



# ボソニックシーソー機構による 電弱対称性の破れ

石田 裕之 (島根大)

@松江素粒子物理学研究会 2016/03/26

共同研究者： 波場 直之 (島根大)  
北澤 敬章 (首都大)  
山口 雄也 (北海道大 & 島根大)

Ref : PLB755 (2016)

# Introduction

- ・2013年10月8日、  
Brout-Englert-Higgs機構がノーベル賞を獲得



©<http://www.nature.com>

- ・標準模型は遂に完成！

しかし、本当に標準模型は完全な理論なのか??

# Introduction

## ・標準模型の未解決問題

\*ニュートリノ質量 → 今年度のノーベル賞！

\*暗黒物質候補

\*バリオン数非対称性の起源

\*ヒッグスポテンシャルの起源

\*インフレーション

\*フェルミオンのフレーバー構造の起源

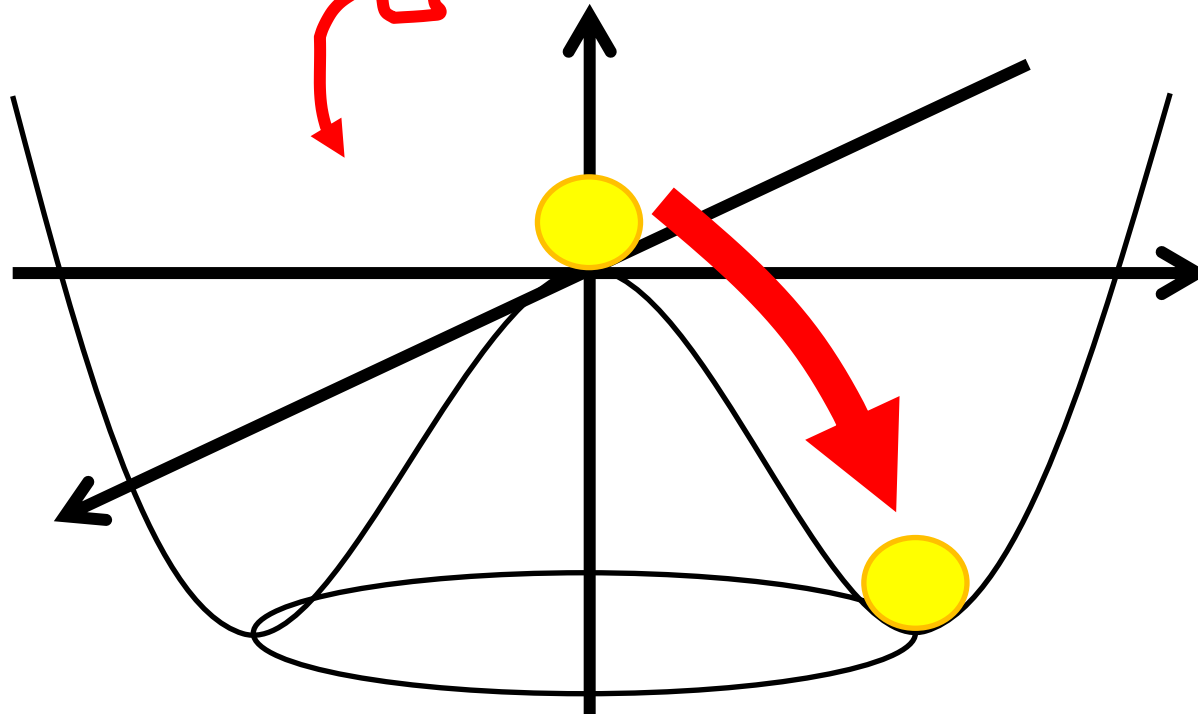
\*強いICP問題

などなど。。

# Introduction

## ・標準模型でのヒッグスポテンシャル

$$V = -m_h^2 |H|^2 + \lambda_h |H|^4$$



うまくいくとはいえ、人工的過ぎる気もする。。

# Introduction

## ・ヒッグス質量パラメータの微調整問題

もし、新しいスケールが  $\Lambda \gg \Lambda_{EW}$  であったとすると、

$$\delta m_h^2 \propto \Lambda^2$$

## ・単純な解：古典的スケール不変性を課す

$$V = \cancel{-m_h^2 |H|^2} + \lambda_h |H|^4$$

対称性を課すことで、質量パラメータは模型の中に現れない  
つまり、少なからず微調整問題はなくなる

ではどのようにスケールを作ればよいのか？

# Introduction

・量子効果でスケールを作る(Coleman-Weinberg機構)

ただし、電弱スケールの生成に直接使えないので、  
ちょっと高いスケールを作る(e.g. TeV scale  $U(1)_{B-L}$  breaking)

$$\mathcal{L} \supset \kappa |H|^2 |\Phi|^2$$



$$\mathcal{L} \supset \kappa v_{\Phi}^2 |H|^2$$

# Model

- 標準模型のゲージ群を拡張:  $\mathcal{G}_{\text{SM}} \times SU(N_{\text{TC}})$
- 2種類のベクター型フェルミオンと一重項スカラー  $S$  を導入

	$SU(N_{\text{TC}})$	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$
$H$	1	2	1/2
$\chi$	$N_{\text{TC}}$	2	1/2
$\psi$	$N_{\text{TC}}$	1	0

$$-\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = y_L \bar{\chi}_L H \psi_R + y_R \bar{\chi}_R H \psi_L + \text{h.c.}$$

$$-\mathcal{L}_S = g_S S \bar{\chi} i \gamma_5 \chi + g'_S S \bar{\psi} i \gamma_5 \psi$$

今後  $y_L = y_R = y, g_S = g'_S = g$

# Model

・導入したフェルミオンが  $\Lambda_{\text{TC}}$  で凝縮した後、

$$\Theta \sim \bar{\chi}\psi / \Lambda_{\text{TC}}^2$$

・ヒッグスの質量行列

$$\begin{aligned} -\mathcal{L}_{\text{mass}} &= (H^\dagger \quad \Theta^\dagger) \begin{pmatrix} 0 & y\Lambda_{\text{TC}}^2 \\ y\Lambda_{\text{TC}}^2 & \alpha\Lambda_{\text{TC}}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H \\ \Theta \end{pmatrix} \\ &\simeq (H_1^\dagger \quad H_2^\dagger) \begin{pmatrix} -\frac{y^2}{\alpha}\Lambda_{\text{TC}}^2 & 0 \\ 0 & \alpha\Lambda_{\text{TC}}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

負の質量項が自然と現れた！  $\alpha \ll y$

**Bosonic seesaw mechanism**



# Model

## ・ゲージ重項の部分

$$-\mathcal{L}_{S-\eta_\chi-\eta_\psi} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} S & \eta_\chi^\dagger & \eta_\psi^\dagger \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 & g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 \\ g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 & \beta_\chi \Lambda_{\text{TC}}^2 & 0 \\ g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 & 0 & \beta_\psi \Lambda_{\text{TC}}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S \\ \eta_\chi \\ \eta_\psi \end{pmatrix}$$
$$\approx \frac{1}{2} \begin{pmatrix} S' & \eta'_\psi{}^\dagger & \eta'_\chi{}^\dagger \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{2g_S^2}{\beta} \Lambda_{\text{TC}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \beta \Lambda_{\text{TC}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \beta \Lambda_{\text{TC}}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S' \\ \eta'_\psi \\ \eta'_\chi \end{pmatrix}$$

**再度Bosonic seesawが起きる** ( $\beta_\psi = \beta_\chi = \beta$ )

ゆえに、

$$-m_S^2 = -\frac{2g_S^2}{\beta} \Lambda_{\text{TC}}^2$$

# Model

## ・低エネルギー有効理論での有効ポテンシャル

$$V_{\text{eff}} = \lambda (H^\dagger H)^2 + \kappa S^2 H^\dagger H + \lambda_S S^4 + y \Lambda_{\text{TC}}^2 (H^\dagger \Theta + \Theta^\dagger H) + \alpha \Lambda_{\text{TC}}^2 \Theta^\dagger \Theta$$

$H_2$  は低エネルギーで現れない

$$V_{\text{eff}} \simeq \lambda (H_1^\dagger H_1)^2 + \kappa S^2 H_1^\dagger H_1 + \lambda_S S^4 - \frac{y^2}{\alpha} \Lambda_{\text{TC}}^2 H_1^\dagger H_1 - \frac{1}{2} m_S^2 S^2$$

## ・停留値条件：

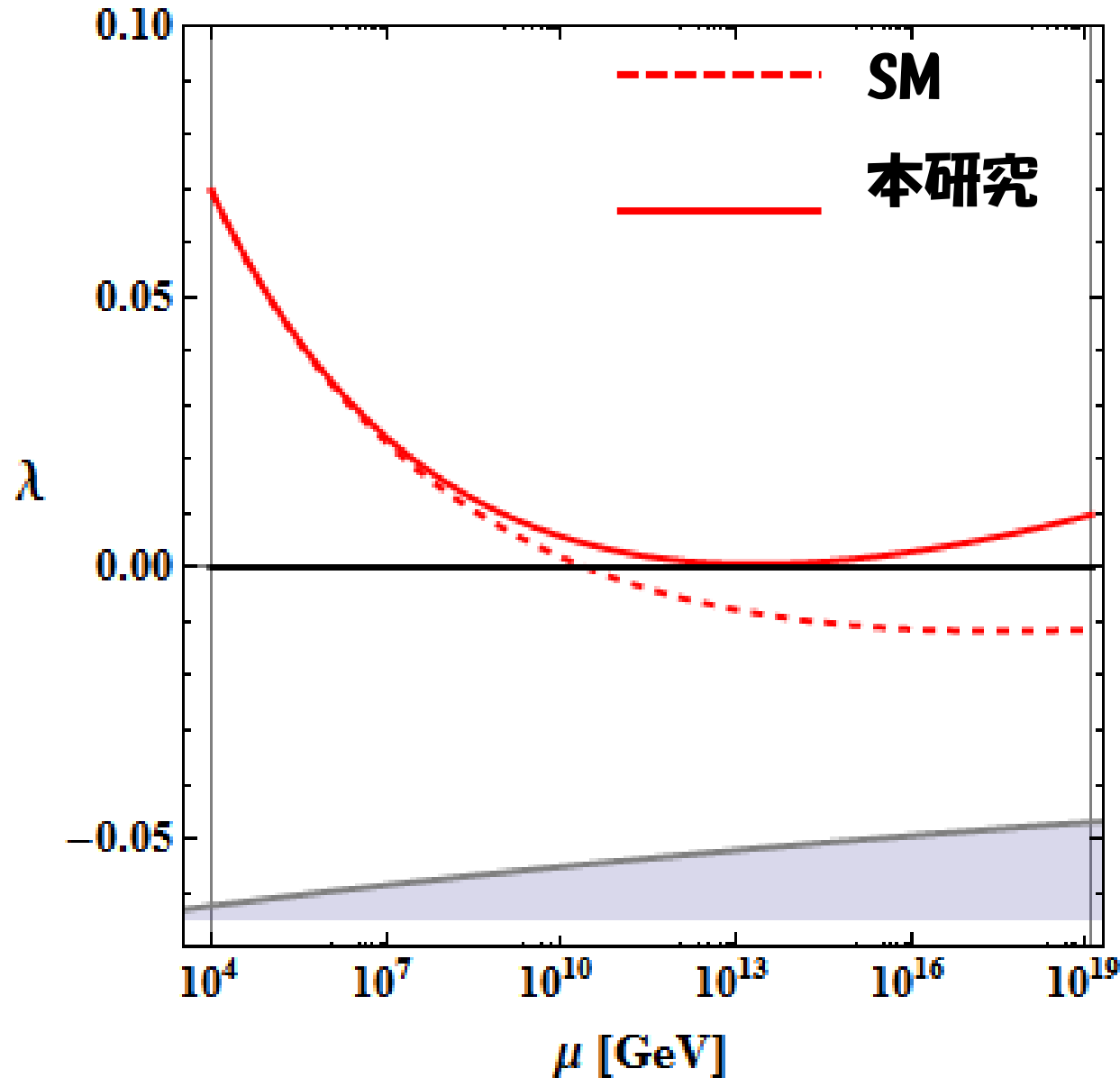
$$v_H^2 = \frac{1}{4\lambda\lambda_S - \kappa^2} \left( \kappa m_S^2 + 4\lambda_S \frac{y^2}{\alpha} \Lambda_{\text{TC}}^2 \right) \tilde{v} \approx \frac{y^2}{\lambda\alpha} \Lambda_{\text{TC}}^2$$

$$v_S^2 = \frac{1}{4\lambda\lambda_S - \kappa^2} \left( \lambda m_S^2 - \kappa \frac{y^2}{\alpha} \Lambda_{\text{TC}}^2 \right) \tilde{v}_S \approx \frac{1}{4\lambda_S} m_S^2$$

ここで、 $\kappa \ll 1$

# 真空安定性

## ・ヒッグス4点のランニング



# pNGボソンたち

・9人のpNGが出てくる

	Operators	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$
$\eta_\chi$	$\bar{\chi}i\gamma_5\chi$	1	0
$\eta_\psi$	$\bar{\psi}i\gamma_5\psi$	1	0
$\Pi_i (i = 1, 2, 3)$	$\bar{\chi}i\gamma_5\sigma_i\chi$	3	0
$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma^0 \\ \Sigma^- \end{pmatrix}$	$\bar{\psi}i\gamma_5\chi$	2	$-1/2$
$\bar{\Sigma} = \begin{pmatrix} \bar{\Sigma}^0 \\ \bar{\Sigma}^+ \end{pmatrix}$	$\bar{\chi}i\gamma_5\psi$	2	$1/2$

# pNGボソンたち

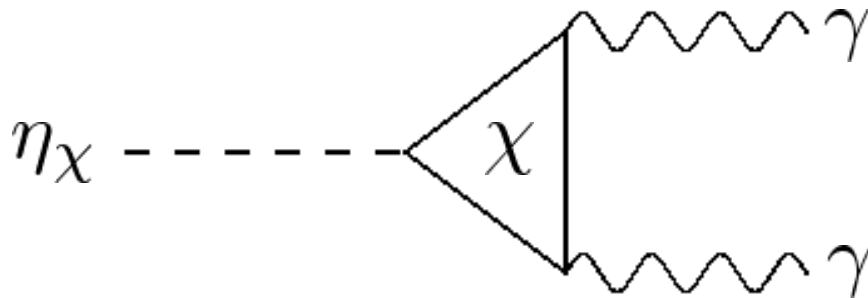
・9人のpNGが出てくる

	Operators	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$
$\eta_\chi$	$\bar{\chi} i \gamma_5 \chi$	1	0
$\eta_\psi$	$\bar{\psi} i \gamma_5 \psi$	1	0
$\Pi_i$ ( $i = 1, 2, 3$ )	$\bar{\psi} i \gamma_5 \psi$	1	0
<b>電荷持っていないから、結構長寿命？</b>			
$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma^0 \\ \Sigma^- \end{pmatrix}$	$\bar{\psi} i \gamma_5 \chi$	2	-1/2
$\bar{\Sigma} = \begin{pmatrix} \bar{\Sigma}^0 \\ \bar{\Sigma}^+ \end{pmatrix}$	$\bar{\chi} i \gamma_5 \psi$	2	1/2

# pNGボソンたち

•  $\eta_\psi$  と  $\eta_\chi$  の崩壊

$\eta_\chi$  はQCDのアナロジーから2つの光子に崩壊可能



•  $\eta_\chi$  の崩壊率

$$\Gamma(\eta_\chi \rightarrow \gamma\gamma) \approx \frac{N_{\text{TC}}^2 \alpha_{\text{em}}^2}{4\pi} \frac{m_{\eta_\chi}^2}{\Lambda_{\text{TC}}^2}$$

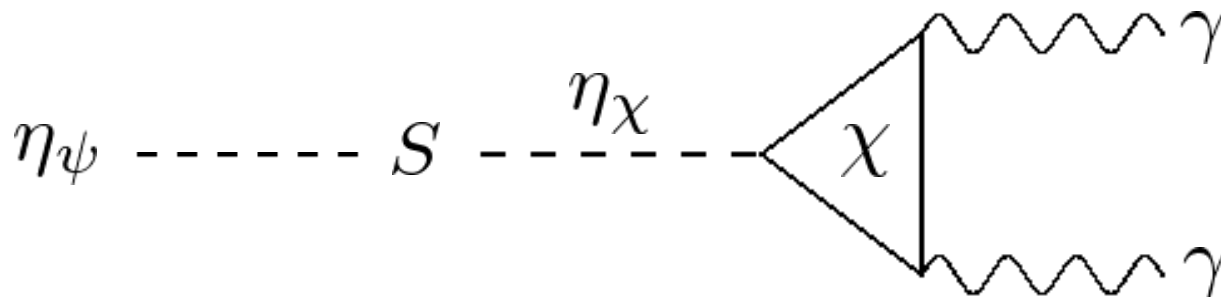
$$\sim 400 \text{MeV}$$

$$\Lambda_{\text{TC}} = 10 \text{TeV} \quad N_{\text{TC}} = 3$$

# pNGボソンたち

•  $\eta_\psi$  と  $\eta_\chi$  の崩壊

$\eta_\psi$  は  $S$  との混合を通じて2つの光子に崩壊



$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} S & \eta_\chi^\dagger & \eta_\psi^\dagger \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & g_S \Lambda_{TC}^2 & g_S \Lambda_{TC}^2 \\ g_S \Lambda_{TC}^2 & \beta \Lambda_{TC}^2 & 0 \\ g_S \Lambda_{TC}^2 & 0 & \beta \Lambda_{TC}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S \\ \eta_\chi \\ \eta_\psi \end{pmatrix}$$

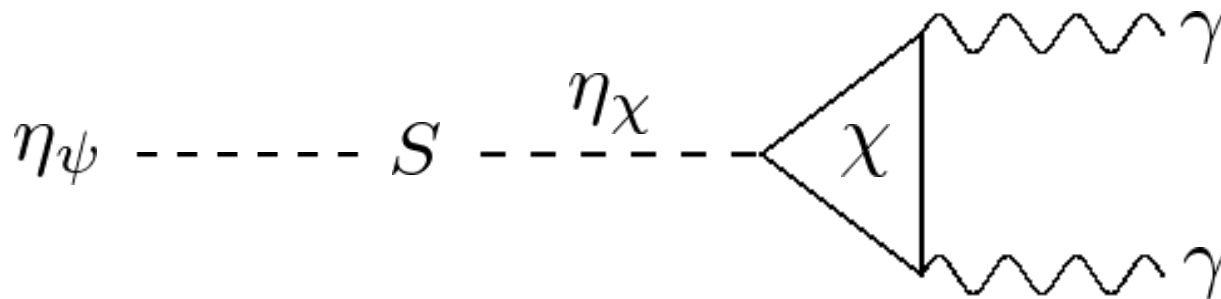
•  $\eta_\psi$  の崩壊率

$$\begin{aligned} \Gamma(\eta_\psi \rightarrow \gamma\gamma) &\approx \left( \frac{g_S^2}{\beta^2} \right)^2 \Gamma(\eta_\chi \rightarrow \gamma\gamma) \\ &\sim 3\text{keV} \quad (g_S = 0.05, \beta = 1) \\ &\quad (\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) \sim 7.7\text{eV}) \end{aligned}$$

# pNGボソンたち

- $\eta_\psi$  と  $\eta_\chi$  の崩壊

$\eta_\psi$  は  $S$  との混合を通じて2つの光子に崩壊



$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} S & \eta_\chi^\dagger & \eta_\psi^\dagger \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 & g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 \\ g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 & \beta \Lambda_{\text{TC}}^2 & 0 \\ g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 & 0 & \beta \Lambda_{\text{TC}}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S \\ \eta_\chi \\ \eta_\psi \end{pmatrix}$$

- $\eta_\psi$  の崩壊率

$$\Gamma(\eta_\psi \rightarrow \gamma\gamma) \approx \left( \frac{g_S^2}{\beta^2} \right)^2 \Gamma(\eta_\chi \rightarrow \gamma\gamma) \\ \sim 3\text{keV}$$

すべてのpNGは十分早く崩壊するので、  
宇宙論的な問題はない



# Summary

- 負の質量項の起源は未だ謎のまま
- 古典的スケール不変の模型に強い相互作用のダイナミクスを導入
  - \* 素粒子のヒッグス
  - \* 複合ヒッグス
- Bosonic seesaw mechanism  
ボソンセクターのシーソー機構で、  
正の結合定数だけで負の質量項が実現！
- ゲージのランニングが変わるため、真空安定性も保障される

