

# ゲージ・ヒッグス統一モデルにおける 湯川結合のずれとヒッグス粒子崩壊について

安達裕樹  
松江高専

- Eur.Phys.J.Plus 130 (2015) 8, 168
- arXiv:1501.06229 [hep-ph]  
丸信人氏 (大阪市立大学) との共同研究に基づく

# 導入

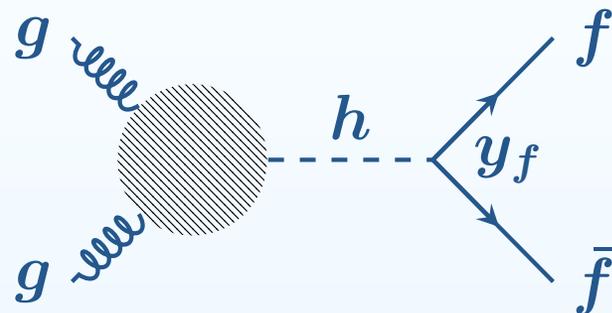
- 標準模型
  - 現在知られている粒子をすべて含む
  - 100GeV 程度までの物理を概ね説明
- フェルミオン質量と湯川結合の関係

$$yH\bar{\psi}\psi = y(v + h)\bar{\psi}\psi$$

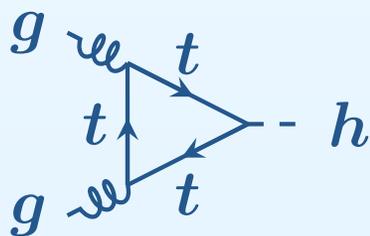
- フェルミオン質量の生成
- 湯川結合の強さ  $y \propto$  質量  $m$
- 標準模型を超える物理
  - $g - 2$ 、暗黒物質、...  $\Rightarrow$  標準模型を超える物理があると期待
- ヒッグスセクターの拡張
  - 湯川結合が標準模型と異なる振る舞い  $\Rightarrow$  湯川結合に着目

# 導入

ヒッグス粒子の崩壊:  $gg \rightarrow h \rightarrow \bar{f}f$



- 湯川結合定数  $y_f$  の標準模型からのずれ
- $gg \rightarrow h$



KKモードトップクォークの寄与

導入

湯川結合のずれ

- 導入
- 導入
- 導入
- 湯川結合のずれ
- 湯川結合のずれ
- 湯川結合のずれ
- 湯川結合のずれ
- 湯川結合のずれ
- 湯川結合のずれ
- $y_{\tau}^{\text{GHU}} / y_{\tau}^{\text{SM}}$
- 湯川結合のずれ
- $y_b^{\text{GHU}} / y_b^{\text{SM}}$
- 湯川結合のずれ

$gg \rightarrow h$  の評価

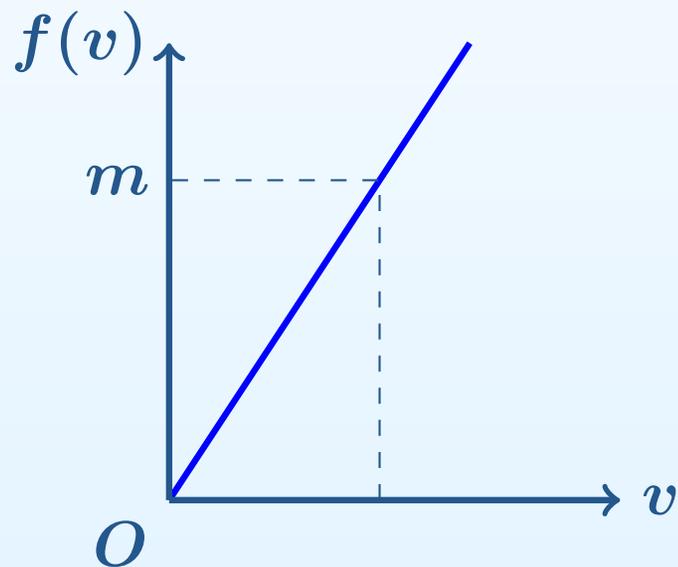
まとめ

# 湯川結合のずれ

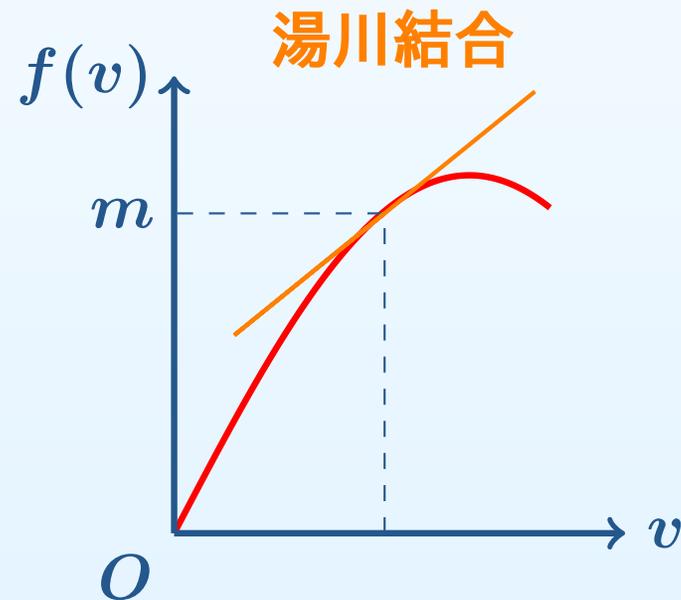
# 導入

- 一般の湯川相互作用

$$f(\mathbf{H})\bar{\psi}\psi = f(\mathbf{v} + \mathbf{h})\bar{\psi}\psi = \left[ \underbrace{f(v)}_{\text{質量 } m} + \underbrace{\frac{df(v)}{dv}}_{\text{湯川結合 } y} h + \dots \right] \bar{\psi}\psi$$



(a) 標準模型タイプ  
 $f(v) = yv$



(b) 非標準模型タイプ  
 $f(v) = ?$

# 導入

- GHU 模型 湯川相互作用=高次元ゲージ相互作用

$$\bar{\psi} i \Gamma^M D_M \psi \supset \bar{\psi} i \Gamma^M \partial_M \psi + \underbrace{\frac{g}{2} \bar{\psi} A_\mu \gamma^\mu \psi}_{\text{ゲージ}} + \underbrace{\frac{g}{2} \bar{\psi} A_y \Gamma^y \psi}_{\text{湯川}}$$

⇒ 標準模型タイプに見える

- 2つの見方

- 線形表示:  $\left[ \partial_y - \frac{i}{2} g A_y \right] \gamma^5 \psi(x, y)$
- 非線形表示 (axial gauge  $A_y \rightarrow A'_y = A_y - \partial_y \chi(y) = 0$ )

$$\left[ \partial_y - \frac{i}{2} g A_y \right] \gamma^5 \psi(x, y) \rightarrow \partial_y \left[ e^{-\frac{i}{2} g \int A_y dy} \gamma^5 \psi(x, y) \right]$$

0モードだけが物理的自由度として残る

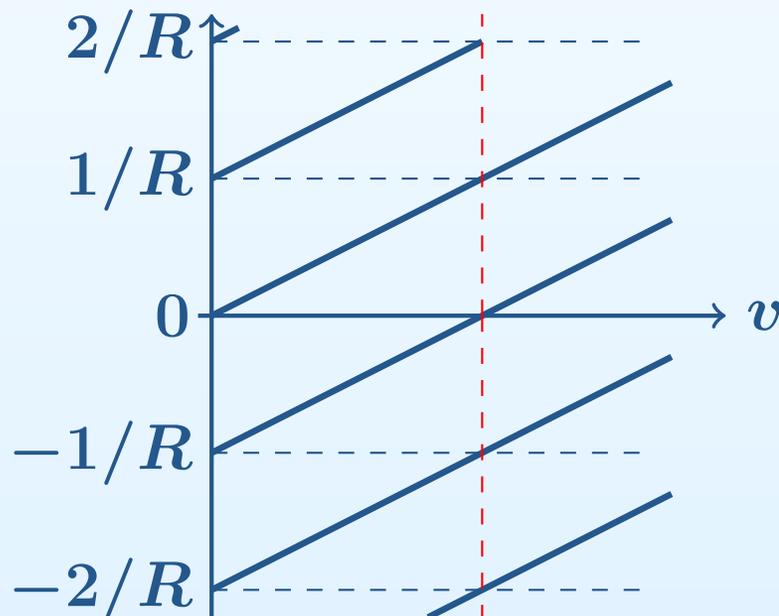
# 導入

- Wilson line phase

$$\exp \left[ -\frac{i}{2} g \oint A_y dy \right] = \exp [-i\pi g v R]$$

ヒッグス場 ( $A_y$ ) の真空期待値  $v$ : **周期的**  $v \rightarrow v + 2/(gR)$

- 例



$$m_n \psi = \left[ \partial_y - i \frac{gv}{2} \right] \gamma^5 \psi$$

$$m_n = \frac{\downarrow n}{R} + \frac{gv}{2}$$

$v$  について **周期的**

# 湯川結合のずれ

GHU では真空期待値  $v$  に対して周期性がある

⇒ 湯川相互作用についても **非線形性が現れうる**

Y. Hosotani, Y. Kobayashi, Phys. Lett. B 674, 192.

Y. Hosotani, P. Ko, M. Tanaka, Phys. Lett. B 680, 179.

K. Hasegawa, N. Kurahashi, C.S. Lim, K. Tanabe, PRD87:016011.

$$m_{\text{SM}}\psi = \left[ \gamma^5 \partial_y - M\epsilon(y) - i\frac{gv}{2}\gamma^5 \right] \psi$$
$$\frac{y^{\text{GHU}}}{y^{\text{SM}}} = \frac{1}{m_{\text{SM}}/v} \frac{dm_{\text{SM}}}{dv}$$
$$= \frac{M^2 - m_{\text{SM}}^2}{M^2 - \pi R m_{\text{SM}}^2 \sqrt{M^2 - m_{\text{SM}}^2}} \frac{\frac{1}{2}gv\pi R \cot\left(\frac{1}{2}gv\pi R\right)}{\coth(\pi R \sqrt{M^2 - m_{\text{SM}}^2})}$$

$\neq 1$

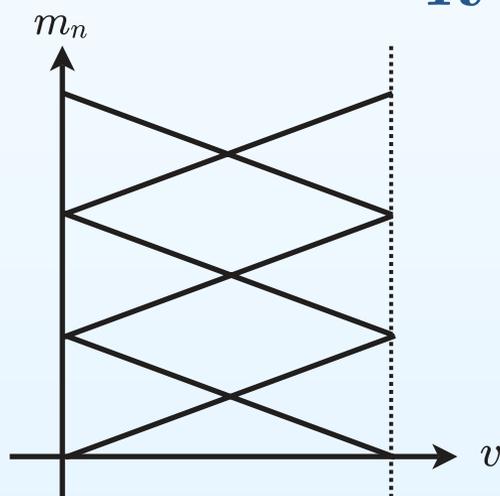
湯川結合が真空期待値  $v$  によって変化: **標準模型からずれる**

# 湯川結合のずれ

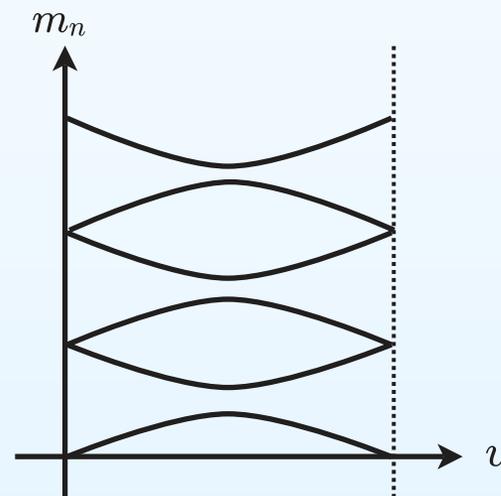
K. Hasegawa, N. Kurahashi, C.S. Lim, K. Tanabe, PRD87:016011.

$$m_n \psi = \left[ i\gamma^5 \partial_y - M\epsilon(y) - i\frac{gv}{2}\gamma^5 \right] \psi$$

$$m_n = \frac{n}{R} \pm \frac{gv}{2} @ M = 0$$



$M = 0$



$M \neq 0$

バルク質量  $M$  が translational invariance を壊す  
異なる KK mode 間で level crossing が阻止される

# 湯川結合のずれ

湯川結合のずれ  $\Rightarrow h \rightarrow \bar{f}f$  が標準模型からずれる可能性

$$\frac{y^{\text{GHU}}}{y^{\text{SM}}} \propto \frac{1}{2} g v \pi R \cot \left( \frac{1}{2} g v \pi R \right)$$

- $d$  型クォーク (3) のみ議論
- exotic matter の排除
- mixing の効果

- $M^4 \otimes S^1/Z_2$  上での  $SU(3) \otimes U(1)$  ゲージ理論
- $u$  型クォークの導入 ( $3 + \bar{6}$ )
- ブレーン質量の導入

# 湯川結合のずれ

- $\bar{6}$  の導入とブレン質量項の導入

$$0 = \left[ i \not{\partial} + i \frac{gv}{2} \gamma^5 \sigma_1 - M \epsilon(y) \right] \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau \end{pmatrix} \quad :3 \text{ のみ導入}$$

$$\Rightarrow 0 = \left[ i \not{\partial} + i \frac{gv}{2} \gamma^5 \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sqrt{2} \sigma_1 \end{pmatrix} - M \epsilon(y) \right] \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau \\ \tau' \\ \tau_3 \end{pmatrix} \quad :3, \bar{6} \text{ 導入}$$

$$+ \sqrt{\pi R} M_B \bar{\tau}'_B \underbrace{U \begin{pmatrix} \tau \\ \tau' \end{pmatrix}}_{\text{混合}} \delta(y) + \sqrt{\pi R} M_B \bar{\tau}''_B \tau_3 \delta(y)$$

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

# 湯川結合のずれ

## スペクトラム

$$\frac{m_{\text{SM}}^2 \sinh^2(\pi R \sqrt{M^2 - m_{\text{SM}}^2})}{M^2 - m_{\text{SM}}^2} = \sin^2 \frac{gv\pi R}{2}$$

↓

$$\frac{m_{\text{SM}}^2 \sinh^2(\pi R \sqrt{M^2 - m_{\text{SM}}^2})}{M^2 - m_{\text{SM}}^2} = \sin^2 \frac{gv\pi R}{2}$$

$$= \left[ \sin^2 \frac{gv\pi R}{2} - \sin^2 \frac{gv\pi R}{\sqrt{2}} \right] \sin^2 \theta$$

3 と  $\bar{6}$  の混合が反映

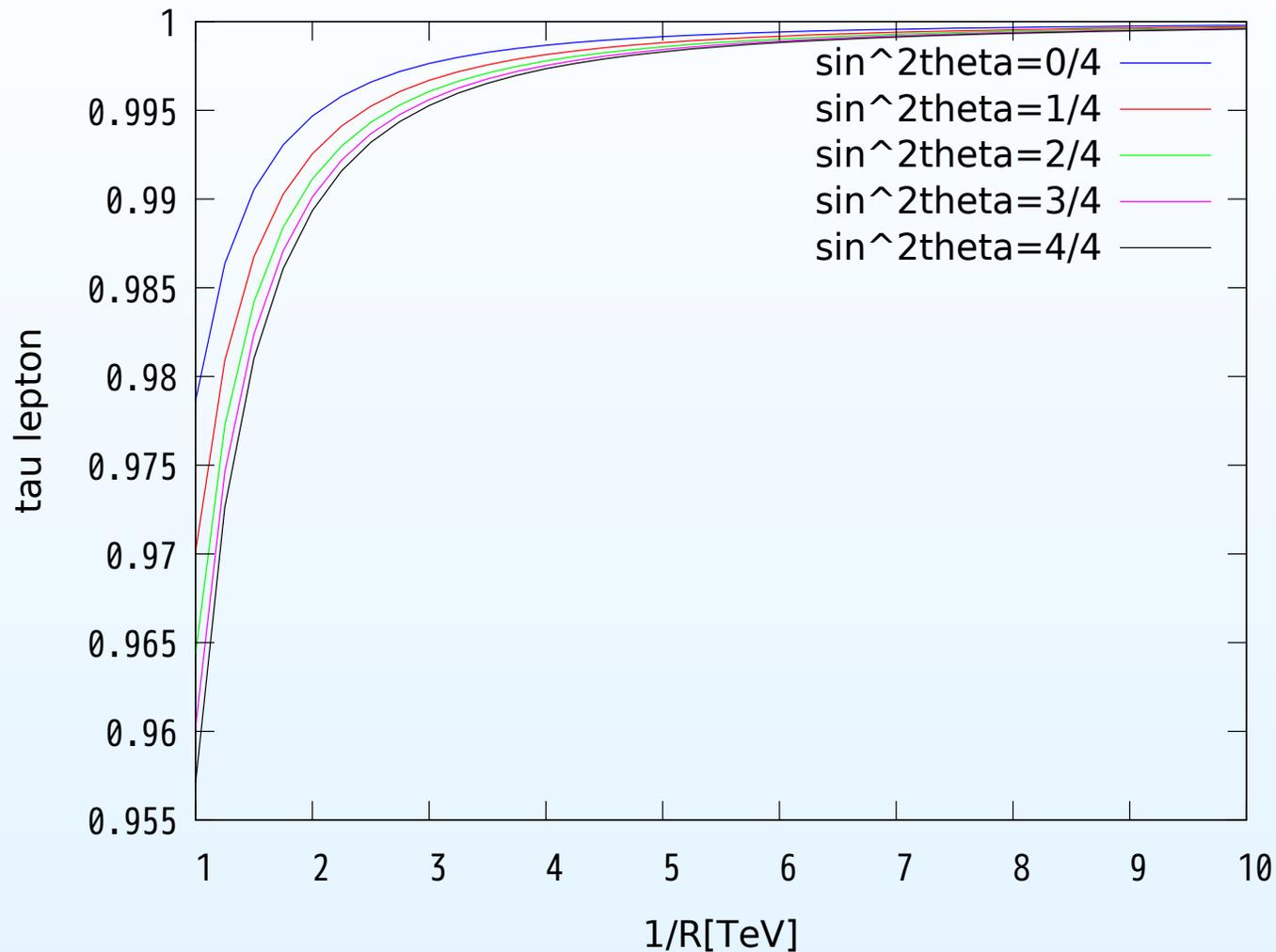
# 湯川結合のずれ

$$\frac{y^{\text{GHU}}}{y^{\text{SM}}} = \frac{M^2 - m_{\text{SM}}^2}{M^2 - \pi R m_{\text{SM}}^2 \sqrt{M^2 - m_{\text{SM}}^2} \coth\left(\pi R \sqrt{M^2 - m_{\text{SM}}^2}\right)} \frac{\frac{1}{2} g v \pi R}{\sin(gv\pi R)} \times \frac{\sin(gv\pi R)}{1 - \cos(gv\pi R)}$$

↓

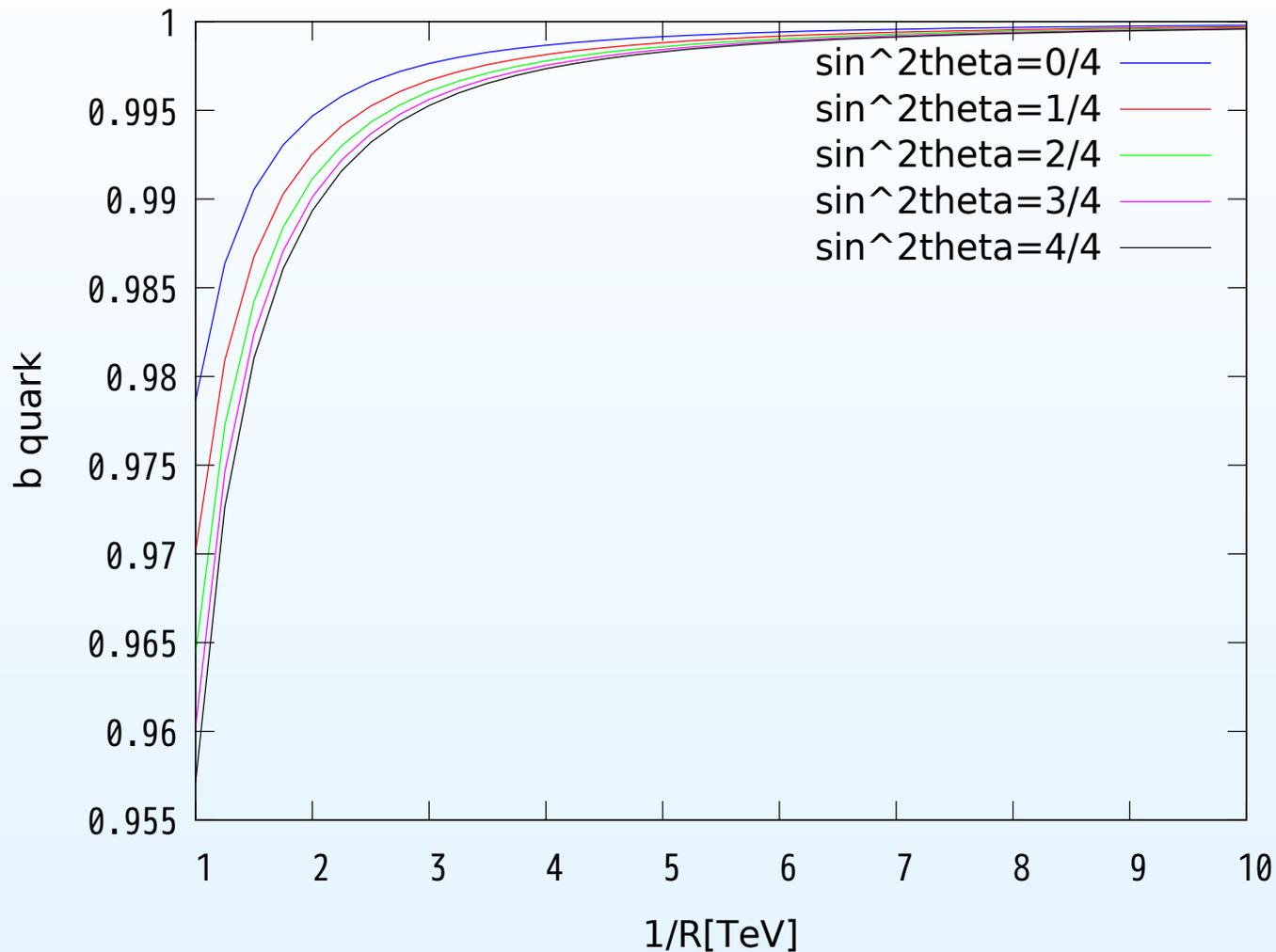
$$\frac{y^{\text{GHU}}}{y^{\text{SM}}} = \frac{M^2 - m_{\text{SM}}^2}{M^2 - \pi R m_{\text{SM}}^2 \sqrt{M^2 - m_{\text{SM}}^2} \coth\left(\pi R \sqrt{M^2 - m_{\text{SM}}^2}\right)} \frac{\frac{1}{2} g v \pi R}{\sin(gv\pi R) - [\sin(gv\pi R) - \sqrt{2} \sin(\sqrt{2} gv\pi R)] \sin^2 \theta} \times \frac{1 - \cos(gv\pi R) - [\cos(\sqrt{2} gv\pi R) - \cos(gv\pi R)] \sin^2 \theta}{\sin^2 \theta}$$

# 湯川結合のずれ $y_{\tau}^{\text{GHU}} / y_{\tau}^{\text{SM}}$



$$m_{\tau} = 1.77\text{GeV}, M_W = \frac{gv}{2} = 80.4\text{GeV}$$

# 湯川結合のずれ: $y_b^{\text{GHU}} / y_b^{\text{SM}}$



$$m_b = 4.18\text{GeV}, M_W = \frac{gv}{2} = 80.4\text{GeV}$$

## 湯川結合のずれ

$$\begin{aligned} \frac{y^{\text{GHU}}}{y^{\text{SM}}} &= \frac{M^2 - m_{\text{SM}}^2}{M^2 - \pi R m_{\text{SM}}^2 \sqrt{M^2 - m_{\text{SM}}^2}} \frac{\frac{1}{2} g v \pi R}{\coth \left( \pi R \sqrt{M^2 - m_{\text{SM}}^2} \right)} \\ &\times \frac{\sin(gv\pi R) - [\sin(gv\pi R) - \sqrt{2} \sin(\sqrt{2}gv\pi R)] \sin^2 \theta}{1 - \cos(gv\pi R) - [\cos(\sqrt{2}gv\pi R) - \cos(gv\pi R)] \sin^2 \theta} \\ &= [1 + \mathcal{O}((m_{\text{SM}}/M)^2)] \frac{1}{\coth \left( \pi R \sqrt{M^2 - m_{\text{SM}}^2} \right)} \\ &\times [1 + \mathcal{O}((gv\pi R)^2)] \end{aligned}$$

$gv\pi R = 2M_W\pi R \ll 1, m_{\text{SM}} \ll M (\pi RM \sim 4)$  では  
湯川結合のずれは ほぼ現れない

導入

湯川結合のずれ

$gg \rightarrow h$  の評価

● ヒッグス粒子生成

$gg \rightarrow h$

● KK モードの影響

●  $gg \rightarrow h \rightarrow f\bar{f}$

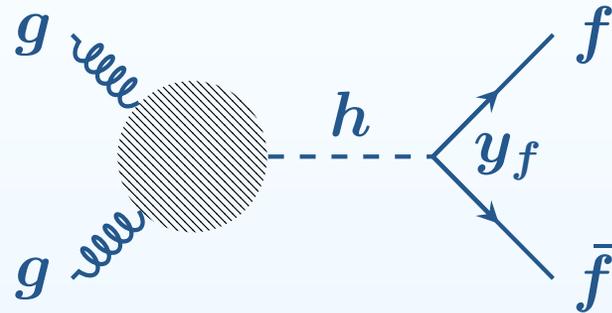
● KK モードの影響

まとめ

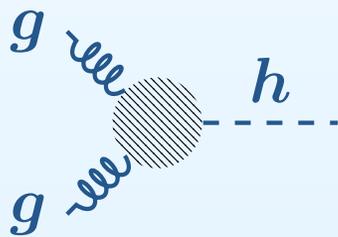
$gg \rightarrow h$  の評価

# ヒッグス粒子生成 $gg \rightarrow h$

ヒッグス粒子の生成:  $gg \rightarrow h$

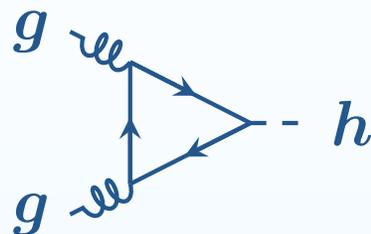


- $gg \rightarrow h$   
トップクォークのループが大きく寄与



KKモードトップクォークの寄与を考慮

# KK モードの影響



$m_t \sim 2M_W$  を再現するため、15次元表現を導入

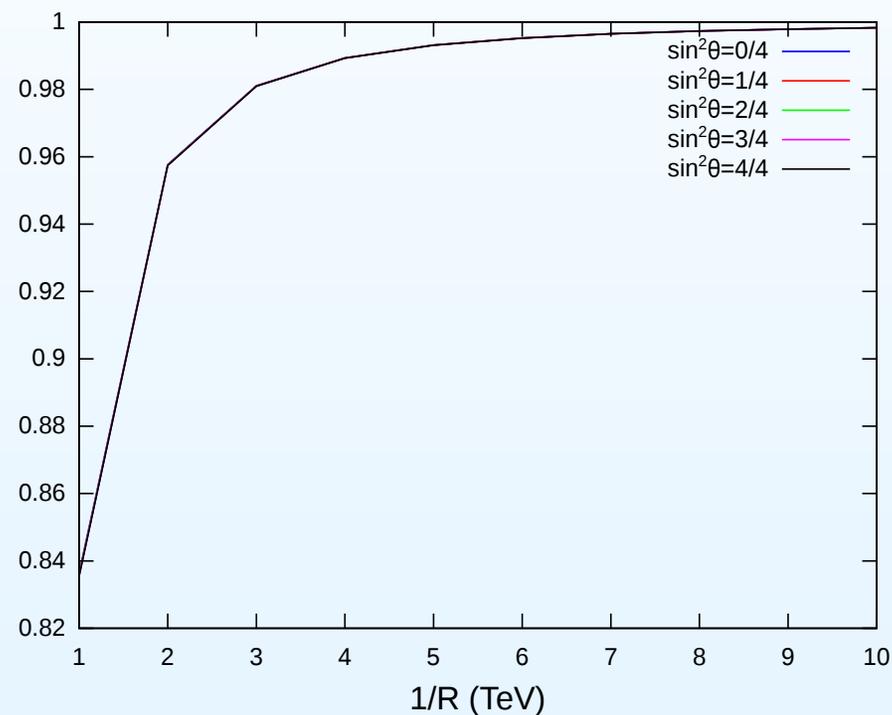
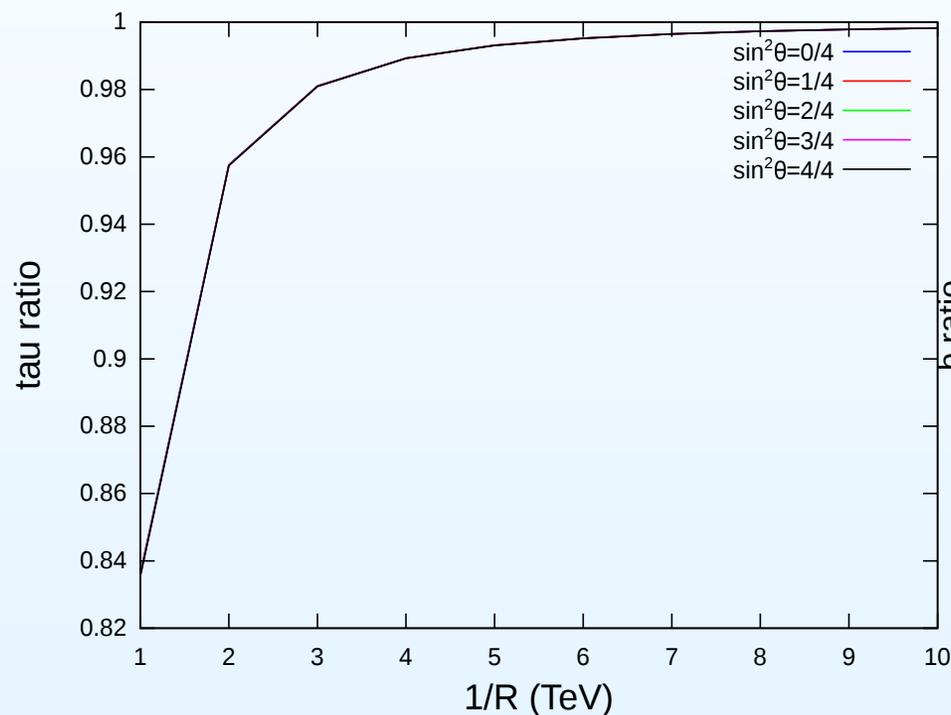
$$15 = 5 + 4 + 3 + 2 + 1$$

$$m_{4\pm}^{(n)}, m_{3\pm}^{(n)}, m_{2\pm}^{(n)}, m_{1\pm}^{(n)}, m_{0\pm}^{(n)},$$

$$\left( m_{a\pm}^{(n)} = \frac{n}{R} \pm aM_W \right)$$

# $gg \rightarrow h \rightarrow f\bar{f}$

$$\mu = \left| \frac{C_g^{\text{KK}}}{C_g^{\text{SM}}} \right|^2 \times \left| \frac{y^{\text{GHU}}}{y^{\text{SM}}} \right|^2$$



(  $m_\tau = 1.77\text{GeV}$ ,  $m_b = 4.18\text{GeV}$ ,  $M_W = \frac{gv}{2} = 80.4\text{GeV}$  )  
 標準模型の予言に比べて減少する

# KK モードの影響

$$m_{a\pm}^{(n)} = \frac{n}{R} \pm aM_W : y = \pm \frac{M_W}{v}$$

逆符号の寄与が打ち消しあう  
⇒ KK モードからの寄与は ヒッグス生成率を抑制

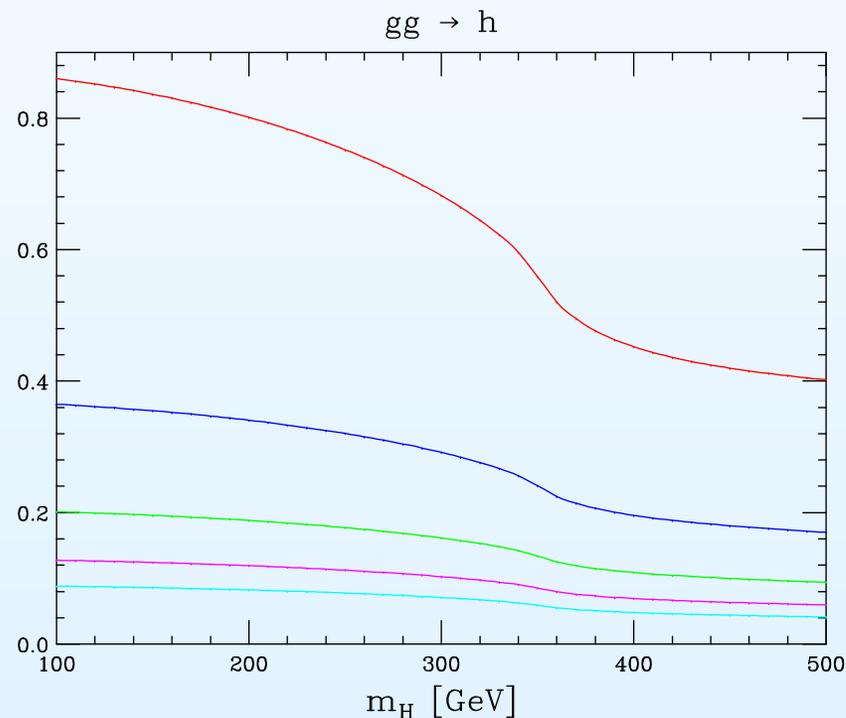
Cf. UED の場合は増加傾向

F. J. Petriello, JHEP 0205, 003 (2002).

$$m_t^{(n)} = \sqrt{\left(\frac{n}{R}\right)^2 + m_t^2}$$

全ての KK モードが同符号で効く

$(\sigma^{\text{UED}} - \sigma^{\text{SM}}) / \sigma^{\text{SM}}$



導入

湯川結合のずれ

$gg \rightarrow h$  の評価

まとめ

- まとめ
- 導入

まとめ

## まとめ

- 1世代を取り入れたモデルで湯川結合定数のずれを調べた
- 現実的なパラメータでは湯川結合のずれはかなり小さい
- 湯川結合のずれは  $h \rightarrow \tau\bar{\tau}, b\bar{b}$  にはほぼ影響しない
- ヒッグス生成率は抑制 (UED は増加傾向)

導入

湯川結合のずれ

$gg \rightarrow h$  の評価

まとめ

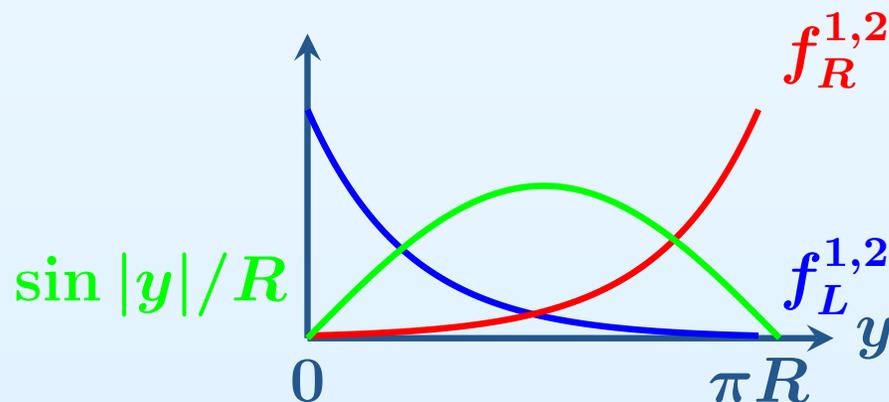
**backup**

# $U(1)_X$ の寄与

$$\begin{aligned} SU(3) \otimes U'(1) &\rightarrow SU(2)_L \otimes U(1) \otimes U'(1) \\ &\rightarrow \underbrace{SU(2)_L \otimes U(1)_Y}_{\text{標準模型}} \otimes U(1)_X \end{aligned}$$

$U(1)_X$ : ブレーン上でアノマラス  $\Rightarrow$  ブレーン上に大きな質量項

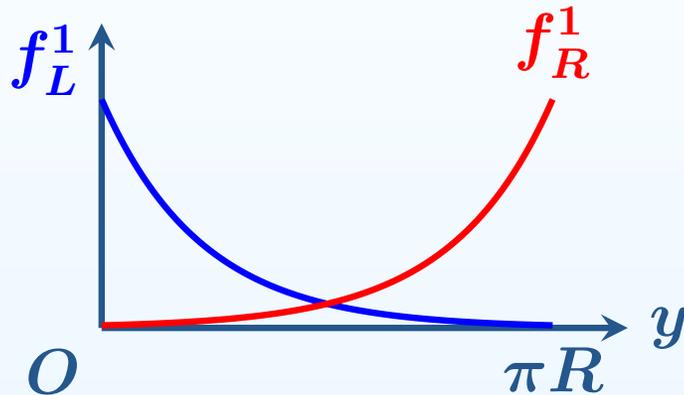
$$\text{モード関数} \sim \sin \left| \frac{n}{R} y \right|$$



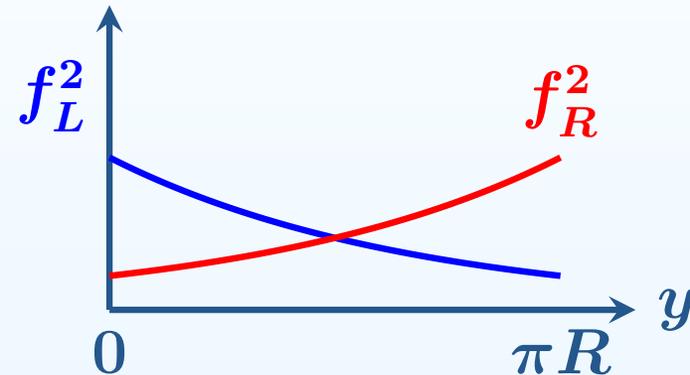
# 湯川結合の階層性

Arkani-Hamed , Schmaltz (1999)

- 階層性:余剰次元方向の局在化で達成



第1世代



第2世代

局在化:バルク質量  $M^i \epsilon(y) \bar{\psi}^i \psi^i$  でコントロール

$$Y^i \propto g \int dy f_L^i(y) f_R^i(y) \sim g \exp[-\pi R M^i]$$

( $R$ :余剰次元半径)

$M^i$ :世代ごとに異なる質量  $\Rightarrow$  フレーバー対称性の破れ

# 導入

- ゲージ・ヒッグス統一模型

N. S. Manton, Nucl. Phys. B158, 141 (1979).

Y. Hosotani, Phys. Lett. 126B, 309 (1983); 129B, 193 (1983).

H. Hatanaka, T. Inami, C.S. Lim, Mod.Phys.Lett.A13:2601-2612,1998.

- ヒッグスはゲージ場の余剰次元成分
- ゲージ対称性を破らずに、有限なヒッグス質量が現れる
- 湯川結合=高次元ゲージ結合
- $SU(2)$  二重項/ゲージ場を含む 5 次元 ( $S^1/Z_2$ ) 最小ゲージ・ヒッグス模型

⇒  $SU(3)_{\text{color}} \otimes SU(3)_W$  模型

- $SU(3)_W$  はオービフォールドで  $SU(2) \otimes U(1)$  へ