

Why lepton (quark) sector has large (small) flavor mixings?

第17回ニュートリノ研究会ICRR(6/29/2005)

波場 直之

(Tokushima Univ.)

Plan of talk

1. Introduction

(What is origin of difference of lepton/quark flavor mixing?)

2. neutrino origin?

3. GUT origin?

4. flavor effects of neutron EDM

5. quark-lepton complementarity

6. summary & discussion

§ 1.

Introduction

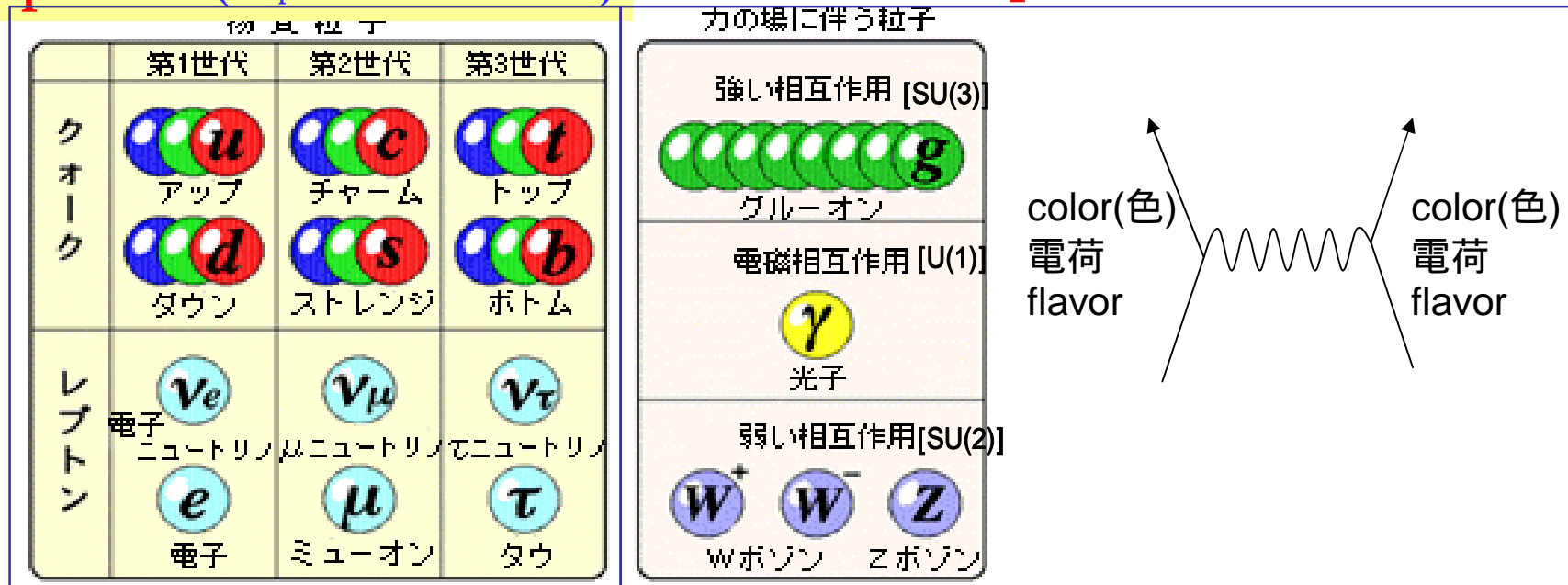
-- What is the origin of difference of quark and lepton flavor mixing?--

Standard Model +m

O(100)GeV以下の素粒子物理をほぼ完璧に記述。

spin:1/2 ($20_{\text{parameter}}=6+6+4+4$)

spin:1 ($3_{\text{parameter}}$)



spin:0 ($2_{\text{parameter}}$)













対称性の破れを引き起こす粒子:
gauge symmetry, chiral symmetry

Standard Model +m

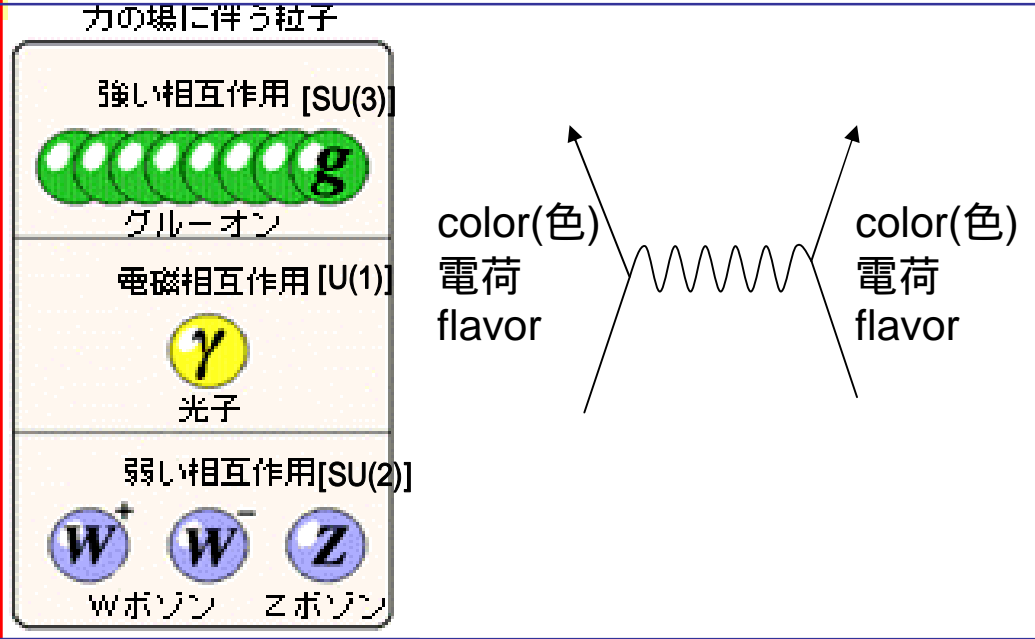
O(100)GeV以下の素粒子物理をほぼ完璧に記述。

spin:1/2 ($20_{\text{parameter}}=6+6+4+4$)

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 電子ニュートリノ	 ミューオンニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

spin:1 ($3_{\text{parameter}}$)



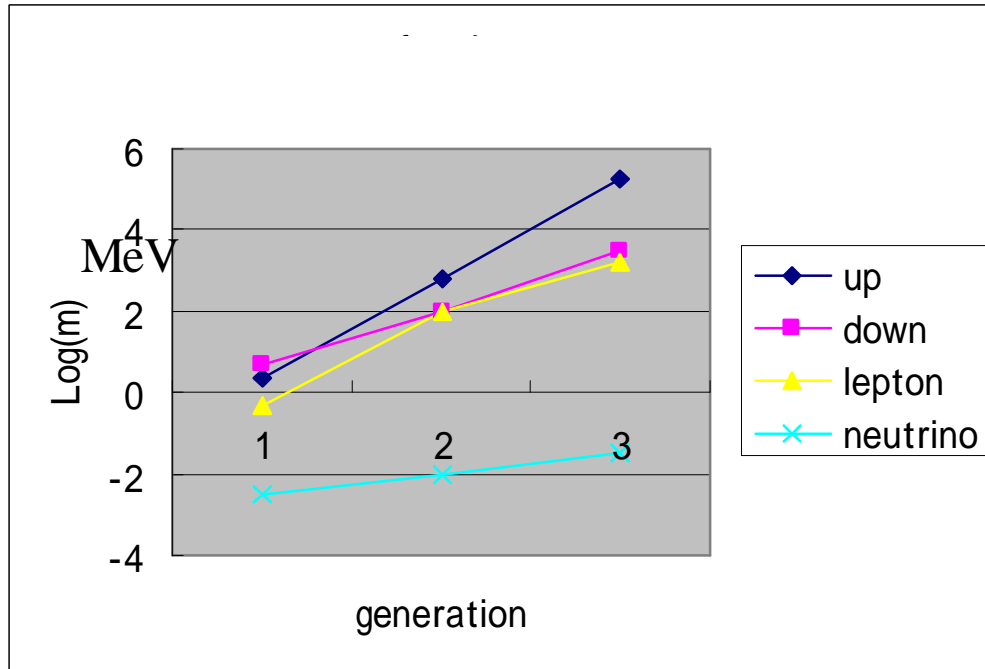
世代ってなんだろう？



spin:0 ($2_{\text{parameter}}$)
対称性の破れを引き起こす粒子:
gauge symmetry, chiral symmetry

spin 1/2 : quark & lepton (物質場)

世代構造 (質量階層性)



$$m_u : m_c : m_t \propto \lambda^{7 \square 8} : \lambda^4 : 1$$

$$m_d : m_s : m_b \propto m_e : m_\mu : m_\tau \propto \lambda^{4 \square 5} : \lambda^2 : 1$$

(~ 0.22 (12°) カピポ角)

第1世代	第2世代	第3世代	$(SU(2)_L, U(1)_Y)$	電荷
クォーク				
$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c_L \\ s_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t_L \\ b_L \end{pmatrix}$	$(2, 1/3)$	$2/3$ $-1/3$
u_R	c_R	t_R	$(1, 4/3)$	$2/3$
d_R	s_R	b_R	$(1, -2/3)$	$-1/3$
レプトン				
$\begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_{\mu L} \\ \mu_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_{\tau L} \\ \tau_L \end{pmatrix}$	$(2, -1)$	0 -1
e_R	μ_R	τ_R	$(1, -2)$	-1

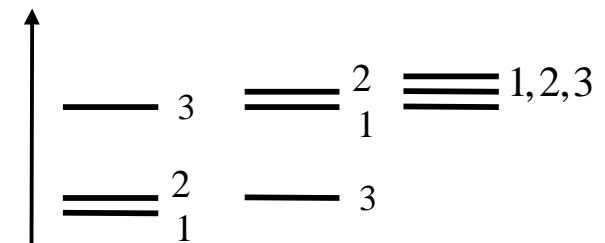
カイラルな3世代!

$$m_{\nu_{1,2,3}}$$

$$\delta m_{12}^2 \propto 7.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \text{ (solar)}$$

$$\delta m_{23}^2 \propto 2.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (atm)}$$

($m_\nu < 0.23 \text{ eV}$: WMAP etc)



spin 1/2 : quark & lepton (物質場)

世代構造 (世代間混合)

quark

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L \Leftrightarrow \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_i, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_i, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_i$$

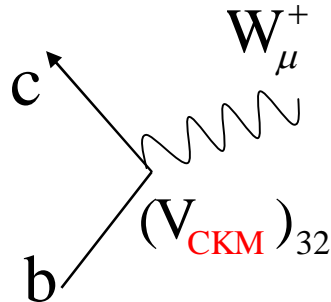
弱い相互作用
の固有状態

ミスマッチ!

質量固有
状態

$$\begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} 1 & \lambda & \lambda^3 \\ \lambda & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_i$$

3: rotations
1: CP



lepton

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_i, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_i, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_i$$

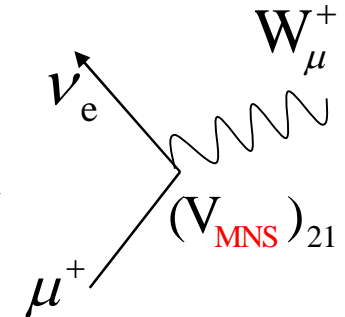
弱い相互作用
の固有状態

ミスマッチ!

質量固有状態
(if $m_e = 0$, no LFV)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} 32^\circ & & \leq 11^\circ \\ & & 45^\circ \\ & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_i$$

3: rotations
1: CP



small mixing in quark

$$V_{CKM} \approx \begin{pmatrix} 1 & \lambda & \lambda^3 \\ \lambda & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$



large mixing in lepton

$$V_{MNS} \approx \begin{pmatrix} 32^\circ & & \leq 11^\circ \\ & & 45^\circ \\ & & \end{pmatrix}$$

質量項 20 parameters = 6+4(1)+6+4(1)

$$L_{\text{Yukawa}} = -m_{u_{ij}} U_{L_i} \bar{U}_{R_j} - m_{d_{ij}} D_{L_i} \bar{D}_{R_j} - m_{e_{ij}} E_{L_i} \bar{E}_{R_j} + m_{\nu_{ij}} \nu_i \nu_j + \text{h.c.}$$

$$U_{L_i} \xrightarrow{\times} \bar{U}_{R_j} \quad i, j = 1, 2, 3 \text{ (gen.\#)}$$

$$= -[y_{u_{ij}} \langle \phi \rangle] Q_{L_j} \bar{U}_{R_i} - [y_{d_{ij}} \langle \phi \rangle] Q_{L_j} \bar{D}_{R_i} - [y_{e_{ij}} \langle \phi \rangle] L_{L_j} \bar{E}_{R_i} - [\kappa_{\nu_{ij}} \langle \tilde{\phi} \tilde{\phi} \rangle] \nu_i \nu_j + \text{h.c.}$$

$$Q_{L_i} \xrightarrow{\quad} \bar{U}_{R_j} \quad \langle \phi \rangle = \begin{pmatrix} \langle \phi^0 \rangle \\ \langle \phi^- \rangle \end{pmatrix} = 246 \text{ GeV}$$

$$\tilde{\phi} = i\sigma^2 \phi^*$$

$\underline{U}_L^{(u)\dagger} [y_{u_{ij}} \langle \tilde{\phi} \rangle] U_R^{(u)}$	$\underline{U}_L^{(d)\dagger} [y_{d_{ij}} \langle \phi \rangle] U_R^{(d)}$	$\underline{U}_L^{(e)\dagger} [y_{e_{ij}} \langle \phi \rangle] U_R^{(e)}$	$\underline{U}^{(\nu)\dagger} [\kappa_{\nu_{ij}} \langle \tilde{\phi} \rangle] U^{(\nu)}$
3	3	3	3

任意の複素行列は2つのユニタリー行列で対角化可能。right-handedを回す自由度はSMでは場の再定義で吸収可能。

$$V_{\text{CKM}} = U_L^{(u)\dagger} U_L^{(d)}$$

4(1)

$$V_{\text{MNS}} = U_L^{(e)\dagger} U^{(\nu)}$$

4(1)

(方針) quark/leptonの世代構造

質量階層性: $m_u : m_c : m_t \propto \lambda^{7 \oplus 8} : \lambda^4 : 1$, $m_d : m_s : m_b \propto m_e : m_\mu : m_\tau \propto \lambda^{4 \oplus 5} : \lambda^2 : 1$

世代間混合: quark小混合 lepton大混合

に注目して、世代とは何かを、探りたい！標準模型を越える物理の手がかりにもなるだろう。

立場1: 特有の効果 (§ 2)

マヨラナ質量や縮退質量が可能なのはquark/leptonの中で **のみ**

立場2: GUT (§ 3)

$-q(e^-) = q(p^+)$ 21桁も!

$|q(e^-) + q(p^+)|/e < 10^{-21}$ from neutrality of matter experiment (assumed $q(n) = q(p^+) + q(e^-)$)



quark leptonの対称性: GUTでは、1つの表現に入るので電荷の量子化が数学的に保障される。

予言: 陽子崩壊 $p^+ \rightarrow e^+ \pi^0$ (non-SUSY) $p^+ \rightarrow K^+ \nu$ (SUSY)

§ 2.

neutrino origin?

立場1: 特有の効果の可能性

(1) see-saw enhance (のみマヨラナ質量を持ちうる)

右巻きを導入 $\mathcal{L}_{\text{fund.}} \supset \nu_L \langle \phi \rangle \mathbf{N} + \mathbf{M}_R \mathbf{N} \mathbf{N} + \text{h.c.}$

$$\begin{array}{cc}
 \text{L} & \text{R} \\
 \begin{pmatrix} 0 & \langle \phi \rangle \\ \langle \phi \rangle & \mathbf{M}_R \end{pmatrix} & \xrightarrow{\langle \phi \rangle \supset \mathbf{M}_R} \begin{pmatrix} \frac{\langle \phi \rangle^2}{\mathbf{M}_R} & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_R \end{pmatrix} \\
 \text{see-saw mechanism} &
 \end{array}
 \xrightarrow{[\partial \mathcal{L}_{\text{fund.}} / \partial \mathbf{N} = 0]}
 \mathcal{L}_{\text{eff}} \supset \frac{\langle \phi \rangle^2}{\mathbf{M}_R} \nu \nu + \text{h.c.}$$

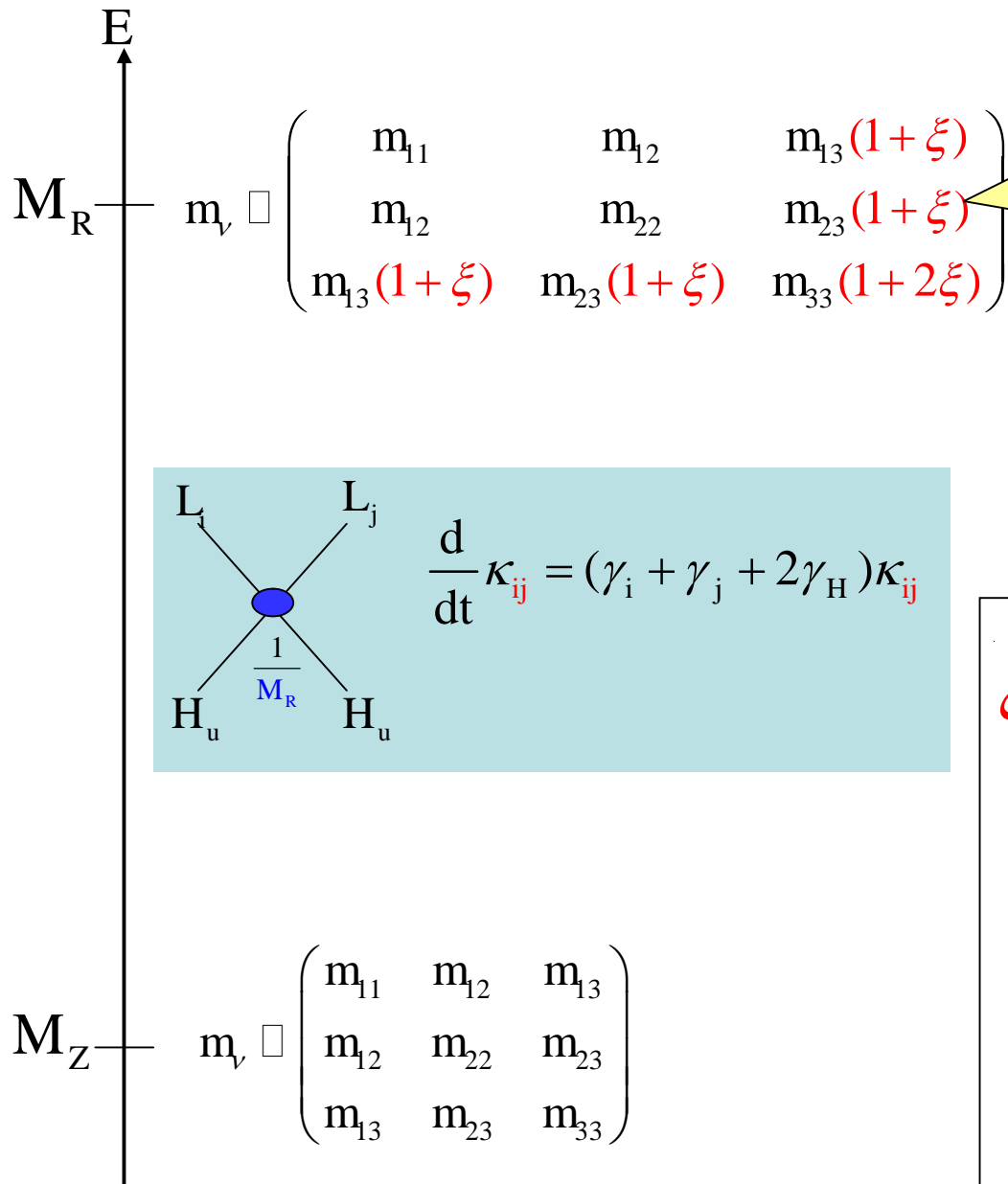
DiracもMajorana質量も小混合、しかし、see-sawで大混合が得られる例: (Smirnov, Tanimoto)

$$\mathbf{m}_\nu^D \supset \begin{pmatrix} \lambda^6 & \lambda^6 & 0 \\ 0 & \lambda^4 & \lambda^4 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{M}_R \supset \begin{pmatrix} \lambda^{12} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{10} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Altarelli, etal})$$

$$\xrightarrow{\text{see-saw}} \mathbf{m}_\nu^1 = \frac{\mathbf{m}_\nu^{DT} \mathbf{m}_\nu^D}{\mathbf{M}_R} = \begin{pmatrix} \lambda^2 & \lambda^2 & 0 \\ \lambda^2 & 1 + \lambda^2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 + \lambda^2 \end{pmatrix} \frac{\langle \phi \rangle^2}{\lambda^2 \mathbf{M}_R}$$

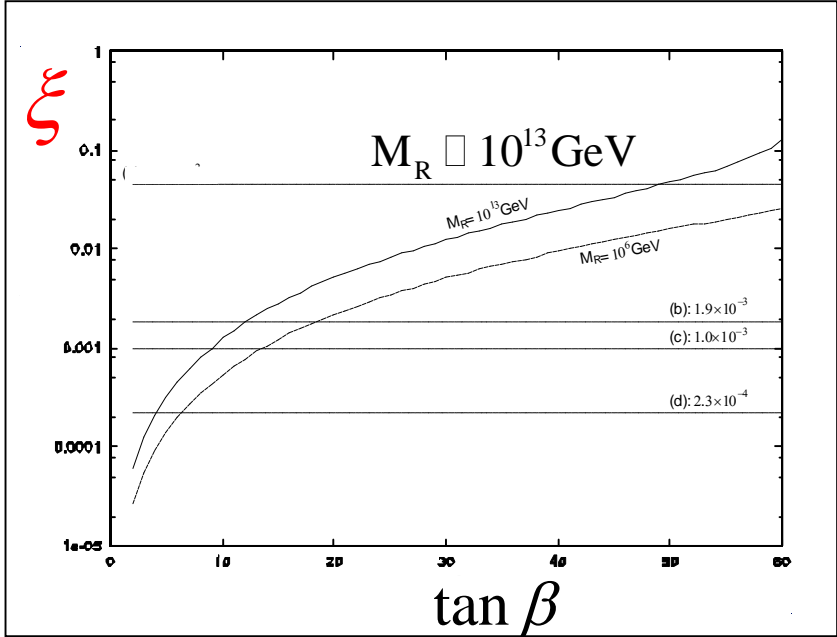
(S₃ symmetry: NH and Yoshioka in preparation)

(2) RGE effect (縮退した質量の可能性はあるのは のみ) (NH, Okamura, etal)



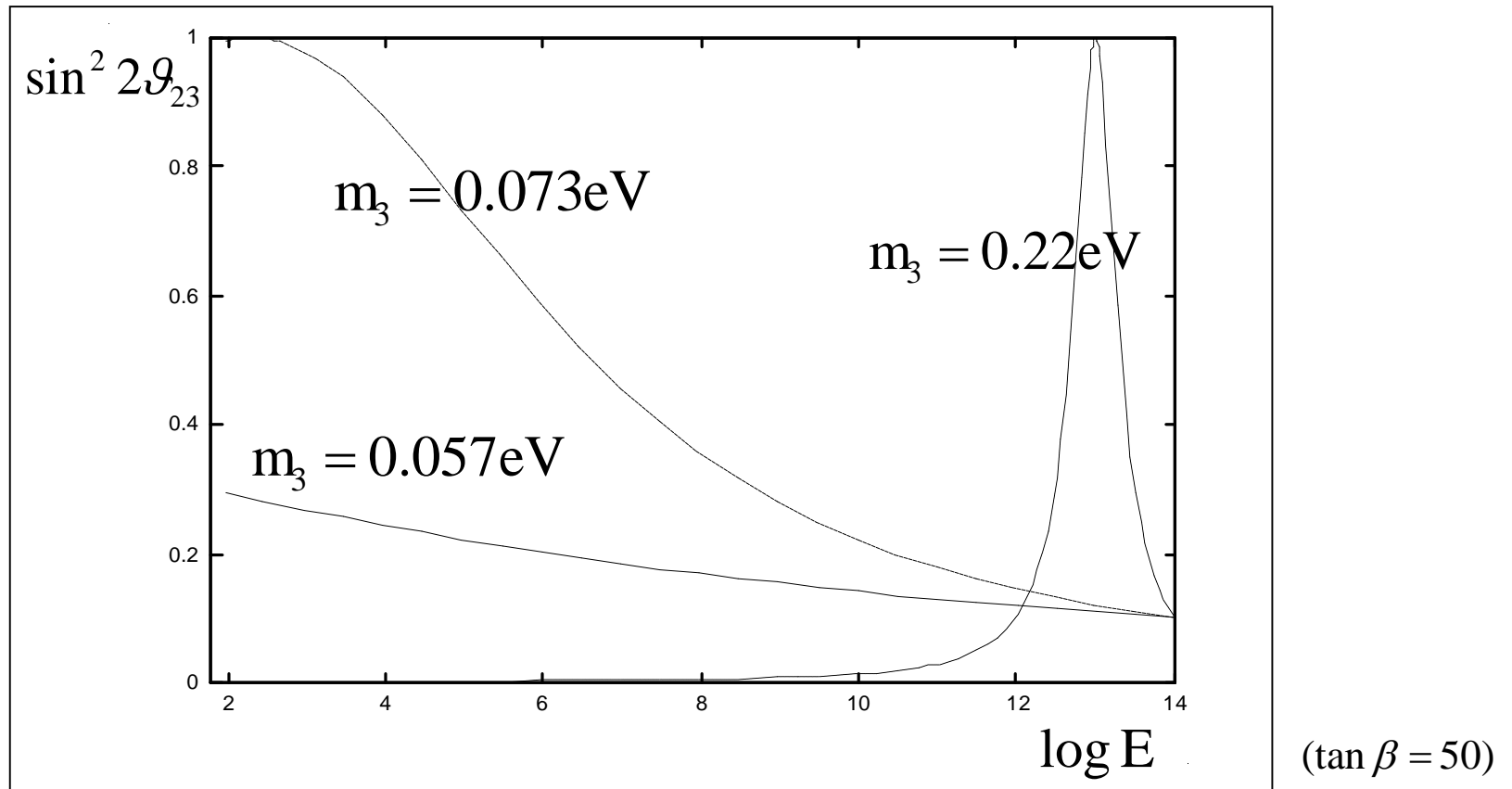
1 parameter
 $\xi = 0.01 \square 0.1$
 ($\tan \beta \square 30 \square 50, M_R \square 10^{13} \text{ GeV}$)

CP位相はRGE不変
 $\frac{d}{dt} \ln \kappa_{ij} = \frac{d}{dt} \ln |\kappa_{ij}| + i \frac{d}{dt} \varphi_{ij}$
 $= (\gamma_i + \gamma_j + 2\gamma_H)$



混合角のエネルギー依存性

(NH, Okamura, Sugiura)



$$\begin{pmatrix} 1 & * \\ * & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \tan 2\theta = \frac{2*}{1-1} = \frac{\delta m/m}{1-1}$$

$$\begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix} \rightarrow \tan 2\theta = \frac{2b}{c-a}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & *(1+\xi) \\ *(1+\xi) & 1(1+2\xi) \end{pmatrix} \rightarrow \tan 2\theta = \frac{\delta m/m}{2\xi}$$

($\delta m/m \square 0.01 \square 0.1$ [$m \square 0.1 \square 1\text{eV}$])

同符号で縮退の場合は、高エネルギーで小混合の可能性あり！

§ 3.

GUT origin?

立場2 : GUT

$$\underline{SU(5) \text{ GUT}} \supset SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

質量項:

$$10 = (Q, \bar{U}, \bar{E}), \quad \bar{5} = (\bar{D}, L) \quad H_5, \bar{H}_5$$

$$W_Y = \frac{10 \cdot 10 \cdot H_5}{m_u} + \frac{10 \cdot \bar{5} \cdot \bar{H}_5}{m_d, m_e} + \frac{\bar{5} \cdot \bar{5} \cdot H_5 \cdot H_5}{m_\nu}$$

$$10_3 \rightarrow 10_3, \quad 10_2 \rightarrow \lambda^2 10_2, \quad 10_1 \rightarrow \lambda^4 10_1$$

10表現が階層性を作ると考えてみる

[Babu&Barr]

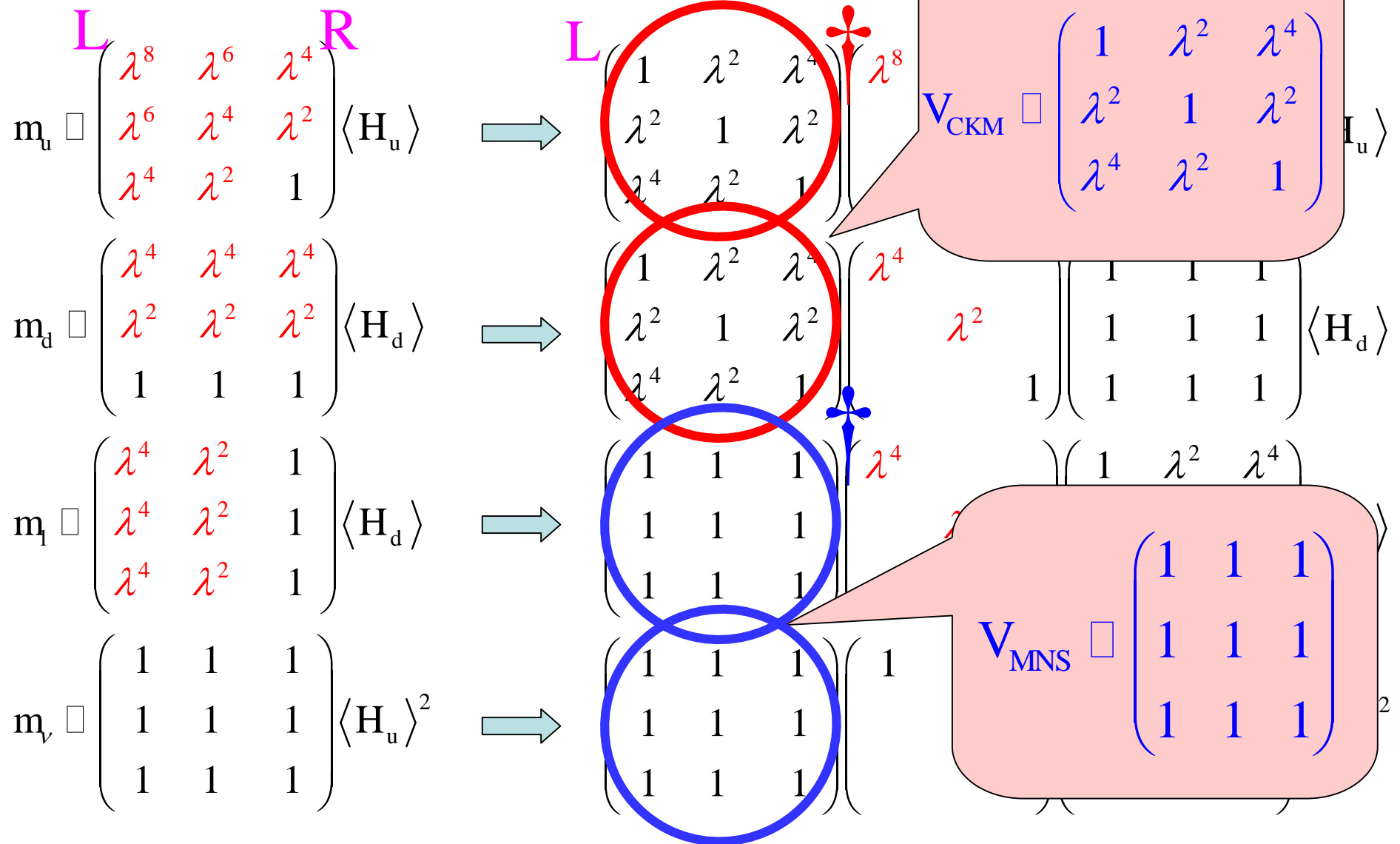
$$W = y^u \mathbf{10} \cdot \mathbf{10} \cdot \mathbf{H}_5 + y^{d/e} \mathbf{10} \cdot \bar{\mathbf{5}} \cdot \overline{\mathbf{H}}_5 + \kappa \bar{\mathbf{5}} \cdot \bar{\mathbf{5}} \cdot \mathbf{H}_5 \cdot \mathbf{H}_5$$

$$\mathbf{10}_i = (\mathbf{Q}, \bar{\mathbf{U}}, \bar{\mathbf{E}})_i \quad [10_3 \rightarrow 10_3, 10_2 \rightarrow \lambda^2 10_2, 10_1 \rightarrow \lambda^4 10_1]$$

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{m}_u \square \begin{array}{c} \mathbf{L} \\ \left(\begin{array}{ccc} \lambda^8 & \lambda^6 & \lambda^4 \\ \lambda^6 & \lambda^4 & \lambda^2 \\ \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \end{array} \right) \mathbf{R} \\ \langle \mathbf{H}_u \rangle \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{c} \mathbf{L} \\ \left(\begin{array}{ccc} 1 & \lambda^2 & \lambda^4 \\ \lambda^2 & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{ccc} \lambda^8 & & \\ & \lambda^4 & \\ & & 1 \end{array} \right) \mathbf{R} \\ \left(\begin{array}{ccc} 1 & \lambda^2 & \lambda^4 \\ \lambda^2 & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \end{array} \right) \langle \mathbf{H}_u \rangle \end{array} \\
 \\
 \mathbf{m}_d \square \begin{array}{c} \left(\begin{array}{ccc} \lambda^4 & \lambda^4 & \lambda^4 \\ \lambda^2 & \lambda^2 & \lambda^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \right) \langle \mathbf{H}_d \rangle \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{c} \left(\begin{array}{ccc} 1 & \lambda^2 & \lambda^4 \\ \lambda^2 & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{ccc} \lambda^4 & & \\ & \lambda^2 & \\ & & 1 \end{array} \right) \mathbf{R} \\ \left(\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \right) \langle \mathbf{H}_d \rangle \end{array} \\
 \\
 \mathbf{m}_l \square \begin{array}{c} \left(\begin{array}{ccc} \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \\ \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \\ \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \end{array} \right) \langle \mathbf{H}_d \rangle \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{c} \left(\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{ccc} \lambda^4 & & \\ & \lambda^2 & \\ & & 1 \end{array} \right) \mathbf{R} \\ \left(\begin{array}{ccc} 1 & \lambda^2 & \lambda^4 \\ \lambda^2 & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \end{array} \right) \langle \mathbf{H}_d \rangle \end{array} \\
 \\
 \mathbf{m}_v \square \begin{array}{c} \left(\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \right) \langle \mathbf{H}_u \rangle^2 \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{c} \left(\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{ccc} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{array} \right) \mathbf{R} \\ \left(\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \right) \langle \mathbf{H}_u \rangle^2 \end{array}
 \end{array}$$

$$W = y^u \mathbf{10} \cdot \mathbf{10} \cdot H_5 + y^{d/e} \mathbf{10} \cdot \bar{\mathbf{5}} \cdot \bar{H}_5 + \kappa \bar{\mathbf{5}} \cdot \bar{\mathbf{5}} \cdot H_5 \cdot H_5$$

$$\mathbf{10}_i = (\mathbf{Q}, \bar{\mathbf{U}}, \bar{\mathbf{E}})_i \quad [10_3 \rightarrow 10_3, 10_2 \rightarrow \lambda^2 10, 10_1 \rightarrow \lambda^4 10]$$



$10_i = (Q, \bar{U}, \bar{E})_i$ が階層性の起源だとすると

質量階層性: $m_u : m_c : m_t \propto \lambda^8 : \lambda^4 : 1$

$m_d : m_s : m_b \propto m_e : m_\mu : m_\tau \propto \lambda^4 : \lambda^2 : 1$

$m_{\nu_e} : m_{\nu_\mu} : m_{\nu_\tau} \propto 1 : 1 : 1$

世代間混合: **quark小混合** **lepton大混合**

おそらく、第0近似として正しいであろう。

(方針) 模型を考える方向で本質が見えてくるかもしれない。

補正されるべき点

質量階層性: 1世代の質量、 m_d, m_e が大きすぎる。

2世代の質量、 $m_s > m_\mu$ になってしまう。

世代間混合: V_{us} が小さすぎる。 U_{e3} が大きすぎる。

O(1)係数で補正されるだろう。

10表現に階層性 ($10_3 \rightarrow 10_3$, $10_2 \rightarrow \lambda^2 10_2$, $10_1 \rightarrow \lambda^4 10_1$) を持たすアイディア

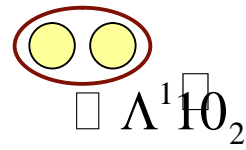
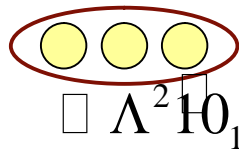
1. flavor symmetry

FN mechanism $Q_f(10_3) = 0$, $Q_f(10_2) = 1$, $Q_f(10_1) = 2$ $Q_f(\varphi_f) = -1$ $\frac{\langle \varphi_f \rangle}{M_*} \propto \lambda^2$

[NH, Murayama, Phys. Rev. D63: 053010, (2001)]

2. composite model

10_1 が3体、 10_2 が2体のcomposite state $N=1$ SQCD –confinement- $Sp(2N)$ with 6 + 



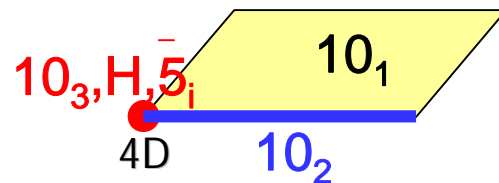
$\Lambda / M_{Pl} \propto \lambda^2$

[NH, Phys. Rev. D59: 035011, (1999)]

3. extra dimensional theory

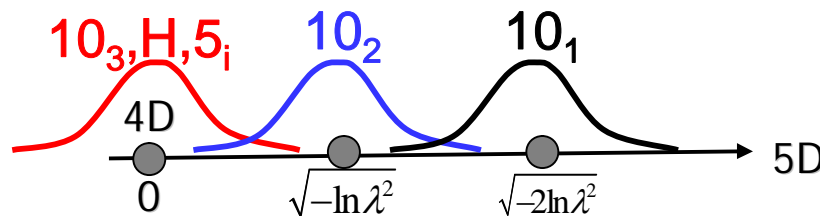
10_1 が6次元、 10_2 が5次元、 10_3 が4次元の場合

(Higgsが4次元の場で波動関数の重なりから階層性が生成)



[NH, Shimizu, Suzuki, Ukai, Prog. Theor. Phys. 107: 151, (2002)
 NH, Kondo, Shimizu, Phys. Lett. B531: 245, (2002)
 Phys. Lett. B535: 271, (2002)
 NH, Shimizu, Phys. Lett. B560: 133, (2003)
 Phys. Rev. D67: 095001, (2003)]

10_1 , 10_2 がHiggsの居る場所から離れて局在



[NH, Maru, Mod. Phys. Lett. A17: 2341, (2002)
 Phys. Rev. D66: 055005, (2002)
 NH, Maru, Nakamura, Phys. Lett. B557: 240, (2003)]

O(1)係数に関する考察(その1): O(1)係数の補正で本当にうまくいくか?

第1世代	第2世代	第3世代	
クォーク			
$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c_L \\ s_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t_L \\ b_L \end{pmatrix}$	$Q_4, \overline{Q}_4, Q_5, \overline{Q}_5, \dots$
u_R	c_R	t_R	$U_4, \overline{U}_4, U_5, \overline{U}_5, \dots$
d_R	s_R	b_R	$D_4, \overline{D}_4, D_5, \overline{D}_5, \dots$
レプトン			
$\begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_{\mu L} \\ \mu_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_{\tau L} \\ \tau_L \end{pmatrix}$	$L_4, \overline{L}_4, L_5, \overline{L}_5, \dots$
e_R	μ_R	τ_R	$E_4, \overline{E}_4, E_5, \overline{E}_5, \dots$

HiggsのVEVと関係ないvector-like mass
を持つ世代は沢山在り得る (LEP実験と無矛盾)
(例) 余次元理論、string理論のKK state

[16 vector like, 45 Higgs(Babu-Barr)]

重い場をintegrate outしてO(1)係数が生成されると考えてみる。

(NH, Maru, Nakamura)

$$m_u \square \begin{pmatrix} 0 & -4d\lambda^6 & 0 \\ -4d\lambda^6 & c\lambda^4 & 0 \\ 0 & b\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \langle H_u \rangle, \quad m_d \square \begin{pmatrix} 4d\lambda^4 & d\lambda^4 & d\lambda^4 \\ d/5\lambda^2 & d\lambda^2 & d\lambda^2 \\ c/2 & b & 1 \end{pmatrix} \langle H_d \rangle,$$

$$m_l \square \begin{pmatrix} \lambda^4 & 0 & 0 \\ b\lambda^4 & -2c\lambda^2 & 1 \\ 0 & -b\lambda^2 & 5 \end{pmatrix} \langle H_d \rangle, \quad m_\nu \square \begin{pmatrix} e & e & 0 \\ e & c & 2.5 \\ 0 & 2.5 & 5 \end{pmatrix} \langle H_u \rangle^2$$

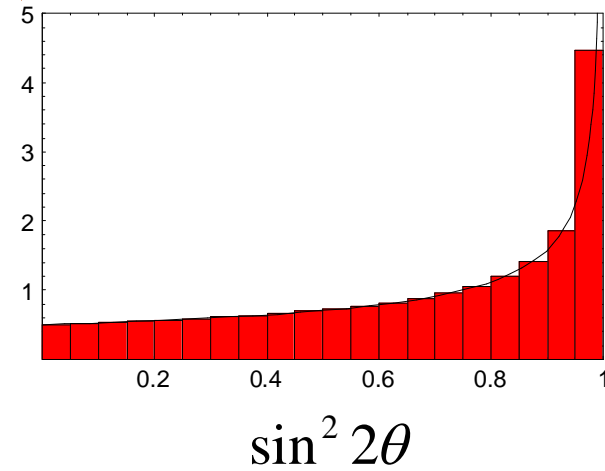
$$(b = 4, c = 3.6, d = 2, e = 1)$$

O(1)係数に関する考察(その2): sector

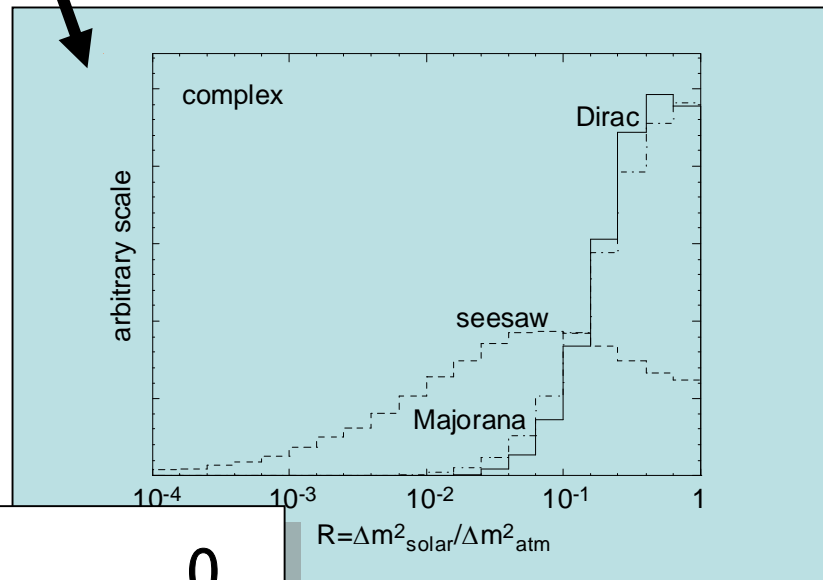
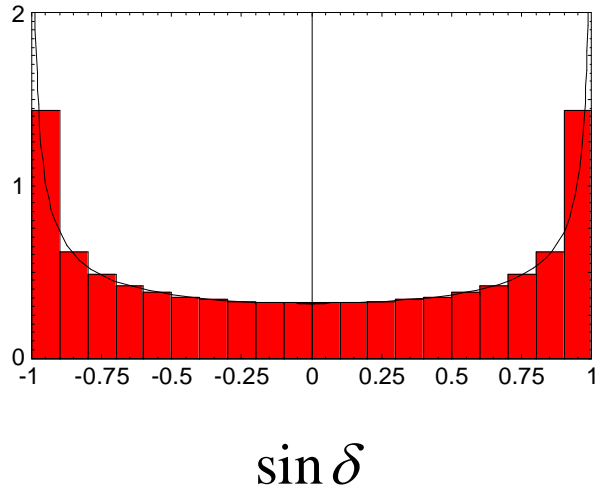
(Murayama, Hall, Weiner, NH, Murayama)

$$m_\nu \propto \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$d(\sin^2 \theta) = \frac{1}{4 \cos 2\theta} d(\sin^2 2\theta)$$



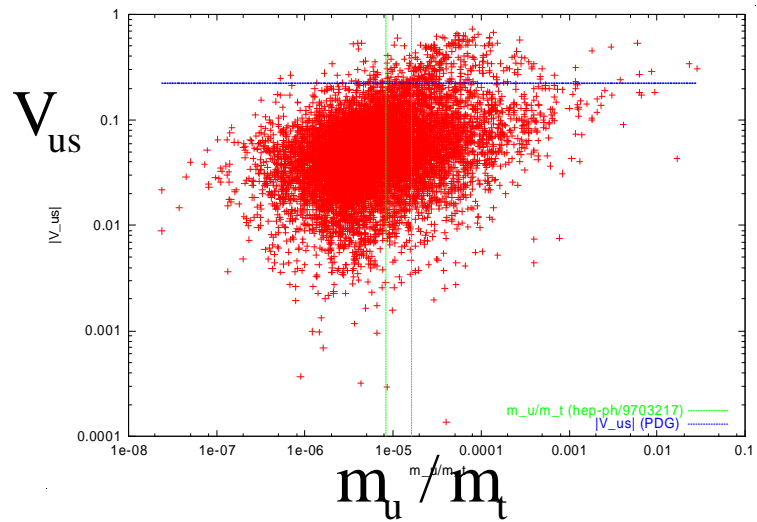
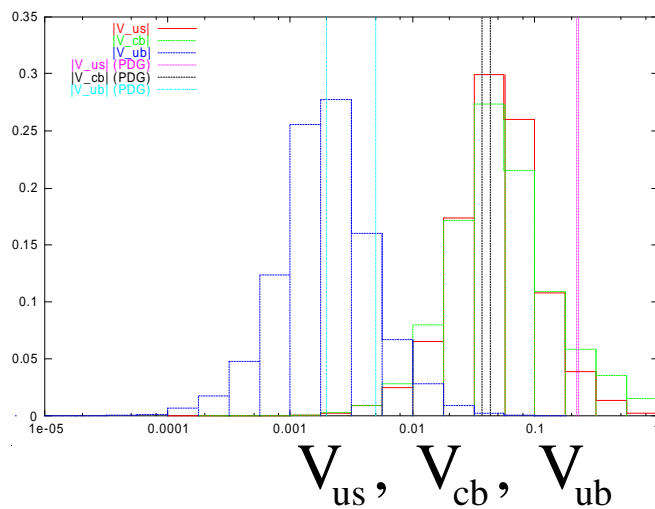
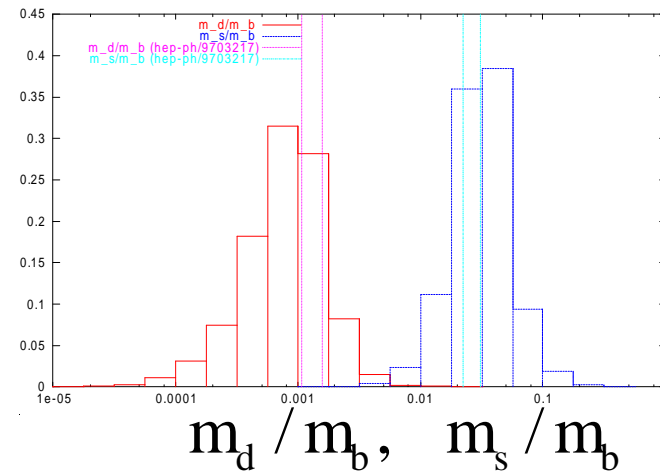
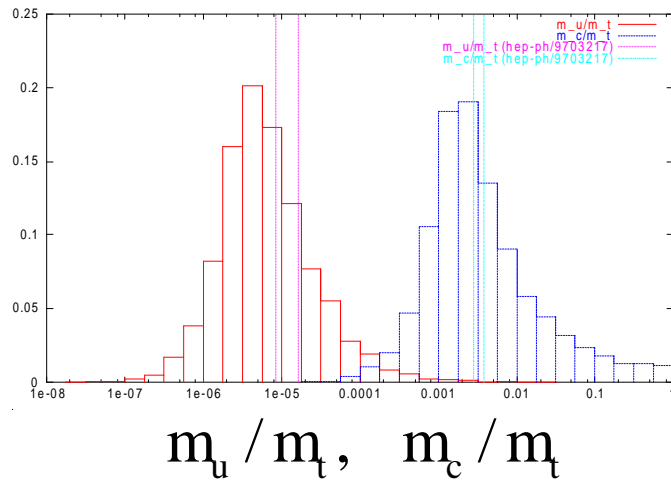
$$d\delta = \frac{1}{\cos \delta} d(\sin \delta)$$



予言: large U_{e3} , large CP, 0

O(1)係数に関する考察 (その2) : quark/charged lepton sector

$$m_u \propto \begin{pmatrix} \lambda^8 & \lambda^6 & \lambda^4 \\ \lambda^6 & \lambda^4 & \lambda^2 \\ \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix}, \quad m_d \propto \begin{pmatrix} \lambda^4 & \lambda^4 & \lambda^4 \\ \lambda^2 & \lambda^2 & \lambda^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad m_l \propto \begin{pmatrix} \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \\ \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \\ \lambda^4 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$



ここまでのまとめ

$$\text{質量階層性: } m_u : m_c : m_t \propto \lambda^{7 \sim 8} : \lambda^4 : 1$$

$$m_d : m_s : m_b \propto m_e : m_\mu : m_\tau \propto \lambda^{4 \sim 5} : \lambda^2 : 1$$

世代間混合: **quark小混合** **lepton大混合**

§ 2 . 特有の効果: see-saw enhance、繰り込み群(RGE)効果

(質量階層性に関しては分からない。

世代間混合は全て小さいが、レプトン系だけは 特有の性質(マヨラナ、縮退質量)のために大きくなる。)

§ 3 . GUT: $10_i = (Q, \bar{U}, \bar{E})_i$ が階層性の起源でO(1)係数の補正を考えるとOK。

10 が起源になるメカニズムやモデルを、flavor symmetry、composite模型、余次元理論で考えた。

O(1)係数の補正について、具体例を示し、統計的解釈を試みた。

ここから何をすべきか？

(1): V_{MNS} の精密測定に伴い、

O(1)係数を決める物理: S_3 symmetry等

quark-lepton complementarity $V_{CKM} + V_{MNS} = \text{bi-maximal?}$

$$\begin{pmatrix} 13^\circ & 0.2^\circ \\ & 2^\circ \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 32^\circ & <11^\circ \\ & 45^\circ \end{pmatrix}$$

(2): right sdown mix=left slepton mix

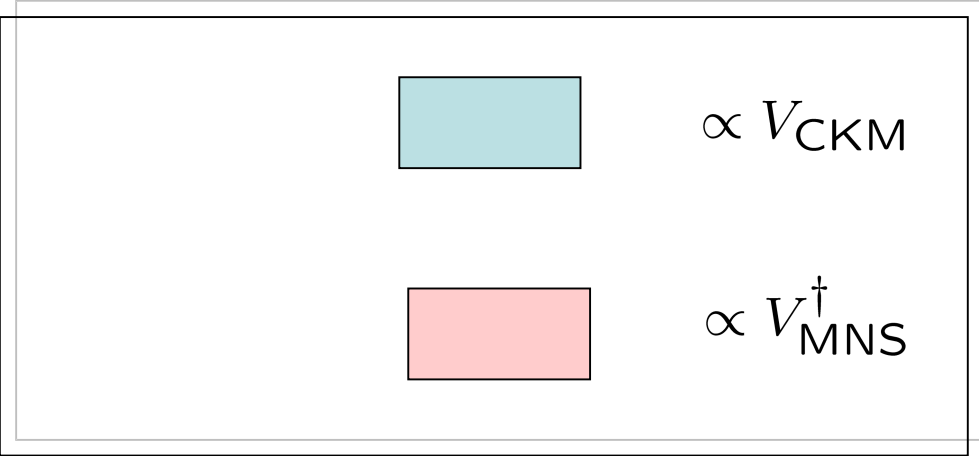
LFV, e/d EDM の flavor mixing effect (Cho, Honda, NH, hep-ph/0409243) etc

§ 4.

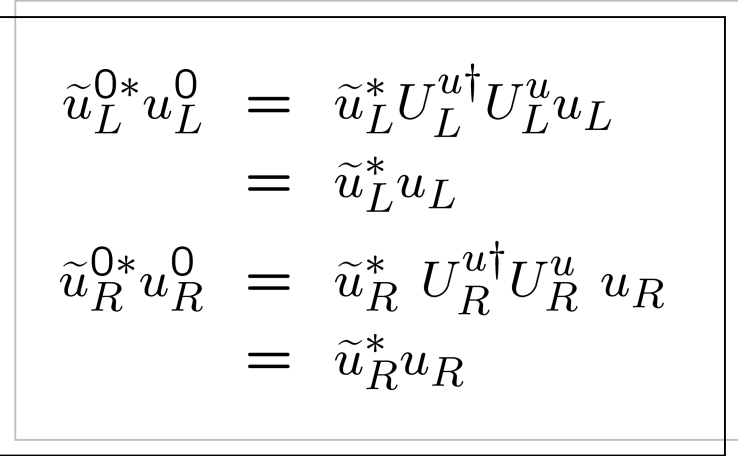
flavor effects of neutron EDM

SUSY SU(5) + right-handed neutrino

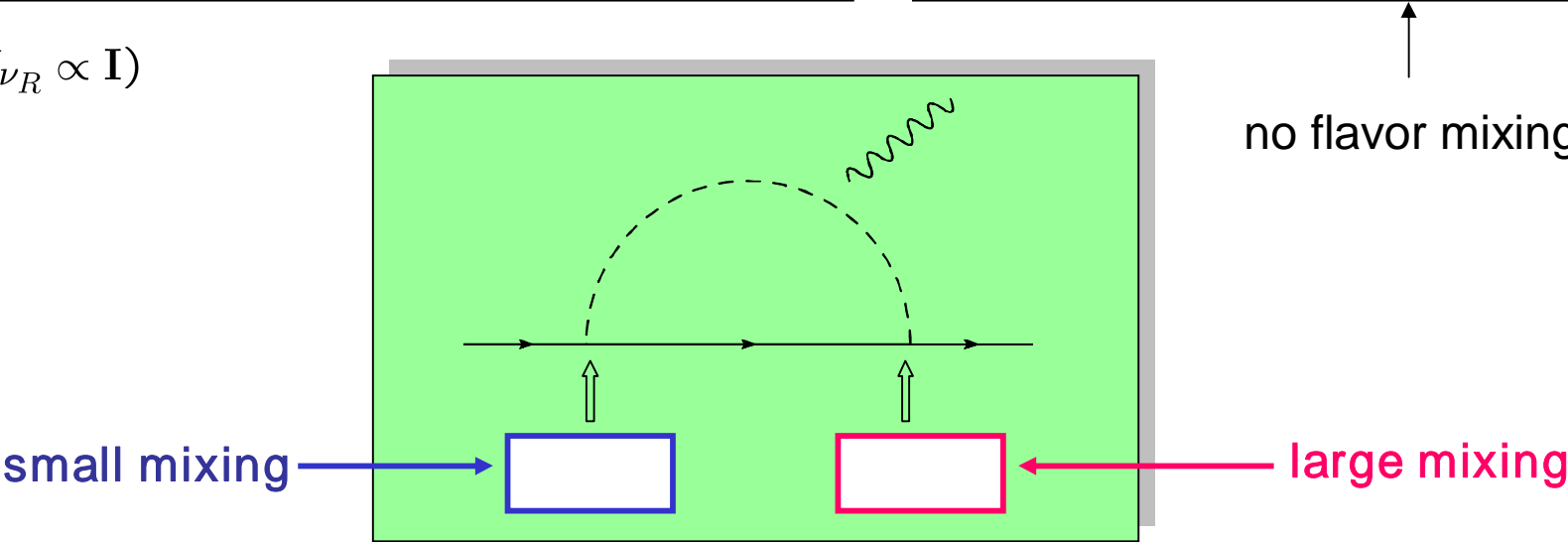
down - sdown



up - sup



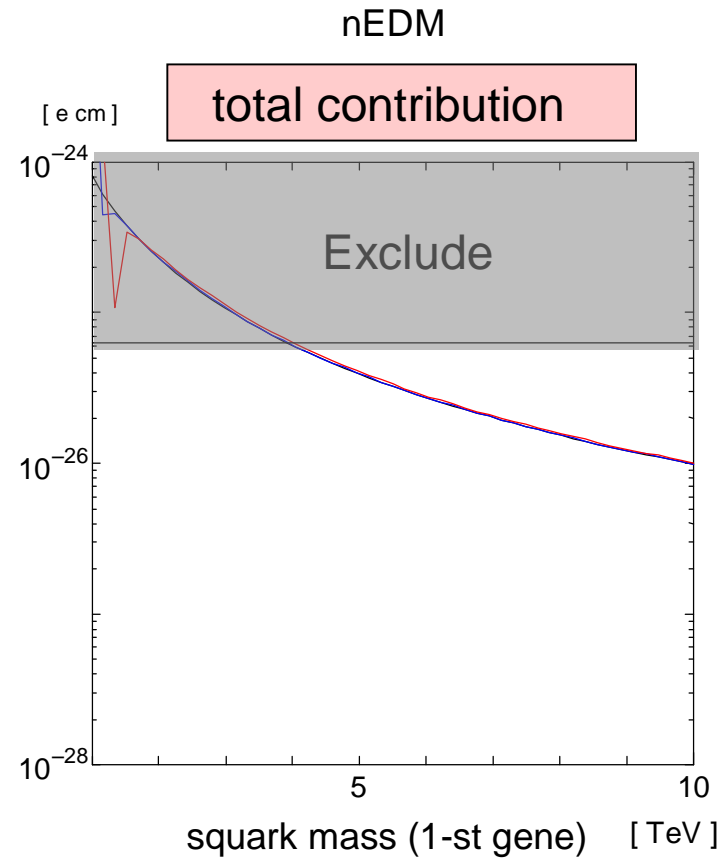
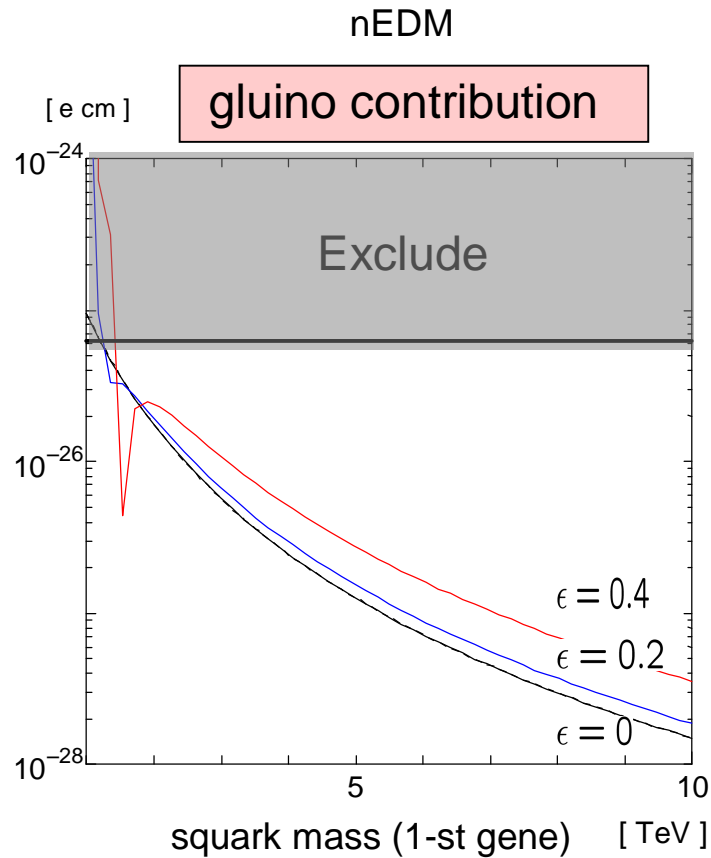
$(M_{\nu_R} \propto \mathbf{I})$



Squark mass dependence



$$\epsilon = \frac{m_{\tilde{d}}^2 - m_{\tilde{s}}^2}{m_{\tilde{d}}^2}$$

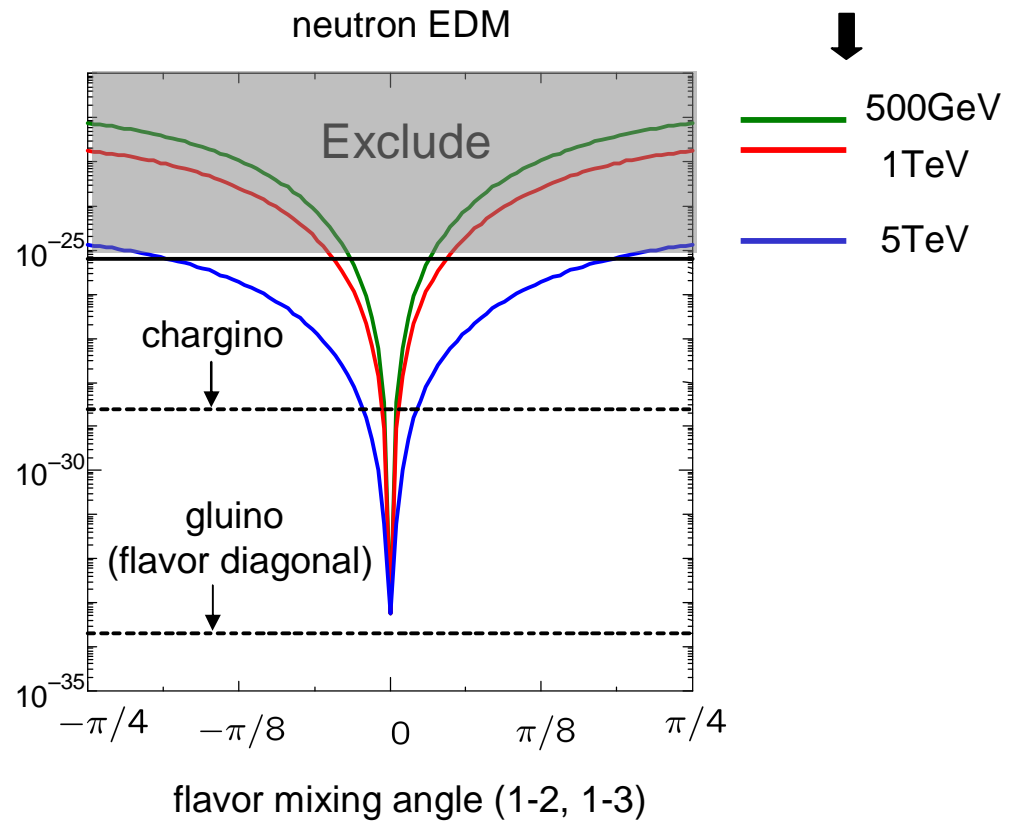
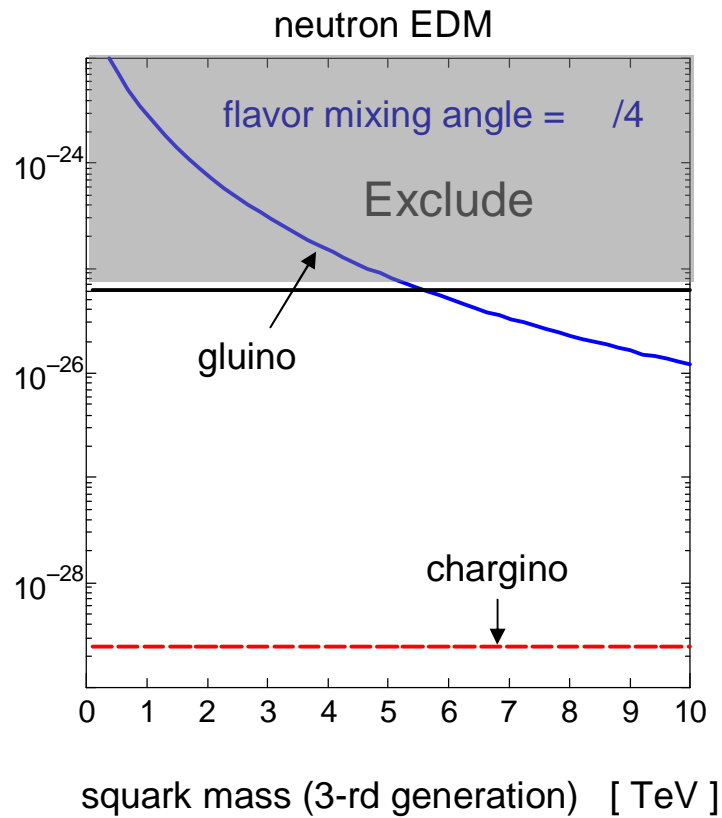


SUSY - decoupling scenario

input

squark mass (1-st & 2-nd gene) = 20 TeV

3-rd gene
squark mass



§ 5.

quark-lepton complementarity

quark-lepton complementarity (QLC)

$$\mathbf{V}_{\text{CKM}} + \mathbf{V}_{\text{MNS}} = \text{bi-maximal?}$$

$$\begin{pmatrix} 13^\circ & 0.2^\circ \\ & 2^\circ \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 32^\circ & <11^\circ \\ & 45^\circ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 45^\circ & 0^\circ \\ & 45^\circ \end{pmatrix}$$

(1): $\mathbf{V}_{\text{CKM}} \mathbf{V}_{\text{MNS}} = \mathbf{V}_{\text{bi max}}$ **origin large mixing (see-saw enhance)**

1st order: $\mathbf{U} = \mathbf{V}_{\text{bimax}}$ (see-saw enhance) $\mathbf{U}_u = \mathbf{I}$ (m_d, m_e : diagonal base)

next order: $\mathbf{U}_l = \mathbf{V}_d (= \mathbf{U}_d) = \mathbf{V}_{\text{CKM}}$ (GUT)

(2): $\mathbf{V}_{\text{MNS}} \mathbf{V}_{\text{CKM}} = \mathbf{V}_{\text{bi max}}$ **lopside (charged lepton origin large mixing)**

1st order: $\mathbf{U}_l^\dagger = \mathbf{V}_{\text{bimax}}, \mathbf{U}_d = \mathbf{I}$ (lopside)

next order: $\mathbf{U}_u = \mathbf{U} = \mathbf{V}_{\text{CKM}}$ (GUT)

(3): $\mathbf{V}_{\text{MNS}} = \mathbf{U}_{23}^{\text{max}} \mathbf{V}_{\text{CKM}}^\dagger \mathbf{U}_{12}^{\text{max}}$

(1) ~ (3) の $\sin^2 \theta_{13}$, $\sin^2 \theta_{12} = \sin^2 \theta_{23} - \sin^2(\theta_{13}/4)$ 等のずれの違いの評価

(ph/0405088, Minakata & Smirnov, ph/0504161, Li, Ma etc.)

quark-lepton complementarity (QLC)

$$V_{CKM} + V_{MNS} = \text{bi-maximal?}$$

$$\begin{pmatrix} 13^\circ & 0.2^\circ \\ & 2^\circ \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 32^\circ & <11^\circ \\ & 45^\circ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 45^\circ & 0^\circ \\ & 45^\circ \end{pmatrix}$$

(1): $V_{CKM} V_{MNS} = V_{\text{bi max}}$ origin large mixing (see-saw enhance)

1st order: $U = V_{\text{bimax}}$ (see-saw enhance) $U_u = I$ (m_d, m_e : diagonal base)

next order: $U_l = V_d (=U_d) = V_{CKM}$ (GUT)

(2): $V_{MNS} V_{CKM} = V_{\text{bi max}}$ lopside (charged lepton origin large mixing)

1st order: $U_l^\dagger = V_{\text{bimax}}, U_d = I$ (lopside)

next order: $U_u = U = V_{CKM}$ (GUT)

(3): $V_{MNS} = U_{23}^{\text{max}} V_{CKM}^\dagger U_{12}^{\text{max}}$

(1) see-saw enhance

(2) lopsided

(1) ~ (3) の $\sin^2 \theta_{13}$, $\sin^2 \theta_{12} = \sin^2 \theta_{23} - \sin^2(\theta_{13}/4)$ 等のずれの違いの評価

(ph/0405088, Minakata & Smirnov, ph/0504161, Li, Ma etc.)

$$\begin{aligned}
V_{\text{CKM}} &= U_u^\dagger U_d^\dagger & Y_u^{\text{diag}} &= U_u^\dagger Y_u V_u, & Y_d^{\text{diag}} &= U_d^\dagger Y_d V_d \\
V_{\text{MNS}} &= U_l^\dagger U_\nu^\dagger & m_\nu^{\text{diag}} &= U_\nu^\dagger m_\nu U_\nu, & Y_l^{\text{diag}} &= U_l^\dagger Y_l V_l
\end{aligned}$$

$$m_\nu = \underbrace{(U_D M_\nu^{D(\text{diag})} V_D^\dagger) M_R^{-1} (V_D^* M_\nu^{D(\text{diag})} U_D^T)}_{\text{(diagonalized by } V_M)} \quad (M_\nu^{D(\text{diag})} = Y_\nu^{\text{diag}} V_u)$$

$$= \underbrace{U_D V_M}_{U_\nu} M_\nu^{\text{diag}} V_M^T U_D^T$$

$$\rightarrow V_{\text{MNS}} = U_l^\dagger U_D V_M$$

$$\text{SU(5) GUT relation: } \underline{Y_e = Y_d^T}, Y_u = Y_u^T$$

$$U_l = V_d^*$$

$$\rightarrow V_d^T U_D V_M$$

$$\text{SO(10) GUT relation: } Y_u = Y$$

$$\rightarrow \underbrace{V_d^T U_u}_{U_d V_{\text{CKM}}^\dagger} V_M$$

(1) : if Y_d is symmetric, $V_d = U_d$

$$\rightarrow V_{\text{MNS}} = V_{\text{CKM}}^\dagger \underline{V_M}$$

-origin bi-maximal (see-saw enhance!)

However, symmetric Y_d is not good, considering $V_{us} \approx \sqrt{\frac{m_d}{m_s}} \approx 3 \sqrt{\frac{m_e}{m_\mu}}$

& $m_\mu/m_e = 3m_s/m_b$ at GUT scale (45 of SU(5), 126 of SO(10) are needed)

$$M_d \approx \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\frac{m_s m_d}{m_b^2}} & \lambda^3 \\ \sqrt{\frac{m_s m_d}{m_b^2}} & \frac{m_s}{m_b} & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow U_d \approx \begin{pmatrix} 1 & \lambda & \lambda^3 \\ \lambda & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_e \approx \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\frac{m_\mu m_e}{m_\tau^2}} & \lambda^3 \\ \sqrt{\frac{m_\mu m_e}{m_\tau^2}} & \frac{m_\mu}{m_\tau} & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow U_e \approx \begin{pmatrix} 1 & \frac{\lambda}{3} & \lambda^3 \\ \frac{\lambda}{3} & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

Thus, phenomenologically preferable mass matrices don't suggest

$$U_l = V_d \quad \theta_{12} = \theta/4 + \theta_c/6 \quad 45^\circ \text{ (no good)}$$

そこで、 M_e, M_d が対角のベースで、まず、どんな m ならQLCがうまく行くのか textureを階層構造ごと(normal, inverted I, inverted II)に調べた。

(ph/0412038, Ferrandis, Pakvasa)

However, symmetric Y_d is not good, considering $V_{us} \approx \sqrt{\frac{m_d}{m_s}} \approx 3 \sqrt{\frac{m_e}{m_\mu}}$

& $m_\mu/m_e = 3m_s/m_b$ at GUT scale (45 of SU(5), 126 of SO(10) are needed)

$$M_d \approx \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\frac{m_s m_d}{m_b^2}} & \lambda^3 \\ \sqrt{\frac{m_s m_d}{m_b^2}} & \frac{m_s}{m_b} & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow U_d \approx \begin{pmatrix} 1 & \lambda & \lambda^3 \\ \lambda & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_e \approx \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{\frac{m_\mu m_e}{m_\tau^2}} & \lambda^3 \\ \sqrt{\frac{m_\mu m_e}{m_\tau^2}} & \frac{m_\mu}{m_\tau} & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow U_d \approx \begin{pmatrix} 1 & \frac{\lambda}{3} & \lambda^3 \\ \frac{\lambda}{3} & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

Thus, phenomenologically preferable mass matrices don't suggest

$$U_l = V_d \quad \theta_{12} = \theta/4 + \theta_c/6 \quad 45^\circ \text{ (no good)}$$

そこで、 M_e, M_d が対角のベースで、まず、どんな m ならQLCがうまく行くのか textureを階層構造ごと(normal, inverted I, inverted II)に調べた。

(ph/0412038, Ferrandis, Pakvasa)

(2) : lopsided $U_l^\dagger = V_d^T = V_{\text{bi max}}, \quad V_M = I$

$$\rightarrow V_{\text{MNS}} = V_{\text{bi max}} U_D$$

$\leftarrow U_D = U_u$

$$V_{\text{MNS}} \underline{U_u^\dagger} = V_{\text{bi max}}$$

V_{CKM}

We must consider GUT (we have used GUT relation till now) ?

flavor Higgs (ex) $U(2)_F$ Higgs takes (1,0) or (1,1) naturally

(ph/0404046, Raidal)

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad L \square y_l (\phi L)(\tilde{\phi} E)H_d$$

0° or 45° is natural mixing angle (lopsided can be induced without GUT)

(2) :lopsided

1st order: $U_v = I, U_u = I, U_l^\dagger = V_{bi\max}, U_d = I$

next order: $Y_u \rightarrow \underline{V_{CKM}^\dagger} Y_u V_{CKM} \rightarrow V_{MNS} = U_l^\dagger U_v = V_{bi\max} V_{CKM}^\dagger \quad (V_{MNS} V_{CKM} = V_{bi\max})$

$U_u^\dagger = V_{CKM}$ \uparrow $Y_v = Y_u$

or

$Y_l = Y_d^T$

$Y_d \rightarrow \underline{V_{CKM}} Y_d V_{CKM}^\dagger$
 $U_d^\dagger = V_{CKM}^\dagger$

$Y_l \rightarrow \underline{V_{CKM}^*} Y_l V_{CKM}^T \rightarrow V_{MNS} = U_l^\dagger U_v = V_{bi\max} V_{CKM}^T \quad (V_{MNS} V_{CKM} = V_{bi\max})$
 $U_l^\dagger = V_{bi\max} V_{CKM}^T$

phenomenology (LFV)

LFV ($l_i \rightarrow l_j$)

(ph/0503122, Cheung, Kang, Lee)

$$|m_{ij}|^2 \approx -\frac{1}{8\pi^2} (3m_0^2 + A_0^2) \underbrace{(Y'_\nu Y'^{\dagger}_\nu)} \log \frac{M_G}{M_R}$$

Y'_ν : charged lepton & M_R diagonal base Y

(1) : see-saw enhance

$$Y'_\nu = V_{\text{CKM}}^\dagger Y_\nu^{\text{diag}} V_\nu^T V_R \quad (V_R : \text{diagonalize } M_R)$$

$$\rightarrow Y'_\nu Y'^{\dagger}_\nu = V_{\text{CKM}}^\dagger (Y_\nu^{\text{diag}})^2 V_{\text{CKM}}$$

(2) : lopsided

$$Y'_\nu Y'^{\dagger}_\nu = V_{\text{bi max}} V_{\text{CKM}}^\dagger (Y_\nu^{\text{diag}})^2 V_{\text{CKM}} V_{\text{bi max}}^\dagger$$

(3) : mixed

$$Y'_\nu Y'^{\dagger}_\nu = U_{23}^{\text{max}} V_{\text{CKM}}^\dagger (Y_\nu^{\text{diag}})^2 V_{\text{CKM}} U_{23}^{\text{max}\dagger}$$

assuming, $Y_\nu^{\text{diag}} = \text{diag.}(\lambda^*, \lambda^*, 1)$ calculate $\text{Br}(\mu \rightarrow e \gamma) : \text{Br}(\mu \rightarrow e e) : \text{Br}(e \rightarrow e \gamma)$

model

(ph/0407139, Frampton, Mohapatra, ph/0504007, Antusch, King, Mohapatra)

$SU(4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ with $U(1)_{Le-L\mu-L}$

($[SU(3)]^3$)

Higgs: $\phi = (0, 2, 2)$, $\chi = (4, 2, 1)$, $\bar{\chi} = (\bar{4}, 2, 1)$, $\chi^c = (\bar{4}, 1, 2)$, $\bar{\chi}^c = (4, 1, 2)$,

quark/lepton: $\Psi = (4, 2, 1)$, $\Psi^c = (\bar{4}, 1, 2)$ $\langle \phi \rangle = \begin{pmatrix} \kappa & 0 \\ 0 & \kappa' \end{pmatrix}$, $\langle \chi^c \rangle = \langle \bar{\chi}^c \rangle = v_R$, $\langle \chi \rangle = \langle \bar{\chi} \rangle = 0$

$$W_Y = h_{ij} \Psi_i \phi \Psi_j^c + f_{ij} (\Psi_i \bar{\chi} S_j^c + \Psi_i^c \bar{\chi}^c S_j) + \mu_{ij} S_i S_j$$

$$\mu = \begin{pmatrix} 0 & \mu_1 & \mu_2 \\ \mu_1 & 0 & 0 \\ \mu_2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad M_u^0 = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{23} & m_{33} \end{pmatrix}, \quad \cot \beta M_u^0 = M_d^0 = M_l^0$$

$U(1)_{Le-L\mu-L} : S(1), (1), {}^c(-1)$

$$M_\nu = \begin{pmatrix} 0 & M_u^0 & 0 \\ M_u^0 & 0 & f v_R \\ 0 & f v_R & \mu \end{pmatrix} \rightarrow m_\nu = \begin{pmatrix} 0 & * & * \\ * & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{double see-saw})$$

for realistic QLC, we also introduce Higgs fields ($U(1)_{Le-L\mu-L}$ charge +2) as

$$\delta_R = (15, 1, 3), \quad \delta_L = (15, 3, 1), \quad \sigma = (15, 1, 1) \quad (\langle \delta_R \rangle \square \langle \sigma \rangle \square \langle \chi^c \rangle, \langle \delta_R \rangle = 0)$$

$$\rightarrow \delta M_d = \begin{pmatrix} 0 & \delta' & 0 \\ \delta' & m_u^0 + \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \delta M_d = \begin{pmatrix} m_0 & -3\delta' & 0 \\ -3\delta' & m_u^0 - 3\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

§ 6.

summary & discussion

質量階層性: $m_u : m_c : m_t \propto \lambda^{7-8} : \lambda^4 : 1$

$m_d : m_s : m_b \propto m_e : m_\mu : m_\tau \propto \lambda^{4-5} : \lambda^2 : 1$

世代間混合: **quark小混合** **lepton大混合**

§ 2 . 特有の効果: see-saw enhance、繰り込み群(RGE)効果

(質量階層性に関しては分からない。

世代間混合は全て小さいが、レプトン系だけは 特有の性質(マヨラナ、縮退質量)のために大きくなる。)

§ 3 . GUT: $10_i = (Q, \bar{U}, \bar{E})_i$ が階層性の起源でO(1)係数の補正を考えるとOK。

10が起源になるメカニズムやモデルを、flavor symmetry、composite模型、余次元理論で考えた。

O(1)係数の補正について、具体例を示し、統計的解釈を試みた。

V_{MNS} の精密測定のphaseに入った。

1 . EDMのflavor effectについてreviewした。

2 . QLC $V_{CKM} + V_{MNS} = \text{bi-maximal?}$

について現在の状況をreviewした。

$$\begin{pmatrix} 13^\circ & 0.2^\circ \\ & 2^\circ \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 32^\circ & <11^\circ \\ & 45^\circ \end{pmatrix}$$