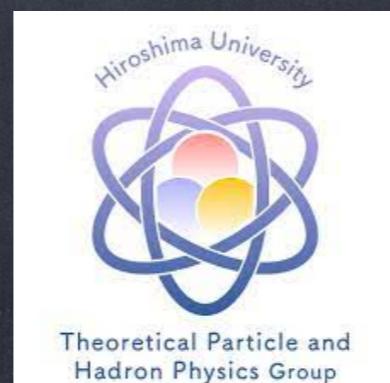


ニュートリノ/レプトンセクター（理論）

清水勇介（広島大学）

2022年11月9日

Flavor Physics Workshop@ニュー八景園（静岡県伊豆の国市）



概要

1. 導入

- クオークの世代混合
- ニュートリノ振動

2. ニュートリノが質量を獲得する機構

- Weinberg operator
- シーソー機構

3. レプトンセクターの世代混合

- CPの破れ
- ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊

4. CPの破れと宇宙のバリオン非対称

5. まとめ

1. 導入

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

	第一世代	第二世代	第三世代
クオーケン	 アップ ダウン	 チャーム ストレンジ	 トップ ボトム
レプトン	ν_e 電子ニュートリノ e 電子	ν_μ ミューニュートリノ μ ミュー粒子	ν_τ タウニュートリノ τ タウ粒子

- 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オーケンで大きく異なっている

- 素粒子の質量と世代混合

◎ 自発的対称性の破れとヒッグス機構

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} \supset i\bar{\psi}_i \partial^\mu \psi_i + y_{ij} \bar{\psi}_i \psi_j h$$

運動項

湯川相互作用 (y_{ij} : 湯川結合定数)



自発的対称性の破れ

$$h \rightarrow v + \delta h$$

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} \supset i\bar{\psi}_i \partial^\mu \psi_i + y_{ij} v \bar{\psi}_i \psi_j$$

運動項

質量項

◎ フェルミオンの質量

$$m_f = y_{ij} v \quad \cdots \text{しかしながら、質量固有状態ではない}$$

ゲージ固有状態から質量固有状態に移る必要がある



- クオークの世代混合
- 左巻きクオークの荷電力レント相互作用 (初日の山田さんの講義)

$$u_i = (U_u)_{ik} u_k^m, \quad d_i = (U_d)_{ik} d_k^m$$

u_i, d_i : ゲージ固有状態 u_i^m, d_i^m : 質量固有状態

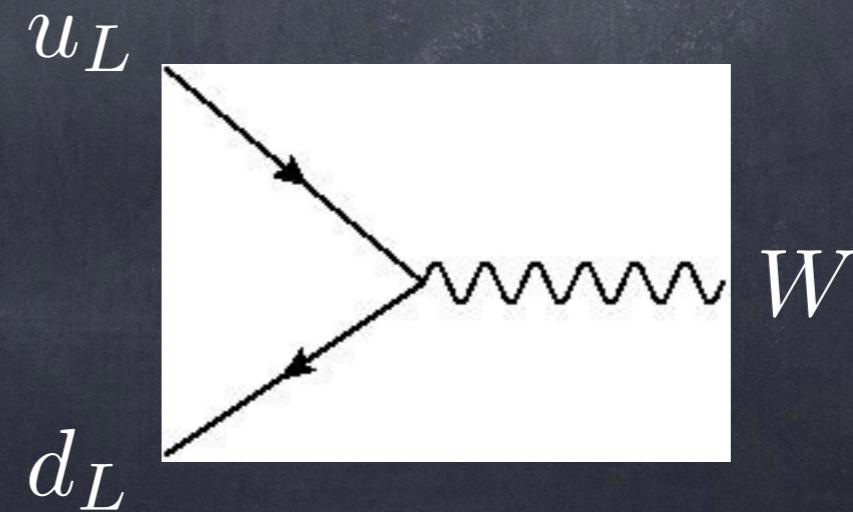
W_μ : ウィークボソン g : ゲージ結合定数

$$\mathcal{L}_{CC} = \frac{g}{\sqrt{2}} W_\mu^+ (\bar{u}_L, \bar{c}_L, \bar{t}_L) \gamma^\mu \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} + h.c.$$

$$= \frac{g}{\sqrt{2}} W_\mu^+ (\bar{u}_L^m, \bar{c}_L^m, \bar{t}_L^m) \gamma^\mu \color{red}{U_u^\dagger U_d} \begin{pmatrix} d_L^m \\ s_L^m \\ b_L^m \end{pmatrix} + h.c.$$

- CKM行列

$$V_{\text{CKM}} \equiv \color{red}{U_u^\dagger U_d}$$



- 左巻きクォークの中性カレント相互作用（右巻きクォークも）

$$u_i = (U_u)_{ik} u_k^m, \quad d_i = (U_d)_{ik} d_k^m$$

u_i, d_i : ゲージ固有状態 u_i^m, d_i^m : 質量固有状態

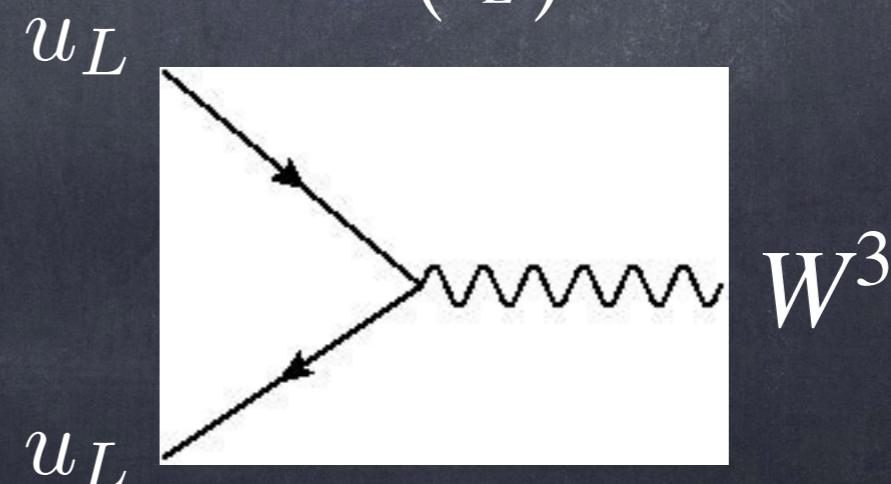
Z_μ : ウィークボソン g : ゲージ結合定数

$$\mathcal{L}_{NC} \supset \frac{g}{\sqrt{2}} W_\mu^3 (\bar{u}_L, \bar{c}_L, \bar{t}_L) \gamma^\mu \begin{pmatrix} u_L \\ c_L \\ t_L \end{pmatrix}$$

$$= \frac{g}{\sqrt{2}} W_\mu^3 (\bar{u}_L^m, \bar{c}_L^m, \bar{t}_L^m) \gamma^\mu U_L^\dagger U_L \begin{pmatrix} u_L^m \\ c_L^m \\ t_L^m \end{pmatrix}$$

- ユニタリー行列

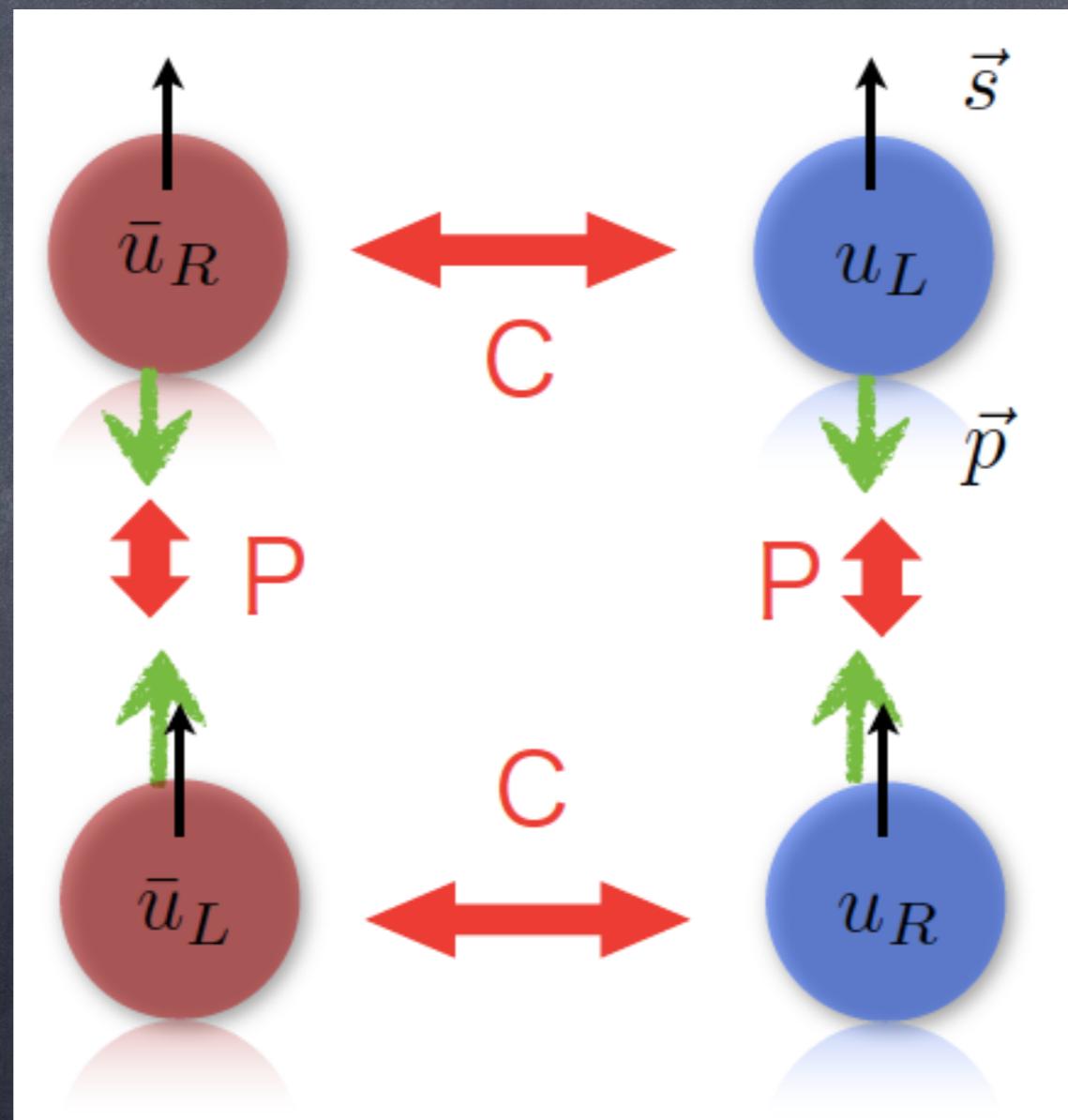
$$U_L^\dagger U_L = 1$$



- CP対称性 (2日目の佐藤さんの講義)

- CP変換 :

$$\psi_L \xrightarrow{C} (i\gamma^2 \psi^*)_R \xrightarrow{P} (\gamma^0 i\gamma^2 \psi^*)_L$$

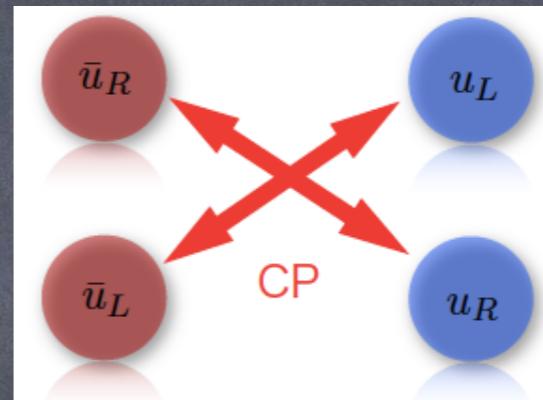


Yuichiro Kiyo @B workshop 2011

④ CP対称性

- CP変換 :

$$\psi_L \xrightarrow{C} (i\gamma^2 \psi^*)_R \xrightarrow{P} (\gamma^0 i\gamma^2 \psi^*)_L$$



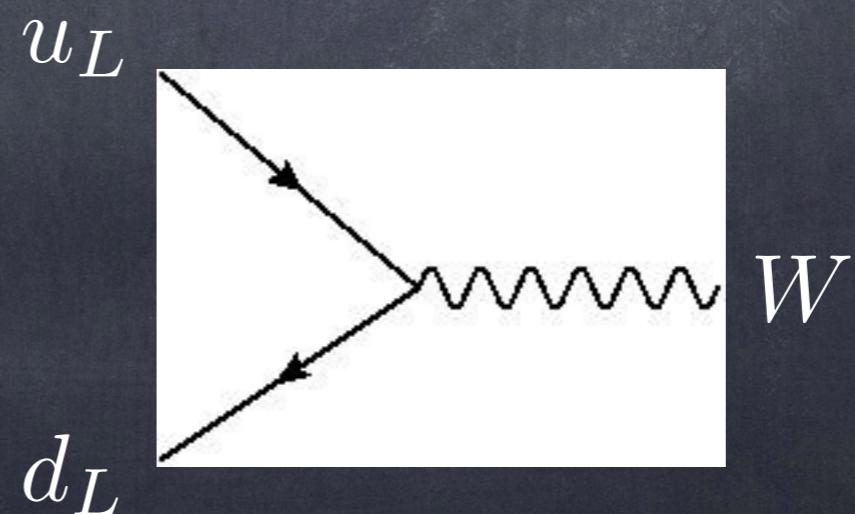
Yuichiro Kiyo @B workshop 2011

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{CC} &= \frac{g}{\sqrt{2}} V_{ij} W_\mu^+ \bar{u}_{Li}^m \gamma^\mu d_{Lj}^m + \frac{g}{\sqrt{2}} V_{ij}^* W_\mu^- \bar{d}_{Lj}^m \gamma^\mu u_{Li}^m \\ &\xrightarrow{CP} \frac{g}{\sqrt{2}} V_{ij} W_\mu^- \bar{d}_{Lj}^m \gamma^\mu u_{Li}^m + \frac{g}{\sqrt{2}} V_{ij}^* W_\mu^+ \bar{u}_{Li}^m \gamma^\mu d_{Lj}^m \end{aligned}$$

⑤ CP対称性が破れる条件

CKM行列 V_{ij} が複素数

\downarrow
 \cancel{CP}



- CKM行列のパラメータ (N世代の場合)

$$V_{ij} = \begin{pmatrix} V_{ud} & \cdots & V_{uj} \\ \vdots & & \vdots \\ V_{id} & \cdots & V_{ij} \end{pmatrix}$$

- $N \times N$ 複素行列の実パラメータの数 : $N^2 \times 2$

- ユニタリー条件 : $\sum_k V_{ik}^* V_{jk} = \delta_{ij} \rightarrow N^2$

- 対角要素 ($i = j$) : N

- 非対角要素 ($i \neq j$) : $N(N - 1)$

- クオーク場の再定義により取り除く事が出来るパラメータの数 :

$$2N - 1$$

- 物理的なパラメータの数 :

$$2N^2 - N^2 - (2N - 1) = (N - 1)^2$$

◦ 混合角と位相パラメータ

- 混合角の数 (θ_{ij}) : ${}_N C_2 = \frac{1}{2} N(N - 1)$

- 位相パラメータの数 :

$$(N - 1)^2 - {}_N C_2 = \frac{1}{2}(N - 1)(N - 2)$$



◦ CP対称性が破れるには少なくとも3世代必要

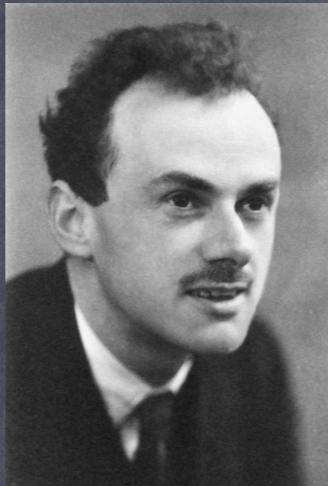
- 小林・益川理論

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

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

ニュートリノの謎

- ・ ニュートリノ振動現象により、ニュートリノには小さい
が質量があり大きな世代混合があることが分かった
- ・ ニュートリノはディラック粒子かマヨラナ粒子をまだ
分かっていない



- ・ ニュートリの質量階層性と質量の大きさがまだ分かっていない

本講演

マヨラナ質量項がレプトン数の破れの原因？
ニュートリノが質量を獲得する機構（理論）を理解する

- ニュートリノ振動とレプトンの世代混合

- ニュートリノのフレーバー、質量固有状態と時間発展

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha j} |\nu_j\rangle, \quad |\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha j} |\nu_j\rangle e^{-iE_j t}$$

- 2世代の場合を考える (世代混合角 θ)

$$|\nu_e(t)\rangle = \cos \theta |\nu_1\rangle e^{-iE_1 t} + \sin \theta |\nu_2\rangle e^{-iE_2 t}$$

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle e^{-iE_1 t} + \cos \theta |\nu_2\rangle e^{-iE_2 t}$$

- $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ の遷移確率

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu; t) = |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{E_2 - E_1}{2} t$$

$$\simeq \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2 L}{4E}, \quad \Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$$

$$E_j = \sqrt{p^2 + m_j^2} \simeq p + \frac{m_j^2}{2E}$$



- ニュートリノの質量二乗差

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

- 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) $\rightarrow m_3 < m_1 < m_2$

- 準縮退型 (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

2. ニュートリノが質量を獲得する機構

- Weinberg operator : PDG参照

$$\mathcal{O}_5 = \frac{Z_{ij}^\nu}{\Lambda_{NP}} (\bar{L}_{Li} \phi) (\phi^T L_{Lj}^C) + \text{h.c.} .$$

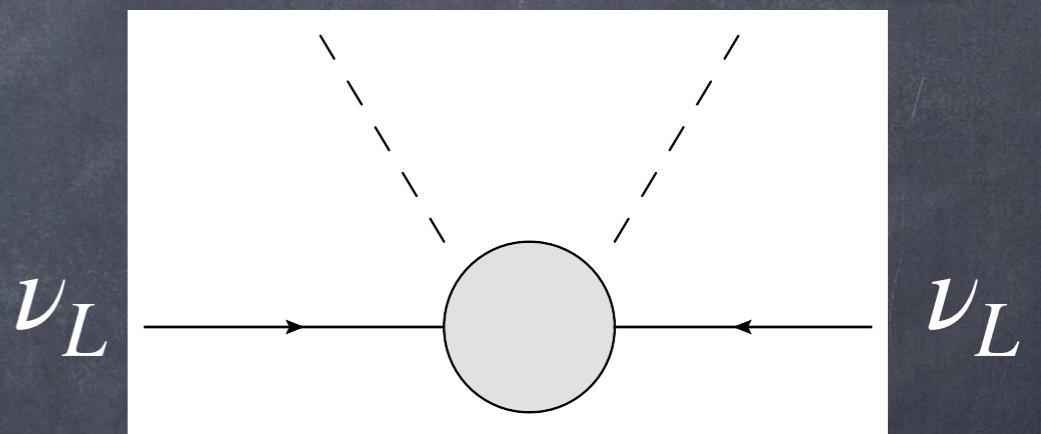
$$-\mathcal{L}_{M_\nu} = \frac{Z_{ij}^\nu}{2} \frac{v^2}{\Lambda_{NP}} \bar{\nu}_{Li} \nu_{Lj}^c + \text{h.c.} .$$

自発的対称性の破れ : $\langle \phi \rangle = v$

$\langle \phi \rangle$ $\langle \phi \rangle$

- 左巻きマヨラナニュートリノの質量

$$(M_\nu)_{ij} = Z_{ij}^\nu \frac{v^2}{\Lambda_{NP}}$$



$\downarrow Z \sim \mathcal{O}(1), v = 246/\sqrt{2} \text{ GeV}, M_\nu \sim 0.1 \text{ eV}$

$$\Lambda_{NP} \sim 10^{14} \text{ GeV}$$

- シーソー機構 (type-I : ゲージ1重項)

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

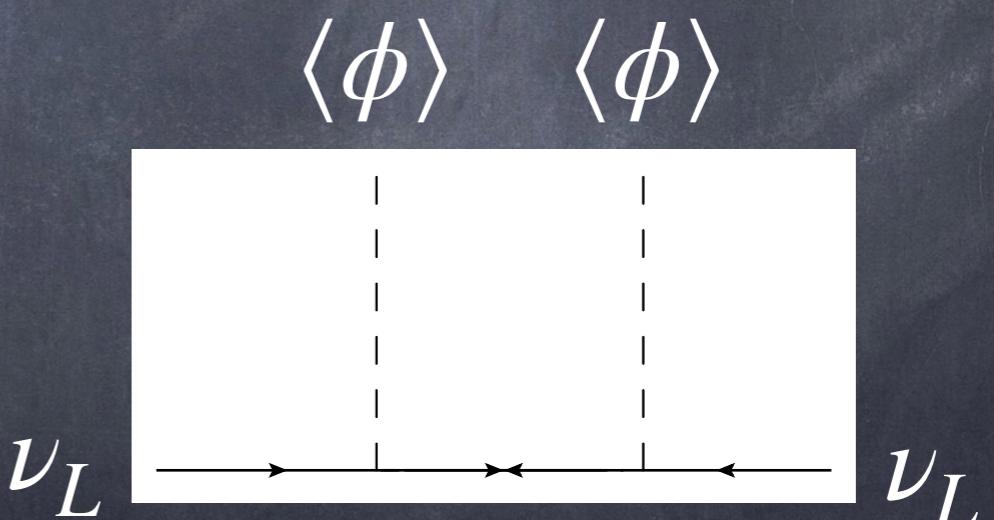
- 右巻きマヨラナニュートリノを3世代導入する : ν_{RI} , $I = 1, 2, 3$

$$\mathcal{L}_{\nu_R} = \mathcal{L}_{SM} + i\bar{\nu}_{RI}\gamma^\mu\partial_\mu\nu_{RI} - \left(F_{\alpha I}\bar{L}_\alpha\tilde{\phi}\nu_{RI} + \frac{M_I}{2}\bar{\nu}_{RI}^c\nu_{RI} + h.c. \right)$$

$$\downarrow \quad \langle\tilde{\phi}\rangle = \begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix} \quad [M_N]_{IJ} = M_I\delta_{IJ}, \quad [M_D]_{\alpha I} = F_{\alpha I}\langle\tilde{\phi}\rangle$$

$$\hat{M}_{6 \times 6} = \begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D^T & M_N \end{pmatrix}$$

簡単のため1世代で考えてみる



- シーソー機構 (type-I : ゲージ1重項)

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

簡単のため1世代で考えてみる

$$M = \begin{pmatrix} 0 & A \\ A & B \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{対角化}} \det(M - \lambda \mathbf{1}) = 0$$

$$\lambda^2 - B\lambda - A^2 = 0$$

$$\lambda = \frac{1}{2} \left[B \pm B \left(1 + \frac{4A^2}{B^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$\lambda_+ \sim B, \lambda_- \sim -\frac{A^2}{B} \quad (B \gg A)$$

- シーソー機構 (type-I : ゲージ1重項)

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

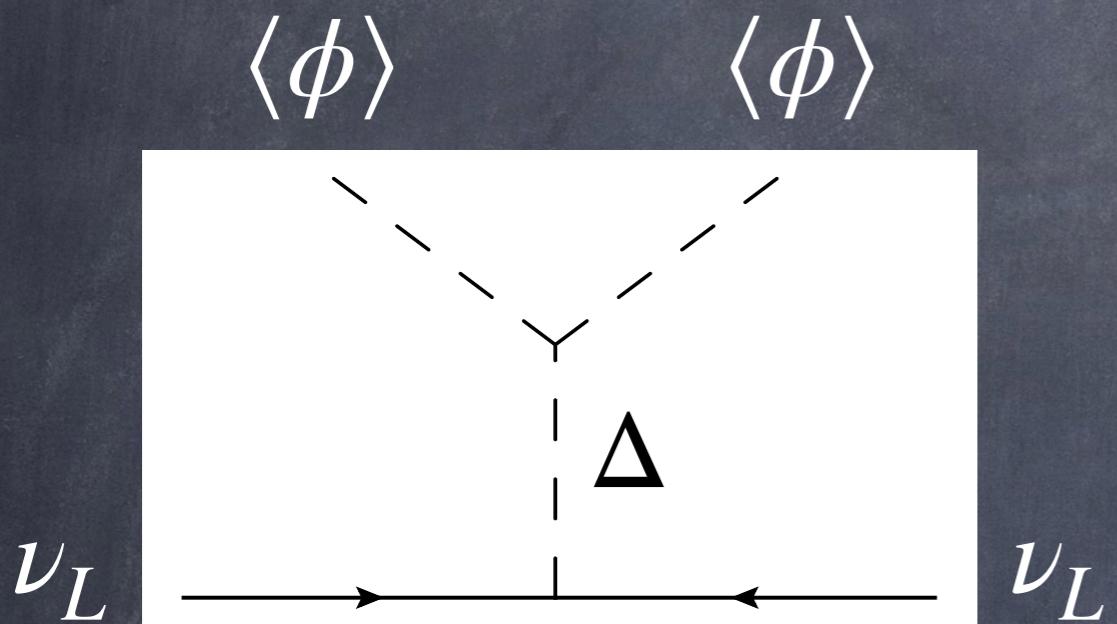
$$M = \begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D^T & M_N \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{対角化}} M_\nu \simeq -M_D^T M_N^{-1} M_D$$

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



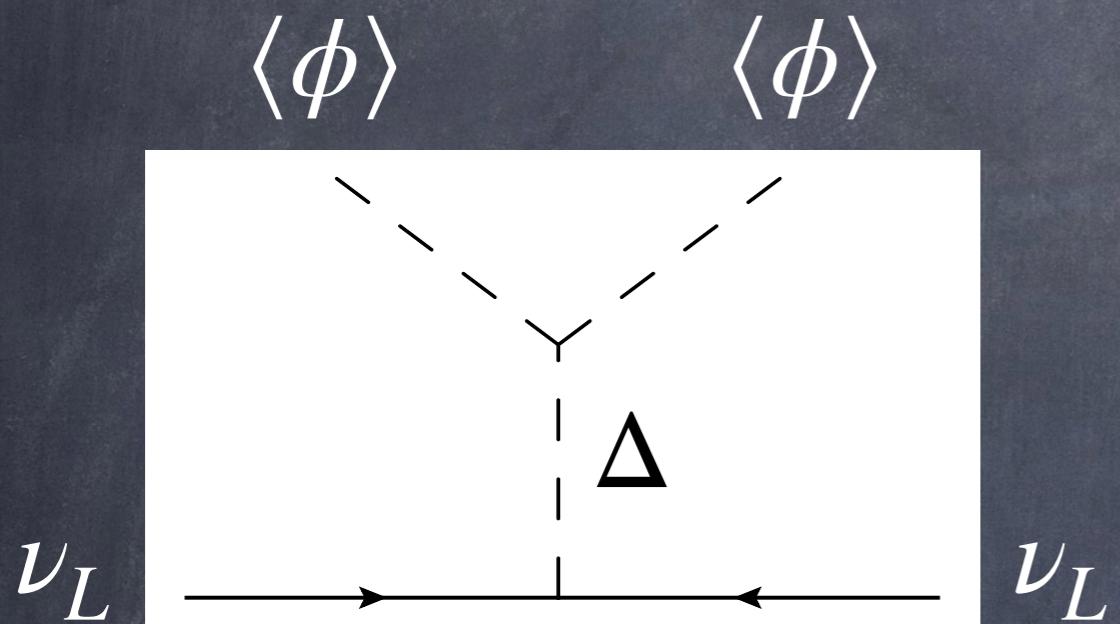
- シーソー機構：ちょっと寄り道 (type-II : ゲージ3重項ボソン)

Mohapatra, Senjanovic '81, Schechter, Valle '80



- シーソー機構：ちょっと寄り道 (type-II : ゲージ3重項ボソン)

Mohapatra, Senjanovic '81, Schechter, Valle '80

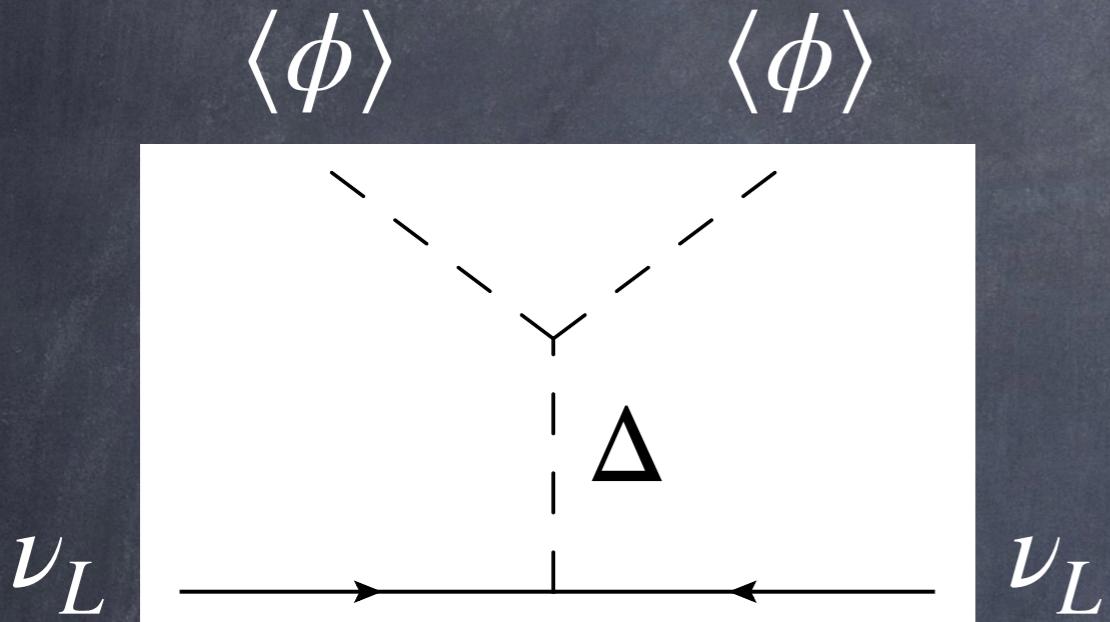


$$\mathcal{L}_\nu = h_{ij} \overline{L}_L^i i\tau_2 \Delta L_L^j + h.c.$$

$$M_\nu^{ij} = h_{ij} \frac{\nu_\Delta}{\sqrt{2}}$$

- シーソー機構：ちょっと寄り道 (type-II : ゲージ3重項ボソン)

Mohapatra, Senjanovic '81, Schechter, Valle '80



$$\mathcal{L}_\nu = h_{ij} \overline{L}_L^i i\tau_2 \Delta L_L^j + h.c.$$

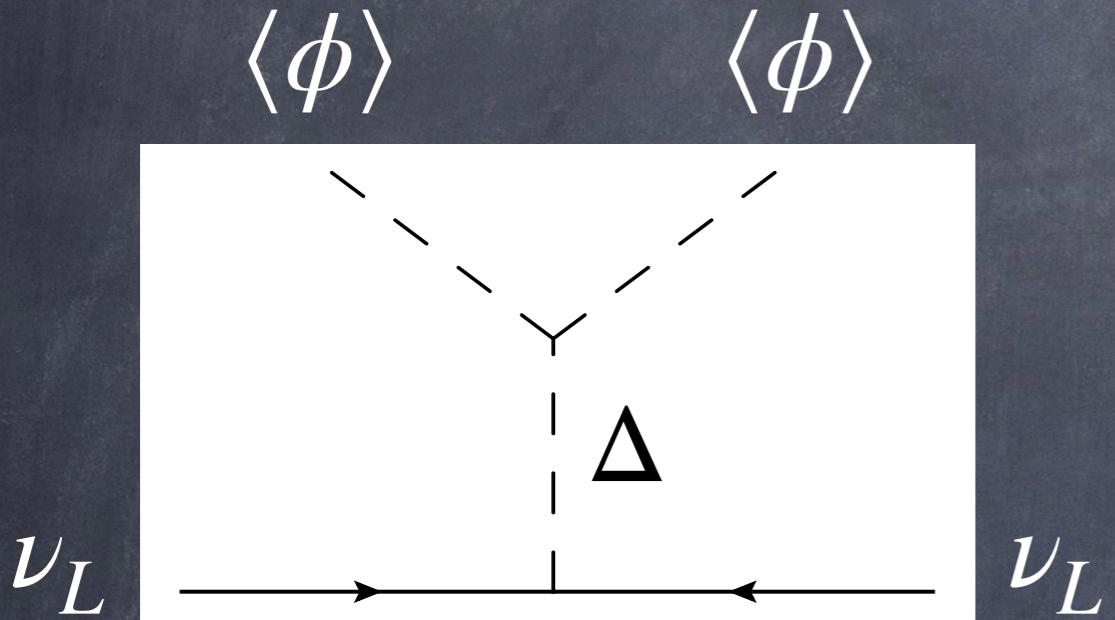
$$M_\nu^{ij} = h_{ij} \frac{\nu_\Delta}{\sqrt{2}}$$

ヒッグスボテンシャル：

$$\begin{aligned}
 V_H = & -m^2 \phi^\dagger \phi + M_\Delta^2 Tr(\Delta^\dagger \Delta) \\
 & + [\mu \phi^T i\tau_2 \Delta^\dagger \phi + h.c.] \\
 & + \lambda_1 (\phi^\dagger \phi)^2 + \lambda_2 Tr(\Delta^\dagger \Delta)^2 \\
 & + \lambda_4 (\phi^\dagger \phi) Tr(\Delta^\dagger \Delta) + \lambda_5 \phi^\dagger \Delta \Delta^\dagger \phi
 \end{aligned}$$

・ シーソー機構：ちょっと寄り道 (type-II : ゲージ3重項ボソン)

Mohapatra, Senjanovic '81, Schechter, Valle '80



$$\mathcal{L}_\nu = h_{ij} \overline{L}_L^i i\tau_2 \Delta L_L^j + h.c.$$

$$M_\nu^{ij} = h_{ij} \frac{v_\Delta}{\sqrt{2}}$$

ヒッグスボテンシャル：

$$\begin{aligned} V_H = & -m^2 \phi^\dagger \phi + M_\Delta^2 Tr(\Delta^\dagger \Delta) \\ & + [\mu \phi^T i\tau_2 \Delta^\dagger \phi + h.c.] \\ & + \lambda_1 (\phi^\dagger \phi)^2 + \lambda_2 Tr(\Delta^\dagger \Delta)^2 \\ & + \lambda_4 (\phi^\dagger \phi) Tr(\Delta^\dagger \Delta) + \lambda_5 \phi^\dagger \Delta \Delta^\dagger \phi \end{aligned}$$

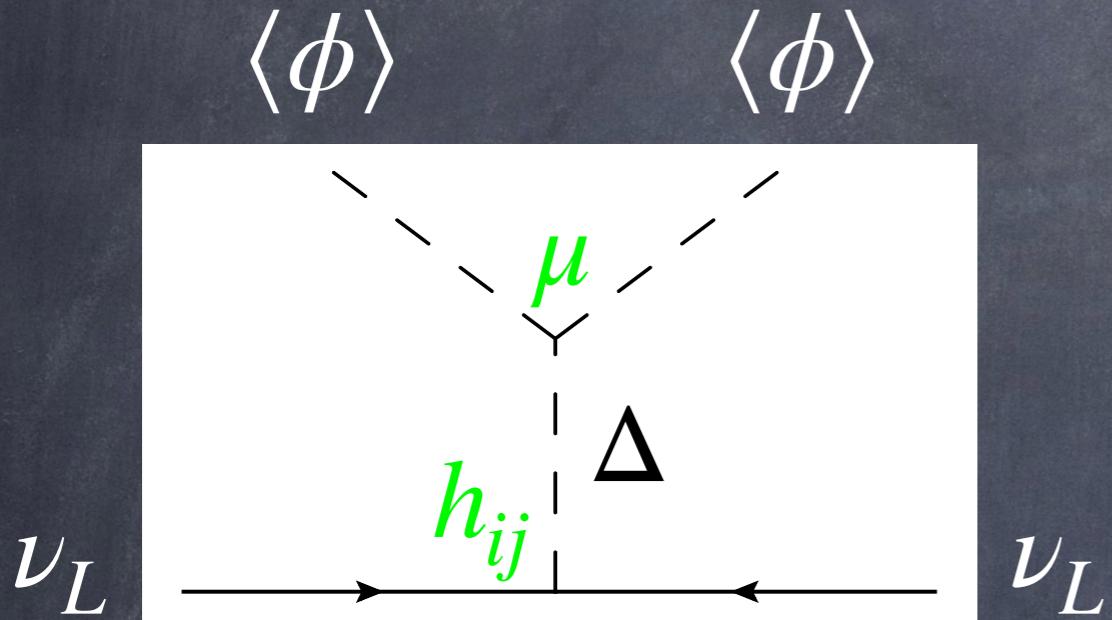
真空期待値：

$$\left. \frac{\partial V_H}{\partial \Delta} \right|_{\langle \phi \rangle = \frac{v}{\sqrt{2}}, \langle \Delta \rangle = \frac{v_\Delta}{\sqrt{2}}} = 0$$

$$\frac{v_\Delta}{\sqrt{2}} \simeq \frac{\mu v^2}{2M_\Delta^2 + (\lambda_4 + \lambda_5)v^2}$$

・ シーソー機構：ちょっと寄り道 (type-II : ゲージ3重項ボソン)

Mohapatra, Senjanovic '81, Schechter, Valle '80



$$\mathcal{L}_\nu = h_{ij} \overline{L}_L^i i\tau_2 \Delta L_L^j + h.c.$$

$$M_\nu^{ij} = h_{ij} \frac{v_\Delta}{\sqrt{2}} \simeq \frac{h_{ij} \mu v^2}{2 M_\Delta^2}$$

ヒッグスボテンシャル：

$$\begin{aligned} V_H = & -m^2 \phi^\dagger \phi + M_\Delta^2 \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta) \\ & + [\mu \phi^T i\tau_2 \Delta^\dagger \phi + h.c.] \\ & + \lambda_1 (\phi^\dagger \phi)^2 + \lambda_2 \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta)^2 \\ & + \lambda_4 (\phi^\dagger \phi) \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta) + \lambda_5 \phi^\dagger \Delta \Delta^\dagger \phi \end{aligned}$$

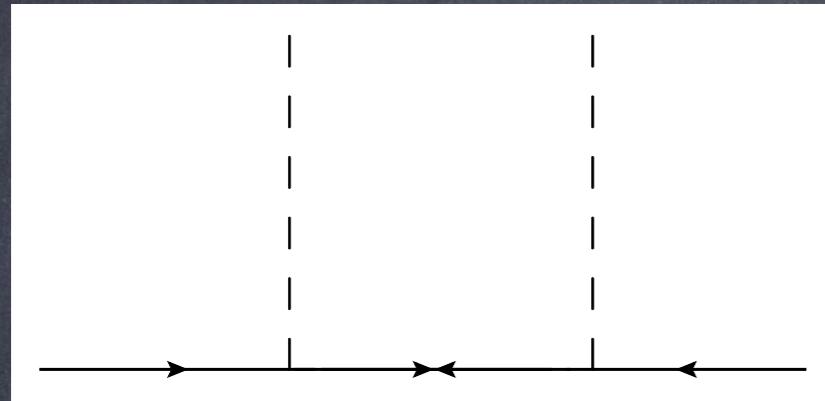
真空期待値：

$$\left. \frac{\partial V_H}{\partial \Delta} \right|_{\langle \phi \rangle = \frac{v}{\sqrt{2}}, \langle \Delta \rangle = \frac{v_\Delta}{\sqrt{2}}} = 0$$

$$\frac{v_\Delta}{\sqrt{2}} \simeq \frac{\mu v^2}{2 M_\Delta^2 + (\lambda_4 + \lambda_5)v^2}$$

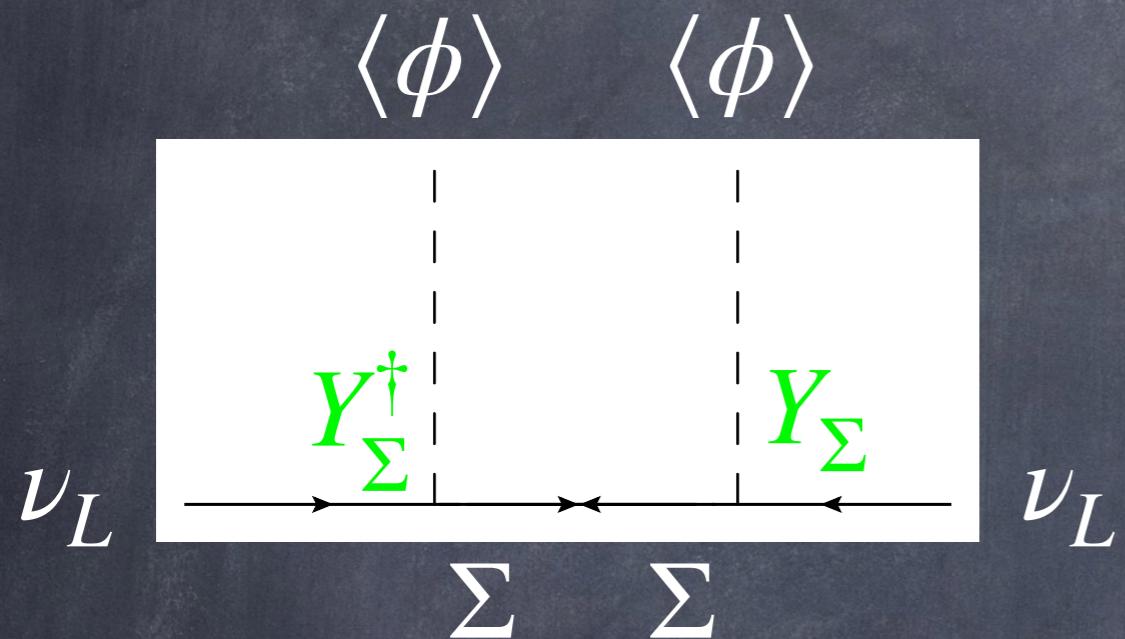
- シーソー機構：ちょっと寄り道 (type-III：ゲージ3重項フェルミオン)

Foot, Lew, He, Joshi; Ma, Ma, Roy; T.H., Lin, Notari, Papucci, Strumia; Bajc, Nemevsek, Senjanovic; Dorshner, Fileviez-Perez; ...



- シーソー機構：ちょっと寄り道 (type-III：ゲージ3重項フェルミオン)

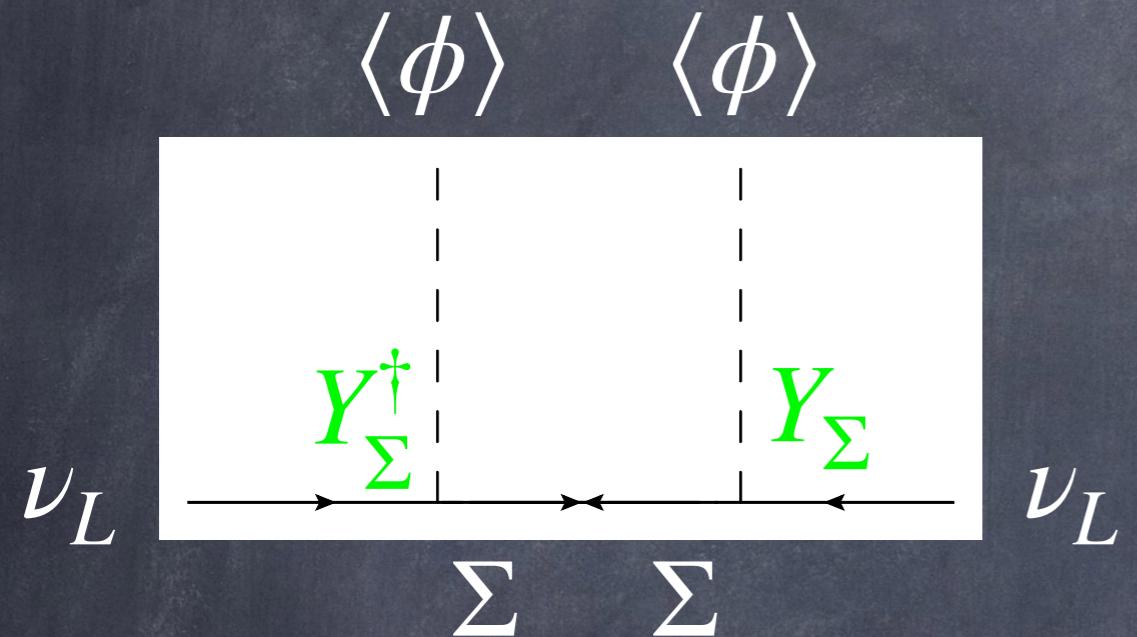
Foot, Lew, He, Joshi; Ma, Ma, Roy; T.H., Lin, Notari, Papucci, Strumia; Bajc, Nemevsek, Senjanovic; Dorshner, Fileviez-Perez; ...



$$M_\nu = Y_\Sigma^T \frac{1}{M_\Sigma} Y_\Sigma v^2$$

- シーソー機構：ちょっと寄り道 (type-III：ゲージ3重項フェルミオン)

Foot, Lew, He, Joshi; Ma, Ma, Roy; T.H., Lin, Notari, Papucci, Strumia; Bajc, Nemevsek, Senjanovic; Dorshner, Fileviez-Perez; ...



$$M_\nu = Y_\Sigma^T \frac{1}{M_\Sigma} Y_\Sigma v^2$$

- その他にも inverse seesaw, linear seesaw, radiative seesaw, ...

3. レプトンセクターの世代混合

- PMNS行列のパラメータ (N世代の場合)
- $N \times N$ 複素行列の実パラメータの数 : $N^2 \times 2$
- ユニタリー条件 : $\sum_k V_{ik}^* V_{jk} = \delta_{ij} \rightarrow N^2$
- レプトン場の再定義により取り除く事が出来るパラメータの数 : N
- 物理的なパラメータの数 :

$$2N^2 - N^2 - N = N(N-1)$$

- 混合角と位相パラメータ
 - 混合角の数 (θ_{ij}) : ${}_NC_2 = \frac{1}{2}N(N-1)$
 - 位相パラメータの数 : $N(N-1) - {}_NC_2 = \frac{1}{2}N(N-1)$
- $\frac{1}{2}N(N-1) \rightarrow 3$ (1つのディラック位相と2つのマヨラナ位相)

混合角と位相パラメータ

- 混合角の数 (θ_{ij}) : ${}_N C_2 = \frac{1}{2} N(N - 1)$

- 位相パラメータの数 : $N(N - 1) - {}_N C_2 = \frac{1}{2} N(N - 1)$

$\frac{1}{2} N(N - 1) \rightarrow 3$ (1つのディラック位相と2つのマヨラナ位相)

レプトンの世代混合行列 (PMNS行列)

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e^{i\eta_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\eta_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

PDG2022

- δ_{CP} : ディラック位相、 η_1, η_2 : マヨラナ位相

- 世代混合 :

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e^{i\eta_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\eta_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

PDG2022

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix}$$

$$s_{12}^2 \equiv \sin^2 \theta_{12} = \frac{|U_{e2}|^2}{1 - |U_{e3}|^2} , \quad s_{23}^2 \equiv \sin^2 \theta_{23} = \frac{|U_{\mu 3}|^2}{1 - |U_{e3}|^2} , \quad s_{13}^2 \equiv \sin^2 \theta_{13} = |U_{e3}|^2$$

- CPの破れのパラメータ :

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

		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 2.6$)	
		bfp $\pm 1\sigma$	3 σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3 σ range
without SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.44^{+0.77}_{-0.74}$	$31.27 \rightarrow 35.86$	$33.45^{+0.77}_{-0.74}$	$31.27 \rightarrow 35.87$
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.573^{+0.018}_{-0.023}$	$0.405 \rightarrow 0.620$	$0.578^{+0.017}_{-0.021}$	$0.410 \rightarrow 0.623$
	$\theta_{23}/^\circ$	$49.2^{+1.0}_{-1.3}$	$39.5 \rightarrow 52.0$	$49.5^{+1.0}_{-1.2}$	$39.8 \rightarrow 52.1$
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02220^{+0.00068}_{-0.00062}$	$0.02034 \rightarrow 0.02430$	$0.02238^{+0.00064}_{-0.00062}$	$0.02053 \rightarrow 0.02434$
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.57^{+0.13}_{-0.12}$	$8.20 \rightarrow 8.97$	$8.60^{+0.12}_{-0.12}$	$8.24 \rightarrow 8.98$
	$\delta_{\text{CP}}/^\circ$	194^{+52}_{-25}	$105 \rightarrow 405$	287^{+27}_{-32}	$192 \rightarrow 361$
	$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	$6.82 \rightarrow 8.04$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	$6.82 \rightarrow 8.04$
	$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.515^{+0.028}_{-0.028}$	$+2.431 \rightarrow +2.599$	$-2.498^{+0.028}_{-0.029}$	$-2.584 \rightarrow -2.413$
with SK atmospheric data		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 7.0$)	
		bfp $\pm 1\sigma$	3 σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3 σ range
	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.45^{+0.77}_{-0.75}$	$31.27 \rightarrow 35.87$	$33.45^{+0.78}_{-0.75}$	$31.27 \rightarrow 35.87$
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.450^{+0.019}_{-0.016}$	$0.408 \rightarrow 0.603$	$0.570^{+0.016}_{-0.022}$	$0.410 \rightarrow 0.613$
	$\theta_{23}/^\circ$	$42.1^{+1.1}_{-0.9}$	$39.7 \rightarrow 50.9$	$49.0^{+0.9}_{-1.3}$	$39.8 \rightarrow 51.6$
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02246^{+0.00062}_{-0.00062}$	$0.02060 \rightarrow 0.02435$	$0.02241^{+0.00074}_{-0.00062}$	$0.02055 \rightarrow 0.02457$
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.62^{+0.12}_{-0.12}$	$8.25 \rightarrow 8.98$	$8.61^{+0.14}_{-0.12}$	$8.24 \rightarrow 9.02$
	$\delta_{\text{CP}}/^\circ$	230^{+36}_{-25}	$144 \rightarrow 350$	278^{+22}_{-30}	$194 \rightarrow 345$
	$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	$6.82 \rightarrow 8.04$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	$6.82 \rightarrow 8.04$
	$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.510^{+0.027}_{-0.027}$	$+2.430 \rightarrow +2.593$	$-2.490^{+0.026}_{-0.028}$	$-2.574 \rightarrow -2.410$

• PMNS行列 (NuFIT 5.1)

NuFIT 5.1 (2021)

$$|U|_{3\sigma}^{\text{w/o SK-atm}} = \begin{pmatrix} 0.801 \rightarrow 0.845 & 0.513 \rightarrow 0.579 & 0.143 \rightarrow 0.156 \\ 0.232 \rightarrow 0.507 & 0.459 \rightarrow 0.694 & 0.629 \rightarrow 0.779 \\ 0.260 \rightarrow 0.526 & 0.470 \rightarrow 0.702 & 0.609 \rightarrow 0.763 \end{pmatrix}$$

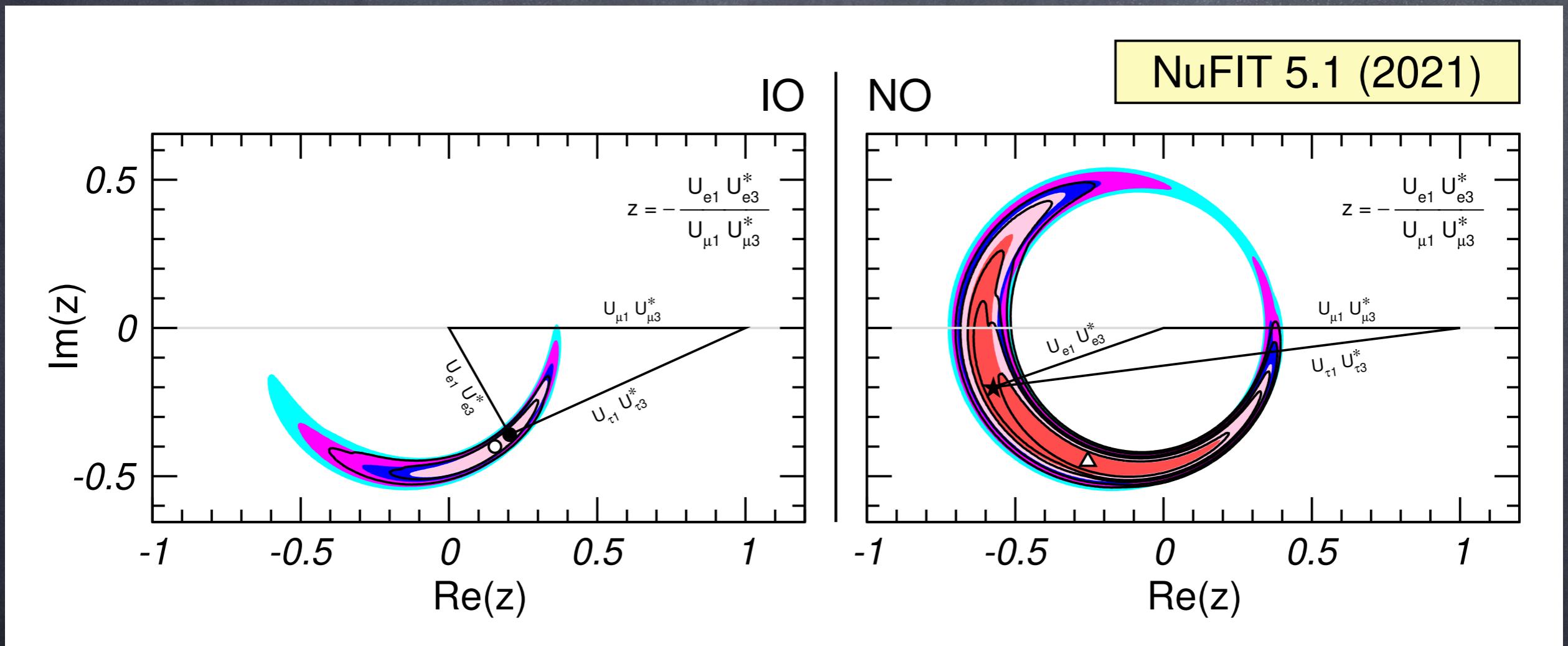
$$|U|_{3\sigma}^{\text{with SK-atm}} = \begin{pmatrix} 0.801 \rightarrow 0.845 & 0.513 \rightarrow 0.579 & 0.144 \rightarrow 0.156 \\ 0.244 \rightarrow 0.499 & 0.505 \rightarrow 0.693 & 0.631 \rightarrow 0.768 \\ 0.272 \rightarrow 0.518 & 0.471 \rightarrow 0.669 & 0.623 \rightarrow 0.761 \end{pmatrix}$$

• CKM行列 (PDG)

$$|V_{\text{CKM}}| = \begin{pmatrix} 0.97435 \pm 0.00016 & 0.22500 \pm 0.00067 & 0.00369 \pm 0.00011 \\ 0.22486 \pm 0.00067 & 0.97349 \pm 0.00016 & 0.04182^{+0.00085}_{-0.00074} \\ 0.00857^{+0.00020}_{-0.00018} & 0.04110^{+0.00083}_{-0.00072} & 0.999118^{+0.000031}_{-0.000036} \end{pmatrix}$$

- CPの破れのパラメータ :

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

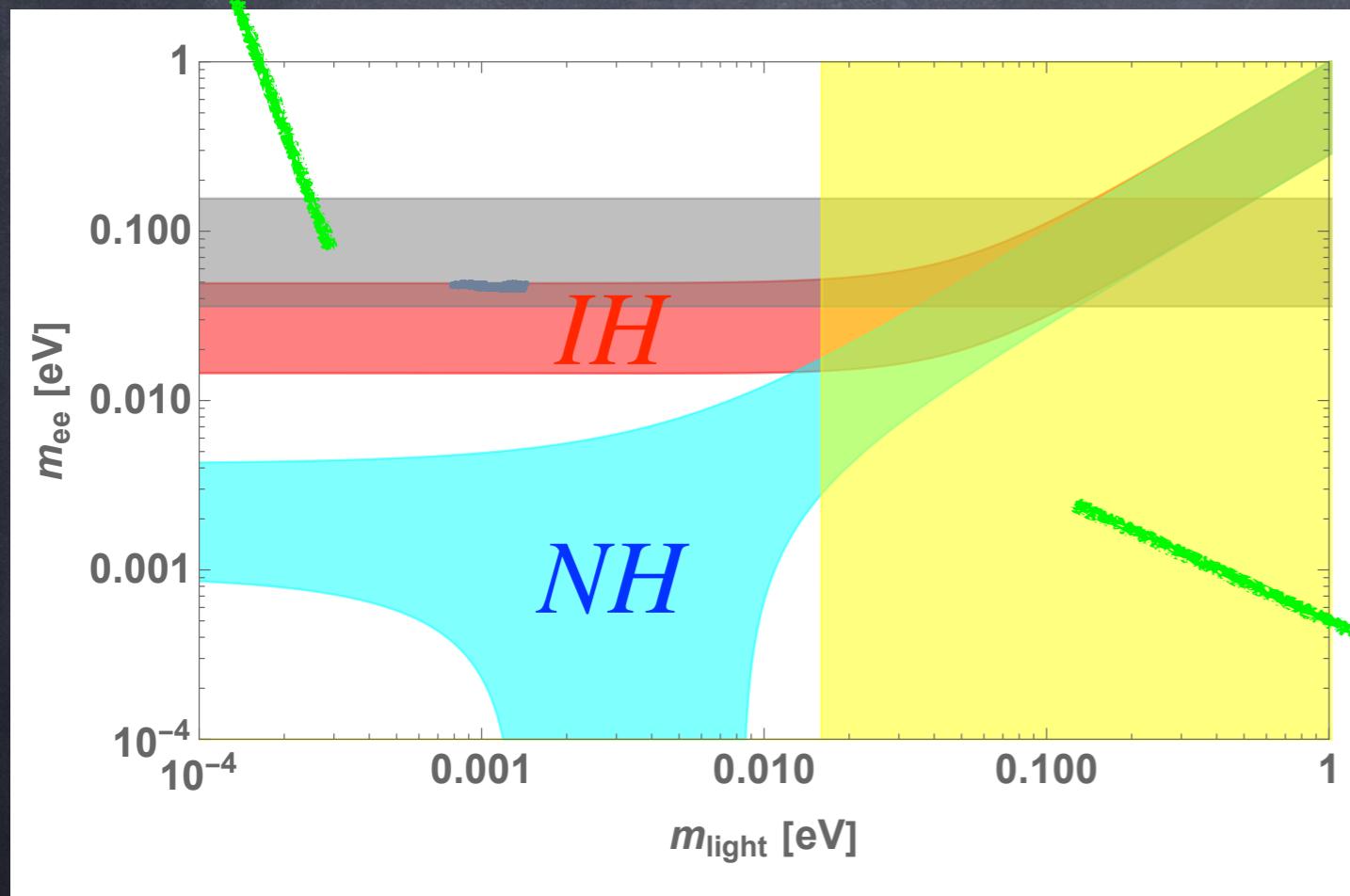


- ニュートリノを放出しない二重ベータ ($0\nu\beta\beta$) 崩壊の有効質量

$$|m_{ee}| = |m_1 U_{e1}^2 + m_2 U_{e2}^2 + m_3 U_{e3}^2|$$

36 - 156 meV at 90% C.L. で排除

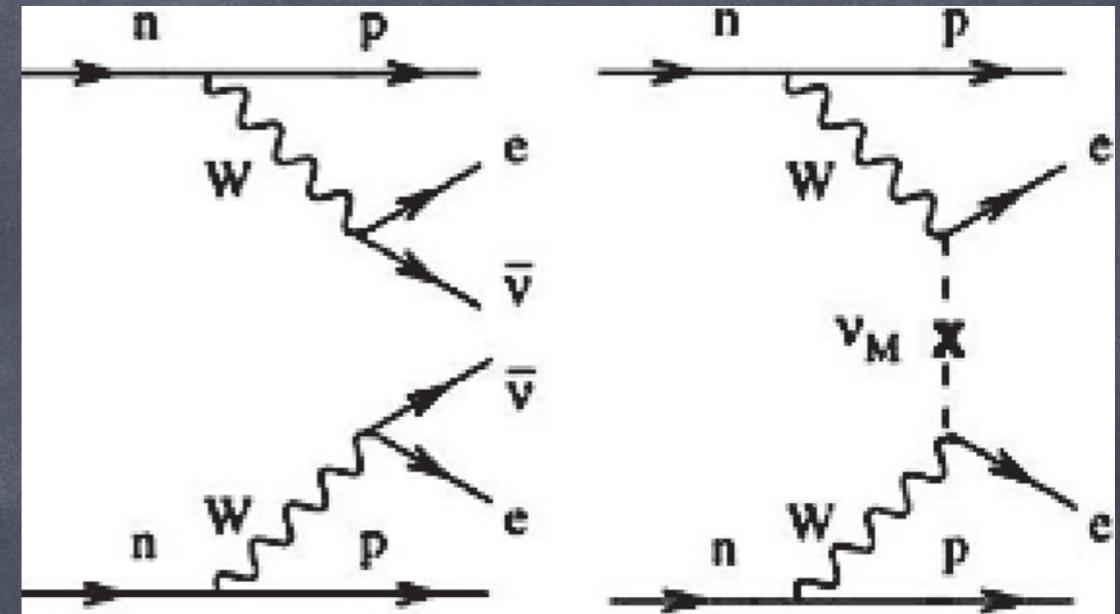
S. Abe et al. [KamLAND-Zen], [arXiv:2203.02139 [hep-ex]]



Y. Izawa, Y.S. and H. Takei, arXiv:2209.10201 [hep-ph]

$2\nu\beta\beta$

$0\nu\beta\beta$



M. K. Singh, S. Karmakar, and D. Singh ISSN:2250-0510, 2020

- ニュートリノ質量の和 : 95% C.L.

$$\sum_i m_i < 0.12$$

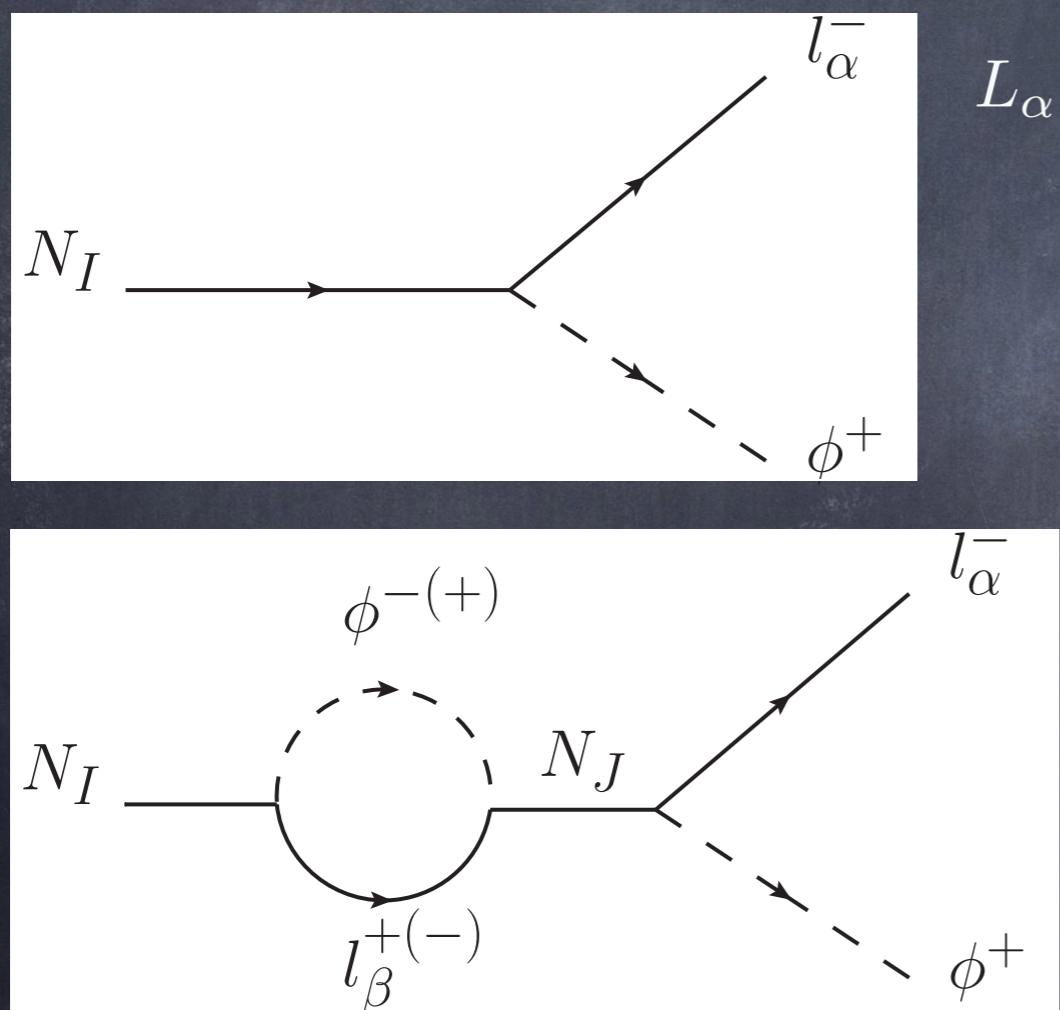
N. Aghanim et al. [Planck], Astron. Astrophys. 641 (2020)

4. CPの破れと宇宙のバリオン非対称

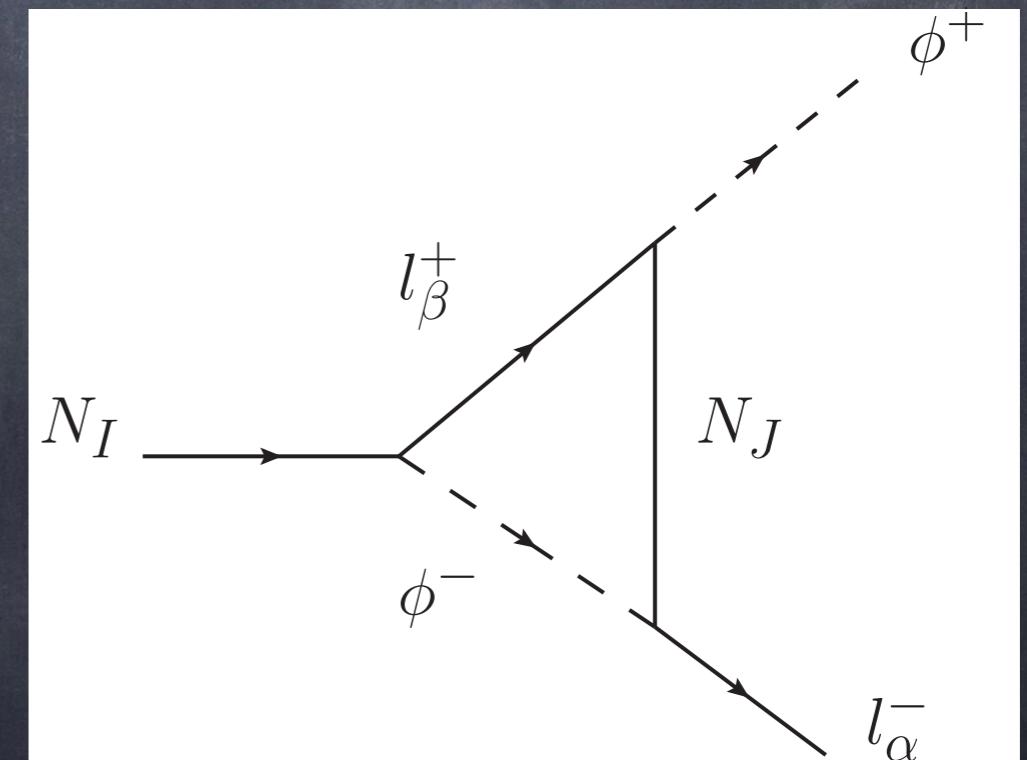
- 右巻きマヨラナニュートリノを加えたラグランジアン：

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

- 右巻きマヨラナニュートリノの崩壊

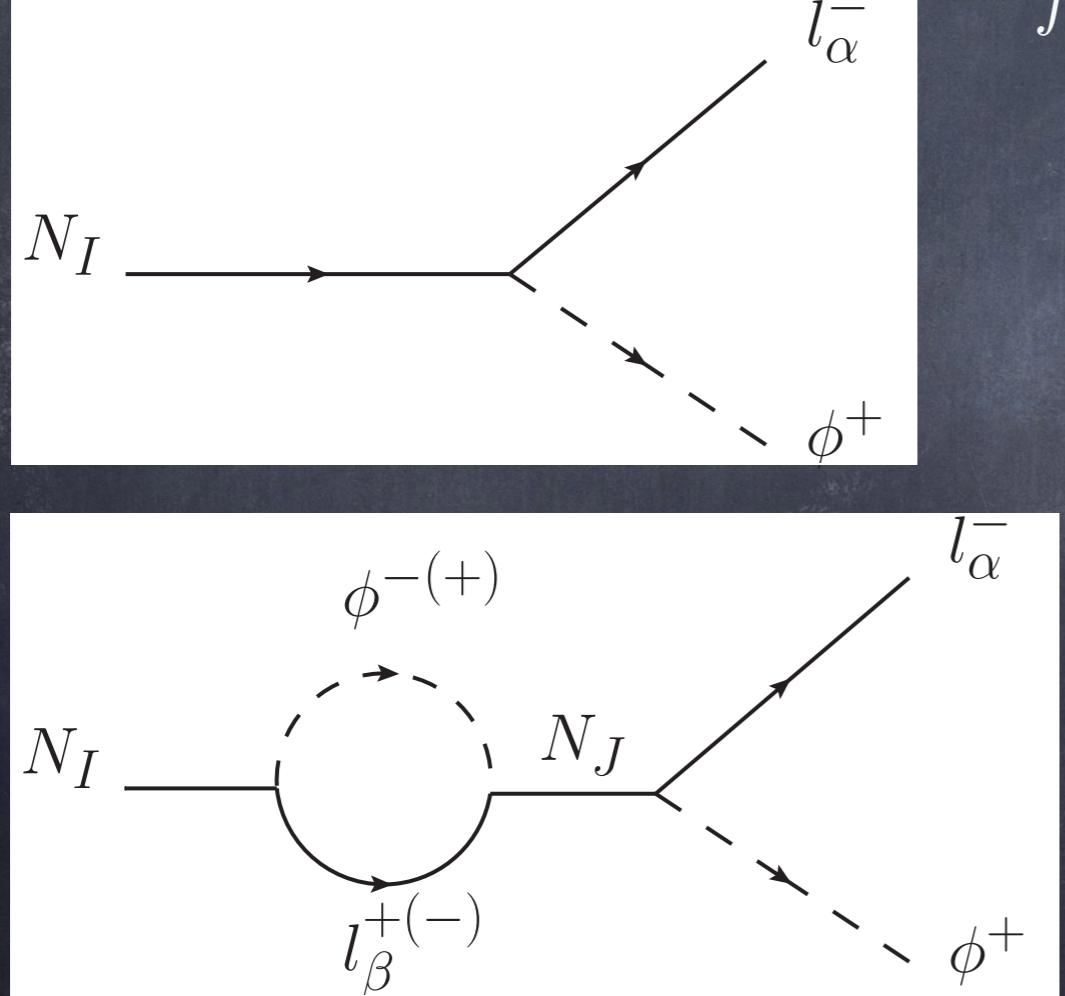


$$L_\alpha = \begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ l_\alpha^- \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{H} = i\tau_2 H = \begin{pmatrix} \phi^{0*} \\ -\phi^- \end{pmatrix}$$

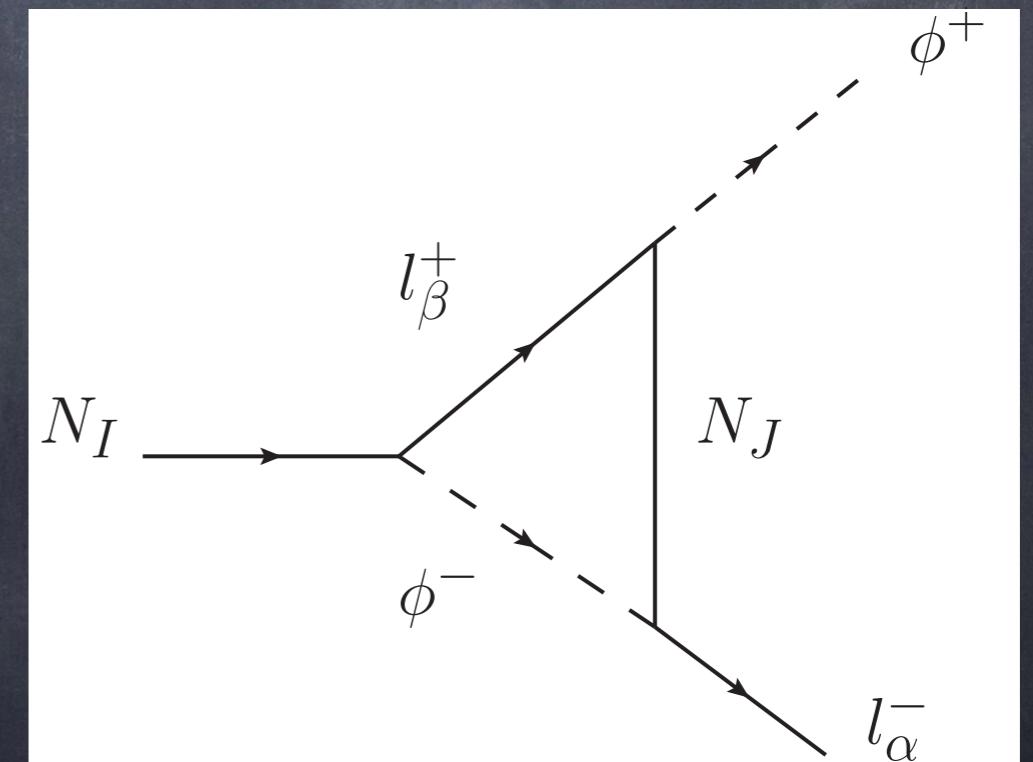


- レプトジエネシス M. Fukugita and T. Yanagida

- CP非対称性 :
$$\epsilon_1 = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow HL) - \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{H}\bar{L})}{\Gamma(N_1 \rightarrow HL) + \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{H}\bar{L})}$$
$$= \frac{1}{8\pi} \sum_{i=2,3} \frac{\text{Im} [(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{i1}^2]}{(Y_\nu^\dagger Y_\nu)_{11}} f\left(\frac{M_i^2}{M_1^2}\right)$$



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



- レプトジエネシス M. Fukugita and T. Yanagida

• 宇宙のバリオン非対称 : $\eta_B = (5.8 - 6.6) \times 10^{-10}$ (95% C.L.)
PDG2022

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

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

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

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

5. まとめ

- ニュートリノ振動実験の結果ニュートリノには質量があり、レプトンの世代混合はクォークの世代混合に比べて大きい
- シーソー機構により、ニュートリノが質量を獲得する
- ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊の実験により、ニュートリノ質量の階層性を決めることができる
- 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
- レプトンの δ_{CP} の精密な測定は素粒子標準模型を超える物理の手がかりとなる