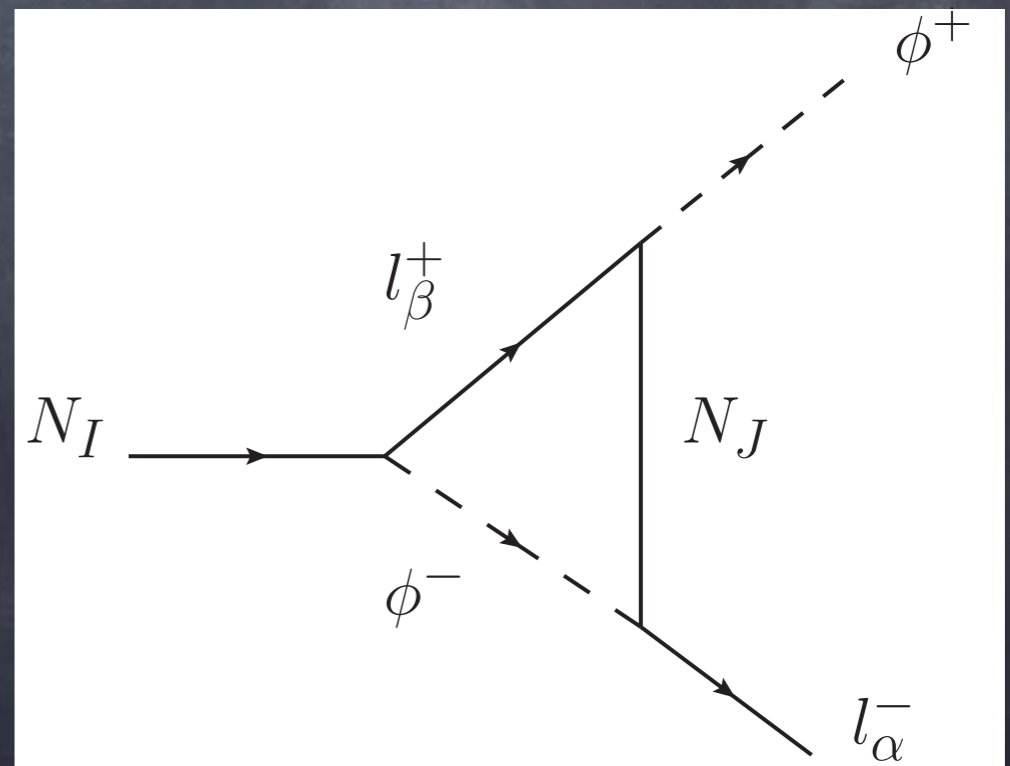
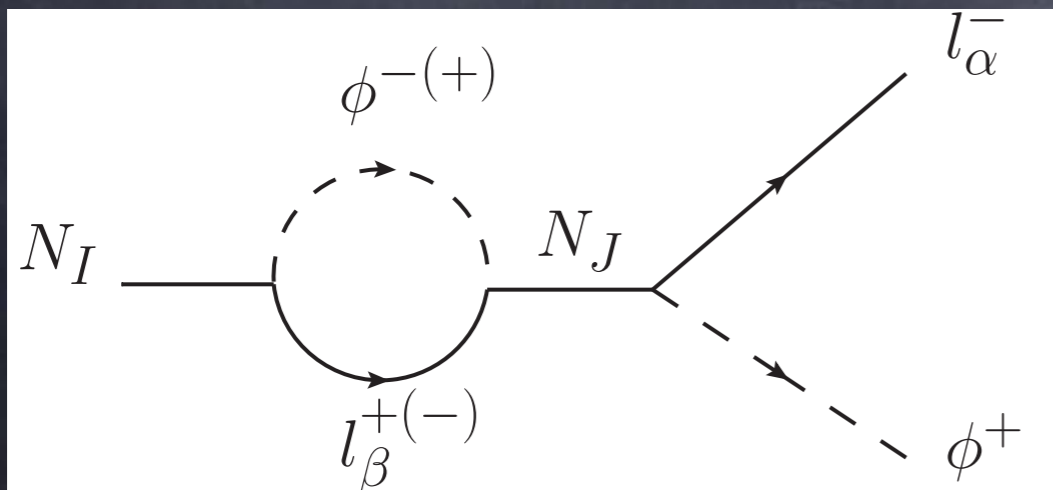
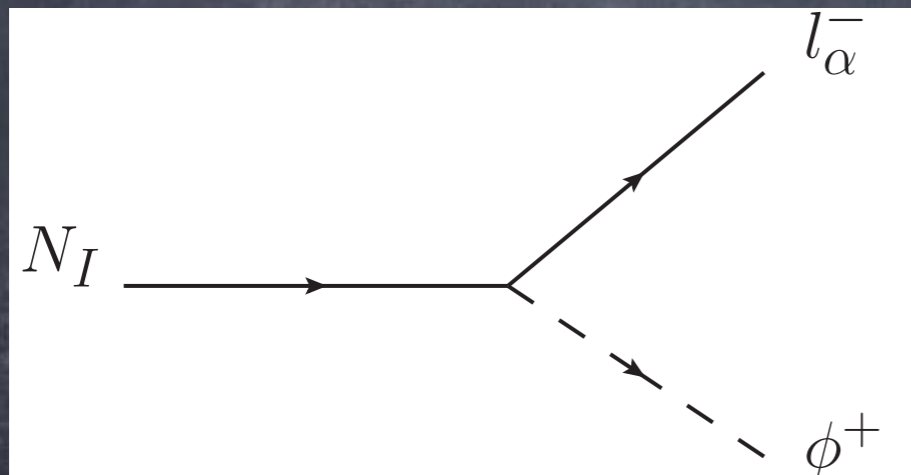


# - CPの破れとバリオン非対称性

● CP非対称性：
$$\epsilon_1 = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow HL) - \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{H}\bar{L})}{\Gamma(N_1 \rightarrow HL) + \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{H}\bar{L})}$$

$$= \frac{1}{8\pi} \sum_{i=2,3} \frac{\text{Im} [(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{i1}^2]}{(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{11}} f\left(\frac{M_i^2}{M_1^2}\right)$$

$$f(x) = \sqrt{x} \left[ \frac{x-2}{x-1} - (1+x) \ln\left(\frac{1+x}{x}\right) \right]$$



## - CPの破れとレプトジェネシス

- 宇宙のバリオン非対称:

$$\eta_B \equiv \frac{n_B}{n_\gamma} = 7.04 \times \frac{28}{79} Y_{B-L}$$

$$Y_{B-L} = -\epsilon_1 \kappa Y_{N_1}^{\text{eq}} \quad g^* = 106.75 \text{ (SM)} \quad Y_{N_1}^{\text{eq}} = \frac{135\zeta(3)}{4\pi g^*}$$

$\kappa$  : 抑制因子      G. F. Giudice, A. Notari, M. Raidal, A. Riotto and A. Strumia, Nucl. Phys. B685 (2004) 89

$$\frac{1}{\kappa} \simeq \frac{3.3 \times 10^{-3}}{\tilde{m}_1} + \left( \frac{\tilde{m}_1}{5.5 \times 10^{-4} \text{eV}} \right)^{1.16}, \quad \tilde{m}_1 = \frac{v^2}{M_1} (Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{11}$$

## - CPの破れとレプトジェネシス

- 宇宙のバリオン非対称:

$$\epsilon_1 \simeq -\frac{3}{16\pi} \frac{\text{Im}[\{(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{21}\}^2]}{(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{11}} \frac{M_1}{M_2}$$

$$\frac{\text{Im}[\{(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{21}\}^2]}{(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{11}} = \frac{1}{2} f^2 (k-1)^2 \sin 2\phi_B$$

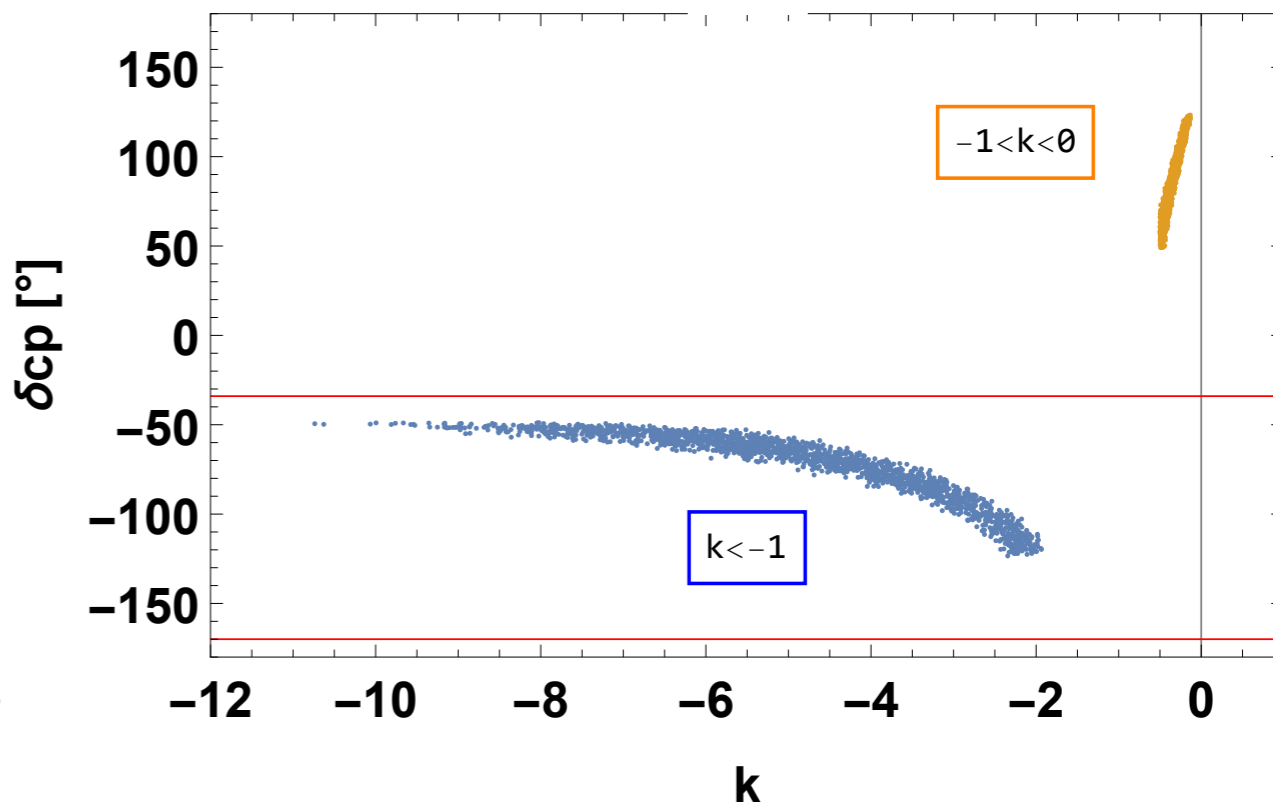
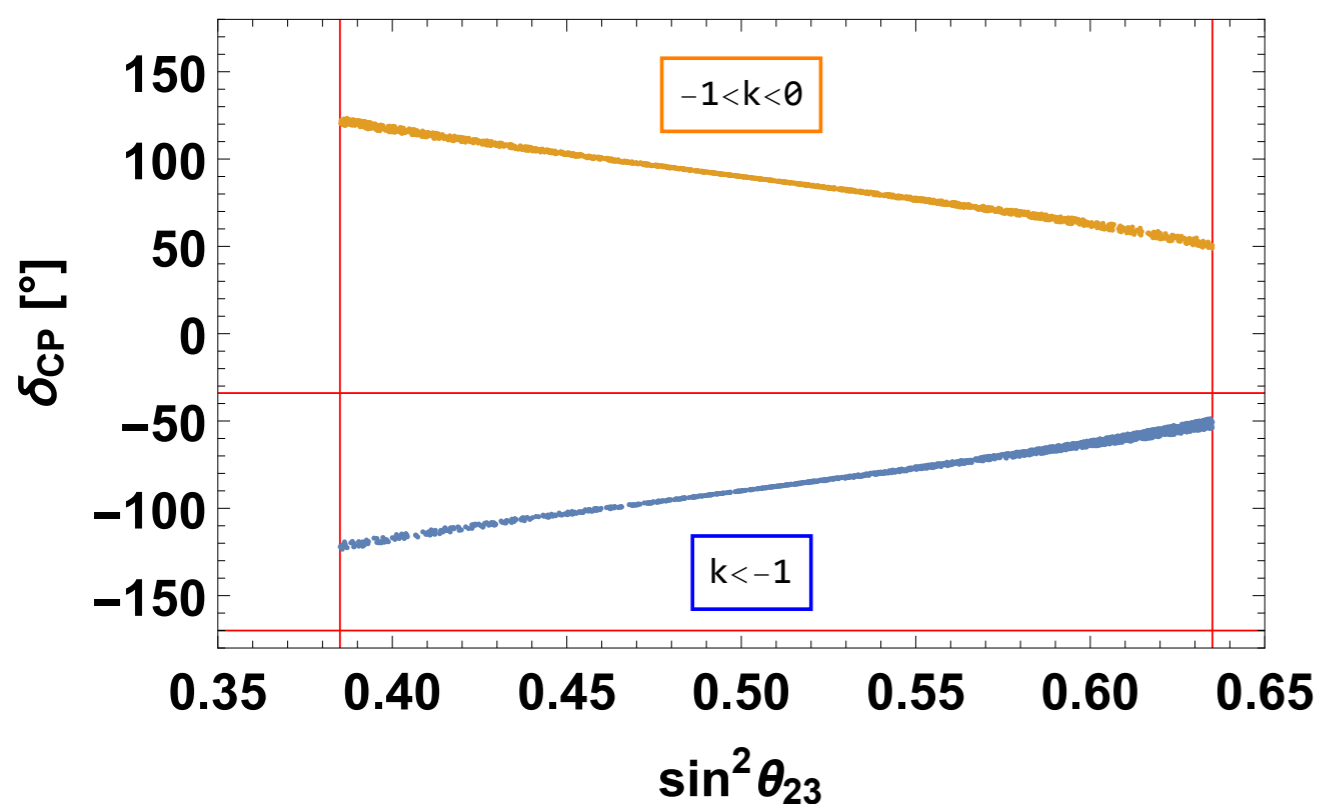
$$J_{CP} = \frac{3}{8} \frac{f^{12}}{(M_1 M_2)^3} B^6 (1-k^2)(k+1)^4 \sin 2\phi_B \frac{v^{12}}{(\Delta m_{13}^2 - \Delta m_{12}^2) \Delta m_{13}^2 \Delta m_{12}^2}$$

$$\sin \delta_{CP} = \frac{J_{CP}}{s_{23} c_{23} s_{12} c_{12} s_{13} c_{13}^2}, \quad J_{CP} = \text{Im} [U_{e1} U_{\mu 2} U_{\mu 2}^* U_{\mu 1}^*]$$

ニュートリノの質量階層性が順階層となる模型

Y. S., K. Takagi and M. Tanimoto, JHEP 1711 (2017) 201; Phys. Lett. B778 (2018) 6.

- バリオン非対称を考慮した数値解析:  $\eta_B = (5.8 - 6.6) \times 10^{-10}$  (95% C.L.)



青色:  $k < -1$       オレンジ色:  $-1 < k < 0$

縦の赤線: 実験の  $3\sigma$       横の赤線: T2K実験の  $2\sigma$

$k < -1$  のとき  $\delta_{CP} \sim -\frac{\pi}{2} \rightarrow$  符号が決まった

## - Short Summary

- ニュートリノの質量が順階層性でminimalなシーソーモデルを構築した

- 2つの右巻きマヨラナニュートリノ

- $S_4$  対称性

$$M_D = vY_\nu = v \begin{pmatrix} 0 & \frac{e+f}{2} \\ b & e \\ -b & f \end{pmatrix}$$

- 3つの実パラメータと1つの位相によりCP位相が予言できる

- レプトジェネシスを考えることにより宇宙のバリオン非対称によってレプトンのPMNS行列のCP位相の符号が決まる

### 3. GUT模型におけるCPの破れ

- クォークセクターとレプトンセクターのCPの破れの関係
  - 位相を一つにした簡単な模型

$$M_d = \begin{pmatrix} 0 & A_d & 0 \\ A'_d & B_d e^{-i\phi} & C_d \\ 0 & C'_d & D_d \end{pmatrix},$$

$$M_u = \begin{pmatrix} 0 & A_u & 0 \\ A'_u & B_u & C_u \\ 0 & C'_u & D_u \end{pmatrix}$$

$m_t \gg m_c$  なので  $C_u \sim C'_u$  を無視する

• 位相を一つにした簡単な模型

$$V_d M_d M_d^\dagger V_d^\dagger = \text{diag}(m_d^2, m_s^2, m_b^2),$$

$$V_u M_u M_u^\dagger V_u^\dagger = \text{diag}(m_u^2, m_c^2, m_t^2)$$

$$V_d^\dagger \simeq \begin{pmatrix} 1 & \frac{A_d}{B_d} e^{i\phi} & 0 \\ -\frac{A_d}{B_d} e^{-i\phi} & 1 & \frac{C_d}{D_d} \\ \frac{A_d}{D_d} e^{-i\phi} & -\frac{C_d}{D_d} & 1 \end{pmatrix}, \quad V_u \simeq \begin{pmatrix} 1 & -\frac{A_u}{B_u} & 0 \\ \frac{A_u}{B_u} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

クォークセクターのCKM行列：

$$V_{\text{CKM}} \equiv V_u V_d^\dagger \simeq \begin{pmatrix} 1 & \frac{A_d}{B_d} & \frac{D_u}{B_u} \frac{C_d}{D_d} e^{-i(\phi - \pi)} \\ -\frac{A_d}{B_d} & 1 & \frac{C_d}{D_d} \\ \frac{A_d}{D_d} & -\frac{C_d}{D_d} & 1 \end{pmatrix}$$

クォークのディラックCP位相： $\delta_{CP}^{\text{CKM}} = \phi - \pi$



- 位相を一つにした簡単な模型

Pati-Salam GUT :  $SU(4) \rightarrow$  レプトンは4番目のカラー

$$M_E = M_d \text{ (各成分のCG係数の自由度はある)}$$

$$V_E M_E M_E^\dagger V_E^\dagger = \text{diag}(m_e^2, m_\mu^2, m_\tau^2)$$

$$V_E = (V_d^\dagger)^\dagger \simeq \begin{pmatrix} 1 & -\frac{A_d}{B_d} e^{i\phi} & \frac{A_d}{D_d} e^{i\phi} \\ \frac{A_d}{B_d} e^{-i\phi} & 1 & -\frac{C_d}{D_d} \\ 0 & \frac{C_d}{D_d} & 1 \end{pmatrix}$$

ニュートリノの混合行列はTBMを仮定：

$$V_\nu^\dagger = \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

- 位相を一つにした簡単な模型

レプトンセクターのPMNS行列：

$$U_{\text{PMNS}} \equiv V_E V_\nu^\dagger \simeq \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{A_d}{\sqrt{2}D_d} e^{i(\phi - \pi)} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

レプトンのディラックCP位相： $\delta_{CP}^{\text{MNS}} = -(\phi - \pi) = -\delta_{CP}^{\text{CKM}}$

$$|U_{e3}| \simeq \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{A_d}{D_d} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{m_d}{m_s}} = \frac{\lambda_C}{\sqrt{2}}$$

- Kingらの具体的な模型

F. J. de Anda, S. F. King and E. Perdomo, JHEP 1712 (2017) 075.

## $SO(10) \times S_4$ GUT模型

$$\begin{aligned}
 M^e/v_d &= y_{12}^e e^{i\eta/2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} + y_2^e \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} + y_3^e e^{i\eta'} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + y^P e^{i\gamma} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 M^d/v_d &= y_{12}^d e^{i\eta/2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} + y_2^d \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} + y_3^d e^{i\eta'} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + y^P e^{i\gamma} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 M^u/v_u &= y_1^u e^{i\eta} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + y_2^u \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} + y_3^u e^{i\eta'} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\
 M_D^\nu/v_u &= y_1^\nu e^{i\eta} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + y_2^\nu \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} + y_3^\nu e^{i\eta'} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\
 M^R &= M_1^R e^{i\eta} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + M_2^R \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} + M_3^R e^{i\eta'} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

$\eta \simeq 4\eta' - 2\gamma$

レプトンのディラックCP位相の予言： $\delta_{CP} = 200.3^\circ$

## 4. まとめ

- ニュートリノ振動実験でのディラックCP位相は宇宙のバリオン非対称性に直接関係する可能性がある



Minimalなシーソー模型で実現できる

- レプトンのディラックCP位相はGUTを考えるとクォークのCP位相と関係する



クォークとレプトンの $\delta_{CP}$ の符号が逆転することは容易に理解できる

- レプトンの $\delta_{CP}$ の精密な測定は素粒子標準模型を超える物理の方向性を決める