

Mini-Workshop on Quarks, Leptons and Family Gauge Bosons,
at Osaka University, December 26, 2016

Prolog:

隅野モデルと私

小出義夫(大阪大理)

初めに

この研究会は、研究発表の場ではなく、自由な雰囲気の中で、ごく個人的な思いやアイデアを出し合うことを目的としています。

それを実践するために、敢えてタイトルに「〇〇と私」という文字を入れました。今回は、大いに個人的な考えを述べようと思います。だからと言って皆さんにもぜひ私と同じ考えに立って貰おうなどとはまったく考えていません。各自がいろいろの考えで、独自の物理を追究してこそそこから新しい物理が生まれると確信をしています。

Contents

1. 前史：荷電レプトン質量式は2つある！

one in 1982 and one in 1992


2. 隅野モデルの登場 2009

2.1 Brief review of Sumino model

2.2 隅野モデルのどこに惚れ込んだか？

3. $U(3) \times U(3)'$ model の戦略

4. このWSへの期待



1. 前史： 荷電レプトン質量式は2つある！

数式は同じでも物理は異なることがある！
(例) Lorentz による短縮公式と
Einstein による短縮公式

1.1 荷電レプトン質量式は2つある！

質量式(A) 1982

$$K(m_{ei}) \equiv \frac{m_e + m_\mu + m_\tau}{(\sqrt{m_e} + \sqrt{m_\tau} + \sqrt{m_\tau})^2} = \frac{2}{3} \quad (\text{A})$$

質量式(B) 1992

$$K(m_{ei}^{pole}) = \frac{2}{3} \times (0.999989 \pm 0.000014) \quad (\text{B})$$

どこが違うか？

質量式(A): U(3) formula

The formula is only satisfied at a special energy scale and for masses switched off electroweak and so on.

質量式(B): Empirical relation

The excellent coincidence may be accidental.

Sumirnov のアドバイス

1.2 Formula (A)が示唆すること

この 1982年の論文のタイトルは

Fermion-Boson Two-Body Model of Quarks and Leptons and Cabibo Mixing

である。幸か不幸かその中の荷電レプトンの話のみが生き残った。

(i) もし (A) 式が $f=e$ sector で成立するなら, 他の sectors では同様な式が成立することはあり得ない。我々は CKM mixing や PMNS mixing の存在を知っているから。にもかかわらず...

(ii) このことは, flavor physics において, 基本として選択すべき family base は 荷電レプトンが対角型である base である。

(iii) 階層的質量スペクトルを見るとき, 伝統的な symmetry の考え “symmetry + small symmetry breaking” は棄てるべきであり,

質量(湯川結合定数)の起源は flavon の VEV 値の階層構造にあると考えるべきである

(iv) 式'(A)で $m_e=0$ と置くと, m_μ/m_τ の値はその観測値とまったくかけ離れた値を予言する.

通常の質量公式の慣例では, まずは $m_e=0$ のもとで m_τ と m_μ の理論を作り, それからその理論の破れとして m_e がゼロでない理論を作る, というシナリオが試みられていた.

質量式(A)の成功は, 次のことを示唆する:

3つの質量値 (m_e, m_μ, m_τ) が, 段階的なシナリオで生み出されたものではなく, いきなり3つの値が得られるようなものでなければならない.

すなわち, electron mass は小さいけれど, はじめからゼロではないとして扱うモデルでなければならない.

(v) 関係式 (A) は変換

$$m_{ei} \rightarrow m_{ei}(1 + \varepsilon)$$

に対して不変である。 (See Sumino model later)

即ち, flavon VEV を

$$\Phi = k \text{diag}(\sqrt{m_e}, \sqrt{m_\mu}, \sqrt{m_\tau})$$

と定義するとき, 式(A) は

$$\frac{\text{Tr}[\Phi\Phi]}{(\text{Tr}[\Phi])^2} = \frac{2}{3}$$

と書ける。

それなら, 残るもう一つの式は

$$\frac{\det[\Phi]}{(\text{Tr}[\Phi])^3} = \kappa = \frac{?}{?}$$

と書けるはず!

残念ながら, この試みは成功しなかった!

1.3 Some comments on the formula (B)

実験との見事な一致は一部の人々の関心を集めた。

(i) Quarks や neutrinos でも同様な関係式がなりたつのではと、探索が試みられた。CKM混合やPMNS混合はどうなるのかと質問すると、質問の意味がわからず、怪訝な顔をする人が多かった。
Mass ratios と mixing は切り離して議論することはできない！

(ii) ずばり $K=2/3$ を与えるような数学量の探索が行われた。
 m_{e_j} は物理として明確に定義されていて、また観測も可能な量であるという認識はなかったようだ。ただの数学パズル遊び！
数学遊びはもうやめましょう！



2. 隅野モデルの衝撃

ところが…，である。

2009年，Sumino は (A) ではなく，(B) に注目して， $U(3) \times O(3)$ model を提案した！

2.1 Brief review of Sumino model

2009年, Suminoは, (A)式ではなく, (B)式に注目して, $U(3) \times O(3)$ に基づくモデルを提案した.

Y. Sumino, PL B671 (2009); JHEP 0905 (2009)

式(A)で m_{ei} として running masses を使うと, 2/3 からのズレの主要なものは QED loop からの

$$\delta m_{ei}^{QED} = m_{ei} (c_1^{QED} \log m_{ei} + c_0^{QED})$$

の中の $\log m_{ei}$ から来る.

それなら, 質量 $M_{ij}^2 = k_F (m_{ei} + m_{ej})$ をもった family gauge bosons の存在を考えて, それによる

$$c_1^{QED} \log m_{ei} - c_1^{FGB} \log M_{ij} = const$$

によって, $\log m_{ei}$ 項を打ち消せばよい.

具体的には

flavon

$$\Phi_{i\alpha} = (3, 3) \text{ of } U(3) \times O(3)$$

$$\langle \Phi \rangle = k \text{diag}(\sqrt{m_e}, \sqrt{m_\mu}, \sqrt{m_\tau})$$

を考える.

荷電レプトン質量行列: $(m_e)_{ij} = \delta_{ij} \Phi_{i\alpha} \Phi_{\alpha j}^T$

ファミリー・ゲージボゾン質量

$$(M_{ij}^{FGB})^2 = k_{FGB}(m_{ei} + m_{ej})$$

2.2 隅野モデルのどこに惚れ込んだか？

FGB が存在しなければ, mass matrix 屋は, 単なる夢想家!

Rebasing free of mass matrix model (in the SM)

Whole mass matrix model (M'_u, M'_d) are equivalent with a mass matrix model (M_u, M_d) by rebasing

$$u'_L = Au_L, u'_R = Bu_R \quad d'_L = Ad_L, d'_R = Bd_R$$

FGB が存在しなければ, モデルの検証は不可能!

(i) FGB masses in the Sumino model are considerably low:

FGB mass matrix is diagonal on the M_e -diagonal base, so that flavor violation is forbidden in lepton sector.

Flavor violation is caused only in the quark sector via quark mixing.

→ In the limit of $U_u = U_d = \mathbf{1}$ or $M_{ij} = M$ (degenerated), FV disappears. → We can obtain low FGB masses. ¹³

(ii) FGB mass ratios are fixed by m_{ei}/m_{ej}

(iii) Gauge coupling constant is related to the EW gauge c.c.

従って、予言能力が高い。観測可能な物理となっている。

(iv) **FGB masses に上限がある！**

あまり FGB mass scale が大きいと cancellation mechanism にズレが生ずる。 $\mu \sim 10^3 \text{ TeV}$ (or 10^4 TeV ?)

実験で観測されなければ、それに対応してスケールを上げるというお定まりの手が使えない！

隅野さんの個人的発言；

「タウレプトンの質量値の測定がもう一桁上がれば、式 (B) からのズレが見えてくるはず」

これは重要。ぜひきちんとループ計算をやって、その大きさを数値的に予言すべき。

Family Gauge Bosons が拓く新物理の世界

FGB mass relation

$$\frac{M_{11}}{M_{33}} = \left(\frac{m_e}{m_\tau}\right)^{n/2} = (2.87564 \times 10^{-4})^{n/2}$$

において $n=2$ を考えるとき,

$$M_{11} \sim \frac{m_e}{m_\tau} \Lambda_{fam} \sim 3 \times 10^4 \Lambda_{fam} \sim \text{a few TeV}$$

ということが予想される.

--> さまざまな
新しい物理が
見えてくるはず!

Direct search
for the light
FGB at LHC

Rare decays
with LFV

but $\Delta N_{family} = 0$

μ -e conversion

Deviations from
 e - μ - τ universality

但し, $\mu \rightarrow e + \gamma$ などは起きない

3. $U(3) \times U(3)'$ model の戦略

$U(3)$ の世界への手がかりは $U(3)'$ にある
 $U(3)$ の世界の法則を探るにはまだ早すぎる

3.1 Q&L は $U(3)$ triplet なのに なぜ $U(3)$ が必要なのか？

我々の世界は four dimension なのに,
"Extra-dimension" の世界で formulationを試み,
そこから再び, 4次元の話を理解し直そうと言うことと
よく似ているかもしれない

むろん, 本質的にはまったく別ものです
しかし, 企みは似ているかも知れません

我々のスケールでの世界が, もっと上のスケールでの
世界での仕組みに案外縛られているのかもしれない.

3.2 なぜ $O(3) \rightarrow U(3)$ としたか？

Sumino model:

[Y.Sumino, PLB 671, 477 (2009)]

Cancellation のためのマイナス符号の出所

$(q, l)_L$ are 3 of $U(3)$, while $(q, l)_R$ are 3^* of $U(3)$

従って, model は anomaly free ではない!

しかも, $\Delta N_F = 2$ をもった相互作用が現れる!

K-Y model:

[YK and T.Yamashita, PLB 711, 354 (2012)]

Both $(q, l)_L$ and $(q, l)_R$ are 3 of $U(3)$

Instead, the origin of minus sign is

問題点

$$M_{ij}^2 = k \left(\frac{1}{m_{ei}} + \frac{1}{m_{ej}} \right)$$

Model が少々複雑になる

Φ 以外に Φ^{-1} の VEV を持つ flavon Ψ が必要

Cancellation は Sumino model ほどこれいでない

3.3 $U(3) \times U(3)'$ model の戦略

通常, symmetry を導入する場合,
その破れのメカニズムを提案し,
それに従って, 現象論を展開する

我々のモデルでは, $U(3)$ を主張するものの,
その破れのメカニズムについては一切立ち入らない.
代わりにその $U(3)$ の破れの結果として現れる荷電レプトンの
質量の観測値を inputs として, 残りの quarks and neutrinos の
masses and mixings を予言する.

$$\langle \Phi \rangle = k \text{diag}(\sqrt{m_e}, \sqrt{m_\mu}, \sqrt{m_\tau})$$

この Φ の VEV 値の起源は当面問わない!

一方, $U(3)'$ だけは $U(3)' \rightarrow S_3$ と考える

VEV matrix = (unit matrix + democratic matrix)

3.4 Example: Mass matrix model

Dirac mass matrix: From a seesaw like model

$$(M_f)_i^j = \langle \Phi_f \rangle_i^\alpha \langle S_f^{-1} \rangle_\alpha^\beta \langle \bar{\Phi}_f \rangle_\beta^j \quad (\Lambda \ll \Lambda')$$

Since $U(3)'$ is broken into S_3 ,

the VEVs of Φ_f take a form (unit matrix + democratic matrix)

$$\langle \hat{S}_f \rangle = v_{Sf} (\mathbf{1} + b_f X_3),$$

$$\mathbf{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad X_3 = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Since $b_e = 0$

$$\langle \Phi_f \rangle \propto \text{diag}(\sqrt{m_e}, \sqrt{m_\mu}, \sqrt{m_\tau})$$

b_f を与えることによって, masses と mixings が完全に決定される!

YK and H.Fusaoka,
Z.Phys. C 71, 1160 (1996)
(+- reads as -, bug of ppt?)

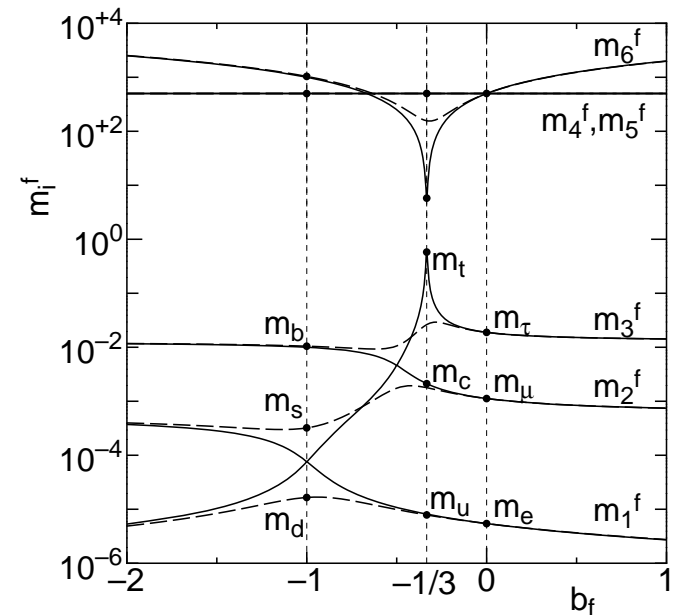


Fig.1

Neutrino mass matrix:

Details \longrightarrow Nishiura's talk

Dirac neutrino mass matrix

$$(\hat{M}_\nu)_{\circ\bullet} = (\Phi_\nu)_{\circ\bullet} (\hat{S}_\nu^{-1})_{\bullet\bullet} (\bar{\Phi}_\nu^T)_{\bullet\circ}$$

Majorana mass matrix of the left-handed neutrinos

$$(M_\nu^{Maj})_{\circ\circ} = (\hat{M}_\nu)_{\circ\bullet} (\bar{M}_R^{-1})_{\bullet\bullet} (\hat{M}_\nu^T)_{\bullet\circ}$$

where \bullet and \circ denote U(3) and U(3)' indices, respectively.

問題

Flavons の VEV scales:

$$A_{\circ\circ} \sim \Lambda_1, \quad A_{\circ\bullet} \sim \Lambda_2, \quad A_{\bullet\bullet} \sim \Lambda_3$$
$$\Lambda_1 \gg \Lambda_2 \gg \Lambda_3$$

このまま行くと, right-handed neutrino の mass matrix は随分と軽い Λ_3 となってしまう。これでは困る？

3.5 今後の課題

- **質量と混合の統一的理解**

Flavons が多すぎる

シナリオが複雑

Y_R (ν_R の Majorana mass) の構造が人為的

- **Family Gauge Bosons の新物理**

導入されたスカラー (flavons) の物理

(生き残るスカラーとその質量, どこに顔をだすか?)

loop を通しての新物理の可能性

実験から推測される FGB の質量

4. このWSへの期待



もっと低いエネルギーの物理にも Flavor Physics へのヒントがあるはず

両角 卓也: "Flavor violation and New Physics in Rare decays"

山中 真人: "Search for charged lepton flavor violation"

久野 良孝: "COMET実験"

山中 卓: "J-PARC KOTO実験"

低いスケールをもった M_R は可能か?

金田 邦雄: "Sterile neutrino dark matter"

一見古典的な話だが, 新しい物理への再出発

福山 武志: "20 years after the discovery of mu-tau symmetry"

新しいスタイルでの Mass Matrix Model への試み


西浦 宏幸: "Flavon VEV scales in $U(3) \times U(3)$ ' model"

なぜ $U(3) \times U(3)$ ' model を創案したか?

山下 敏史: "Family Gauge Bosons with an Inverted Mass Hierarchy"

一連の話題の創造主からの直接のお話

隅野 行成: To be announced (Concluding talk)



フレーバーの起源について
だんだん光が見えてきました。
もう一息です

ご静聴とご関心ありがとうございました