TeVスケールB-L模型とヒッグスポテンシャル

折笠　雄太（大阪大）

共同研究者
磯　暁（KEK)
岡田　宣親（アラバマ大）

Phys.Lett.B676(2009)81
Phys.Rev.D80(2009)115007
PTEP(2013)023B08

- ヒッグスポテンシャル
- B-L模型
- TeVスケール

- ヒッグスポテンシャル
  フラットポテンシャル
- B-L模型
  標準模型の拡張
- TeVスケール
  フラットポテンシャルの予言

フラットポテンシャル

$$V_{eff}(H) = \lambda_H(t)\left(H^{\dagger}H\right)^2 + \mu^2 \cancel{(H}^{\dagger} H$$

繰り込み群方程式

$$\frac{d\lambda_H}{dt} = \frac{1}{16\pi^2}\left(24\lambda_H^2 - 6Y_t^4 + \frac{9}{8}g^4 + \frac{3}{8}g'^4 + \frac{3}{4}g^2 g'^2 + \lambda_H\left(12Y_t^2 - 9g^2 - 3g'^2\right)\right)$$

$$\frac{d\mu^2}{dt} = \frac{\mu^2}{16\pi^2}\left(12\lambda_H + 6Y_t^2 - \frac{9}{2}g^2 - \frac{3}{2}g'^2\right)$$

フラットポテンシャル

$\boxed{\lambda_H = \mu^2 = 0 \text{ at planck scale}}$

Coleman-Weinberg機構

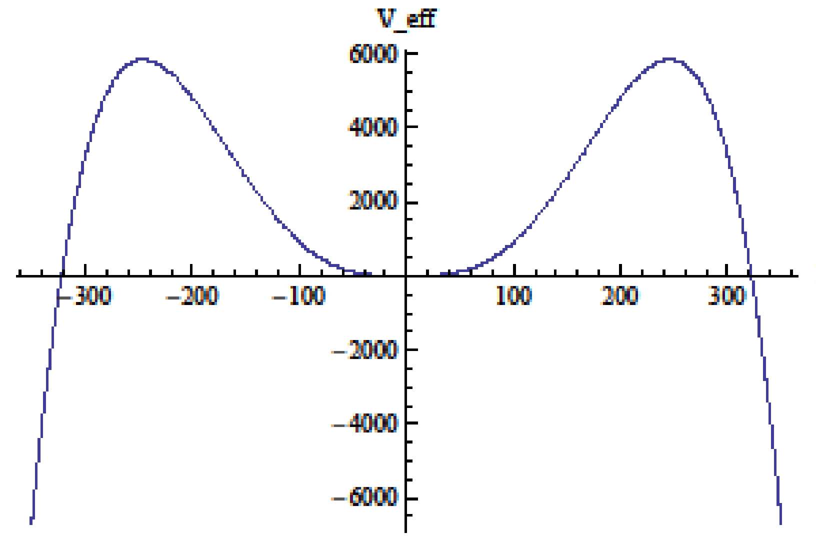
S.R.Coleman, E.Weinberg
PRD7 (1973) 1888

	標準模型	CW機構
ポテンシャル	$V(h) = \frac{\lambda_h}{4}h^4 + \frac{\mu^2}{2}h^2$	$V(h) = \frac{\lambda_h(h)}{4}G(h)^4h^4 = \frac{\lambda_h(t)}{4}G(t)^4v^4e^{4t}$ $t = ln\left(\frac{h}{v}\right)$ $G(t) = exp\left[-\int_0^t dt'\gamma(t')\right]$
1階微分	$V'(v) = v\left(\lambda_h v^2 + \mu^2\right) = 0$ ➡ $\lambda_h = -\frac{\mu^2}{v^2}$	$V'(v) = \left(\frac{e^{-t}}{v}\frac{d}{dt}\right)V(t)\Big\vert_{t=0} = v^3e^{3t}\left(\frac{1}{4}\frac{d\lambda_h}{dt}G^4 - \lambda_h\gamma G^3 + \lambda_h G^4\right) = 0$ ➡ $\lambda_h(0) \sim -\frac{1}{16\pi^2}\left(\frac{9}{32}g^4 + \frac{3}{32}g'^4 + \frac{3}{16}g^2g'^2 - \frac{3}{2}Y_t^4\right)$
２階微分	$V''(v) = 3\lambda_h v^2 + \mu^2 = -2\mu^2 > 0$	$V''(v) = \left(\frac{e^{-t}}{v}\frac{d}{dt}\right)^2 V(t)\Big\vert_{t=0} > 0$ ➡ $\frac{9}{32}g^4 + \frac{3}{32}g'^4 + \frac{3}{16}g^2g'^2 - \frac{3}{2}Y_t^4 > 0$ ➡ $\frac{1}{16}\left(2m_W^4 + m_Z^4\right) - m_t^4 > 0$

標準模型のCW機構

トップクォークが重すぎるために、ポテンシャルが安定ではない

$$
\begin{aligned}
m_W &= 80.4GeV, \\
m_Z &= 91.2GeV, \\
m_t &= 171.3GeV
\end{aligned}
$$



$$\frac{1}{16}\left(2m_W^4 + m_Z^4\right) - m_t^4 < 0$$

標準模型ではCW機構はうまく機能しない

B–L模型を考える

B–L模型

- **ゲージ対称性**

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times \boxed{U(1)_{B-L}}$$

- **新粒子**

右巻きニュートリノ
SMシングレットスカラー
$U(1)_{B-L}$ ゲージ場

	$\mathrm{SU}(3)_c$	$\mathrm{SU}(2)_L$	$\mathrm{U}(1)_Y$	$\mathrm{U}(1)_{B-L}$
q_L^i	$\mathbf{3}$	$\mathbf{2}$	$+1/6$	$+1/3$
u_R^i	$\mathbf{3}$	$\mathbf{1}$	$+2/3$	$+1/3$
d_R^i	$\mathbf{3}$	$\mathbf{1}$	$-1/3$	$+1/3$
ℓ_L^i	$\mathbf{1}$	$\mathbf{2}$	$-1/2$	-1
ν_R^i	$\mathbf{1}$	$\mathbf{1}$	0	-1
e_R^i	$\mathbf{1}$	$\mathbf{1}$	-1	-1
H	$\mathbf{1}$	$\mathbf{2}$	$+1/2$	0
Φ	$\mathbf{1}$	$\mathbf{1}$	0	$+2$

- **ラグランジアン**

$$\mathcal{L} \supset -Y_D^{ai} \overline{\nu_R^a} H^\dagger l_L^i - \frac{1}{2} \Phi Y_N^i \overline{\nu_R^{ci}} \nu_R^i + h.c.$$

- **ポテンシャル**

フラットポテンシャルを仮定

$$V(H, \phi) = \lambda_H \left(H^\dagger H\right)^2 + \lambda \left(\phi^\dagger \phi\right)^2 + \lambda' \left(\phi^\dagger \phi\right)\left(H^\dagger H\right)$$

B–L模型のフラットポテンシャル

$$V(H,\phi) = \lambda_H \left(H^\dagger H\right)^2 + \lambda \left(\phi^\dagger \phi\right)^2 + \lambda' \left(\phi^\dagger \phi\right)\left(H^\dagger H\right)$$

繰り込み群方程式

$$\frac{d\lambda_H}{dt} = \frac{1}{16\pi^2}\Big(24\lambda_H^2 + \lambda'^2 - 6Y_t^4 + \frac{9}{8}g^4 + \frac{3}{8}g_1^4 + \frac{3}{4}g^2 g_1^2 + \frac{3}{4}g^2\tilde{g}^2 + \frac{3}{4}g_1^2\tilde{g}^2 + \frac{3}{8}\tilde{g}^4 + \lambda_H\left(12Y_t^2 - 9g^2 - 3g_1^2 - 3\tilde{g}^2\right)\Big)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{16\pi^2}\left(20\lambda^2 + 2\lambda'^2 - \frac{1}{2}Tr\left[Y_N^4\right] + 96 g_{B-L}^4 + \lambda\left(2Tr\left[Y_N^2\right] - 48 g_{B-L}^2\right)\right)$$

$$\frac{d\lambda'}{dt} = \frac{1}{16\pi^2}\left[\lambda'\left(12\lambda_H + 8\lambda + 4\lambda' + 6Y_t^2 - \frac{9}{2}g^2 - \frac{3}{2}g_1^2 - \frac{3}{2}\tilde{g}^2 + Tr\left[Y_N^2\right] - 24 g_{B-L}^2\right) + 12\tilde{g}^2 g_{B-L}^2\right]$$

プランクスケールでの仮定

フラットポテンシャル $\lambda_H = \lambda' = 0$

ゲージカップリング $g_1 \sim g_{B-L}$

$\Rightarrow$ $\lambda' \sim -\mathcal{O}(10^{-3})$

B–L模型のCW機構

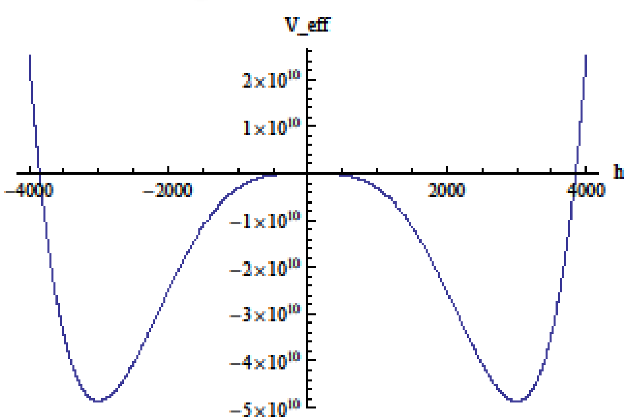
$$V_{eff}(\phi) \quad = \quad \frac{\lambda(\phi)}{4}G(\phi)^4\phi^4$$

1階微分

$$\alpha_\lambda(0) \sim -\frac{6}{\pi}\left(\alpha_{B-L}(0)^2 - \frac{1}{96}\sum_i \alpha_N^i(0)^2\right)$$

2階微分

$$\alpha_{B-L}(0)^2 - \frac{1}{96}\sum_i \alpha_N^i(0)^2 > 0$$



非自明な最小値
⇒自発的なB-L対称性の破れ

電弱対称性の破れ

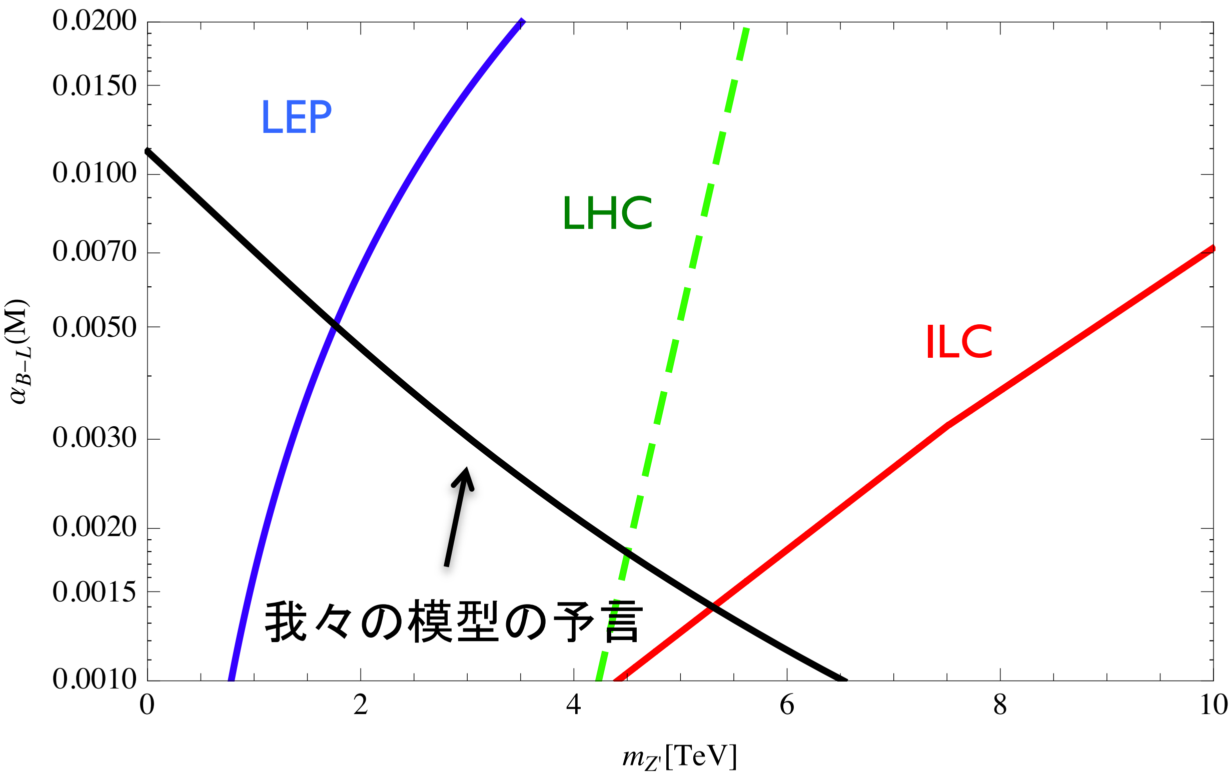
SMヒッグスがB–Lヒッグスとのmixingを通じ質量を持つ

$$V(h) \sim \frac{\lambda_H}{4} h^4 + \boxed{\frac{\lambda'}{4} M^2 h^2}$$

フラットポテンシャルから λ' はnegative
⇒負の質量項によってEW対称性が破れる

$$M = \sqrt{\frac{m_h^2}{|\lambda'|}} \sim \text{数TeV}$$

フラットポテンシャルの予言



B–Lゲージカップリングがすべてを決める

まとめ

- フラットポテンシャルを仮定

  ➡ 標準模型の真空は不安定

- B–L対称性をゲージ化した模型

  ➡ CW機構により安定な真空

- フラットポテンシャルの予言

  ➡ B–L対称性の破れのスケールはTeV