

Discussion (Technicolor)

Glashow 模型より良い模型はなかなか困難である

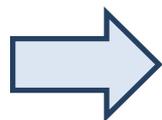
テクニカラーグループ

Glashow 模型の予言能力

$$\Delta\mathcal{L} = c_B B_{\mu\nu} \text{Tr} \Sigma \tau_3 \Sigma^\dagger W^{\mu\nu}$$

$$\hat{S} \equiv g^2 \Pi'_{W_3 B}(0) = -g^2 c_B \quad c_B = (4.0 \pm 3.0) \cdot 10^{-3}$$

NDA; $c_B \sim (f/\Lambda)^2 \sim 10^{-2} = 10 * 10^{-3}$



実験を説明する領域も含まれている。
そんなに悪くない予言能力か。

Glashow 模型の予言能力

$$\Delta\mathcal{L} = c_B B_{\mu\nu} \text{Tr} \Sigma \tau_3 \Sigma^\dagger W^{\mu\nu}$$

$$\hat{S} \equiv g^2 \Pi'_{W_3 B}(0) = -g^2 c_B \quad c_B = (4.0 \pm 3.0) \cdot 10^{-3}$$

$$\text{NDA; } c_B \sim (f/\Lambda)^2 \sim 10^{-2} = 10 * 10^{-3}$$

e.g. QCD-like technicolor

(using dispersion relation, large N techniques,

experimental data, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $\tau \rightarrow \nu_\tau \pi^+ 2\pi^-$, etc.)

$$c_B \approx (-6 \cdot 10^{-3}) \frac{N_{\text{TF}}}{2} \frac{N_{\text{TC}}}{3}$$

Minimal technicolor model ($N_{\text{TC}} = 3$, $N_{\text{TF}} = 2$) は3 σ で ruled out

- Technicolorを考えることでGlashow 模型より良くなってはいない(何かを説明できてはいない e.g. S parameter) (今のところ)

➡ だが信念がある(?)

EWSB induced by a **strong dynamics**
(Naturalness)

困難な問題

- Top mass

(QCD-like なものでは難しいので、これを説明できる他のものをさがす。S parameter もうまくいくものがあるかも知れない←がんばって計算しないといけない。。。)

- S parameter

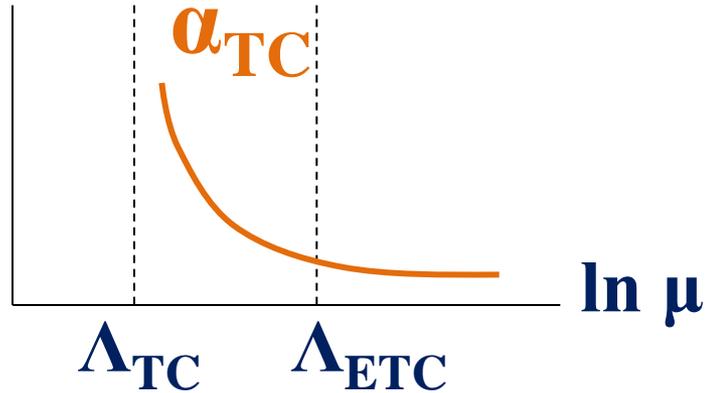
Naturalness

■ **Technicolor** Weinberg ('79); Susskind ('79)

Global : $SU(N)_L \times SU(N)_R$

Gauge : $SU(N)_{TC} \times SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

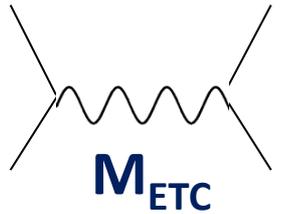
Techniquarks : $Q_{L,R} \quad \langle \bar{Q} Q \rangle_{TC} \neq 0$



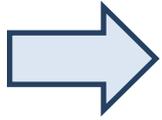
■ **Extended Technicolor** Dimopoulos, Susskind; Eichten, Lane

$$\frac{g_{ETC}^2}{M_{ETC}^2} \bar{Q} Q \bar{q} q$$

$$\frac{g_{ETC}^2}{M_{ETC}^2} \bar{q} q \bar{q} q$$



$$m_q = \frac{g_{ETC}^2}{M_{ETC}^2} \langle \bar{Q} Q \rangle_{ETC} \sim \Lambda_{TC} \left(\frac{\Lambda_{TC}}{\Lambda_{ETC}} \right)^{2-\gamma}$$



- Top mass
- S parameter

dim.[$\langle q \bar{q} \rangle$]を小さくする

- Walking/Conformal ?
- Supersymmetric ?

B. Holdom; K. Yamawaki, M. Bando, and K. Matumoto; T.W. Appelquist, D. Karabali, and L.C.R. Wijewardhana; T. Appelquist and L.C.R. Wijewardhana; M. Luty, T. Okui

Witten; Dine, Fischler, Srednickiとか
S. Samuel とか

まだ計算できてない(Sもわからない)
Glashow 模型から良くはなっていない

- 他の可能性？
- 実験でどうやって確かめる？

- Technicolorを考えることでGlashow 模型より良くなってはいない(何かを説明できてはいない)
(今のところ)

➡ だが信念がある(?)

EWSB induced by a **strong dynamics**
(Naturalness)

なんとかこの信念でGlashow模型を超える模型をつくれなにか

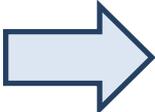
→もう一つ別のアプローチを考えてみよう

もういちど、Glashow 模型の予言能力

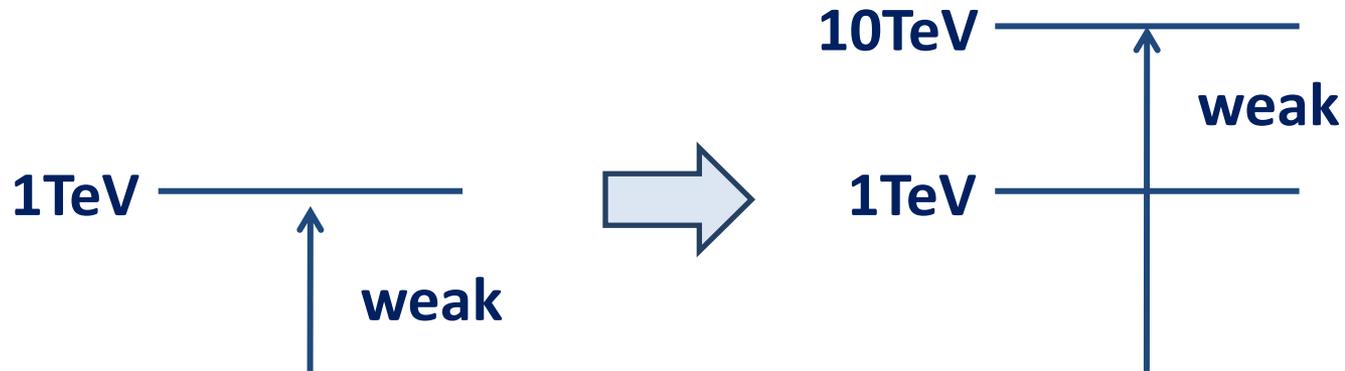
$$\Delta\mathcal{L} = c_B B_{\mu\nu} \text{Tr} \Sigma \tau_3 \Sigma^\dagger W^{\mu\nu}$$

$$\hat{S} \equiv g^2 \Pi'_{W_3 B}(0) = -g^2 c_B \quad c_B = (4.0 \pm 3.0) \cdot 10^{-3}$$

NDA; $c_B \sim (f/\Lambda)^2 \sim 10^{-2} = 10 * 10^{-3}$

 カットオフを上げればいいんじゃないの？

$$\text{NDA}; \quad c_B \sim (f / \Lambda)^2$$



カットオフを上げたら、上からのS parameterの寄与は小さくなるのではないか

これまでに取り組まれているもの

- Little Higgs (scalar)
- Higgsless (vector)

Naturalness



EWPM

Extended EW Non-linear σ model 的な模型

■ Little Higgs model

ex. Littlest Higgs model

Global : $SU(5)$

Gauge : $[SU(2) \times U(1)]^2$

NG boson : $\pi^0, \pi^\pm, \pi^0', \pi^\pm', H, \Phi$
 π^0, π^\pm, h

■ Higgsless model

Global : $SU(2) \times SU(2) \dots$

Gauge : $SU(2) \dots \times U(1) \dots$

NG boson : $\pi^0, \pi^\pm, \pi^0', \pi^\pm', \dots$

“Collective” symmetry breaking ($v_{EW} < f$)

$$\Delta m_h^2 \sim [\Pi(g_i^2/16\pi^2)] (4\pi f)^2$$

軽い Higgs, W', Z'

Arkani-Hamed, Cohen, Georgi

$$(1/v_{EW})^2 = \Sigma (1/f_i)^2$$

W', Z'

Chivukula, Dicus and He ; Csaki, Grojean, Murayama, Pilo and Terning

Higgsless でそれはできているか？

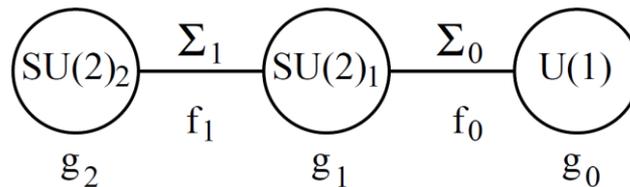
Glashow模型

$$\Delta\mathcal{L} = c_B B_{\mu\nu} \text{Tr} \Sigma \tau_3 \Sigma^\dagger W^{\mu\nu}$$

$$\hat{S} \equiv g^2 \Pi'_{W_3 B}(0) = -g^2 c_B$$

$$\text{NDA; } c_B \sim (f/\Lambda)^2 \sim 10^{-2} = 10 * 10^{-3}$$

Higgsless模型



$\Lambda_{3\text{SHM}}$

$\sim \sqrt{2} (4\pi f)$

$$\Delta\mathcal{L} = c_1 \mathcal{O}_1 + c_2 \mathcal{O}_2$$

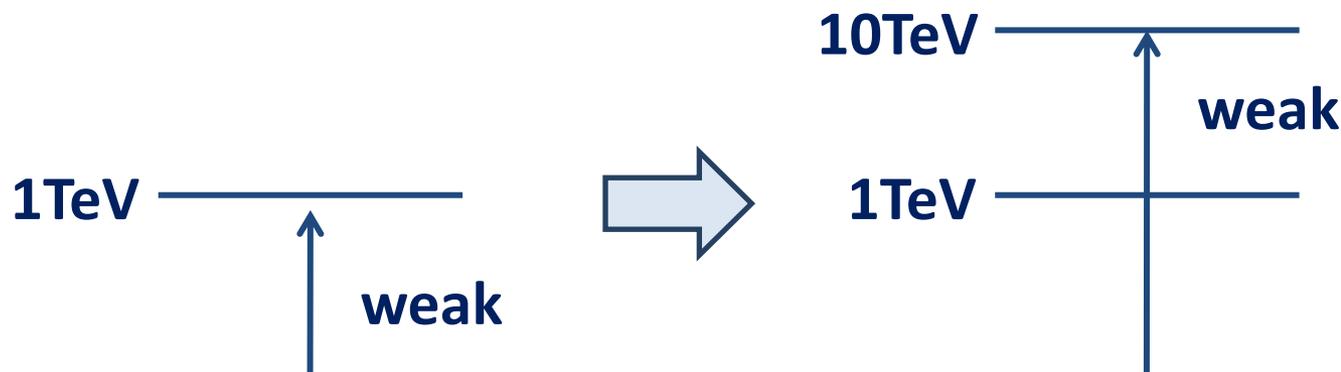
$$\mathcal{O}_1 = B^{\mu\nu} \text{Tr} (W_{\mu\nu}^{(1)} \Sigma_0 \tau^3 \Sigma_0^\dagger), \quad \mathcal{O}_2 = \text{Tr} (W_{\mu\nu}^{(1)} \Sigma_1^\dagger W^{(2)\mu\nu} \Sigma_1)$$

$$\tan \theta = f_1/f_0 \quad \hat{S} = \frac{g^2}{g_1^2} \cos^2 \theta \sin^2 \theta - g^2 (c_1 \sin^2 \theta + c_2 \cos^2 \theta).$$

$$\text{NDA; } c \sim (f/\Lambda)^2 / 2 + (f/\Lambda)^2 / 2$$

Perelstein (04)

$$\text{NDA}; \quad cB \sim (f / \Lambda)^2$$



カットオフを上げたら、上からのS parameterの寄与は小さくなるのではないか

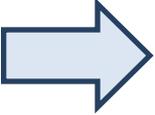
これまでに取り組まれているもの

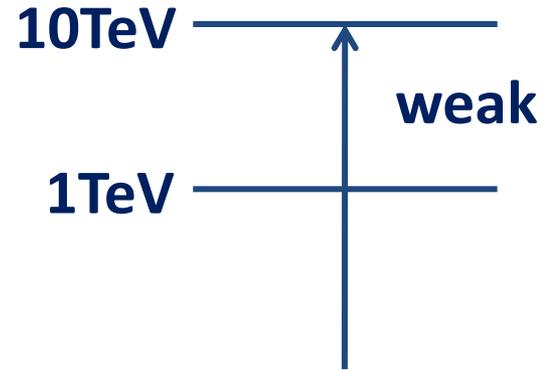
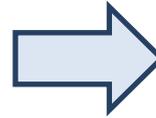
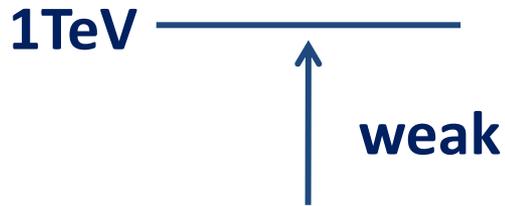
■ Little Higgs (scalar)

■ Higgsless (vector)

→ Λ が大きくなってもoperatorの数も多くなる。特に良くなるわけではない

Perelstein (04)

- Top mass
 - S parameter
- 



- Little Higgs (scalar)
- Higgsless (vector)
- ...他に可能性あるか？

- UnHiggs ?
- Non-commutative ?
- Supersymmetric ?

を実験でどうやって調べるか？

■ 10 TeV までweakな理論

- W, Z とcouple する、unitarityを回復する粒子

■ 1 TeV TC

- 重いけどnarrow Higgs → ZZ @ LHC
- Broad resonance 等 : WW scattering
- 強くnew physに結合する粒子への効果を見る(W, A, top)
 $\Delta\kappa_\gamma$
- …他にあるか？ $\text{Dim}[v]$?

Weak gauge boson coupling

■ Triple coupling

In the SM, $g_1^V = \kappa_V = 1$,
all other couplings are equal to zero

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{WWV} = & g_{WWW} \left[ig_1^V V_\mu (W_\nu^- W_{\mu\nu}^+ - W_{\mu\nu}^- W_\nu^+) + i\kappa_V W_\mu^- W_\nu^+ V_{\mu\nu} + i\frac{\lambda_V}{M_W^2} W_{\lambda\mu}^- W_{\mu\nu}^+ V_{\nu\lambda} \right. \\ & + g_4^V W_\mu^- W_\nu^+ (\partial_\mu V_\nu + \partial_\nu V_\mu) + g_5^V \epsilon_{\mu\nu\lambda\rho} (W_\mu^- \partial_\lambda W_\nu^+ - \partial_\lambda W_\mu^- W_\nu^+) V_\rho \\ & \left. + i\tilde{\kappa}_V W_\mu^- W_\nu^+ \tilde{V}_{\mu\nu} + i\frac{\tilde{\lambda}_V}{M_W^2} W_{\lambda\mu}^- W_{\mu\nu}^+ \tilde{V}_{\nu\lambda} \right], \quad (\end{aligned}$$

Among the different couplings g_1 , κ and λ are C- and P-conserving,
 g_5 is C and P-violating but CP-conserving while g_4 , $\tilde{\kappa}$, λ violate CP symmetry.

$$\begin{aligned} \Delta \kappa_\gamma &= 4\pi\alpha_w \cdot \frac{1}{2} (L_{9L} + L_{9R} + 2L_{10}) \\ \Delta g_{1Z} &= +4\pi\alpha_w \cdot \left(\frac{1}{2 \cos^2 \theta_w} L_{9L} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sin^2 \theta_w}{\cos^2 \theta_w (\cos^2 \theta_w - \sin^2 \theta_w)} L_{10} \right) \end{aligned}$$

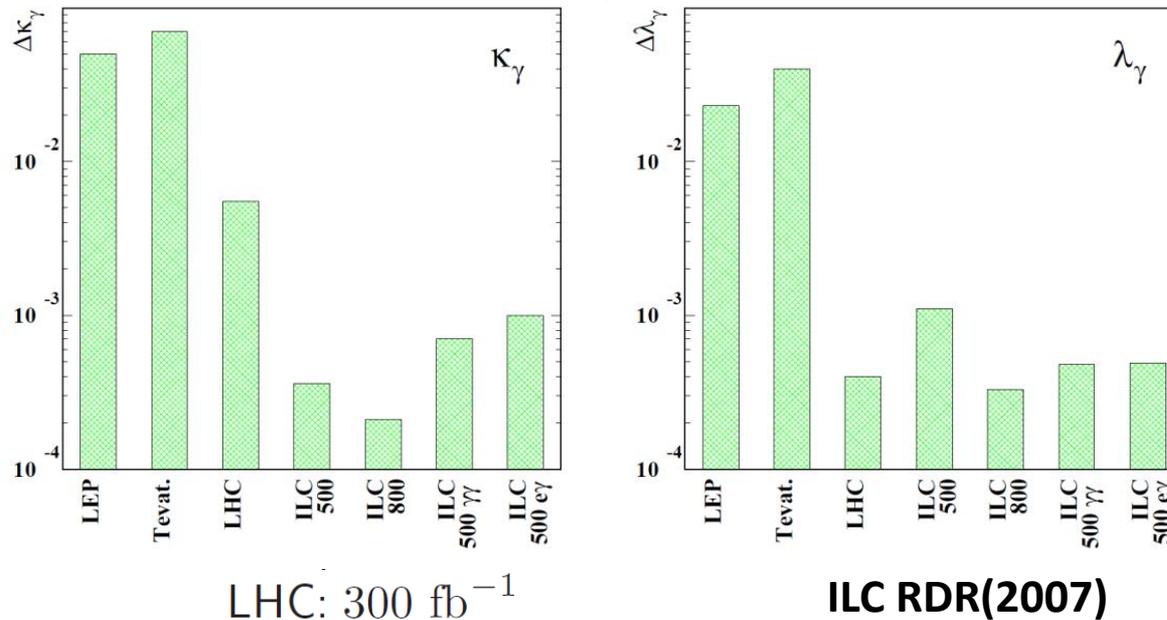
Weak gauge boson coupling

■ Triple coupling

In the SM, $g_1^V = \kappa_V = 1$,
all other couplings are equal to zero

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{WWV} = & g_{WWW} \left[ig_1^V V_\mu (W_\nu^- W_{\mu\nu}^+ - W_{\mu\nu}^- W_\nu^+) + i\kappa_V W_\mu^- W_\nu^+ V_{\mu\nu} + i\frac{\lambda_V}{M_W^2} W_{\lambda\mu}^- W_{\mu\nu}^+ V_{\nu\lambda} \right. \\ & + g_4^V W_\mu^- W_\nu^+ (\partial_\mu V_\nu + \partial_\nu V_\mu) + g_5^V \epsilon_{\mu\nu\lambda\rho} (W_\mu^- \partial_\lambda W_\nu^+ - \partial_\lambda W_\mu^- W_\nu^+) V_\rho \\ & \left. + i\tilde{\kappa}_V W_\mu^- W_\nu^+ \tilde{V}_{\mu\nu} + i\frac{\tilde{\lambda}_V}{M_W^2} W_{\lambda\mu}^- W_{\mu\nu}^+ \tilde{V}_{\nu\lambda} \right], \end{aligned} \quad ($$

Very sensitive



信念

EWSB induced by a **strong dynamics**

これから

- 計算する(lattice等) → S,T parameter & top mass 出せる模型を見つける
- 計算できるシナリオ(e.g. little Higgs)を試してみる
- EWがstrong dynamicsで破れている証拠をかどうかをcheck