「風味」:「家族」の立場から考える

小出義夫　(京都産業大学益川塾・大阪大学理)

1. Generations versus families

タイトルを直訳すると,「“ Flavor ” physics: from the point of view of a “ family ” symmetry」となる．なぜ　“「家族」の立場から ” と副題をつけのたか，そのあたりから議論を進めたい．

「家族 (families)」という言葉の対極にある言葉は「世代 (generations)」である．現在では，ほとんど区別されることなく同義に使われているが，その考え方には大きな違いがある．

「世代」派は，クォークとレプトンを

$$\begin{pmatrix} u \\ d \\ e \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \\ \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \\ \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}, \tag{1}$$

という描像で理解しようとする．これに対して,「家族」派は

$$\begin{array}{l} (u,\ c,\ t), \\ (d,\ s,\ b), \\ (e,\ \mu,\ \tau), \\ (\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau), \end{array} \tag{2}$$

という描像を持つ．どっちでも良さそうに思えるが，そうでもない．

もともと,「世代」派は，世代の数は無限の可能性を念頭に置いていた．そして，$n = 1 \to n = 2 \to n = 3 \cdots$ とその世代の順序に意味があると考えていた．つまり，世代ごとに質的な違いがあると考える.（例えば，Froggatt-Nielsen model [1] のように，世代ごとに，関与するスカラー ϕ の数が増えて行くなど.）

これに対して,「家族」派は，家族の数は有限と考え，その家族間は皆，もともとは平等であったと考える．すなわち，横（水平方向）の自由度を「対称性」で理解しようとする．見かけの違い（観測さている階層的質量構造）は対称性の破れによるものと考える.（しかし，この立場は，old flavor SU(3) では，(symmetry + a small symmetry breaking) として，それなりに現象の記述に成功したが，クォークとレプトンでは，観測されるその質量の階層的構造があまりに急激であったため，それを対称性から理解しようとする立場は，当初，旗色が悪かった．離散群による記述の登場により，対称性に基づく質量行列の研究が復活した.）

「世代」派の人たちの関心は，主として，縦の並びにあり，例えば，SU(5) など，GUT による記述へ関心が行く．横方向は，もっぱら，階層的質量構造にのみ関心を持ち，それさえ出せそうだったらもうクォークとレプトンの現象論ではやるべきことは終わったと思いこんでいる人が多い．

「家族」派では，関心は家族間の混合にある．すなわち，CKM 行列や MNS 行列の理解に関心がある．質量スペクトルの構造は，混合の結果として発生したにすぎない．(2) 式の並び順は，単

なる質量の大きさの順に並べたにすぎない．例えば，もともとはこんな

$$\begin{array}{l}(t^0,\ c^0,\ u^0),\\ (b^0,\ d^0,\ s^0),\\ (e^0,\ \mu^0,\ \tau^0)\end{array} \tag{3}$$

並びであったのかもしれない.「世代」派の立場からは，こんな (3) のような発想は出てこない.

私はむろん「家族」派なので,「家族」派の立場から，話を進めてみたい.

2．クォークとレプトンの質量スペクトルと混合の起源

標準模型では，クォークとレプトンの「質量」の起源はヒグススカラーにあるが,「質量スペクトルと混合」の起源は「湯川結合定数」にある:

$$H_Y = \bar{q}_{Li} Y_u^{ij} u_{Rj} H_u + \bar{q}_{Li} Y_d^{ij} d_{Rj} H_d + \cdots . \tag{4}$$

(「質量の起源」と「質量スペクトルの起源」とを分けて考えることは重要である.）標準模型では,「湯川結合定数」は，理論の基本定数であり，神が与えた定数であって，畏れおおくも，我々が計算で求めようなとど，決して考えてはならないたぐいのものとなっている．せいぜいが，対称性を要求することにより，それら基本定数の間に制限を加えるだけであって，それ以上の手出しは人間には許されていない．なんともつまらない話である．また，フレーバー物理を対称性から理解しようと試みるとき，その対称性が連続群であるなら，湯川結合定数は（それが数値の行列である限りは）その対称性を直接的に破る存在となってしまう.（そこで，離散群の登場となる.）さらに，ヒグスにも離散群の変換性を割り当てるアイディアがある．これだと，ヒグスは，質量の生成と，家族対称性の破れとを同時に自発的な破れからもたらしてくれることになる．大変興味あるシナリオであるが，多くのモデルでは，FCNC 問題に出くわしてしまう．そもそも，ファミリー対称性に関する 「No Go 定理」[2] が存在する．

定理　「モデルにファミリー対称性を課すとき，それがいかなるタイプの対称性であろうとも，各セクターに１つのみ Higgs が結合するモデルでは，混合行列（CKM and/or MNS) は，2 家族までの混合しか記述できず，観測されている３家族の混合は記述できない.」

ただし，これには例外があって，multi-Higgs model はこの定理には該当しない．

$$M_f = Y_A^f H_A + Y_B^f H_B + \cdots , \tag{5}$$

しかし，この場合は 前述のように，FCNC が登場する．

そこで，もう無理をせず,「 Y_f は基本定数である」と見なすことを放棄したらどうであろうか？

3．ユカワオンモデル

湯川結合定数は，そっくり，あるスカラー粒子 Y_f の真空期待値 $\langle Y_f \rangle$ から

$$Y_f^{eff} = \frac{y_f}{\Lambda} \langle Y_f \rangle, \tag{6}$$

で与えられる，有効理論における見かけ上の定数にすぎないと見たらどうであろうか：

$$W_Y = \frac{y_u}{\Lambda} u_i^c Y_u^{ij} q_j H_u + \frac{y_d}{\Lambda} d_i^c Y_d^{ij} q_j H_d + \cdots . \tag{7}$$

この粒子 Y_f を yukawaons と呼び，Y_f が関わるモデルをユカワオンモデル [3] という．もちろん，ユカワオンモデルはフレボンモデル [1] の一種である．

このモデルの特徴は次の通りである．

(i) Y_f は fields なので，連続群のファミリー対称性を考えることができる．(むろん，量子数も割り当てることができる.)

(ii) Y_f は，gauge symmetry $\mathrm{SU}(3)_c \times \mathrm{SU}(2)_L \times \mathrm{U}(1)_L$ に対して，singlets であり，これらの gauge bosons とは相互作用をしない．

(iii) SUSY 真空条件を利用して，各 $\langle Y_f \rangle$ の間の関係を直接求めることができる．(行列要素の間の関係ではなく.)

[例]

$$\langle Y_R \rangle = k_R \left(\langle Y_e \rangle \langle \Phi_u \rangle + \langle \Phi_u \rangle \langle Y_e \rangle \right) + \cdots . \tag{8}$$

(iii) すべての $\langle Y_f \rangle$ は，基本ユカワオン VEV $\langle \Phi_e \rangle$ に関係ずけられて記述される [4]．これによって，quarks and leptons の統一的記述を目指す．具体的には，次のように考える．

$$\langle Y_e \rangle = k_e \langle \Phi_e \rangle \langle \Phi_e \rangle, \tag{9}$$

$$\langle Y_u \rangle = k_u \langle \Phi_u \rangle \langle \Phi_u \rangle, \quad \langle \Phi_u \rangle = k'_u \langle \Phi_e \rangle (\mathbf{1} + a_u X) \langle \Phi_e \rangle, \tag{10}$$

$$\langle Y_d \rangle = k'_d \langle \Phi_e \rangle (\mathbf{1} + a_d X) \langle \Phi_e \rangle, \tag{11}$$

where

$$\mathbf{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad X = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \tag{12}$$

特に，ニュートリノ質量行列 M_ν については，シーソー型 $M_\nu = m_D M_R^{-1} m_D$ を考えるものの，$m_D = M_e$ と選ぶので，MNS mixing は M_R の構造だけから出ることになる．そのとき，$M_R \propto \langle Y_R \rangle$ を

$$\langle Y_R \rangle = k_R \left(\langle Y_e \rangle \langle \Phi_u \rangle + \langle \Phi_u \rangle \langle Y_e \rangle \right) + \cdots , \tag{13}$$

と選ぶことによって [4]，観測されている MNS を見事に与えることができることは注目に値する．

4. ユカワオンモデルの問題点

(a) 今のところ， cutoff scale Λ を含んだ effective theory である．(この問題への試みは例えば Ref.[5] でなされている.)

(b) 初期モデルでは，ファミリー対称性（連続群）はグローバル対称性と考えていたが，やはりゲージ対称性考えるべきであろう．そうなると，そのゲージボソンは観測可能でないとつまらない．(１つの試みは Ref.[6] でなされている.)

(c) あまりにユカワオンの数が多すぎる．いかに節約するか？　(すでに，Y_ν は Y_e に代役させており，更に Y_u も節約できそうである.)

(d) Quark sector に登場するファクター (unit matrix)+(democratic matrix) （即ち $(\mathbf{1} + a_q X)$ ）をどう理解するか？　例えば，離散対称性 S_3 を考える？　（その試みについては Ref.[?] を参照．また，より徹底したモデルについては，H. Nisiura と準備中.)

(e) GUT シナリオと両立は可能か？　（これについては，talk でも紹介したが，この報告書では割愛する．[5, 7]

(f) Sumino mechanism [8] との相性はどうか？

(g) 今のところ，SUSY 版を考えているが，実のところ，Y_f はスカラーだけでよく，フェルミオンである必然性は全くない．Non-SUSY 版のモデルにも魅力を感じている．

(h) 対称性が破れた後の効果は結果にどう影響をもたらすか？

などなど．

これらについて，現在，検討中である．

References

[1] C. D. Froggatt and H. B. Nielsen, Nucl. Phys. **B 147**, 277 (1979).

[2] Y. Koide, Phys.Rev. **D 71**, 016010 (2005).

[3] Y. Koide, Phys. Rev. **D 79**, 033009 (2009).

[4] Y. Koide, Phys. Lett. **B 680**, 76 (2009).

[5] Y. Koide, arXiv:1106.0971 [hep-ph].

[6] Y. Koide, Y. Sumino and M. Yamanaka, Phys. Lett. **B 695**, 279 (2011).

[7] Y. Koide, arXiv:1110.5413 [hep-ph].

[8] Y. Sumino, Phys. Lett. **B 671**, 477 (2009); JHEP **0905**, 075 (2009).