Unification of Lμ - Lτ and the standard model gauge group

令和3年11月6日

佐藤丈（横浜国立大学）

目次

1.　導入

- 標準理論

  よく出来ている。加速器実験は18のパラメタで全部説明。

- 現象論的な不備

  ニュートリノ振動（ニュートリノ質量とレプトン混合）　暗黒物質　粒子優勢

  $g_\mu-2$　リチウム問題　Hubble-tension　IceCube-Gap

- 理論的な不満

  パラメタが多い　電荷の量子化　ゲージ群の種類　三世代

現代素粒子の標準理論

SU(3)×SU(2)×U(1)　ゲージ相互作用

Lepton

1st generation		
$\cancel{\nu_{eR}^{?}}$	$\cancel{\nu_{\mu R}^{?}}$	$\cancel{\nu_{\tau R}^{?}}$
ν_{eL}	$\nu_{\mu L}$	$\nu_{\tau L}$
e_R	μ_R	τ_R
e_L	μ_L	τ_L
$u_R^{r,g,b}$	$c_R^{r,g,b}$	$t_R^{r,g,b}$
$u_L^{r,g,b}$	$c_L^{r,g,b}$	$t_L^{r,g,b}$
$d_R^{r,g,b}$	$s_R^{r,g,b}$	$b_R^{r,g,b}$
$d_L^{r,g,b}$	$s_L^{r,g,b}$	$b_L^{r,g,b}$

Quark

Higgs

標準理論では無いことになっている

加速器実験などは全部説明できる、　が、

ニュートリノ振動（質量）

暗黒物質

粒子優勢

ミューオン異常磁気能率！？

などは説明できない。

説明＋検証を

現象論的な問題

標準模型を拡張　＝粒子の追加＝相互作用の追加

単純に粒子の追加
超対称性
新たなゲージ群　（追加とか大統一理論）
　最近Lμ-Lτ模型に興味

現代素粒子の標準理論

$SU(3)\times SU(2)\times U(1)$ －＞$SU(5)$、$SO(10), E_6$

1st generation

Lepton

$\nu_{e\mathrm{R}}^{?}$	$\nu_{\mu\mathrm{R}}^{?}$	$\nu_{\tau\mathrm{R}}^{?}$
$\nu_{e\mathrm{L}}$	$\nu_{\mu\mathrm{L}}$	$\nu_{\tau\mathrm{L}}$
e_R	μ_R	τ_R
e_L	μ_L	τ_L
$u_\mathrm{R}^{r,g,b}$	$c_\mathrm{R}^{r,g,b}$	$t_\mathrm{R}^{r,g,b}$
$u_\mathrm{L}^{r,g,b}$	$c_\mathrm{L}^{r,g,b}$	$t_\mathrm{L}^{r,g,b}$
$d_\mathrm{R}^{r,g,b}$	$s_\mathrm{R}^{r,g,b}$	$b_\mathrm{R}^{r,g,b}$
$d_\mathrm{L}^{r,g,b}$	$s_\mathrm{L}^{r,g,b}$	$b_\mathrm{L}^{r,g,b}$

Quark

粒子が多すぎる？三種類もの力？

大統一理論　一つの力、一世代に一つ/二つの粒子

なぜ「同じ粒子」が「三つ」？

さらなる統一？

SU(5)

$$\mathbf{10}_1 = (u^c, \{u_L, d_L\}, e^c)\ \mathbf{5}_1^* = (d^c, \{\nu_{Le}, e_L\}),$$
$$\mathbf{10}_2 = (c^c, \{c_L, s_L\}, \mu^c)\ \mathbf{5}_2^* = (s^c, \{\nu_{L\mu}, \mu_L\}),$$
$$\mathbf{10}_3 = (t^c, \{t_L, b_L\}, \tau^c)\ \mathbf{5}_3^* = (b^c, \{\nu_{L\tau}, \tau_L\}).$$
$$\mathrm{SO}(10)\mathbf{16} = \mathbf{10} + \mathbf{5}^* + 1(\nu_R^c)$$

電荷の量子化は説明できる

理論的な不満

大統一理論によるゲージ群の単一化
　電荷の量子化も

三世代？
　世代対称性　(family symmetry)
　Lμ-Lτ も世代対称性？

$$E_7/SU(5) \times U(1)^3$$

に基づくCoset Space Unification

昨年のこの研究会で
溝口さん「$\mu - \tau$ も含めて統一しないの？」

2. Coset Space Unification

(Phys.Lett.B 430 (1998) 127-131)とその周辺

- Supersymmetric Nonlinear Realization

  ボソンとフェルミオン。

$$E_7/SU(5) \times U(1)^3$$

- 三世代のE7orSU(5)大統一理論

  背後にE7があるとしたSU(5)大統一理論と見なせる。

  三世代のフェルミオン(Superfields。 RH ν含む)が存在。

  現象論的にもそこそこ上手くいく。

Particle Content

Table 1
U(1) charges of the NG multiplets. The $U(1)_1$, $U(1)_2$ and $U(1)_3$ are the unbroken U(1)'s of coset-subspaces $E_7/E_6 \times U(1)$, $E_6/SO(10) \times U(1)$ and $SO(10)/SU(5) \times U(1)$, respectively

SU(5)	$U(1)_1$	$U(1)_2$	$U(1)_3$
$\mathbf{10}_1$	0	0	4
$\mathbf{10}_2$	0	3	−1
$\mathbf{10}_3$	2	−1	−1
$\mathbf{5}_1^*$	0	3	3
$\mathbf{5}_2^*$	2	−1	3
$\mathbf{5}_3^*$	2	2	−2
$\mathbf{1}_1$	0	3	−5
$\mathbf{1}_2$	2	−1	−5
$\mathbf{1}_3$	2	−4	0
$\mathbf{5}$	2	2	2

$$E_7 \underset{\epsilon_0}{\rightarrow} E_6 \underset{\epsilon_1}{\rightarrow} SO(10) \underset{\epsilon_2}{\rightarrow} SU(5)$$

NonLinear Realization

九後さんの下巻参照

対称性G -> Hに対しNambu-GoldstoneモードはG/Hの商空間に住む粒子として現れる

例　$SU(2)_L * SU(2)_R$（＝G)対称な理論が$SU(2)_{V(=L+R)}$(=H)に破れるchiral 対称性の破れ

商空間はHの3表現　＝　パイ中間子

G=SO(4) , H=SO(3)、SO(4)/SO(3)はSO(3)の3表現＝パイ中間子

超対称化すると商空間の「半分」が残る。「半分」の恣意性は高い

ボソンだけでなくフェルミオンも残る（超対称性）

NPB227（1983）503、PTP72(1984)313、PTP75(1986)386

Particle Content

Table 1
U(1) charges of the NG multiplets. The $U(1)_1$, $U(1)_2$ and $U(1)_3$ are the unbroken U(1)'s of coset-subspaces $E_7/E_6\times U(1)$, $E_6/SO(10)\times U(1)$ and $SO(10)/SU(5)\times U(1)$, respectively

SU(5)	$U(1)_1$	$U(1)_2$	$U(1)_3$
$\mathbf{10}_1$	0	0	4
$\mathbf{10}_2$	0	3	−1
$\mathbf{10}_3$	2	−1	−1
$\mathbf{5}_1^*$	0	3	3
$\mathbf{5}_2^*$	2	−1	3
$\mathbf{5}_3^*$	2	2	−2
$\mathbf{1}_1$	0	3	−5
$\mathbf{1}_2$	2	−1	−5
$\mathbf{1}_3$	2	−4	0
$\mathbf{5}$	2	2	2

$$E_7 \supset E_6 \times U(1)_1$$

$$133 = 78(0) + 1(0) + 27(2) + \overline{27}(-2)$$

半分残る

$$E_6 \supset SO(10) \times U(1)_2$$

$$78 = 45(0) + 1(0) + 16(3) + \overline{16}(-3)$$

半分残る

$$27 = 16(-1) + 10(2) + 1(-4)$$

$$27 = 10_3 + 5_3^* + 1_2 + 5 + 5_2^* + 1_3 \quad U(1)_1=2$$

$$16 = 10_2 + 5_1^* + 1_1 \quad U(1)_1=0,\ U(1)_2=3$$

$$SO(10) \supset SU(5) \times U(1)_3$$

$$45 = 24(0) + 1(0) + 10(4) + \overline{10}(-4)$$

半分残る

$$10 = 10_1 \quad U(1)_{1,2}=0,\ U(1)_3=4$$

Particle Content

Table 1

U(1) charges of the NG multiplets. The $U(1)_1$, $U(1)_2$ and $U(1)_3$ are the unbroken U(1)'s of coset-subspaces $E_7/E_6\times U(1)$, $E_6/SO(10)\times U(1)$ and $SO(10)/SU(5)\times U(1)$, respectively

SU(5)	$U(1)_1$	$U(1)_2$	$U(1)_3$
$\mathbf{10}_1$	0	0	4
$\mathbf{10}_2$	0	3	-1
$\mathbf{10}_3$	2	-1	-1
$\mathbf{5}^*_1$	0	3	3
$\mathbf{5}^*_2$	2	-1	3
$\mathbf{5}^*_3$	2	2	-2
$\mathbf{1}_1$	0	3	-5
$\mathbf{1}_2$	2	-1	-5
$\mathbf{1}_3$	2	-4	0
$\mathbf{5}$	2	2	2

解釈

Breaking Chain

$$E_7 \xrightarrow[\epsilon_0]{} E_6 \xrightarrow[\epsilon_1]{} SO(10) \xrightarrow[\epsilon_2]{} SU(5)$$

Family Symmetry

$$q_i \equiv (Q_{i1}, Q_{i2}, Q_{i3})$$

Fermion質量

C.D. Froggatt and H.B. Nielsen, Nucl. Phys.B147(1979) 277

288 *C.D. Froggatt, H.B. Nielsen / Hierarchy of quark masses*

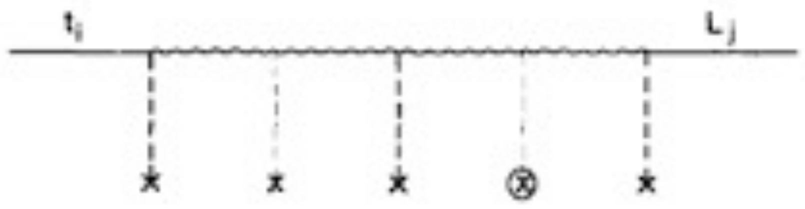


Fig. 1. Feynman diagram which generates the quark mass matrix element $M_{t,ij}$. Full lines represent quarks and wavy lines represent super heavy fermions. The dashed lines represent Higgs tadpoles as follows: $---\times\ \langle\phi_1\rangle$, and $---\otimes\ \langle\phi_2\rangle$.

Effetive Operator : 全体として要求されている対称性を満たす

例：Weiberg演算子(Seesawによって導出されるニュートリノのマヨラナ質量項)

$$\mathcal{L} = \frac{1}{\Lambda} LHLH$$

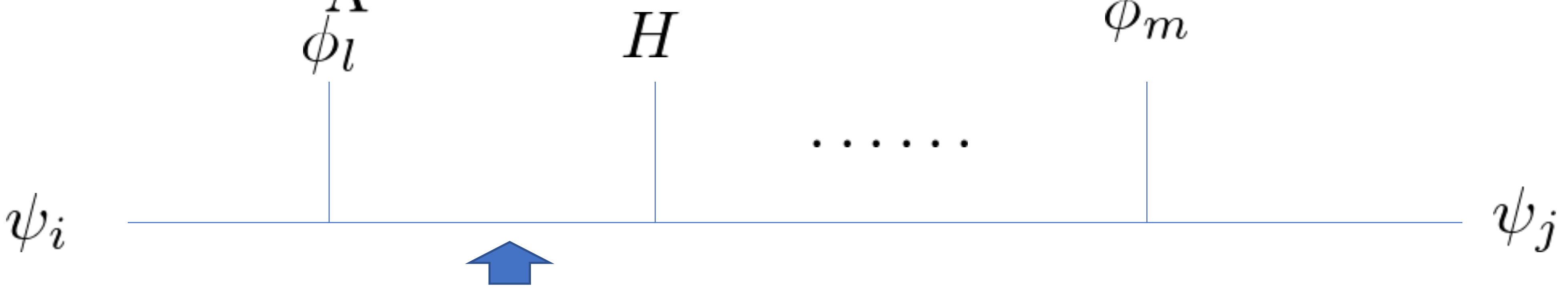
標準理論のゲージ対称性を満たす
Λは背後にある物理を表す。具体例は右巻きニュートリノの質量

Fermion質量

C.D. Froggatt and H.B. Nielsen, Nucl. Phys.B147(1979) 277

Family対称性まで含めて全体として対称性を満たす演算子を考える。

$$\mathcal{L} = \Pi_k \left(\frac{\phi_k}{\Lambda}\right)^{n_k} \psi_i \psi_j H \qquad \Sigma_k n_k q_k + q_i + q_k + q_H = 0$$



質量Mの粒子が飛ぶ。
Λは結合定数の大きさ
込みでの表記的な値

$$\mathcal{L} = \frac{1}{\Lambda} LHLH \to \frac{<H>}{\Lambda} H\nu\nu \to \epsilon <H> \nu\nu = m_\nu \nu\nu$$

に対応して

$$\mathcal{L} = \Pi_k \left(\frac{\phi_k}{\Lambda}\right)^{n_k} \psi_i \psi_j H \to \Pi_k \left(\frac{<\phi_k>}{\Lambda}\right)^{n_k} \psi_i \psi_j H \to \Pi_k \epsilon_k^{n_k} \psi_i \psi_j H$$

$\Pi_k \epsilon_k^{n_k}$ は i, j の組による ➡ $y_{ij} \psi_i \psi_j H$ 湯川結合の「予言」

ϵ_k は対称性の破れと湯川結合の小ささを表すパラメタとなる

今の模型 $E_7 \xrightarrow[\epsilon_0]{} E_6 \xrightarrow[\epsilon_1]{} SO(10) \xrightarrow[\epsilon_2]{} SU(5)$

$\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2$: E_7 の表現の要素であり、この破れを引き起こす

Particle Content

Table 1

U(1) charges of the NG multiplets. The $U(1)_1$, $U(1)_2$ and $U(1)_3$ are the unbroken U(1)'s of coset-subspaces $E_7/E_6\times U(1)$, $E_6/SO(10)\times U(1)$ and $SO(10)/SU(5)\times U(1)$, respectively

SU(5)	$U(1)_1$	$U(1)_2$	$U(1)_3$
$\mathbf{10}_1$	0	0	4
$\mathbf{10}_2$	0	3	-1
$\mathbf{10}_3$	2	-1	-1
$\mathbf{5}_1^*$	0	3	3
$\mathbf{5}_2^*$	2	-1	3
$\mathbf{5}_3^*$	2	2	-2
$\mathbf{1}_1$	0	3	-5
$\mathbf{1}_2$	2	-1	-5
$\mathbf{1}_3$	2	-4	0
$\mathbf{5}$	2	2	2

$$E_7 \underset{\epsilon_0}{\rightarrow} E_6 \underset{\epsilon_1}{\rightarrow} SO(10) \underset{\epsilon_2}{\rightarrow} SU(5)$$

$$\epsilon_0(-3,0,0), \quad \bar{\epsilon}_0(3,0,0),$$

$$\epsilon_1(-1,-4,0), \quad \bar{\epsilon}_1(1,4,0)$$

$$\epsilon_2(-1,-1,-5), \quad \bar{\epsilon}_2(1,1,5)$$

$$E_7 \supset E_6 \times U(1)$$

$$56 = 1(3) + 1(-3) + 27(-1) + \overline{27}(1)$$

$$133 = 78(0) + 1(0) + 27(2) + \overline{27}(-2)$$

$$E_6 \supset SO(10) \times U(1)$$

$$27 = 1(-4) + 10(2) + 16(-1)$$

Family Symmetry

Particle Content

Table 1

U(1) charges of the NG multiplets. The $U(1)_1$, $U(1)_2$ and $U(1)_3$ are the unbroken U(1)'s of coset-subspaces $E_7/E_6 \times U(1)$, $E_6/SO(10) \times U(1)$ and $SO(10)/SU(5) \times U(1)$, respectively

SU(5)	$U(1)_1$	$U(1)_2$	$U(1)_3$
$\mathbf{10}_1$	0	0	4
$\mathbf{10}_2$	0	3	-1
$\mathbf{10}_3$	2	-1	-1
$\mathbf{5}_1^*$	0	3	3
$\mathbf{5}_2^*$	2	-1	3
$\mathbf{5}_3^*$	2	2	-2
$\mathbf{1}_1$	0	3	-5
$\mathbf{1}_2$	2	-1	-5
$\mathbf{1}_3$	2	-4	0
$\mathbf{5}$	2	2	2

$$E_7 \underset{\epsilon_0}{\rightarrow} E_6 \underset{\epsilon_1}{\rightarrow} SO(10) \underset{\epsilon_2}{\rightarrow} SU(5)$$

$$\epsilon_0(-3,0,0), \quad \bar{\epsilon}_0(3,0,0),$$

$$\epsilon_1(-1,-4,0), \quad \bar{\epsilon}_1(1,4,0)$$

$$\epsilon_2(-1,-1,-5), \quad \bar{\epsilon}_2(1,1,5)$$

$$E_7 \supset E_6 \times U(1)$$

$$56 = 1(3) + 1(-3) + 27(-1) + \overline{27}(1)$$

$$133 = 78(0) + 1(0) + 27(2) + \overline{27}(-2)$$

$$E_6 \supset SO(10) \times U(1)$$

$$27 = 1(-4) + 10(2) + 16(-1)$$

Family Symmetryの破れ

56表現が司る、、かも

$$E_8 \supset E7 \times SU(2)$$

$$248 = (133,1) + (1,3) + (56,2)$$

Higgsの指定

$$\mathrm{E}_6 \supset \mathrm{SO}(10) \times \mathrm{U}(1)$$

$$27 = 1(-4) + 10(2) + 16(-1)$$

5の候補が一つと5*の候補が二つ

$$\mathbf{5}_H \ (2,2,2)$$

$$\mathbf{5}_H^* = \sin\theta \mathbf{5}_{16}^* + \cos\theta \mathbf{5}_{10}^* \qquad \mathbf{5}_{16}^*(2,-1,3) \quad \text{and} \quad \mathbf{5}_{10}^*(2,2,-2)$$

線形結合

湯川結合

一般に

$$W = W_U + W_D + W_E + W_\nu ,$$

$$W_U = \sum_{ij} a_{ij} Y_{Uij} \mathbf{10}_i \mathbf{10}_j \mathbf{5}_H ,$$

$$W_D = W_E = \sum_{ij} b_{ij} Y_{D/Eij} \mathbf{5}_i^* \mathbf{10}_j \mathbf{5}_H^* ,$$

$$W_\nu = \sum_{ij} c_{ij} Y_{\nu ij} \mathbf{5}_i^* \mathbf{1}_j \mathbf{5}_H ,$$

$$Y_U \simeq \begin{pmatrix} \epsilon_2^2 & \epsilon_1\epsilon_2 & \epsilon_0\epsilon_2 \\ \epsilon_1\epsilon_2 & \epsilon_1^2 & \epsilon_0\epsilon_1 \\ \epsilon_0\epsilon_2 & \epsilon_0\epsilon_1 & \epsilon_0^2 \end{pmatrix},$$

$$Y_{D/E} \simeq \begin{pmatrix} \epsilon_1\epsilon_2\cos\theta & \epsilon_1^2\cos\theta & \epsilon_0\epsilon_1\cos\theta \\ \epsilon_0\epsilon_2\cos\theta & \epsilon_0\epsilon_1\cos\theta & \epsilon_0^2\cos\theta \\ \epsilon_0\epsilon_2\sin\theta & \epsilon_0\epsilon_1\sin\theta & \epsilon_0^2\sin\theta \end{pmatrix},$$

$$Y_\nu \simeq \begin{pmatrix} \epsilon_1^2 & \epsilon_0\epsilon_1 & \epsilon_0\epsilon_2 \\ \epsilon_0\epsilon_1 & \epsilon_0^2 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_0^2 \end{pmatrix}.$$

これに対し

$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} \sim 0.1, \quad \frac{\epsilon_2}{\epsilon_0} \sim 0.01 \quad \text{and} \quad \tan\theta \sim 1$ を仮定

$$M_{\nu_R} = \frac{1}{M_G}\begin{pmatrix} \epsilon_1^2 s_{\bar{2}}^2 & \epsilon_0\epsilon_1 s_{\bar{2}}^2 & \epsilon_0\epsilon_1 s_{\bar{1}} s_{\bar{2}} \\ \epsilon_0\epsilon_1 s_{\bar{2}}^2 & \epsilon_0^2 s_{\bar{2}}^2 & \epsilon_0^2 s_{\bar{1}} s_{\bar{2}} \\ \epsilon_0\epsilon_1 s_{\bar{1}} s_{\bar{2}} & \epsilon_0^2 s_{\bar{1}} s_{\bar{2}} & \epsilon_0^2 s_{\bar{1}}^2 \end{pmatrix}$$

と併せてO(1)パラメタの範囲でうまくいく

もう少し一般化して“Unparallel Family Structure” Lopsidedに負けた

Phys.Lett.B 493 (2000) 356-365

	I	II
Q_{l_3}	A	A
Q_{l_2}	A	A
Q_{l_1}	$A+1$	A

$$M_{\nu_L} \sim \begin{pmatrix} \epsilon^2 & \epsilon & \epsilon \\ \epsilon & 1 & 1 \\ \epsilon & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Mとτは元々同じ → 大きな混合

3. Unification of Lμ-Lτ and the standard model gauge group　2106.01520

最近Lμ-Lτ模型に興味　これも含めて大大統一理論を作りたい

大統一理論はクオークとレプトンを同列に扱う　VS　LμーLτ模型は特定のレプトンを特別視

一見無理そう

一方で、Coset Space UnificationにはU(1)が沢山存在する。

→　なんとか有効活用したい。

→　やってみた

方針

SU(5)	$U(1)_1$	$U(1)_2$	$U(1)_3$
$\mathbf{10}_1$	0	0	4
$\mathbf{10}_2$	0	3	-1
$\mathbf{10}_3$	2	-1	-1
$\mathbf{5}^*_1$	0	3	3
$\mathbf{5}^*_2$	2	-1	3
$\mathbf{5}^*_3$	2	2	-2
$\mathbf{1}_1$	0	3	-5
$\mathbf{1}_2$	2	-1	-5
$\mathbf{1}_3$	2	-4	0

元の電荷 q_i

U(1)は線形結合を取り直せる
→lepton doubletは5＊に入っているので
5＊のU(1)電荷が0, 1, −1になるように線形結合を取る。

新しい電荷

$$Q_i = a_{ij} q_j$$

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{5}{4} & -\frac{3}{4} \\ 0 & -\frac{1}{4} & \frac{1}{4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{12} & \frac{1}{4} \\ 0 & \frac{5}{4} & -\frac{3}{4} \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{12} & \frac{1}{4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & 1 \\ -\frac{5}{3} & -\frac{5}{6} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 \end{pmatrix}.$$

3行目がLμ−Lτを与える

1,2行目もE7の破れを考えると一意に決まる

一つ目

$$\begin{aligned} E_7 &\longrightarrow E_6 \times U(1)_1 \longrightarrow SU(5) \times SU(2) \times U(1)_1 \times U(1)_2 \\ &\longrightarrow SU(5) \times U(1)_1 \times U(1)_2 \times U(1)_{3=\mu-\tau} \end{aligned} \quad (6)$$

SU(5)	$U(1)_1$	$U(1)_2$	$U(1)_{3=\mu-\tau}$
$\mathbf{10}_1$	0	3	1
$\mathbf{10}_2$	0	3	-1
$\mathbf{10}_3$	2	-2	0
$\mathbf{5}^*_1$	0	6	0
$\mathbf{5}^*_2$	2	1	1
$\mathbf{5}^*_3$	2	1	-1
$\mathbf{1}_1$	0	0	-2
$\mathbf{1}_2$	2	-5	-1
$\mathbf{1}_3$	2	-5	1

TABLE II: U(1) charges of the NG multiplets in breaking (3). The $U(1)_1$, $U(1)_2$ and $U(1)_3$ are the unbroken U(1)'s of coset-subspaces $E_7/E_6\times U(1)$, $E_6/SU(5)\times SU(2)\times U(1)$ and $SU(2)/U(1)$, respectively.

In this chain both ($\mathbf{5}^*_3$, $\mathbf{5}^*_2$) and ($\mathbf{10}_2$,$\mathbf{10}_1$) appear as SU(2) doublet at the second breaking.

SU(5)多重項のE7多重項への埋め込み方は昔の模型と同じになるように定義

この例は純粋にU(1)の線形変換

二つ目

SU(5)	$U(1)_1$	$U(1)_2$	$U(1)_{3=\mu-\tau}$
$\mathbf{10}_1$	1	-1	1
$\mathbf{10}_2$	0	4	0
$\mathbf{10}_3$	1	-1	-1
$\mathbf{5}^*_1$	1	3	1
$\mathbf{5}^*_2$	2	-2	0
$\mathbf{5}^*_3$	1	3	-1
$\mathbf{1}_1$	1	-5	1
$\mathbf{1}_2$	0	0	-2
$\mathbf{1}_3$	1	-5	-1

TABLE III: U(1) charges of the NG multiplets in breaking (4). The $U(1)_1$, $U(1)_2$ and $U(1)_3$ are the unbroken U(1)'s of coset-subspaces $E_7/SO(10)\times SU(2)\times U(1)$, $SO(10)/SU(5)\times U(1)$ and $SU(2)/U(1)$, respectively.

$$
\begin{aligned}
E_7 &\longrightarrow SO(10)\times SU(2)\times U(1)_1 \\
&\longrightarrow SU(5)\times SU(2)\times U(1)_1\times U(1)_2 \\
&\longrightarrow SU(5)\times U(1)_1\times U(1)_2\times U(1)_{3=\mu-\tau} \qquad (7)
\end{aligned}
$$

both SO(10) $\mathbf{16}=(\mathbf{10}_1+\mathbf{5}^*_1+\mathbf{1}_1)$ and $(\mathbf{10}_3+\mathbf{5}^*_3+\mathbf{1}_3)$ form an SU(2) doublet at the first breaking. Note that U(1)

SU(5)多重項のE7多重項への埋め込み方は昔の模型と同じになるように定義

この例はU(1)の線形変換になっていない。

RH ν (1_1)の電荷が単純な線形変換の場合と符号が逆転
本質的に独立な破れのパターンであると言うこと。
SUSY Nonlinear Modelでは表現ｒを取るかｒ＊を取るかについて常に不定生が存在

三つ目

$$
\begin{aligned}
E_7 &\longrightarrow (SU(6)\times SU(2)\times U(1)_1) \\
&\longrightarrow SU(5)\times SU(2)\times U(1)_1\times U(1)_2 \\
&\longrightarrow SU(5)\times U(1)_1\times U(1)_2\times U(1)_{3=\mu-\tau}
\end{aligned}
$$

SU(5)	$U(1)_1$	$U(1)_2$	$U(1)_{3=\mu-\tau}$
$\mathbf{10}_1$	4	2	0
$\mathbf{10}_2$	0	-3	1
$\mathbf{10}_3$	0	-3	-1
$\mathbf{5}^*_1$	4	-1	1
$\mathbf{5}^*_2$	4	-1	-1
$\mathbf{5}^*_3$	0	-6	0
$\mathbf{1}_1$	-4	-5	-1
$\mathbf{1}_2$	-4	-5	1
$\mathbf{1}_3$	0	0	-2

TABLE IV: U(1) charges of the NG multiplets in breaking (5). The $U(1)_1$, $U(1)_2$ and $U(1)_3$ are the unbroken U(1)'s of coset-subspaces $E_7/SU(6)\times SU(2)\times U(1)$, $SU(6)/SU(5)\times SU(1)$ and $SU(2)/U(1)$, respectively.

In this chain both $(\mathbf{5}^*_1,\mathbf{5}^*_2)$ and $(\mathbf{10}_2,\mathbf{10}_3)$ appear as SU(2) doublet at the second breaking.

SU(5)多重項のE7多重項への埋め込み方は昔の模型と同じになるように定義

この例もU(1)の線形変換になっていない。

RH ν (1_1と1_2) の電荷が単純な線形変換の場合と符号が逆転
本質的に独立な破れのパターンであると言うこと。
SUSY Nonlinear Modelでは表現ｒを取るかｒ*を取るかについて常に不定生が存在

フェルミオンの埋め込み

湯川結合を指定しないとフェルミオンは指定できない

breaking parameters e_i を指定する必要がある。が、

Lμ-Lτ模型であると仮定するとレプトンの埋め込みは一意

例―

$$\mathbf{10}_1 = (t^c, \{t_L, b_L\}, \tau^c) \qquad \mathbf{5}^*_1 = (d^c, \{\nu_{Le}, e_L\}),$$
$$\mathbf{10}_2 = (c^c, \{c_L, s_L\}, \mu^c) \qquad \mathbf{5}^*_2 = (s^c, \{\nu_{L\mu}, \mu_L\}),$$
$$\mathbf{10}_3 = (u^c, \{u_L, d_L\}, e^c) \qquad \mathbf{5}^*_3 = (b^c, \{\nu_{L\tau}, \tau_L\}).$$

クオークは全く任意。ここではこう仮定してみる
「世代」が意味をなさない。

フェルミオンの埋め込み

Lμ-Lτ相互作用

$$\mathcal{L}_{Z'} = g_{Z'}\{(\bar{\mu}\gamma^\rho\mu + \bar{\nu}_{L\mu}\gamma^\rho\nu_{L\mu}) - (\bar{\tau}\gamma^\rho\tau + \bar{\nu}_{L\tau}\gamma^\rho\nu_{L\tau})$$
$$+(\bar{c}\gamma^\rho\gamma_5 c - \bar{s}\gamma^\rho s) - (\bar{t}\gamma^\rho\gamma_5 t - \bar{b}\gamma^\rho b)\}Z'_\rho.$$

クオークとの結合は2世代と3世代のみ。一部軸性になる。

低エネルギーではすぐに実害は無さそう。

本当の予言を与えるには破れのパターンと破れを司る場を指定する必要がある。あくまで例

フェルミオンの埋め込み

湯川結合を指定しないとフェルミオンは指定できない
breaking parameters e_i を指定する必要がある。が、

Lμ-Lτ模型であると仮定するとレプトンの埋め込みは一意

例二

$$\mathbf{10}_1 = (u^c, \{u_L, d_L\}, \tau^c) \qquad \mathbf{5}^*_1 = (b^c, \{\nu_{Le}, e_L\}),$$
$$\mathbf{10}_2 = (c^c, \{c_L, s_L\}, \mu^c) \qquad \mathbf{5}^*_2 = (d^c, \{\nu_{L\mu}, \mu_L\}),$$
$$\mathbf{10}_3 = (t^c, \{t_L, b_L\}, e^c) \qquad \mathbf{5}^*_3 = (s^c, \{\nu_{L\tau}, \tau_L\}).$$

クオークは全く任意。ここではこう仮定してみる
「世代」が意味をなさない。

フェルミオンの埋め込み

Lμ-Lτ相互作用

$$\mathcal{L}_{Z'} = g_{Z'}\{(\bar{\mu}\gamma^\rho\mu + \bar{\nu}_{L\mu}\gamma^\rho\nu_{L\mu}) - (\bar{\tau}\gamma^\rho\tau + \bar{\nu}_{L\tau}\gamma^\rho\nu_{L\tau})$$
$$-(\bar{u}\gamma^\rho\gamma_5 u + \bar{d}\gamma^\rho\gamma_5 d) + (\bar{c}\gamma^\rho\gamma_5 c + \bar{s}\gamma^\rho\gamma_5 c)\}Z'_\rho$$

クオークとの結合は軸性になる。　**低エネルギーではすぐに実害は無さそう。**

「世代」がずれるので核子崩壊はゲージ相互作用寄与については　$p^+ \to \mu^+\pi^0$

通常の統一理論だと　$p^+ \to e^+\pi^0$

本当の予言を与えるには破れのパターンと破れを司る場を指定する必要がある。あくまで例

4.まとめ

Coset Space Unificationの枠組みでSM+Lμ−LτゲージがE_7埋め込めるかもしれない

ボトムアップ

低エネルギー（要は観測結果）を説明する。
具体的には破れのパラメタを定めて質量や混合が再現するか、その上で新たな予言があるのか。
一旦μ−τは忘れる必要があると思う。

トップダウン

高エネルギー（要はE_7統一理論）から出発してSU(5)大統一理論あるいは標準理論の登場人物を導出する。
具体的にはCoset Space Dimensional Reduction, Boundary condition , U(1) D term, Non-linear Realization, VEV
とりあえず登場人物を用意できれば
E7ではなくてE8かも