

高次元における フレーバー物理

2011年 1月 25日

@ 余剰次元物理2011

吉岡 興一 (京大理)

Introduction

- 標準模型におけるフレーバー物理
 - フェルミオンの質量階層性と世代混合 (Yukawa coupling)
 - FCNC (GIM)
- 高次元に特有のフレーバー力学
- 最近の発展

背景時空

平坦

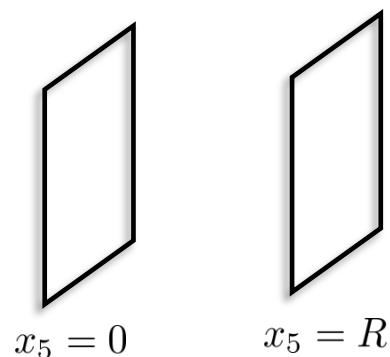
$$ds^2 = dx^2 + dx_5^2$$

歪曲

(Randall-Sundrum)

$$ds^2 = e^{-2kx_5} dx^2 + dx_5^2$$

k : 曲率



(chiral fermions)

モード展開

$$\psi(x, x_5) = \psi_0(x) f(x_5) + \psi_1(x) f_1(x_5) + \psi_2(x) f_2(x_5) + \dots$$

$$\text{高次元場} = \boxed{\text{ゼロモード}} + \boxed{\text{Kaluza-Klein (excited) モード}}$$

(我々)

f : 運動方程式から決まる 波動関数

5D fermion :

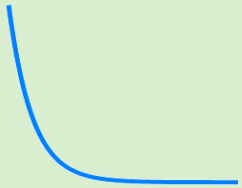
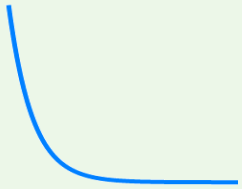
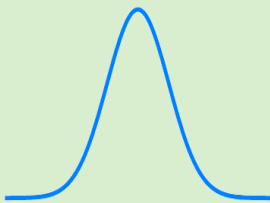
$$\mathcal{L} = \sqrt{-g} \left[i\bar{\psi} \not{D} \psi - m\bar{\psi}\psi - y\phi\bar{\psi}\psi \dots \right]$$

重力

質量

相互作用

波動関数の例

背景	波動関数	形
Flat	e^{-mx_5}	
RS	$e^{-(m - \frac{k}{2})x_5}$	
domain wall ($\langle \phi \rangle = x_5$)	$e^{-(x_5 - m)^2}$	

質量パラメータ



フレーバー(世代)の区別

高次元物理を決めるもの

背景時空

- Flat, RS, ...

粒子の種類

- SM + α

粒子の配置

- 高次元に住む (波動関数 = 平ら, 局在, ...)
- 4次元境界に住む

境界の物理

- 境界条件 (対称性の破れ)
- 境界上の項

フレーバー
物理

4次元の Yukawa coupling

Yukawa 階層性を 高次元の力学で 説明したい

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}}^{4d} = \int dx_5 y_{ij} \bar{\psi}_i(x, x_5) \psi_j(x, x_5) H \delta(x_5 - R) + \text{h.c.}$$

↑
ゲージ階層性
SUSY etc.



$$y_{ij}^{4d} = y_{ij} f_i(R) f_j(R) \quad (\times f_H(R))$$

- Volume suppression

$$f_i = \frac{1}{(\Lambda R)^{n_i/2}}$$

世代の違いは

フェルミオン場が
感じる次元の数 n_i

- RS with bulk mass

$$f_i = \sqrt{\frac{2m_i - k}{1 - e^{-(2m_i - k)R}}} e^{-(m_i - \frac{k}{2})R}$$

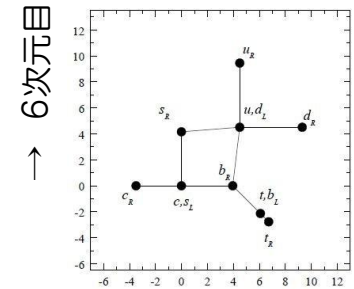
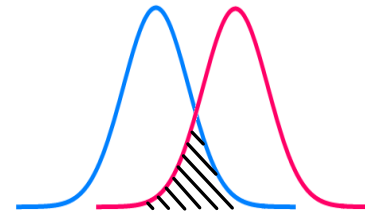
質量パラメータ m_i

その他の高次元フレーバー機構

- 高次元中の距離

- split fermions

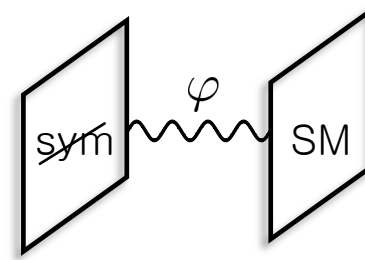
$$y_{ij}^{4d} \sim e^{-(m_i - m_j)^2}$$



→ 5次元目

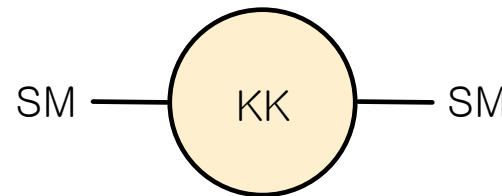
Schmaltz et al.

- distant breaking



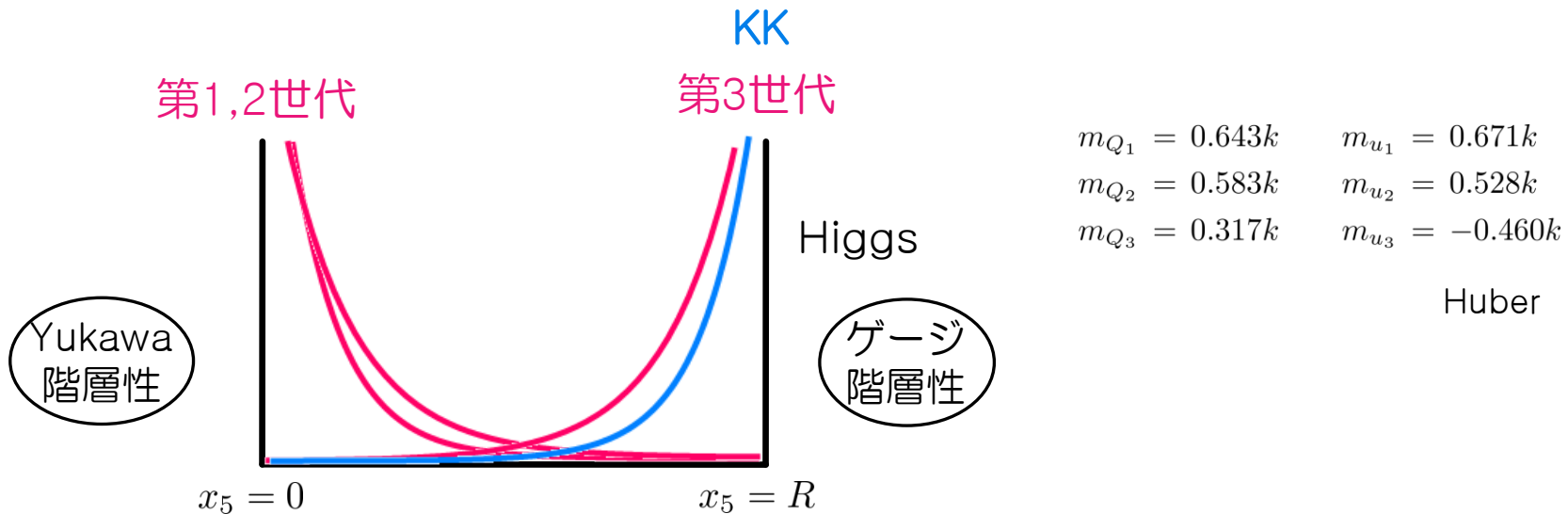
- くり込み群の効果

$$y_{ij}^{4d} \sim \frac{1}{(\Lambda R)^{\delta_{ij}}}$$



- 境界上のフレーバーを破る項

基本的な setup (RS時空)



$$\begin{aligned}
 m_{Q_1} &= 0.643k & m_{u_1} &= 0.671k \\
 m_{Q_2} &= 0.583k & m_{u_2} &= 0.528k \\
 m_{Q_3} &= 0.317k & m_{u_3} &= -0.460k
 \end{aligned}$$

Huber

	局在地	Higgs との coupling	KK との coupling	
第1,2世代	$x_5 = 0$	weak	weak	FCNC 抑圧
第3世代	$x_5 = R$	strong	strong	

↓ Yukawa 階層性
↘ new flavor violation

Naive な operator 解析

最も効きそうなのは **TeV** boundary 上の
non-renormalizable operators :

naive には 1/TeV
でのみ suppress

$$\int dx_5 \sqrt{-g} \frac{1}{\Lambda^4} \bar{\psi}_i \psi_j \bar{\psi}_k \psi_\ell \delta(x_5 - R) \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{M^2} \bar{\psi}_i^{(0)} \psi_j^{(0)} \bar{\psi}_k^{(0)} \psi_\ell^{(0)}$$

$$M \simeq \frac{\Lambda^2}{k} \times \begin{cases} e^{-kR} \cdot e^{\sum(m_i - \frac{k}{2})R} & (m > \frac{k}{2}) \\ e^{-kR} & (m < \frac{k}{2}) \end{cases}$$

- Yukawa 階層性のために m_i が決まり $M \sim 10^{7-8} \text{ GeV}$
- Kaon や LFV からの制限はだいたい $M > 10^{6-7} \text{ GeV}$

(proton decay は 違う物理 が必要)

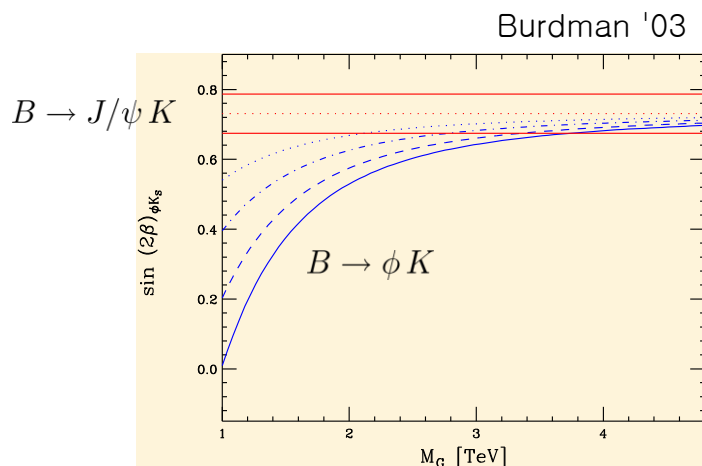
フレーバーを破る gauge coupling

KK ゲージ場は、波動関数が歪んでいるので
世代ごとに異なる gauge coupling をもつ

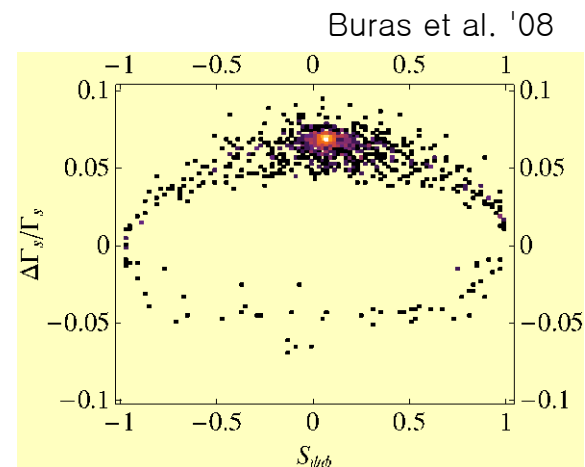
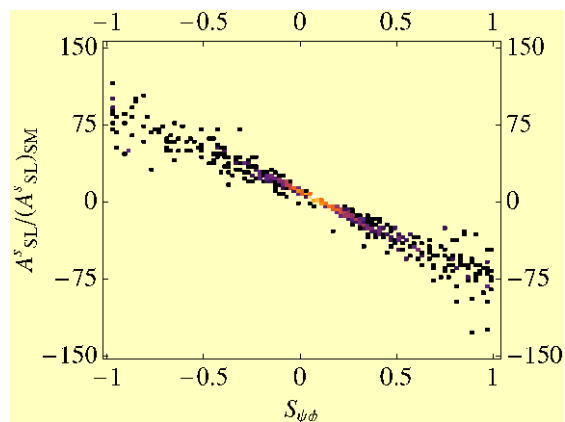
Delgado-Pomarol-Quiros

- tree-level でのフレーバーの破れ
- 第3世代が強く couple

➡ B physics ?



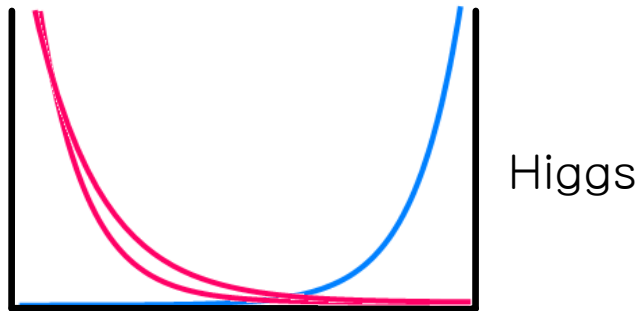
1st KK gluon mass



実験的な制限は、第1,2世代のほうが強い →

第1,2世代

KK



1,2世代と KK が離れて局在



世代 universal な coupling
(up to CKM 程度の破れ)

1st KK gauge 場
との coupling

$$g_{ij}^{(1)} \simeq g \left(\frac{-1}{kR} + \frac{2.3}{3 - \frac{2m_i}{k}} f_i^2(R) \right) \delta_{ij}$$

↑
 $x_5 = 0$

↑
 $x_5 = R$

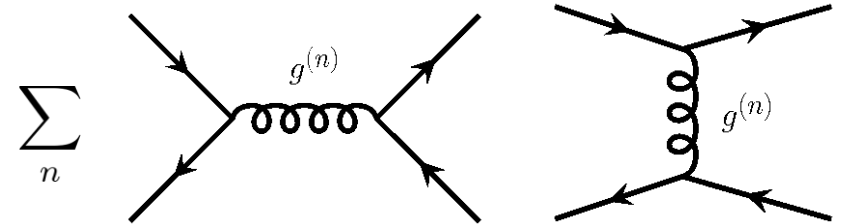
mass basis
で見ると



$$g_{ij}^{(1)} \simeq g f_i(R) f_j(R) \quad (i \neq j)$$

KK-induced 4-Fermi op.

KK gauge boson を積分する
(1st KK gluon mass M_G)



(KK EW boson もある)

$$H = C^1 (\bar{q}_L^{i\alpha} \gamma_\mu q_{L\alpha}^j) (\bar{q}_L^{k\beta} \gamma^\mu q_{L\beta}^\ell) + C^4 (\bar{q}_R^{i\alpha} q_{L\alpha}^k) (\bar{q}_L^{\ell\beta} q_{R\beta}^j) + C^5 (\bar{q}_R^{i\alpha} q_{L\beta}^\ell) (\bar{q}_L^{k\beta} q_{R\alpha}^j)$$

UTfit
lower bound

suppression
scale

Parameter	Limit on Λ_{NP}		Suppression in RS
Re C_K^1	1.0×10^3	<	$7.6 \times 10^3 M_G$
Re C_K^4	12×10^3	<	$7.3 \times 10^3 M_G$
Re C_K^5	10×10^3	<	$12.6 \times 10^3 M_G$
Im C_K^1	15×10^3	<	$7.6 \times 10^3 M_G$
Im C_K^4	160×10^3	<	$7.3 \times 10^3 M_G$
Im C_K^5	140×10^3	<	$12.6 \times 10^3 M_G$

[TeV]

$$C_K^4 \sim \frac{g^2}{M_G^2} f_{Q_1} f_{Q_2} f_{d_1} f_{d_2}$$

$$M_G \gtrsim 22 \text{ TeV}$$

Csaki-Falkowski-Weiler

結局…

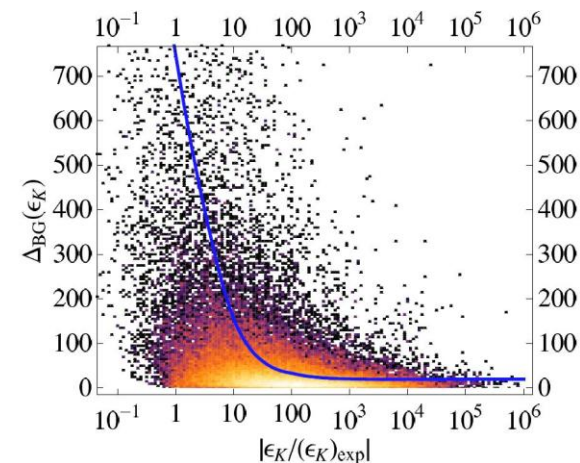
$$M_G \gtrsim 22 \text{ TeV}$$

- LHC で見えない
- fine tuning



他のフレーバー力学が必要

- フレーバー対称性
 - 4次元境界上のフレーバーを破る項
- etc.



Buras et al.

高次元に特有な力学…??

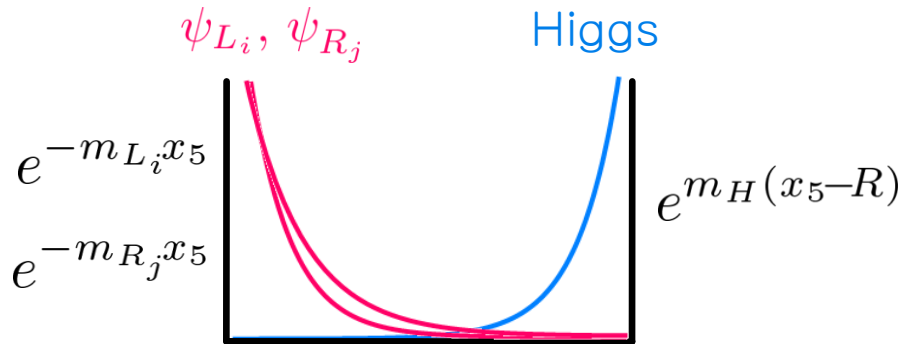
レプトンの世代物理

- クォーク : 質量階層性 \Leftrightarrow CKM 小混合
- 荷電レプトン : down クォークと類似
- ニュートリノは？
 - Dirac or Majorana ?
 - MNS 大混合 v.s. 質量階層性 ?
 - O(eV) 質量 ?



高次元力学

- Volume suppression Dienes et al., Arkani-hamed et al.
- RS with bulk mass Grossman-Neubert



Higgs も高次元場 (局在)

$$y_{ij}^{4d} \simeq Y_{ij} \times \begin{cases} e^{-(m_{L_i} + m_{R_j})R} & [m_{L_i} + m_{R_j} < m_H] \\ e^{-m_H R} & [m_{L_i} + m_{R_j} > m_H] \end{cases}$$

← 荷電レプトン
← ニュートリノ

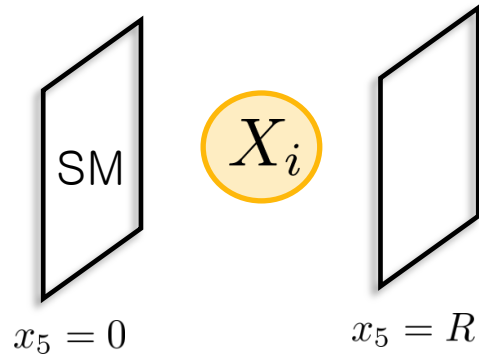
フレーバー
階層的

$$y_{eij}^{4d} \gg y_{\nu ij}^{4d}$$

フレーバー
非依存

- Dirac ニュートリノ
- RS の場合 ($m_H \sim k$)、 $m_\nu^{4d} \sim v e^{-kR} \sim \mathcal{O}(\text{eV})$
- Lepton フレーバーの破れは "RS-GIM" で suppress

ニュートリノ世代混合



$X = \nu_R$: 右手型ニュートリノ

ϕ : フレーバー対称性を
破るスカラー


ニュートリノ世代混合の実験値（ \equiv tri-bimaximal型）は
"整列した" 世代構造を要求している :

$$m_\nu = \frac{m_1}{6} \begin{pmatrix} 4 & -2 & -2 \\ -2 & 1 & 1 \\ -2 & 1 & 1 \end{pmatrix} + \frac{m_2}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} + \frac{m_3}{2} \begin{pmatrix} & & \\ & 1 & -1 \\ -1 & & 1 \end{pmatrix}$$

世代の整列 \longleftrightarrow X_i の境界条件

Haba et al.
Kobayashi et al.

まとめ

- やっぱりフレーバー問題は難しい！
 - Yukawa 階層性 v.s. FCNC, CP 
 - さらに 電弱精密測定 of 制限も
- 他の時空, 場の性質, etc. におけるフレーバー物理
- 高次元特有の何かがあるか？