

分岐点に立つ ユカワオン模型

Y. Koide

Contents

- 1. ユカワオンモデルとは
- 2. SUSY か non-SUSYか？
- 3. 基本ユカワオンは S_3 の 2+1 か？
- 4. Can be compatible with GUT?
- 5. その他, 残された課題

個人的信條

The nature is simple,

but

Matter is rich

1. ユカワオンモデルとは？

■ 1.1 定義

広義

クォークとレプトンの「質量スペクトルと混合」を、理論の基本定数によって説明する^(a)のではなく、あるスカラーの真空期待値(VEV)として理解しようとする^(b)モデル。

(a) 対称性を置くことにより、それら基本定数間の制約を求める

(b) 対称性のもとで、スカラーポテンシャルの極小条件を解く

狭義

湯川結合定数 Y_f をあるスカラー(ユカワオン)のVEV

$$(Y_f^{eff})_{ij} = \frac{y_f}{\Lambda} \langle (Y_f)_{ij} \rangle$$

として理解する。

■ 1.2 フレーボンモデルとどこが異なるか？

フレーボン模型

ユカワオン模型

(狭義)

Froggatt-Nielsen

特定の対称性にこだわらない

“generations”

「世代」思想

$$\begin{pmatrix} u \\ d \\ e \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \\ \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \\ \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

水平方向は

質的な違いがある

Y.K.

U(3), O(3)

“families”

「家族」思想

$$\begin{pmatrix} u, c, t \\ d, s, b \\ e, \mu, \tau \\ \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t, c, u \\ b, s, d \\ e, \mu, \tau \\ \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Q と L では異なる対応であってよい

「質量スペクトル」より

「混合」が重要

(広義) ユカワオン模型を含む

■ 1.3 私の戦略

(1) $\langle \Phi_e \rangle = \text{diag}(v_1, v_2, v_3) \propto (\sqrt{m_e}, \sqrt{m_\mu}, \sqrt{m_\tau})$

を認めた上で. $\langle \Phi_e \rangle$ と他のユカワオンの VEV matrices との関係
を現象論的に探求 (現象論: U(1) charge を現象に都合よく割り当てている)

(例) $\langle Y_e \rangle = k_e \langle \Phi_e \rangle \langle \Phi_e \rangle$

$$\langle Y_u \rangle = k_u \langle \Phi_u \rangle \langle \Phi_u \rangle, \quad \langle \Phi_u \rangle = k'_u \langle \Phi_e \rangle (1 + a_u X) \langle \Phi_e \rangle$$

$$\langle Y_d \rangle = k'_d \langle \Phi_e \rangle (1 + a_d X) \langle \Phi_e \rangle$$

$$1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad X = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

C.f. “Democratic universal seesaw model”

YK, H.Fusaoka, Z.Phys.C 71, 459 (1996)

$$\langle Y_R \rangle = k_R (\langle Y_e \rangle \langle \Phi_u \rangle + \langle \Phi_u \rangle \langle Y_e \rangle) + \dots$$

Neutrino seesaw では, $M_D = M_e$ と考えているので, MNS は Y_R のみから来る

(2) $\langle \Phi_e \rangle$ のスペクトルそのものの起源を探求

$$K = \frac{m_e + m_\mu + m_\tau}{(\sqrt{m_e} + \sqrt{m_\mu} + \sqrt{m_\tau})^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2}{(v_1 + v_2 + v_3)^2} = \frac{\text{Tr}[\langle \Phi_e \rangle \langle \Phi_e \rangle]}{(\text{Tr}[\langle \Phi_e \rangle])^2}$$

$$K = (2/3) \times (0.999989 \pm 0.000014)$$

$$\kappa = \frac{\sqrt{m_e m_\mu m_\tau}}{(\sqrt{m_e} + \sqrt{m_\mu} + \sqrt{m_\tau})^3} = \frac{v_1 v_2 v_3}{(v_1 + v_2 + v_3)^3} = \frac{\det \langle \Phi_e \rangle}{(\text{Tr}[\langle \Phi_e \rangle])^3}$$

$$\kappa = (2.0633 \pm 0.0001) \times 10^{-3}$$

(これらの式は変換 $m_{ei} \rightarrow m_{ei}(1 + \varepsilon_0)$ のもとで不変)

これらの値を理論的にどう導くか？

Sumino model が大いに参考になると考えている

Sumino's 2nd relation [(Sumino, JHEP, 05, 075 (2009))]

$$v_2^3 + v_1 v_2 v_3 - v_1 v_3 (v_1 + v_3) = 0 \quad \rightarrow \kappa = 2.20869 \times 10^{-3}$$

Also see YK, PLB 687, 219 (2019)

(3) 登場する新しい粒子の観測可能性の探究

Family gauge bosons

Yukawaons ← 特に、この問題にはまだ未着手

TeV物理で観測可能な物理を立ち上げたい

宇宙論との関わりはまったく手つかず

(ユカワオンは $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)$ gauge力とは相互作用をしない！)

(参考)

初期ユカワオンモデルでは、

$\Lambda \sim 10^{14}$ GeV を持つ effective theory

かつ, global family symmetry

そもそも, ゲージボソンは存在しない.

ユカワオンも超ヘビー. 観測にほとんどかからない.

2. SUSYか non-SUSYか？

■ Non-SUSY と考えたい理由

(i) 「質量スペクトルと混合」問題にとって必要なものは
ユカワオンの内で、そのスカラー部分のみ。
フェルミオンはあってもなくてもよい。

(ii) Sumino's cancellation mechanism は
non-SUSY model にのみ有効

SUSY model に適用しようとする、かなり苦しいシナリオとなる。

(iii) 今のところ、実験的にも、SUSY partner は観測されていない。

■ にもかかわらず、なぜ SUSY にこだわるのか？

(i) 「荷電レプトンの質量関係式」が evolution に依存しないのは SUSY を考える根拠となる (Ma による指摘)

(ii) SUSY 真空条件を利用すると、VEV 関係式を論ずるのが容易

Superpotential W は

$$W = \sum_A f_A(Y_u, Y_d, \dots) \Theta_A$$

の形で与えられ、かつ、我々の真空は $\langle \Theta_A \rangle = 0$ を選ぶと仮定する。

$$\frac{\partial W}{\partial \Theta_A} = 0 \Rightarrow f_A(Y_u, Y_d, \dots) = 0$$

しかるに、 $\partial W / \partial Y_u = 0$ などは、必ず $\langle \Theta_A \rangle$ を含むので、何の VEV 関係式も導かない。

Non-SUSY model では、このような簡便な手法は使えない。

3. 基本ユカワオンは S_3 の2+1か？

$$\langle Y_e \rangle = k_e \langle \Phi_e \rangle \langle \Phi_e \rangle$$

$$\langle Y_d \rangle = k_d \langle \Phi_e \rangle (1 + a_d X) \langle \Phi_e \rangle$$

$$\langle \Phi_u \rangle = k'_u \langle \Phi_e \rangle (1 + a_u X) \langle \Phi_e \rangle$$

Quark sector に登場する $(1 + a_q X)$ をどう理解するか？

Φ_e に S_3 対称性の変換を与えればよい

$$\Rightarrow \langle Y_q^{ij} \rangle = k_q \langle \Phi_e^{T ia} \rangle \xi_{ab}^q \langle \Phi_e^{bj} \rangle$$

$$\xi_{ab}^q = 1_{ab} + a_q X_{ab}$$

Parameter a_q の自由度は, S_3 の triplet は 2+1 であることから来る

Quarks and leptons は S_3 の変換生を持たぬことに注意

- もしそのようなモデルを考えるなら
荷電レプトンだって、同じタイプの構造を考えたいくなる。

$$\begin{aligned}\langle Y_e^{ij} \rangle &= k_e \langle \Phi_0^T{}^{ia} \rangle \xi_{ab}^e \langle \Phi_0^{bj} \rangle \\ \langle Y_d^{ij} \rangle &= k_d \langle \Phi_0^T{}^{ia} \rangle \xi_{ab}^d \langle \Phi_0^{bj} \rangle \\ \langle \hat{Y}_u^{ij} \rangle &= k_u \langle \Phi_0^T{}^{ia} \rangle \xi_{ab}^u \langle \Phi_0^{bj} \rangle\end{aligned}$$

a_e を non-zero と考えても、MNS と CKM の fit は可能
むしろ、その方が、よさそう (?)

しかし、そのようなモデルでは、荷電レプトンの公式を導くことは
きわめて難しくなる。

レプトンでは $a_e = 0$ と考えるか？ (その理由は?)

それとも、荷電レプトンの公式を諦めるか？

4. Can be compatible with GUT ?

- ユカワオンは $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)$ gauge singlets
GUTのシナリオに影響を与えることなくモデルが作れるはず

$$W_Y = \frac{y_u}{\Lambda} 10_i Y_{(10,10)}^{ij} 10_j 5_H + \frac{y_d}{\Lambda} \bar{5}_i Y_{(5,10)}^{ij} 10_j \bar{5}_H \\ + \frac{y_\nu}{\Lambda} \bar{5}_i Y_{(5,1)}^{ij} 1_j 5_H + \lambda_R 1_i Y_{(1,1)}^{ij} 1_j$$

- Y_e と Y_d の区別ができない。
→ なんとか工夫 **Vector-like $5 + \bar{5}$ の導入**
- Λ の登場しないモデルをつくりたい。
→ 更に **vector-like $5, 10$ の導入**
→ **$SU(5)$ gauge c.c. が blow up しないためには**
 $VEV > 10^{12} \text{ GeV}$ gauge boson effects は見えない

■ Is U(3) family symmetry compatible SU(5) GUT?

$SU(5)$	$\bar{5}_i$	10		
$U(3)$	3	3	3^*	1
A_5	-1		$+1$	
l_5	$+1$		$+3$	
A_3	$+1$	$+1$	-1	0
l_3	$+1$	$+1$	$+1$	0
Q	$1 \pm 3n$	$1 \pm 3n$	$-1 \pm 3n$	$0 \pm 3n$

[SU(5)]²U(1) 条件と[SU(3)]²U(1)とは両立しない

U(3) → SU(3) とするか, それとも
GUT scenario をあきらめるか?

5. その他, 残された課題

■ モデル上の課題・モデルの改良

Yukawaons の節約

Λ なしのモデル・ Λ の scale

Φ_e における VEV relation $\sum \langle \Phi^{(8)} \rangle^2 = \langle \Phi^{(1)} \rangle^2$

U(3) [SU(3)xU(1)] を何に埋め込むか？

■ 場の理論上の課題

loop effects

SUSY breaking effects

Are Θ 's subsidiary fields?