スリーサイトヒッグスレス模型における フレーバーの物理

阿部智広（名古屋大学）

2011年 3月 7日

基研研究会　素粒子物理学の発展２０１１

内容

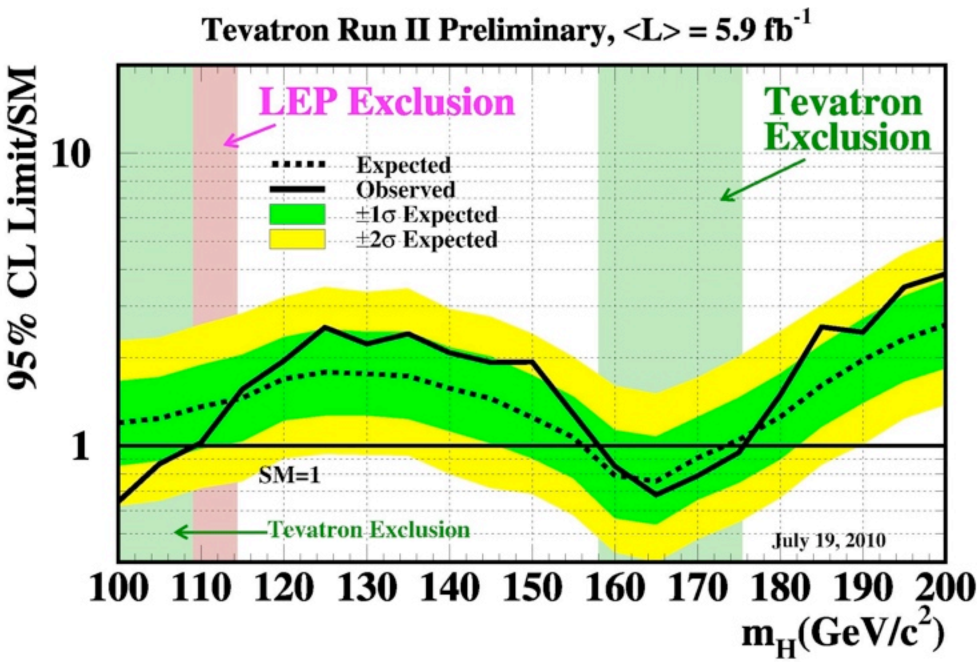
1. 研究の目的など

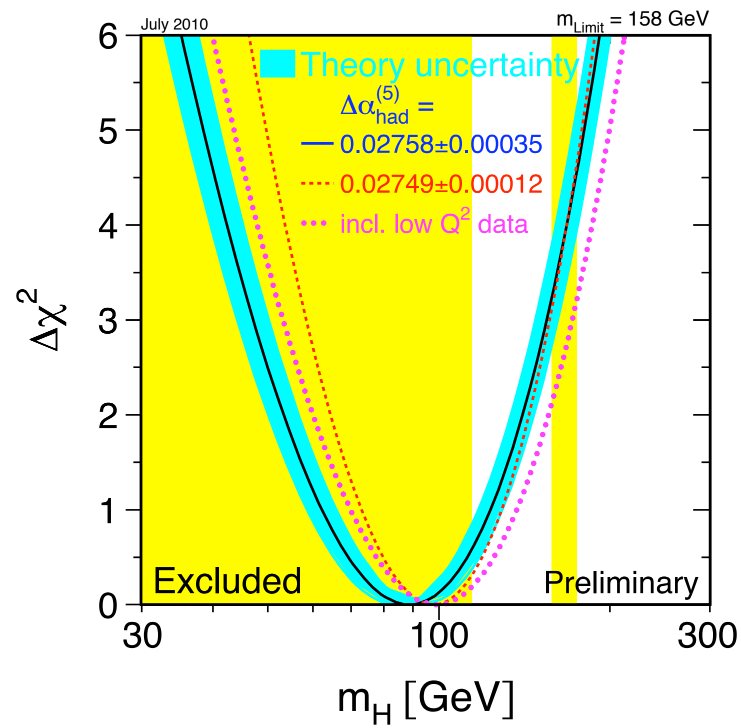
2. スリーサイトヒッグスレス模型

3. フレーバーの物理からの制限

4. まとめ

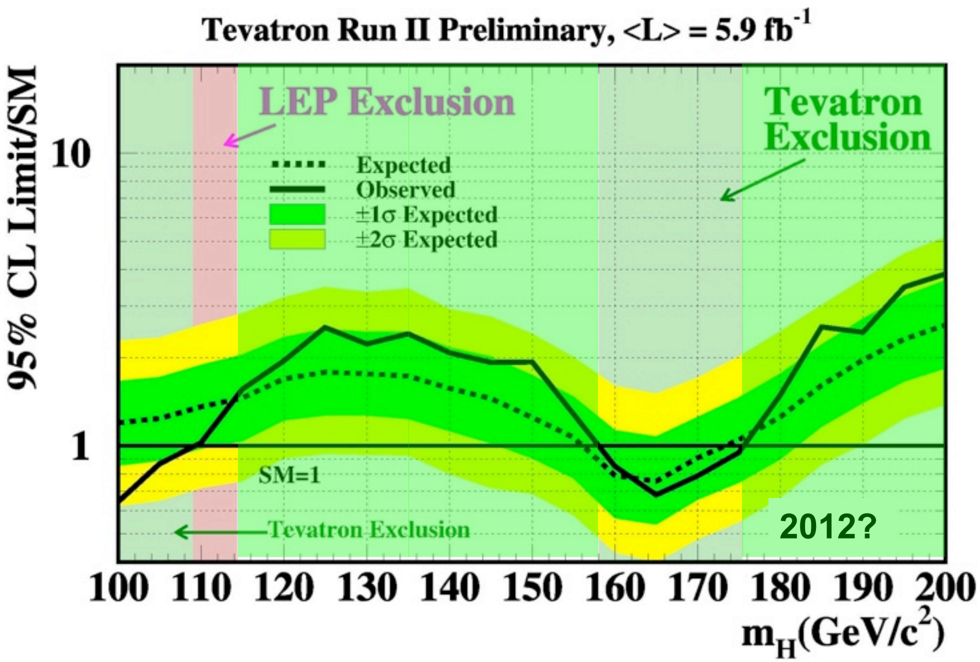
イントロダクション

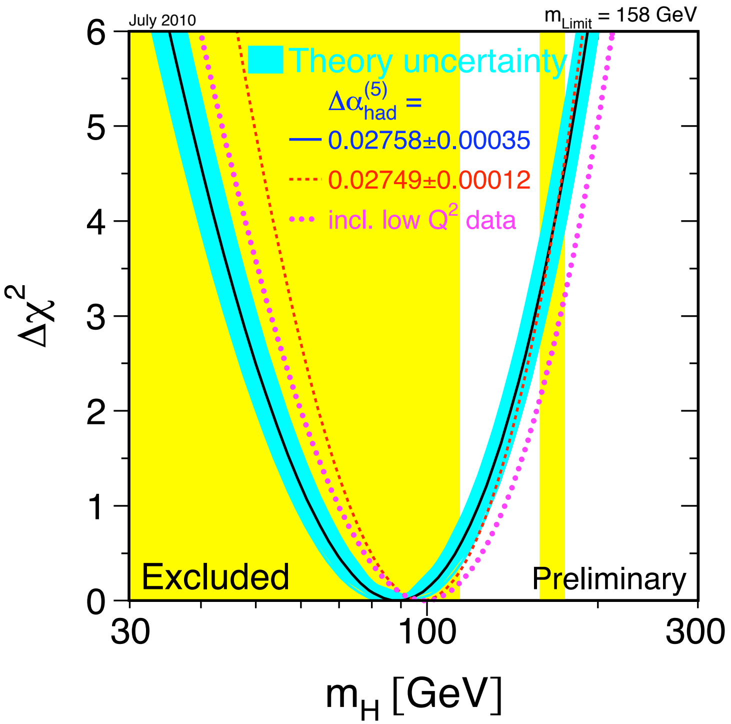




ヒッグスの存在しない可能性

イントロダクション





ヒッグスの存在しない可能性

イントロダクション

ヒッグスがない模型の乗り越えるべき事柄

•電弱対称性の破れの起源　（質量の起源）

•（摂動論的）ユニタリティーの問題

•精密測定との整合性

→

•Technicolor　（非摂動論的）

•**Higgsless**（摂動論的）

•...

Electroweak Chiral Lagrangian

$SU(2)_L \times U(1)_Y \to U(1)$ の有効理論

$$\mathcal{L} = \frac{v^2}{4}\mathrm{tr}(D_\mu U)^\dagger (D^\mu U) - \overline{\psi}_L U \begin{pmatrix} m_u & \\ & m_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_R \\ d_R \end{pmatrix} + (\mathrm{matter}) + (\mathrm{gauge})$$

$$U = \exp\left(i \frac{\tau^a \pi^a}{v} \right)$$: would-be NG boson の非線形表現

$$U \to g_L U g_Y^{-1}$$

$$g_L = \exp\left(i \frac{\tau^a}{2} \theta_L^a \right)$$

$$g_Y = \exp\left(i \frac{\tau^3}{2} \theta_Y \right)$$

- 摂動論的ユニタリティー : ~1TeV で破れる
- 精密測定との整合性　　 : S, T parameters

Electroweak Chiral Lagrangian

ゲージ場を増やす

M.Bando et.al Nucl.Phys. B259 (1985) 493

$SU(2)_0 \times SU(2)_1 \times U(1)_2 \to U(1)$ の有効理論

$$\mathcal{L} \ni \frac{f_1^2}{4}\mathrm{tr}(D_\mu U_1)^\dagger(D^\mu U_1) + \frac{f_2^2}{4}\mathrm{tr}(D_\mu U_2)^\dagger(D^\mu U_2)$$

$$U_i = \exp\left(i\frac{\tau^a \pi_i^a}{f_i}\right)$$

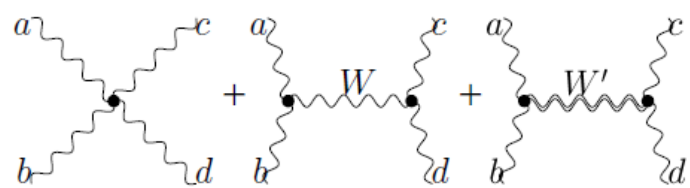
$$U_1 \to g_0 U_1 g_1^{-1}$$

$$U_2 \to g_1 U_2 g_2^{-1}$$

$$\frac{1}{v^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2}$$

摂動論的ユニタリティー

$$i\mathcal{M}(W_L^a W_L^b \to W_L^c W_L^d) =$$

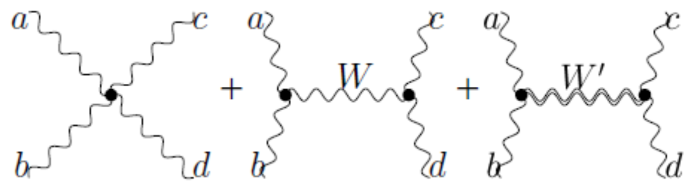


破れるスケールがあがる（~2TeV）

Unitarity and infinite gauge fields

無限個のゲージ場 → 完全に回復

$i\mathcal{M}(W_L^a W_L^b \to W_L^c W_L^d) =$



$+ \quad \cdots \quad$ +crossed.

Csaki et.al Phys.Rev.D69:055006,2004
Chivukula et.al Phys.Lett.B 525, 175(2002)
Chivukula et.al Phys.Lett.B 562, 109(2003)

余剰次元的な描像

4次元での $SU(2) \times SU(2) \times SU(2) \times SU(2) \times \cdots$

↕ deconstruction

Arkani-Hamed et.al PRL86 (2001) 4757-4761
Hill et.al PRD64 (2001) 105005

5次元での $SU(2)$

Effective Higgsless model

フェルミオンも増やす

- $i\mathcal{M}(f\overline{f} \to W_L W_L)$ のユニタリティー
- 精密測定との兼ね合い(S parameter)

Effective Higgsless model

フェルミオンも増やす

- $i\mathcal{M}(f\overline{f} \to W_L W_L)$ のユニタリティー
- 精密測定との兼ね合い(S parameter)

$$
\begin{array}{cccc}
W, & W', & W'', & W''', \ \cdots \\
f, & f', & f'', & f''', \ \cdots
\end{array}
$$

Effective Higgsless model

フェルミオンも増やす

- $i\mathcal{M}(f\overline{f} \to W_L W_L)$ のユニタリティー
- 精密測定との兼ね合い(S parameter)

$$\boxed{\begin{array}{cc} W, & W', \\ f, & f', \end{array}} \begin{array}{ccc} W'', & W''', & \cdots \\ f'', & f''', & \cdots \end{array}$$

Effective Higgsless model

フェルミオンも増やす

- $i\mathcal{M}(f\overline{f} \to W_L W_L)$ のユニタリティー
- 精密測定との兼ね合い(S parameter)

$$\begin{array}{cccccc} W, & W', & W'', & W''', & \cdots \\ f, & f', & f'', & f''', & \cdots \end{array}$$

3site Higgsless model

一度に多くの模型の現象論を扱える

内容

1. 研究の目的など

2. スリーサイトヒッグスレス模型

3. フレーバーの物理からの制限

4. まとめ

3site Higgsless Model

Chivukula et.al Phys.Rev.D74:075011 (2006)
Casalbuoni et.al Phys.Lett.B155(1985) 95

Extra particles

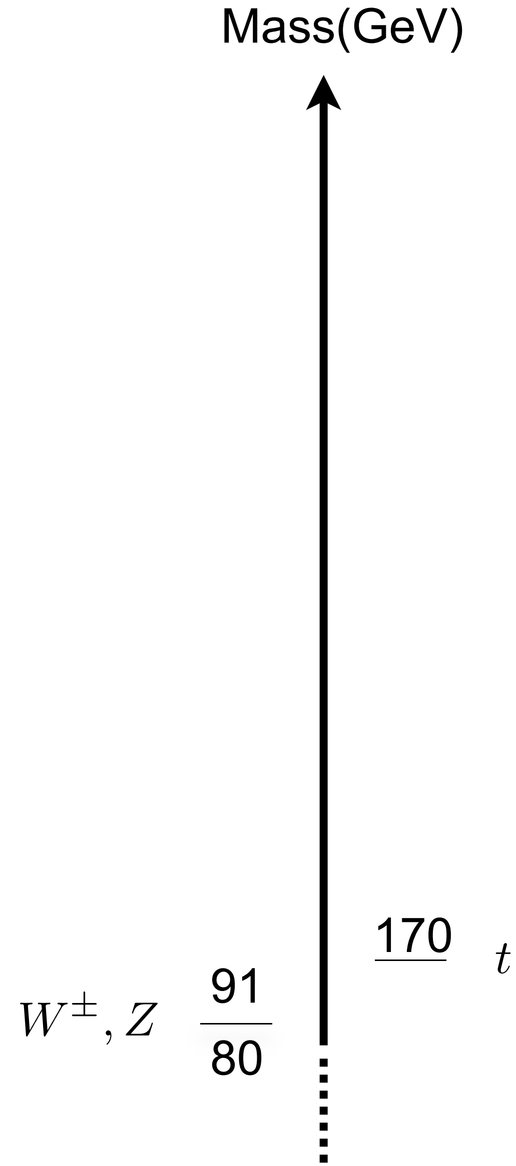
$$\begin{pmatrix} u' & c' & t' \\ d' & s' & b' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu'_e & \nu'_\mu & \nu'_\tau \\ e' & \mu' & \tau' \end{pmatrix}$$

$$W' \; Z'$$

SM particles

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

$$\gamma \; W \;\; Z \; G$$



3site Higgsless Model

Chivukula et.al Phys.Rev.D74:075011 (2006)
Casalbuoni et.al Phys.Lett.B155(1985) 95

Extra particles

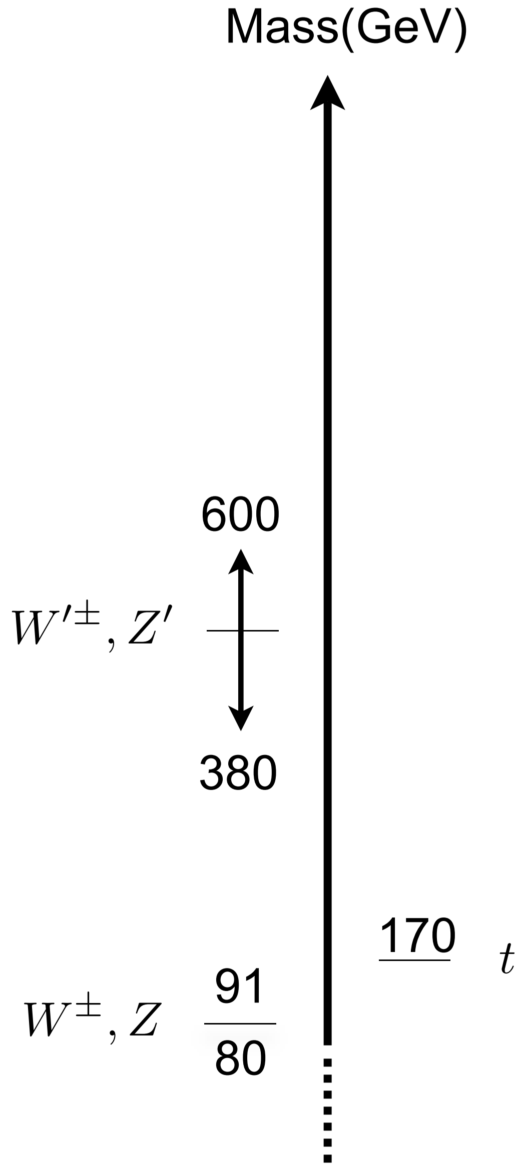
$$\begin{pmatrix} u' & c' & t' \\ d' & s' & b' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu'_e & \nu'_\mu & \nu'_\tau \\ e' & \mu' & \tau' \end{pmatrix}$$

$$W' \ Z'$$

SM particles

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

$$\gamma \ W \ Z \ G$$



3site Higgsless Model

Chivukula et.al Phys.Rev.D74:075011 (2006)
Casalbuoni et.al Phys.Lett.B155(1985) 95

Extra particles

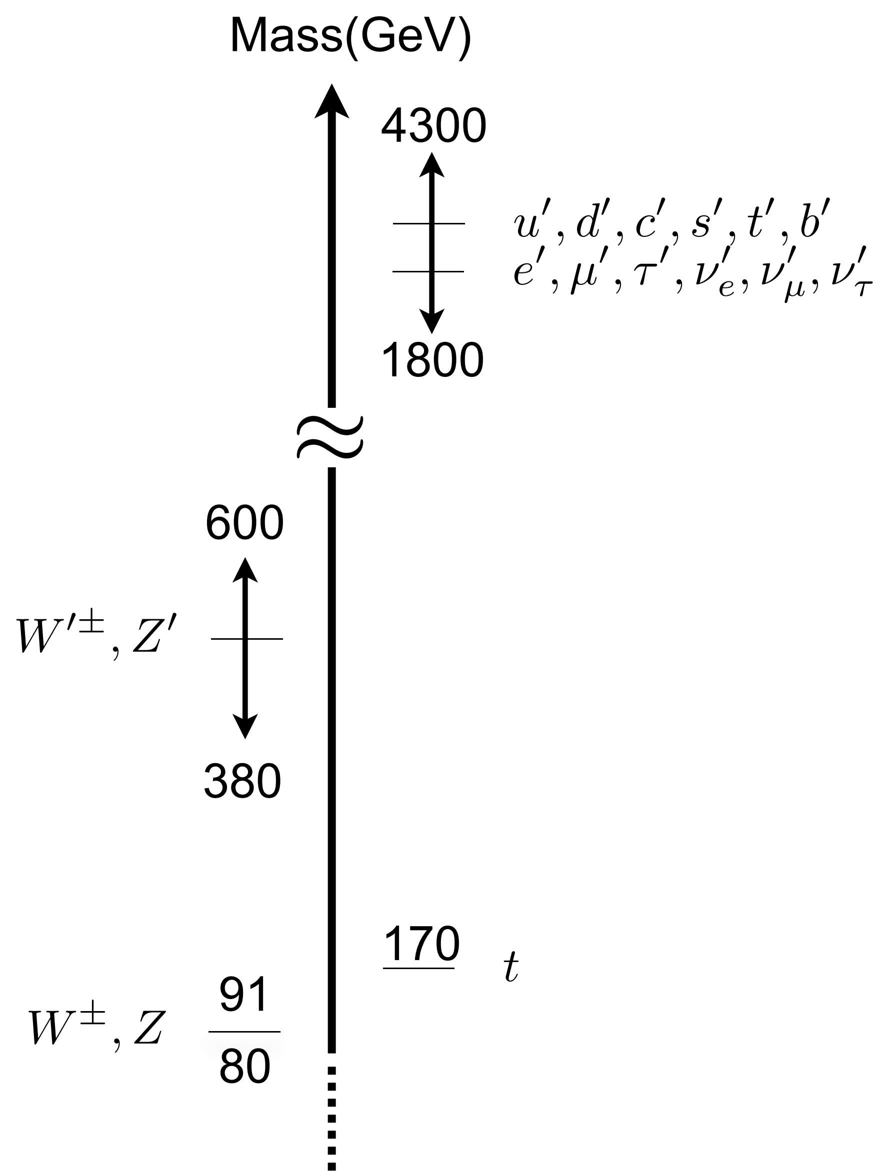
$$\begin{pmatrix} u' & c' & t' \\ d' & s' & b' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu'_e & \nu'_\mu & \nu'_\tau \\ e' & \mu' & \tau' \end{pmatrix}$$

$$W' \ Z'$$

SM particles

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

$$\gamma \ W \ Z \ G$$



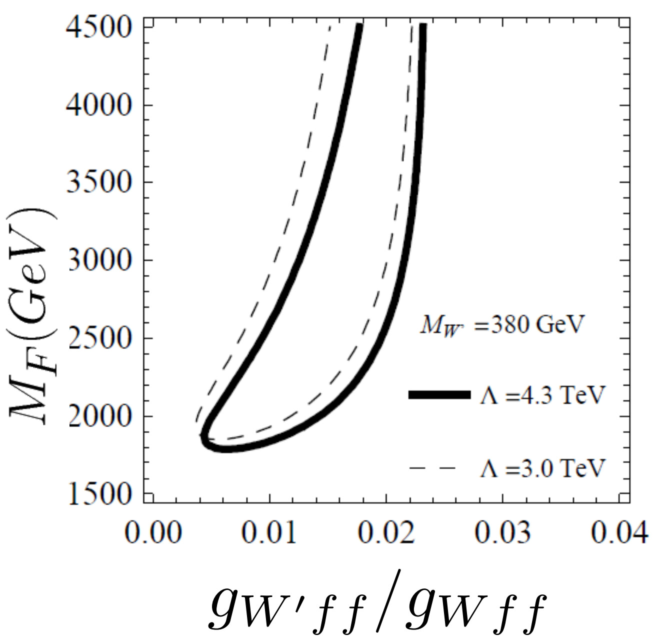
Fermiphobic

特徴：fermiophobic (STパラメータからの制限)

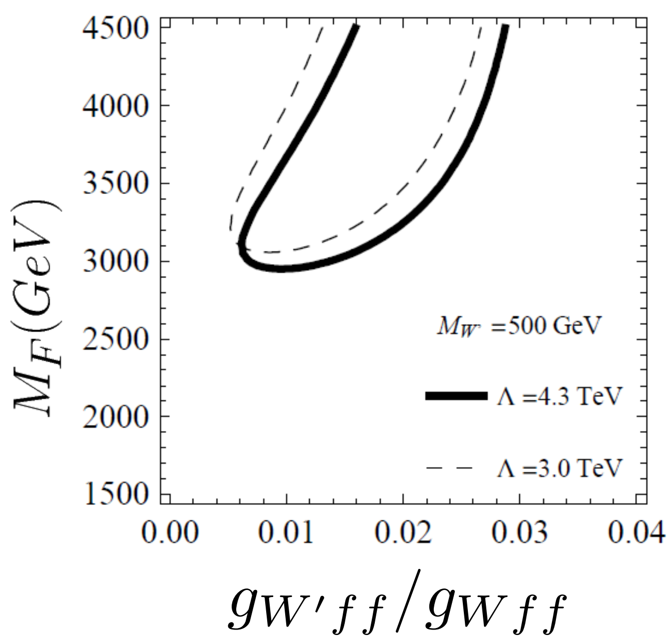
$$g_{W'ff}/g_{Wff} \sim \mathcal{O}(10^{-2})$$

Matsuzaki, Tanabashi, T.A,
Phys.Rev.D78:055020,2008

$M_{W'} = 380\mathrm{GeV}$



$M_{W'} = 500\mathrm{GeV}$



内容

1. 研究の目的など
2. スリーサイトヒッグスレス模型
3. フレーバーの物理からの制限
4. まとめ

Flavor physics in 3site Model

Yukawa int.

$$\begin{pmatrix} u_L & c_L & t_L \\ d_L & s_L & b_L \end{pmatrix} \longleftrightarrow \begin{pmatrix} u_R & c_R & t_R \\ d_R & s_R & b_R \end{pmatrix}$$

Flavor physics in 3site Model

$$\begin{pmatrix} u_L & c_L & t_L \\ d_L & s_L & b_L \end{pmatrix} \xleftrightarrow{\text{Yukawa int.}} \begin{pmatrix} u_R & c_R & t_R \\ d_R & s_R & b_R \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u'_L & c'_L & t'_L \\ d'_L & s'_L & b'_L \end{pmatrix} \qquad\qquad \begin{pmatrix} u'_R & c'_R & t'_R \\ d'_R & s'_R & b'_R \end{pmatrix}$$

Flavor physics in 3site Model

Yukawa int.

$$\begin{pmatrix} u_L & c_L & t_L \\ d_L & s_L & b_L \end{pmatrix} \qquad \longleftrightarrow \qquad \begin{pmatrix} u_R & c_R & t_R \\ d_R & s_R & b_R \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u'_L & c'_L & t'_L \\ d'_L & s'_L & b'_L \end{pmatrix} \qquad \longleftrightarrow \qquad \begin{pmatrix} u'_R & c'_R & t'_R \\ d'_R & s'_R & b'_R \end{pmatrix}$$

- Many Yukawa interactions
- Large FCNC?

At tree level

R.S.Chivukula et.al Phys.Rev.D74:075011 (2006)

There are FOUR 3x3 matrices

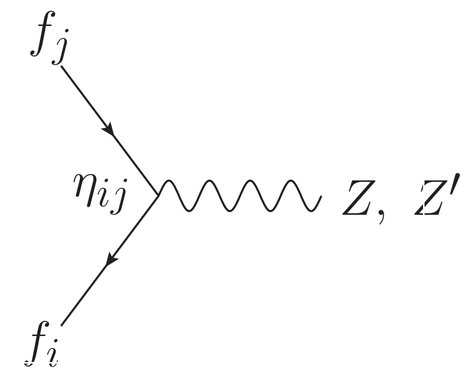
$$m_1,\ M,\ m_{2u},\ m_{2d}$$

Source of FCNC @ tree level

By Integrating out the KK fermions

$$\eta^{ij}(\overline{\psi}_L)^i\left[\gamma^\mu(iD_\mu U_1)U_1^\dagger\right](\psi_L)^j$$

$$\eta^{ij}=\left[(m_1M^{-1})(m_1M^{-1})^\dagger\right]^{ij}$$



To avoid FCNC $\longrightarrow$ $m_1^{ij}\propto\delta^{ij},\quad M^{ij}\propto\delta^{ij}$

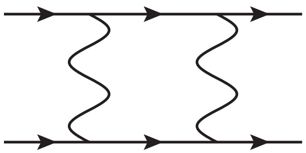
(Minimal Flavor Violation を仮定)

MFV and 3site Model

$$m_1^{ij} \propto \delta^{ij}, \quad M^{ij} \propto \delta^{ij}$$

(Minimal Flavor Violation)

- FCNC @ loop level (ex; Box diagrams)



- Minimal Flavor Violation の仮定は量子効果で破れる

$$\begin{aligned} \mu \frac{d}{d\mu} m_1 &= \frac{m_1}{(4\pi)^2}\left[-8g_s^2 - \frac{1}{6}g_2^2 - 3\frac{m_1^2}{f_1^2}\right] \\ \mu \frac{d}{d\mu} M &= \frac{M}{(4\pi)^2}\left[-8g_s^2 - \frac{9}{2}g_1^2 - \frac{1}{6}g_2^2 - \frac{3}{2}\frac{m_1^2}{f_1^2} - \underline{\frac{m_{2u}^2}{f_2^2} - \frac{m_{2d}^2}{f_2^2}}\right] \end{aligned}$$

- そもそも Minimal Flavor Violation の仮定は強すぎないか?

At one-loop level

FCNC @ loop level (Box diagrams)

太い線：KK fermions

C¹ を求める

$$
\begin{aligned}
&C_K^1(\bar{s}_L\gamma^\mu d_L)(\bar{s}_L\gamma_\mu d_L)\\
&C_{B_d}^1(\bar{b}_L\gamma^\mu d_L)(\bar{b}_L\gamma_\mu d_L)\\
&C_{B_s}^1(\bar{b}_L\gamma^\mu s_L)(\bar{b}_L\gamma_\mu s_L)\\
&C_D^1(\bar{c}_L\gamma^\mu u_L)(\bar{c}_L\gamma_\mu u_L)\,.
\end{aligned}
$$

experimental bounds

Bona et al. [UTfit Collaboration]
JHEP 0803, 049 (2008)

$$
\begin{array}{ccccc}
-9.6\times10^{-13} & < & \mathrm{Re}(C_K^1) & < & 9.6\times10^{-13}\\
-4.4\times10^{-15} & < & \mathrm{Im}(C_K^1) & < & 2.8\times10^{-15}\\
 & & |C_{B_d}^1| & < & 2.3\times10^{-13}\\
 & & |C_{B_s}^1| & < & 1.1\times10^{-13}\\
 & & |C_D^1| & < & 7.2\times10^{-13}
\end{array}
$$

One-loop level results

T.A, Chivukula, Simmons, Tanabashi
(work in progress)

$$C^1\,(\overline{q}_{mL}\gamma^{\mu}q_{nL})\,(\overline{q}_{mL}\gamma_{\mu}q_{nL})$$

$$C^1 \sim \frac{G_F}{\sqrt{2}}\left(\frac{\alpha}{4\pi}\right)\frac{1}{s_W^2}\cdot\sum_{j,k}(V_{jm}^{*}V_{jn}V_{km}^{*}V_{kn})\cdot\underline{\frac{M_W^2}{M^2}}\,\frac{m_j^2}{M_W^2}\,\frac{m_k^2}{M_W^2}$$

M ~ KK fermion mass
~ a few TeV

Parameters	3site model	experimental allowed range
Re C_K^1	$\mathcal{O}(10^{-16})$	[-9.6, 9.6]$\cdot 10^{-13}$
Im C_K^1	$\mathcal{O}(10^{-16})$	[-4.4, 2.8]$\cdot 10^{-15}$
$\lvert C_D^1\rvert$	$\mathcal{O}(10^{-17})$	$< 7.2 \cdot 10^{-13}$
$\lvert C_{B_d}^1\rvert$	$\mathcal{O}(10^{-13})$	$< 2.3 \cdot 10^{-11}$
$\lvert C_{B_s}^1\rvert$	$\mathcal{O}(10^{-12})$	$< 1.1 \cdot 10^{-9}$

量子補正 << 実験値の上限

One-loop level results

T.A, Chivukula, Simmons, Tanabashi
(work in progress)

$$C^1\,(\overline{q}_{mL}\gamma^\mu q_{nL})\,(\overline{q}_{mL}\gamma_\mu q_{nL})$$

$$C^1 \sim \frac{G_F}{\sqrt{2}}\left(\frac{\alpha}{4\pi}\right)\frac{1}{s_W^2}\cdot\sum_{j,k}(V^*_{jm}V_{jn}V^*_{km}V_{kn})\cdot\underline{\frac{M_W^2}{M^2}}\,\frac{m_j^2}{M_W^2}\,\frac{m_k^2}{M_W^2}$$

M ~ KK fermion mass
~ a few TeV

Parameters	3site model	experimental allowed range
Re C_K^1	$\mathcal{O}(10^{-16})$	$[-9.6,\ 9.6]\cdot 10^{-13}$
Im C_K^1	$\mathcal{O}(10^{-16})$	$[-4.4,\ 2.8]\cdot 10^{-15}$
$\lvert C_D^1\rvert$	$\mathcal{O}(10^{-17})$	$< 7.2\cdot 10^{-13}$
$\lvert C_{B_d}^1\rvert$	$\mathcal{O}(10^{-13})$	$< 2.3\cdot 10^{-11}$
$\lvert C_{B_s}^1\rvert$	$\mathcal{O}(10^{-12})$	$< 1.1\cdot 10^{-9}$

量子補正 << 実験値の上限

Box diagram からのFCNCは十分小さい

MFV and 3site Model

- Minimal Flavor Violation の仮定は量子効果で破れる

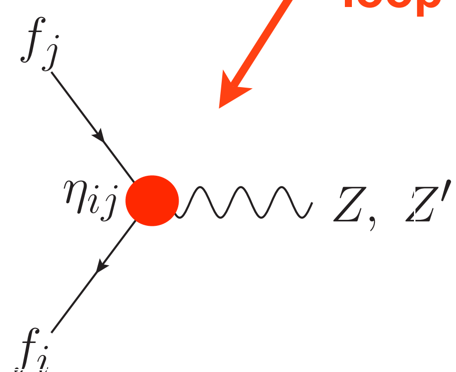
$$\mu \frac{d}{d\mu} m_1 = \frac{m_1}{(4\pi)^2}\left[-8g_s^2 - \frac{1}{6}g_2^2 - 3\frac{m_1^2}{f_1^2}\right]$$

$$\mu \frac{d}{d\mu} M = \frac{M}{(4\pi)^2}\left[-8g_s^2 - \frac{9}{2}g_1^2 - \frac{1}{6}g_2^2 - \frac{3}{2}\frac{m_1^2}{f_1^2} - \frac{m_{2u}^2}{f_2^2} - \frac{m_{2d}^2}{f_2^2}\right]$$

- 例えば下のダイアグラムに影響する

loop effect

$$\eta^{ij} = \left[(m_1 M^{-1})(m_1 M^{-1})^\dagger\right]^{ij}$$



$$\mu \frac{d}{d\mu}\eta \propto \frac{1}{(4\pi)^2}\left(\frac{m_u m_u^\dagger + m_d m_d^\dagger}{v^2}\right) + (\text{flavor independent terms})$$

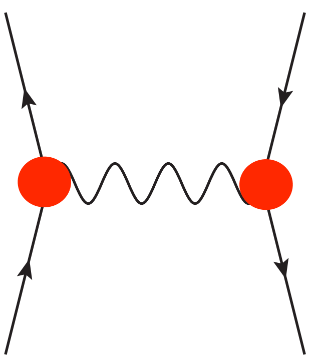
MFV and 3site Model

- ランニングの間隔が狭い

$$\ln\frac{\Lambda}{M} \sim \ln\frac{M}{M_{W'}} \sim \ln\frac{M_{W'}}{M_W} \sim 1$$

$$\Lambda \sim 4\mathrm{TeV}$$
$$M \sim \mathrm{a\ few\ TeV}$$
$$M_{W'} \sim 500\mathrm{GeV}$$

- フレーバーを破るカップリングは２つ必要



~ 2 loop order

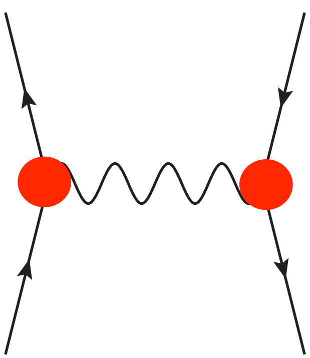
MFV and 3site Model

- ランニングの間隔が狭い

$$\ln\frac{\Lambda}{M} \sim \ln\frac{M}{M_{W'}} \sim \ln\frac{M_{W'}}{M_W} \sim 1$$

$$\Lambda \sim 4\mathrm{TeV}$$
$$M \sim \mathrm{a\ few\ TeV}$$
$$M_{W'} \sim 500\mathrm{GeV}$$

- フレーバーを破るカップリングは２つ必要



~ 2 loop order

MFV の破れの効果は十分小さい

MFV からのずれ

- Minimal Flavor Violation の仮定は強すぎないか?
- どのくらいずれてもいいのか見てみる

対角成分は

S パラメータ $$\eta^{diag} \simeq 2\frac{M_W^2}{M_{W'}^2} = 0.08\left(\frac{400\mathrm{GeV}}{M_{W'}}\right)^2$$

Z の崩壊 $$\frac{\Gamma(Z\to b\bar{b})}{\Gamma(Z\to hadron)},\ \frac{\Gamma(Z\to c\bar{c})}{\Gamma(Z\to hadron)}$$

ΔF = 2 $$D^0 - \overline{D}^0$$

非対角成分は

ΔF = 2 $$K^0\text{-}\overline{K}^0,\ B_d^0\text{-}\overline{B}_d^0,\ B_s^0\text{-}\overline{B}_s^0$$

MFV からのずれ

$$\left|\eta^{\text{quark}}\right| = 2\left(\frac{M_W}{M_{W'}}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{M_{W'}}{400\text{GeV}}\right)^2 \begin{pmatrix} < 0.0235 & < 0.0060 & < 0.0285 \\ < 0.0060 & 0 & < 0.202 \\ < 0.0285 & < 0.202 & < 0.306 \end{pmatrix}\right]$$

- ほぼ $\eta^{ij} \propto \delta^{ij}$ であることがわかる
- $m_1^{ij} \propto \delta^{ij}, \quad M^{ij} \propto \delta^{ij}$ となるUVの理論を示唆

内容

まとめと展望

- ヒッグスレス模型：ヒッグスの見つからない場合の一つの可能性
- 重要なのは、1st KK モードが現象論に効くこと
- 有効理論（3site Model）で現象論を調べるのが効率的
- 電弱精密測定とは無矛盾
- 今回、フレーバーの物理と無矛盾であることを調べた

BACK-UP SLIDES

3site model

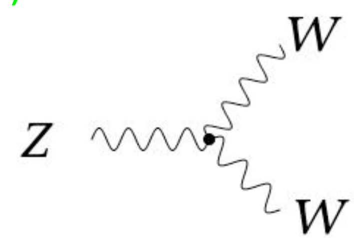
W' mass from WWZ coupling

R.S.Chivukula et.al
Phys.Rev.D74:075011 (2006)

constraint from WWZ coupling（LEP−Ⅱ）

K.Hagiwara, R.D.Peccei, D.Zeppenfeld, and K.Hikasa,
Nucl.Phys. B282,253(1987)

$$\mathcal{L} = -ig_{WZZ}^{SM}(1+\Delta\kappa_Z)W_\mu^+W_\nu^-Z^{\mu\nu}$$
$$-ig_{WZZ}^{SM}(1+\Delta g_1^Z)(W_{\mu\nu}^+W_\nu^- - W_{\mu\nu}^-W_\nu^+)Z_\nu$$



3サイトヒッグスレス模型では

$$\Delta\kappa_Z = \Delta g_1^Z = \frac{1}{2c^2}\frac{M_W^2}{M_{W'}^2} + \mathcal{O}\left(\frac{M_W^4}{M_{W'}^4}\right) \qquad c = \frac{M_W}{M_Z}$$

LEP-II からの制限

$$\Delta g_1^Z < 0.028 \ (95\%\mathrm{C.L.})$$

$$\longrightarrow \boxed{M_{W'} \geq 380\mathrm{GeV}}$$

One loop level

T.A, S.Matsuzaki, M.Tanabashi Phys.Rev.D78:055020,2008

$$
\begin{aligned}
\alpha S &= -4s^2 \frac{M_W}{M_{W'}} \frac{g_{W'ff}}{g_{Wff}} - \frac{\alpha}{24\pi} \frac{M_{W'}}{M_W} \frac{g_{W'ff}}{g_{Wff}} \ln \frac{M_{W'}^2}{M_F^2} - \frac{\alpha}{24\pi} \ln \frac{M_{W'}^2}{M_F^2} + \frac{\alpha}{12\pi} \ln \frac{\Lambda^2}{M_{Href}^2} \\
\alpha T &= \frac{\sqrt{2} G_F}{64\pi^2} \left(\frac{M_t}{M_F} \right)^2 \frac{M_t^2}{\left(\frac{M_W}{M_{W'}} \right)^4 \left[1 - \frac{M_{W'}}{M_W} \frac{g_{W'ff}}{g_{Wff}} \right]^2} - \frac{3\alpha}{32\pi c^2} \ln \frac{M_{W'}^2}{M_{Href}^2} - \frac{3\alpha}{32\pi c^2} \ln \frac{\Lambda^2}{M_{Href}^2}
\end{aligned}
$$

- これらから以下の量を制限
  - KK fermion mass
  - W'ff coupling

パラメータ

$$
\left(M_{W'}, \frac{g_{W'ff}}{g_{Wff}}, M_F, \Lambda \right)
$$

Flavor structure

Yukawa and mass terms

T.A, S Matsuzaki, M. Tanabashi, Phys.Rev.D78:055020,2008.

$$-(\overline{q}_{L0})^i U_1 (m_1)^{ij} (q_{R1})^j - (\overline{q}_{L1})^i M^{ij} (q_{R1})^j - (\overline{q}_{L1})^i U_2 \begin{pmatrix} (m_{2u})^{ij} & 0 \\ 0 & (m_{2d})^{ij} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (u_{2R})^j \\ (d_{2R})^j \end{pmatrix} + h.c.$$

Assumption in original 3site paper

$$m_1^{ij} \propto \delta^{ij}, \ M^{ij} \propto \delta^{ij}$$

- Dangerous FCNC does not occur at tree level
- Flavor violation is carried by m_{2u} and m_{2d}

This assumption is unstable under the loop corrections

$$\mu \frac{d}{d\mu} m_1 = \frac{m_1}{(4\pi)^2} \left[-8 g_s^2 - \frac{1}{6} g_2^2 - 3 \frac{m_1^2}{f_1^2} \right]$$

$$\mu \frac{d}{d\mu} M = \frac{M}{(4\pi)^2} \left[-8 g_s^2 - \frac{9}{2} g_1^2 - \frac{1}{6} g_2^2 - \frac{3}{2} \frac{m_1^2}{f_1^2} - \underline{\frac{m_{2u}^2}{f_2^2} - \frac{m_{2d}^2}{f_2^2}} \right]$$

FCNC and 3site Model

$$\eta = (m_1 M^{-1})(m_1 M^{-1})^\dagger + (\text{loop corrections}) + \eta(\Lambda)$$

これまでの研究ではFCNCを避けるために

- $m_1^{ij} \propto \delta^{ij}, \quad M^{ij} \propto \delta^{ij}$ を**仮定**
- $\eta(\Lambda) = 0$ を**仮定**

しかし、この仮定を保証する対称性はない

この仮定の下でも量子補正でFCNCが生じる

今回は

- η^{ij} へのFCNCからの制限 (tree level)

η への制限

対角成分は

S パラメータ $$\eta^{diag} \simeq 2\frac{M_W^2}{M_{W'}^2} = 0.08\left(\frac{400\mathrm{GeV}}{M_{W'}}\right)^2$$

Z の崩壊 $$\frac{\Gamma(Z\to\mu\mu)}{\Gamma(Z\to ee)},\ \frac{\Gamma(Z\to\tau\tau)}{\Gamma(Z\to ee)}\quad \frac{\Gamma(Z\to b\bar{b})}{\Gamma(Z\to hadron)},\ \frac{\Gamma(Z\to c\bar{c})}{\Gamma(Z\to hadron)}$$

ΔF = 2 $$D^0-\overline{D}^0$$

非対角成分は

ΔF = 2 $$K^0\text{-}\overline{K}^0,\ B_d^0\text{-}\overline{B}_d^0,\ B_s^0\text{-}\overline{B}_s^0$$

LFV
$$\mu^-\to e^-e^+e^-$$
$$\tau^-\to \mu^-e^+e^-$$
$$\tau^-\to e^-\tau^+\tau^-$$

η への制限

$$\eta^{\text{lepton}} = 2\left(\frac{M_W}{M_{W'}}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{M_{W'}}{400\text{GeV}}\right)^2 \begin{pmatrix} 0 & < 0.00013 & < 0.034 \\ < 0.00013 & [-0.063, 0.043] & < 0.036 \\ < 0.034 & < 0.036 & [-0.11, 0.012] \end{pmatrix}\right]$$

$$\left|\eta^{\text{quark}}\right| = 2\left(\frac{M_W}{M_{W'}}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{M_{W'}}{400\text{GeV}}\right)^2 \begin{pmatrix} < 0.0235 & < 0.0060 & < 0.0285 \\ < 0.0060 & 0 & < 0.202 \\ < 0.0285 & < 0.202 & < 0.306 \end{pmatrix}\right]$$

- ほぼ $\eta^{ij} \propto \delta^{ij}$ であることがわかる
- $\eta^{ij} \propto \delta^{ij}$ となるUVの理論を示唆

Collider Physics

展望：コライダー物理

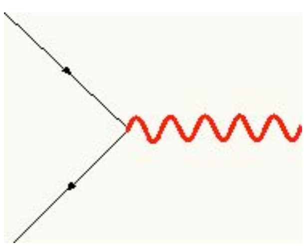
- 発見すべきは $W'^{\pm}, Z'$

$$380\mathrm{GeV} \leq M_{W'} \leq 630\mathrm{GeV}$$
$$1.8\mathrm{TeV} \leq M_F$$

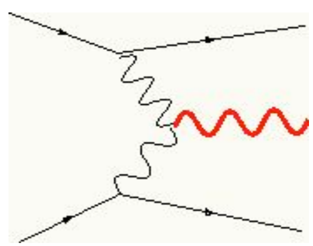
- 崩壊先はゲージボソン

$$BF(W'^{\pm} \to W^{\pm}Z) \sim 99\%$$
$$BF(Z' \to W^{+}W^{-}) \sim 99\%$$

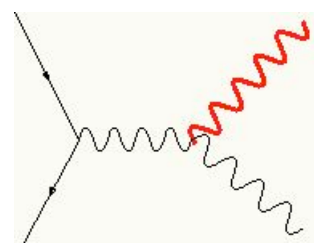
- 生成方法は



DY



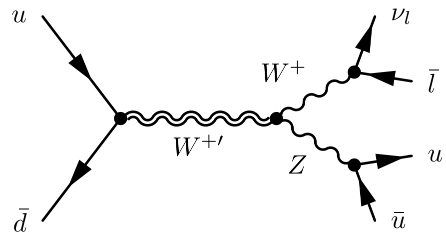
VBF



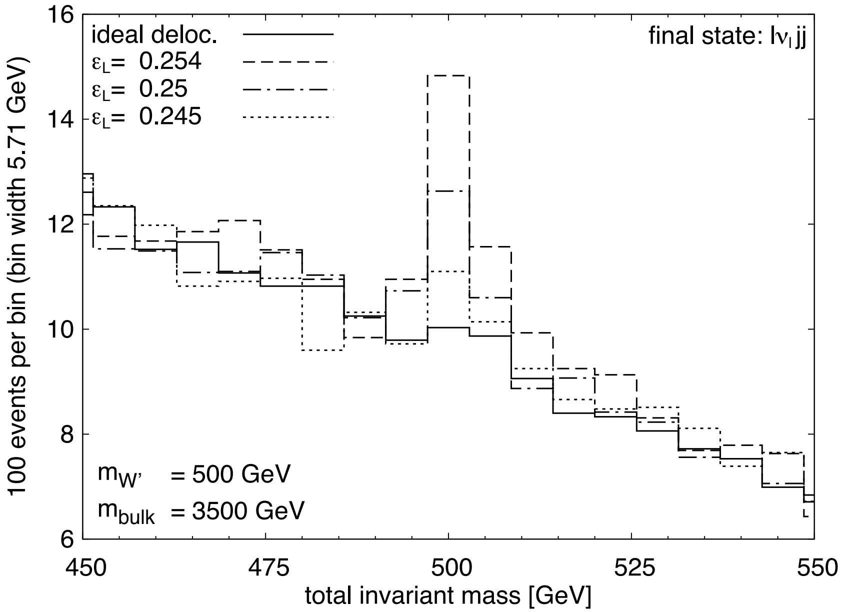
AP

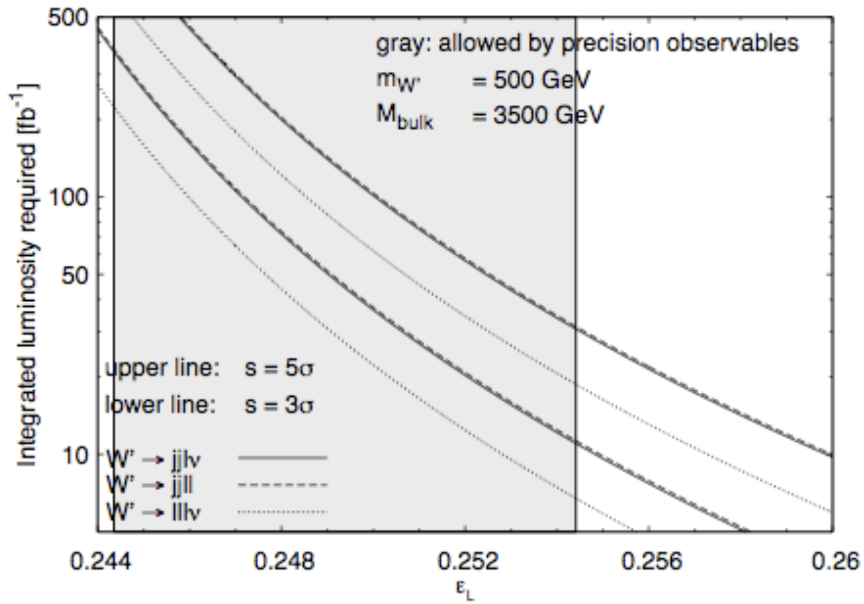
Drell-Yan production of W'

Thorsten Ohl, Christian Speckner
Phys.Rev.D78:095008,2008



崩壊率は、W' ->WZ がほぼ100%





Mw' = 500 GeV
パラメータによっては見えそう

3site Model

R.S.Chivukula et.al Phys.Rev.D74:075011 (2006)
R.Casalbuoni et.al Phys.Lett.B155(1985) 95

フェルミオンセクター

ゲージ対称性

(quark case)	$SU(2)_0$	$SU(2)_1$	$U(1)_2$
ψ_{L0}	2	1	$1/6$
ψ_{L1}, ψ_{R1}	1	2	$1/6$
$\psi_{R2} \equiv \begin{pmatrix} u_{R2} \\ d_{R2} \end{pmatrix}$	1	1	$\begin{matrix} 2/3 \\ -1/3 \end{matrix}$

3site Model

R.S.Chivukula et.al Phys.Rev.D74:075011 (2006)
R.Casalbuoni et.al Phys.Lett.B155(1985) 95

フェルミオンセクター

ゲージ対称性

(quark case)	$SU(2)_0$	$SU(2)_1$	$U(1)_2$
ψ_{L0}	2	1	1/6
ψ_{L1}, ψ_{R1}	1	2	1/6
$\psi_{R2} \equiv \begin{pmatrix} u_{R2} \\ d_{R2} \end{pmatrix}$	1	1	$2/3$ $-1/3$

湯川相互作用

$$-(\overline{\psi}_{L0})^i U_1 (m_1)^{ij} (\psi_{R1})^j - (\overline{\psi}_{L1})^i M^{ij} (\psi_{R1})^j - (\overline{\psi}_{L1})^i U_2 \begin{pmatrix} (m_{2u})^{ij} & 0 \\ 0 & (m_{2d})^{ij} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (u_{2R})^j \\ (d_{2R})^j \end{pmatrix} + h.c.$$

i, j : generation indices

$$U_i = \exp\left(i \frac{\tau^a \pi_i^a}{f_i} \right)$$

Effective theory below KK fermion mass scale

- Assume eigenvalues of M are large
- Integrate out q_{L1} and q_{R1}

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_{eff} \ni & -\overline{q}_{L0}\left[\gamma^\mu (iD_\mu U_1) U_1^\dagger\right]\left[(m_1 M^{-1})(m_1 M^{-1})^\dagger\right] q_{L0} \\
& + \begin{pmatrix} \overline{u}_{R2} & 0 \end{pmatrix}\left[\gamma^\mu U_2^\dagger (iD_\mu U_2)\right]\left[(m_1^{-1} m_u)^\dagger (m_1^{-1} m_u)\right]\begin{pmatrix} u_{R2} \\ 0 \end{pmatrix} \\
& + \begin{pmatrix} 0 & \overline{d}_{R2} \end{pmatrix}\left[\gamma^\mu U_2^\dagger (iD_\mu U_2)\right]\left[(m_1^{-1} m_d)^\dagger (m_1^{-1} m_d)\right]\begin{pmatrix} 0 \\ d_{R2} \end{pmatrix} \\
& + \left[\begin{pmatrix} \overline{u}_{R2} & 0 \end{pmatrix}\left[\gamma^\mu U_2^\dagger (iD_\mu U_2)\right]\left[(m_1^{-1} m_u)^\dagger (m_1^{-1} m_d)\right]\begin{pmatrix} 0 \\ d_{R2} \end{pmatrix} + h.c.\right]
\end{aligned}
$$

We can redifine mass terms

$$m_u \equiv m_1 M^{-1} m_{u2}, \; m_d \equiv m_1 M^{-1} m_{d2}$$

3site Higgsless Model

- Left-handed FCNC

$$\mathcal{L}_{eff} \ni -\,\overline{q}_{L0}\left[\gamma^\mu (iD_\mu U_1)U_1^\dagger\right]\left[(m_1 M^{-1})(m_1 M^{-1})^\dagger\right] q_{L0}$$
$$+\begin{pmatrix}\overline{u}_{R2} & 0\end{pmatrix}\left[\gamma^\mu U_2^\dagger (iD_\mu U_2)\right]\left[(m_1^{-1}m_u)^\dagger (m_1^{-1}m_u)\right]\begin{pmatrix}u_{R2}\\ 0\end{pmatrix}$$
$$+\begin{pmatrix}0 & \overline{d}_{R2}\end{pmatrix}\left[\gamma^\mu U_2^\dagger (iD_\mu U_2)\right]\left[(m_1^{-1}m_d)^\dagger (m_1^{-1}m_d)\right]\begin{pmatrix}0\\ d_{R2}\end{pmatrix}$$
$$+\left[\begin{pmatrix}\overline{u}_{R2} & 0\end{pmatrix}\left[\gamma^\mu U_2^\dagger (iD_\mu U_2)\right]\left[(m_1^{-1}m_u)^\dagger (m_1^{-1}m_d)\right]\begin{pmatrix}0\\ d_{R2}\end{pmatrix} + h.c.\right]$$

- No FCNC if m_1 and M are flavor blind (in original 3site case)
- To avoid a large contribution to S param.

$$(m_1 M^{-1})^{diag} \approx \epsilon_L^{ideal} \equiv \sqrt{2}\frac{M_W}{M_{W'}} = 0.28\left(\frac{M_{W'}}{400\mathrm{GeV}}\right)$$

R.S.Chivukula et.al
Phys.Rev.D74:075011 (2006)

3site Higgsless Model

- Right-handed FCNC

$$\mathcal{L}_{eff} \ni -\overline{q}_{L0}\left[\gamma^\mu(iD_\mu U_1)U_1^\dagger\right]\left[(m_1M^{-1})(m_1M^{-1})^\dagger\right]q_{L0}$$

$$+\begin{pmatrix}\overline{u}_{R2} & 0\end{pmatrix}\left[\gamma^\mu U_2^\dagger(iD_\mu U_2)\right]\left[(m_1^{-1}m_u)^\dagger(m_1^{-1}m_u)\right]\begin{pmatrix}u_{R2}\\0\end{pmatrix}$$

$$+\begin{pmatrix}0 & \overline{d}_{R2}\end{pmatrix}\left[\gamma^\mu U_2^\dagger(iD_\mu U_2)\right]\left[(m_1^{-1}m_d)^\dagger(m_1^{-1}m_d)\right]\begin{pmatrix}0\\d_{R2}\end{pmatrix}$$

$$+\left[\begin{pmatrix}\overline{u}_{R2} & 0\end{pmatrix}\left[\gamma^\mu U_2^\dagger(iD_\mu U_2)\right]\left[(m_1^{-1}m_u)^\dagger(m_1^{-1}m_d)\right]\begin{pmatrix}0\\d_{R2}\end{pmatrix}+h.c.\right]$$

- No FCNC if m_1 is flavor blind
- Very small effect because of suppression by mass ($m_{u,d} << m_1$)

3site Higgsless Model

- Right-handed not FCNC

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_{eff} \ni & - \overline{q}_{L0} \left[\gamma^\mu (iD_\mu U_1) U_1^\dagger\right] \left[(m_1 M^{-1})(m_1 M^{-1})^\dagger\right] q_{L0} \\
& + \begin{pmatrix} \overline{u}_{R2} & 0 \end{pmatrix} \left[\gamma^\mu U_2^\dagger (iD_\mu U_2)\right] \left[(m_1^{-1} m_u)^\dagger (m_1^{-1} m_u)\right] \begin{pmatrix} u_{R2} \\ 0 \end{pmatrix} \\
& + \begin{pmatrix} 0 & \overline{d}_{R2} \end{pmatrix} \left[\gamma^\mu U_2^\dagger (iD_\mu U_2)\right] \left[(m_1^{-1} m_d)^\dagger (m_1^{-1} m_d)\right] \begin{pmatrix} 0 \\ d_{R2} \end{pmatrix} \\
& + \left[\begin{pmatrix} \overline{u}_{R2} & 0 \end{pmatrix} \left[\gamma^\mu U_2^\dagger (iD_\mu U_2)\right] \left[(m_1^{-1} m_u)^\dagger (m_1^{-1} m_d)\right] \begin{pmatrix} 0 \\ d_{R2} \end{pmatrix} + h.c. \right]
\end{aligned}
$$

- No generation mixing if m_1 is flavor blind
- Very small effect because of suppression by mass ($m_{u,d} << m_1$)