日大理工･益川塾連携　素粒子物理学シンポジュウム:　2011.10.31,　東京

「風味」:
「家族」の立場から考える

直訳すると

“Flavor” physics:
from the point of view of a “family” symmetry

小出義夫　京都産業大学益川塾･大阪大学理

Contents

1． 湯川結合定数を本気で理論の基本定数であると信じているバカ
2． 質量スペクトルと混合は $\langle Y_f \rangle$によると考えているバカ
3． ユカワオンモデルの現在進行中の話 (Preliminary!)

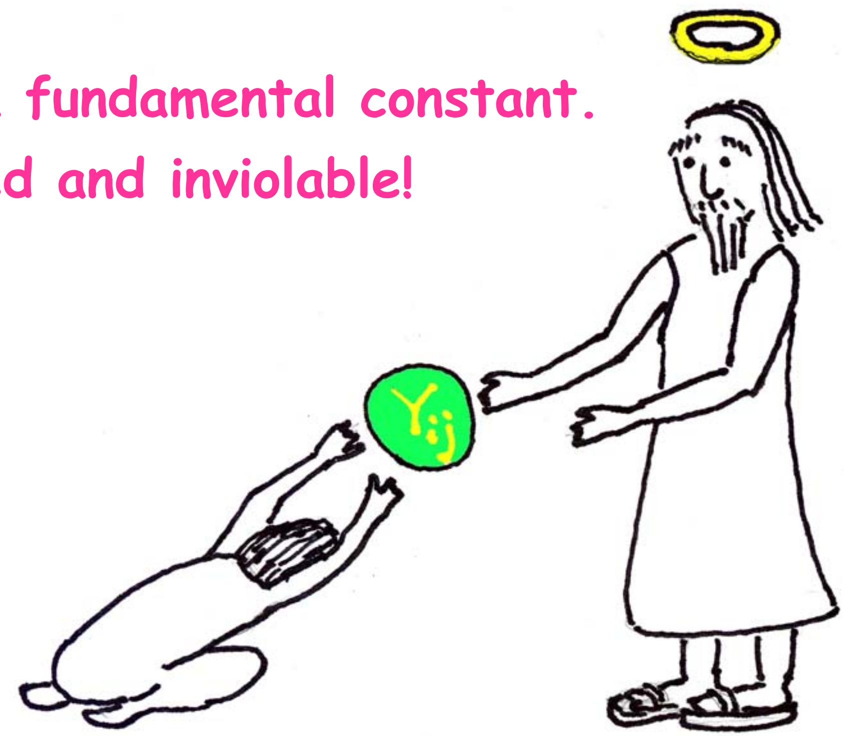
3.1 Fundamental VEV matrix and S_3 symmetry

3.2 SU(5) compatible Yukawaon model with family symmetries U(3) x O(3)

4． 今後の話

1. 湯川結合定数を本気で理論の基本定数であると信じているバカ

This is a fundamental constant.
Be scared and inviolable!



1.1　標準模型

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

「質量」の起源：　　ヒグス・スカラー

「質量スペクトル」と「混合」の起源：　湯川結合定数

「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どと，

決して考えてはならない．

1.2 「世代」派と「家族」派

Generations vs Families

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

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

世代の数は無限の可能性

n=1 → n=2 →n=3... と

その世代の順序に意味がある

世代差は質的な違いにある.

U(1)対称性を考えることはあっても,

「世代」を対称性で

考えることはない.

質量スペクトルに注目

家族の数は有限

家族間は皆，平等

「対称性」で理解しようとする

見かけの違いは

対称性の破れによる

混合に注目

1.3　畏れを知らぬ輩の試み

フレーバー物理を対称性から理解しようと試みる

- 湯川結合定数はその対称性を直接的に破る存在
- 連続群の適用を諦めて，離散群の適用を考える

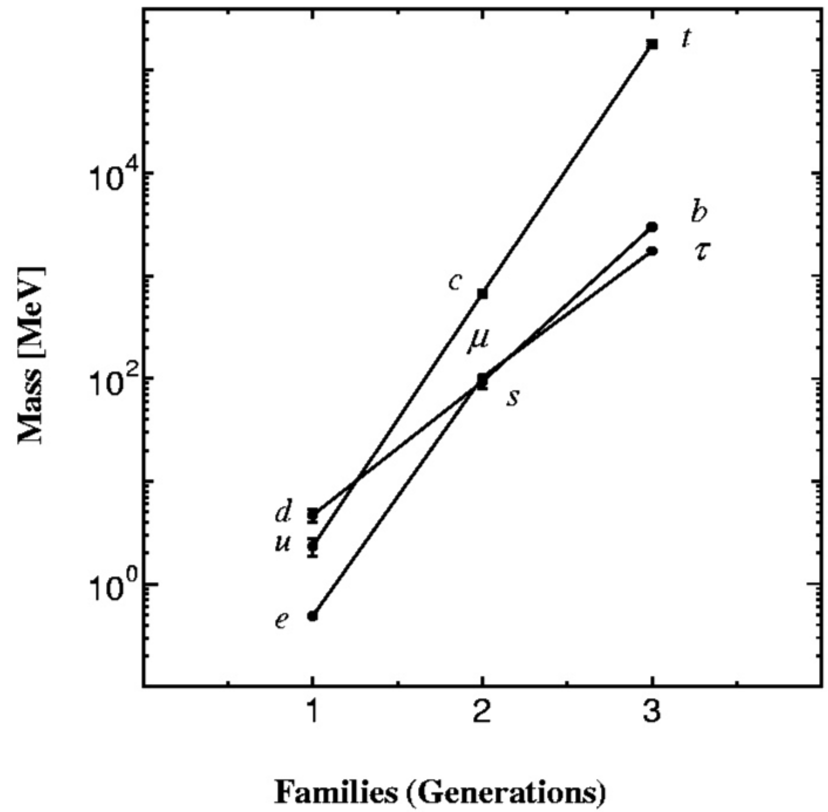
数学的にはsingletsとなる組み合わせがいくつも登場し，パラメター数が多い

→ より高次元の離散群へとマニアック化する

・ヒグスにも離散群の変換性を割り当てる

→ multi-Higgs model

→ FCNC問題に出くわす



1.4　ファミリー対称性に関する No Go 定理

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．」 Y.K, Phys.Rev. D71, 016010 (2005)

例外： **multi-Higgs model** はこの定理には該当しない．

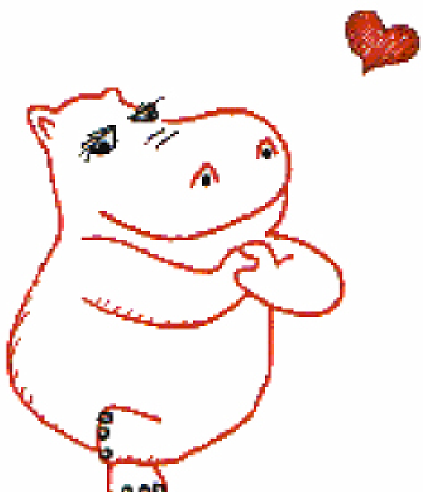
$$M_f = Y_A^f H_A + Y_B^f H_B + \cdots$$

しかし，この場合は **FCNC**が登場する．

もう無理をせず， Y_f は基本定数であると見なすことを
あきらめた方がよい

2. 質量スペクトルと混合は $\langle Y_f \rangle$によると考えているバカ

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



I love Yukawaon model

2.1　ユカワオンモデルの特徴

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

(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

(ii) 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]　$\langle Y_R \rangle = k_R (\langle Y_e \rangle \langle \Phi_u \rangle + \langle \Phi_u \rangle \langle Y_e \rangle) + \cdots$

(iii) すべての<Y_f> 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．これによって，quarks and leptonsの統一的記述を目指す．

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

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

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

where

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

- 特に，$\langle Y_R\rangle$を

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

と選ぶことによって，観測されているMNSを見事に与えることができる．YK, PLB655, 227 (2008); B680, 76 (2009)

2.2　気にしていること

(i) Λ を含んだ effective theory である.

YK, arXiv:1106.0971 [hep-ph]

(ii) ファミリー対称性は連続群

→ ゲージ対称性 → ゲージボソンは見えるか？

YK, Y.Sumino, M.Yamanaka, PLB695, 279 (2011)

(iii) Quark sector に登場するファクター

(unit matrix)+(democratic matrix): $(1 + a_q X)$ をどう理解するか？

YK, arXiv:1110.5413 [hep-ph]

(iv) GUTシナリオと両立は可能か？

YK, arXiv:1106.0971 [hep-ph]

(v) Sumino mechanism との相性はどうか？

(vi) SUSY or non-SUSY?

3. ユカワオンモデルの現在進行中の話

Preliminary!

3.1 Fundamental VEV matrix and S_3 symmetry

YK, arXiv:1110.5413 [hep-ph]

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

➡ Φ_e にのみ S_3対称性の変換を与えれる

Before: $$\langle Y_q^{ij}\rangle = k_q\langle\Phi_e^{ik}\rangle(\langle E_{kl}\rangle + a_q\langle X_{kl}\rangle)\langle\Phi_e^{lj}\rangle$$

After: $$\langle Y_f^{ij}\rangle = k_f\langle\Phi_e^{T\,ia}\rangle\xi_{ab}^f\langle\Phi_e^{bj}\rangle$$

$$\xi_{ab}^f = 1_{ab} + a_f X_{ab}$$

$$\psi \equiv \begin{pmatrix}\psi_1\\ \psi_2\\ \psi_3\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}}\\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}}\\ 0 & -\frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\psi_\pi\\ \psi_\eta\\ \psi_\sigma\end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}\psi_\pi\\ \psi_\eta\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_1-\psi_2)\\ \frac{1}{\sqrt{6}}(\psi_1+\psi_2-2\psi_3)\end{pmatrix}$$

$$\psi_\sigma = \frac{1}{\sqrt{3}}(\psi_1+\psi_2+\psi_3)$$

それならいっそのこと Y_e も同じと考えたら？

Before:

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

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

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

After:

$$\langle Y_e^{ij} \rangle = k_e \langle \Phi_0^{T\ ia} \rangle \xi_{ab}^{e} \langle \Phi_0^{bj} \rangle$$

$$\langle Y_d^{ij} \rangle = k_d \langle \Phi_0^{T\ ia} \rangle \xi_{ab}^{d} \langle \Phi_0^{bj} \rangle$$

$$\langle \hat{Y}_u^{ij} \rangle = k_u \langle \Phi_0^{T\ ia} \rangle \xi_{ab}^{u} \langle \Phi_0^{bj} \rangle$$

$$\xi_{ab}^{f} = \mathbf{1}_{ab} + a_f X_{ab}$$

a_e, a_d, a_u を適当に選ぶことにより, CKMもMNSも（むろん質量比も）すべてうまく合わせられる！

(In preparation with H.Nishiura)

3.2 SU(5) compatible Yukawaon model

YK, arXiv:1106.0971 [hep-ph]

ユカワオンは $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ に対してsinglets

→ ユカワオンをどれだけ考えようと SU(5) GUT などには影響を与えない

→ クォーク･レプトンを SU(5)の 5*+10+1 と考えてみる

目的

- Λ なしのモデルをつくりたい
- ファミリー･ゲージボソンのスケールを決めたい

Λ はどこまで小さくできるか？

3.2.1 SU(5) compatible yukawaon model with U(3) family symmetry

vector-like (5*+5), (10+10*) を導入

$$W_{Yu} = y_u \mathbf{10}_i Y_u^{ij} \overline{\mathbf{10}}'_j + M_{10} \overline{\mathbf{10}}'_i \mathbf{10}'^{\,i} + y_{10} \mathbf{10}'^{\,i} \mathbf{10}_i \mathbf{5}_H$$

$$\Rightarrow \quad W_{Yu}^{eff} = \frac{y_u y_{10}}{\bar{M}_{10}} \mathbf{10}_i Y_u^{ij} \mathbf{10}_j \mathbf{5}_H$$

$$W_{Ye} = y_e \bar{\mathbf{5}}_i Y_e^{ij} \mathbf{5}'_j + M_5 \mathbf{5}'_i \bar{\mathbf{5}}'^{\,i} + y_5 \bar{\mathbf{5}}'^{\,i} \mathbf{10}_i \bar{\mathbf{5}}_H$$

$$\Rightarrow \quad W_{Ye}^{eff} = \frac{y_e y_5}{\bar{M}_5} \bar{\mathbf{5}}_i Y_e^{ij} \mathbf{10}_j \bar{\mathbf{5}}_H$$

$$W_{Y\nu} = y_e \bar{\mathbf{5}}_i Y_e^{ij} \mathbf{5}'_j + M_5 \mathbf{5}'_i \bar{\mathbf{5}}'^{\,i} + y_1 \bar{\mathbf{5}}'^{\,i} \mathbf{1}_i \mathbf{5}_H$$

$$\Rightarrow \quad W_{Y\nu}^{eff} = \frac{y_e y_1}{\bar{M}_5} \bar{\mathbf{5}}_i Y_e^{ij} \mathbf{10}_j \mathbf{5}_H$$

Note that $Y_\nu \Rightarrow Y_e$

Energy scale of U(3) family symmetry breaking

- 現象論からの要求

$$M_u = \frac{y_u y_{10}}{M_{10}} \langle Y_u^{ij} \rangle v_{Hu} \qquad M_e = \frac{y_e y_5}{M_5} \langle Y_e^{ij} \rangle v_{Hd}$$

$$\Rightarrow \qquad \frac{\langle Y_u \rangle}{M_{10}} \sim 1 \qquad \frac{\langle Y_e \rangle}{M_5} \sim 10^{-1}$$

- 理論的条件

$\Lambda_{U3} \geq \langle Y_u \rangle$ ：破れのスケールは, VEVs の値の中の最大値

$M_{10} \geq 10^{12}$ GeV ：これ以上 M_{10} を小さくすると gauge c.c.はblow up

まとめると

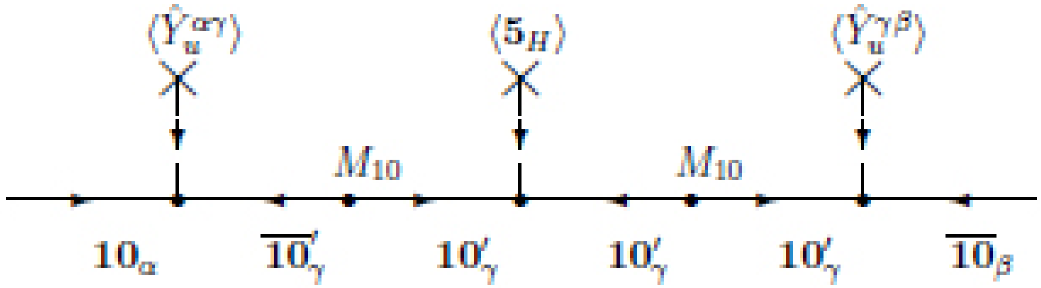
$$\Lambda_{U3} \geq \langle Y_u \rangle \sim M_{10} \geq 10^{12}\ \text{GeV}$$

軽い family gauge boson masses を

得ることはできない YK, arXiv:1106.0971 [hep-ph]

3.2.2 U(3)xO(3) model

$(\bar{5}+10+1)$ を $(\bar{5}_i+10_\alpha+1_\alpha)$ と考える



$$W_{Yu}=y_u \mathbf{10}_\alpha \hat{Y}_u^{\alpha\beta}\overline{\mathbf{10}}'_\beta+M_{10}\overline{\mathbf{10}}'_\alpha\mathbf{10}'_\alpha+y_{10}\mathbf{10}'_\alpha\mathbf{10}'_\alpha\mathbf{5}_H$$

$$W_{Yu}^{eff}=\frac{y_u^2 y_{10}}{(M_{10})^2}\mathbf{10}_\alpha\hat{Y}_u^{\alpha\gamma}\hat{Y}_u^{\gamma\beta}\mathbf{10}_\beta\mathbf{5}_H$$

特徴

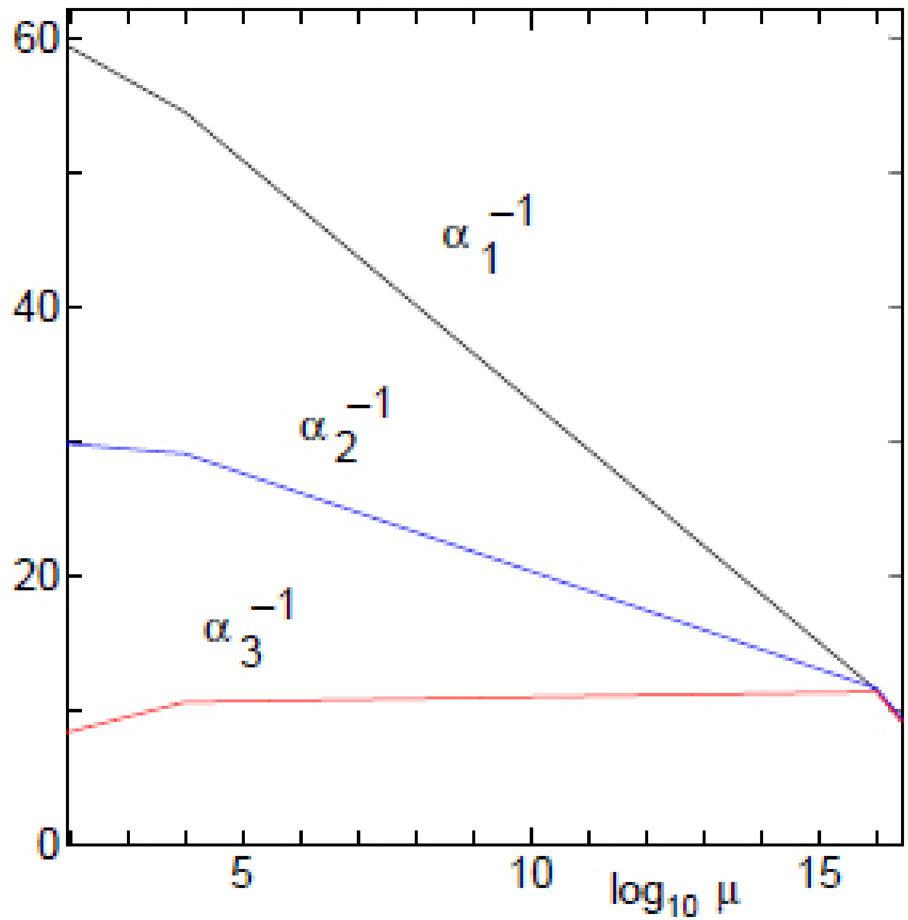
(i) Y_u がなくなった！　　(O(3) だからそれが可能)

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

(ii) M_{10} と M_5 は独立に選び得る

Λ_{U3} ～ 1 TeV のモデルも可能！

YK, arXiv:1110.5413 [hep-ph]



Example: Evolutions of the gauge coupling constants of $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Inputs: $M_5 = 10^4$ GeV; $M_{10}=10^{16}$ GeV

YK, arXiv:1110.5413 [hep-ph]

4. 今後の話

- 質量スペクトルと混合が「あるスカラーの真空期待値によって与えられる」という考えは正しいと確信している.
- しかし, 各湯川結合定数に対して1対1で対応する別々のユカワオンが存在するという考えにはこだわらない.
  徐々にではあるが, ユカワオンの数は着実に減少している.
- ユカワオンを導入したからこそ, 家族対称性を連続群で扱えるようになった. その特徴を生かして, ファミリー・ゲージボソンの探索(モデル構築)に力を注いで行きたい.
- Sumino mechanism については(今回触れなかったが)
  家族対称性を必然的に要求する根拠として
  重要視している.