



ボソニックシーソー機構を用いた 電弱対称性の破れ

石田 裕之 (島根大)

@京都大学 2016/05/25

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 ひとつの魅力的な解決方法[シーソー機構]

*バリ: 単純にはとても重たい右巻きニュートリノを導入

*ヒツ: $\begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D & M_N \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{yellow arrow}} \begin{pmatrix} M_\nu & 0 \\ 0 & M_N \end{pmatrix}$

*イン:

*フェ:

$$M_\nu = -\frac{M_D^2}{M_N}$$

*強い

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CP問題

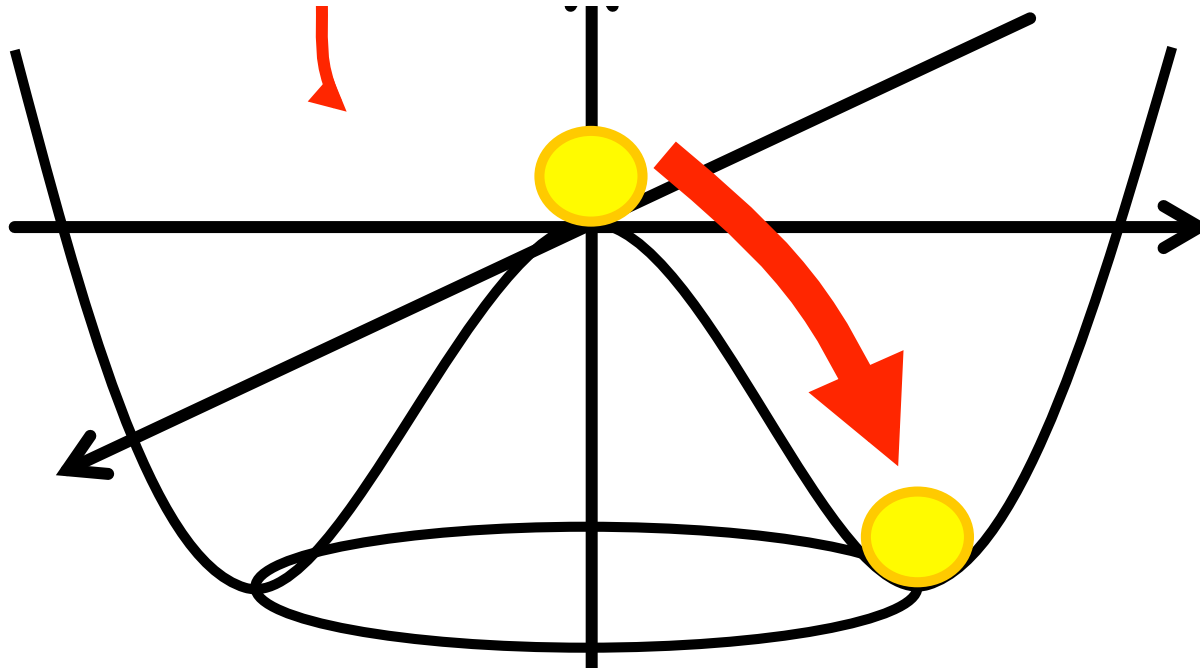
などなど。。。

Introduction

- 標準模型でのヒッグスポテンシャル

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

負の質量項があれば



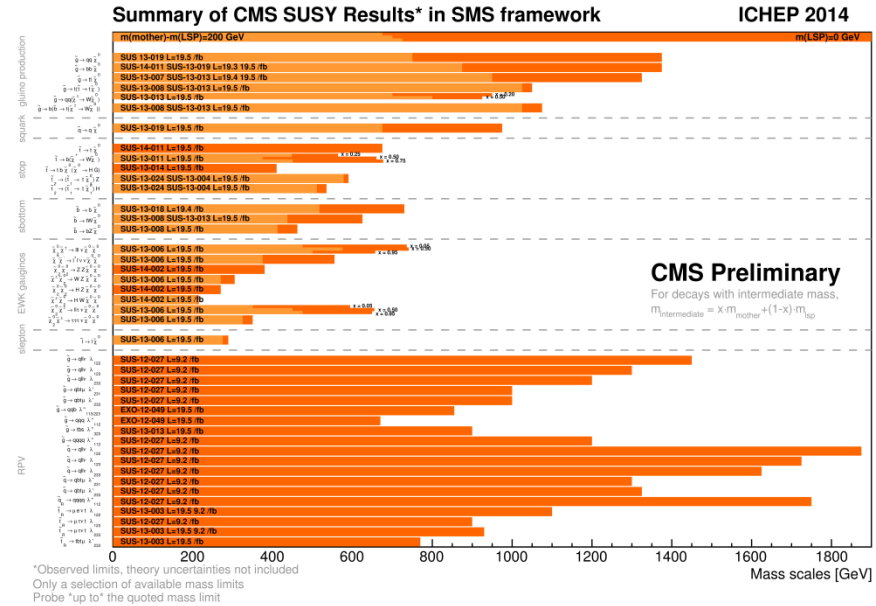
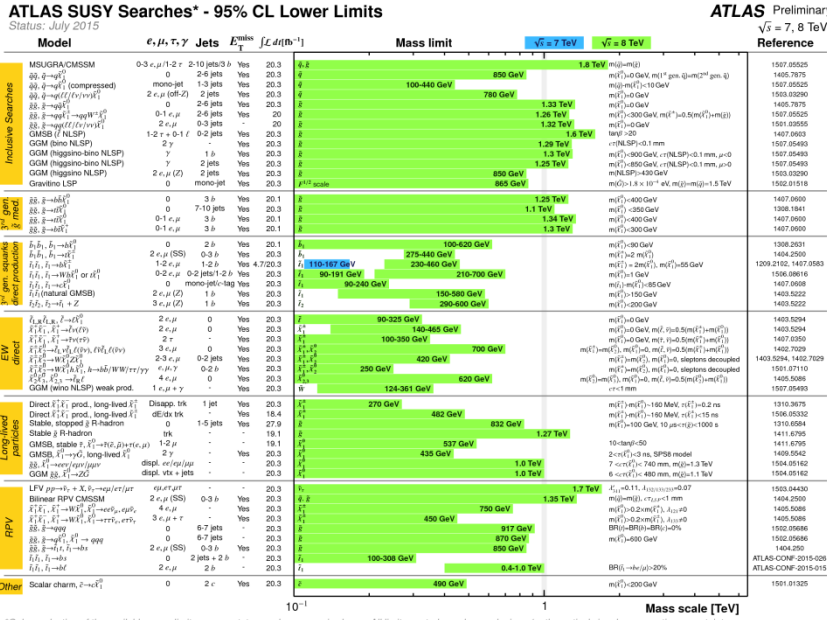
うまくいくとはいえ、人工的過ぎる気もする。。

Introduction

・ゲージ階層性問題

Q: 何故電弱スケールはプランクスケールと比べてとても小さい?

- ・よくある解: 超対称性を課す
- しかし...



[ATLAS Wiki]

[CMS Wiki]

超対称粒子は大雑把に1TeVよりは(ずっと?)重たい

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 $\Lambda \gg \Lambda_{\text{EW}}$ 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)

$$V_{\text{CW}} = \frac{1}{4}\lambda_h h^4 + \sum_i \frac{h^4}{4\pi^2} n_i \alpha_i^2 \left[\ln \left(\frac{h^2}{Q^2} \right) - C_i \right]$$



Introduction

- ・量子効果でスケールを作る(Coleman-Weinberg機構)

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)

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



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

質量項が現れたかのように見える！

しかしながら、この項を質量項と思うためには、
 $\kappa < 0$ が必要！

Goal&Contents

Goal

結合定数の符号を仮定することなく、
classically conformal invariant modelで
電弱対称性の破れを説明する

- Introduction
- Model
- Bosonic seesaw mechanism
- pseudo Nambu–Goldstone bosons
- Vacuum stability
- Summary

Model

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
χ	N_{TC}	2	1/2
ψ	N_{TC}	1	0

— $\mathcal{L}$ 古典的スケール不変性を課しているので、あらゆる質量項は禁止されている h.c.

今後 $y_L = y_R = y$ $g_S = g'_S = g$

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
χ	N_{TC}	2	1/2
ψ	N_{TC}	1	0

- 標準模型のゲージ対称性を無視すると、
 $SU(3)_L \times SU(3)_R \times U(1)_A$ がカイラル対称性としてある
- 標準模型のゲージ対称性を考慮したとしても、
 $SU(3)_{\chi_L} \times SU(2)_{\chi_R} \times U(1)_{\chi_A} \times U(1)_{\psi_A}$
 がカイラル対称性としてある  Massless NGがある?

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
χ	N_{TC}	2	1/2
ψ	N_{TC}	1	0

- ・カイラル対称性の破れとして、

$$\langle \bar{\chi}_L \chi_R \rangle = \langle \bar{\chi}_R \chi_L \rangle, \langle \bar{\psi}_L \psi_R \rangle = \langle \bar{\psi}_R \psi_L \rangle \text{ の形で破れる}$$

 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ は保存したまま破る

Model

- 標準模型のゲージ対称性を無視したとき

$$\underset{8}{SU(3)_L} \times \underset{8}{SU(3)_R} \times \underset{1}{U(1)_A} \xrightarrow{\text{yellow arrow}} \underset{8}{SU(3)_V}$$

 9つのNG bosons $\left\{ \begin{array}{l} \text{Anomalyによる1つのpNG} \\ 8つのmassless NG bosons} \end{array} \right.$

- 標準模型のゲージ対称性を考慮したとき

$$\underset{3}{SU(3)_{\chi_L}} \times \underset{3}{SU(2)_{\chi_R}} \times \underset{1}{U(1)_{\chi_A}} \times \underset{1}{U(1)_{\psi_A}} \xrightarrow{\text{yellow arrow}} \underset{3}{SU(2)_{\chi_V}}$$

 5つのNG bosons $\left\{ \begin{array}{l} \text{Anomalyによる2つのpNG} \\ 3つのmassless NG bosons} \end{array} \right.$

$SU(2)_L \times U(1)_Y$ によって4つのpNG bosonsが出てくる

Model

- ・ $SU(3)_{\chi_L} \times SU(2)_{\chi_R} \times U(1)_{\chi_A} \times U(1)_{\psi_A}$ を破るために

➡ S の導入の理由

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

- ・ CP対称性の破れを仮定 ➡ g_S が実に

- ・ 新たに導入したフェルミオンの凝縮ではパリティの破れが起きない

$$\langle \bar{\chi} i \gamma_5 \chi \rangle = \langle \bar{\psi} i \gamma_5 \psi \rangle = 0$$

➡ S はtadpoleをもたない

- ・ S が真空期待値を持てば、カイラル対称性が破れる(詳細は後程)

➡ 標準模型と同じ

Model

- ・Higgsとの結合をまとめると

$$-\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = y\bar{\chi}H\psi + \text{h.c.} + \kappa S^2 H^\dagger H$$

CとCP不変を仮定すると、実のパラメータ

- ・フェルミオン凝縮が起きた後の有効理論では

$$\begin{aligned}\bar{\chi}_L\psi_R &= \bar{\chi}\frac{1+\gamma_5}{2}\psi = \frac{1}{2}\bar{\chi}\psi + \frac{1}{2}\bar{\chi}\gamma_5\psi \\ \bar{\chi}_R\psi_L &= \bar{\chi}\frac{1-\gamma_5}{2}\psi = \frac{1}{2}\bar{\chi}\psi - \frac{1}{2}\bar{\chi}\gamma_5\psi\end{aligned}$$

複合ヒッグスと bosons と結合する

- ・今後、 $\bar{\chi}\psi \sim \Lambda_{\text{TC}}^2 \Theta^\dagger$ とし複合ヒッグスを Θ であらわす

Bosonic seesaw mechanism

Model

- ・導入したフェルミオンが Λ_{TC} で凝縮した後、

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

- ・有効スカラーポテンシャル

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

SMのヒッグスとの混合
strong dynamicsにより生成

Model

- ・導入したフェルミオンが Λ_{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！ $y \ll \alpha$

Bosonic seesaw mechanism

cf: $U(1)_{\text{B-L}}$ の拡張をした 2HDM でも説明可能

[Haba, Okada, Yamaguchi, H.I. PLB754(2016)]

Model

- ・導入したフェルミオンが Λ_{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

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

- ・混合の大きさ: $\frac{y}{\alpha}$  十分に小さい

- ・質量固有状態 $\begin{cases} H_1 \simeq H \\ H_2 \simeq \Theta \end{cases}$

Model

- ・ゲージ重項の部分(η については後程説明)

$$\begin{aligned}
 -\mathcal{L}_{S-\eta_\chi-\eta_\psi} &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} S & \eta_\chi^\dagger & \eta_\psi^\dagger \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 & g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 \\ g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 & \beta_\chi \Lambda_{\text{TC}}^2 & 0 \\ g_S \Lambda_{\text{TC}}^2 & 0 & \beta_\psi \Lambda_{\text{TC}}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S \\ \eta_\chi \\ \eta_\psi \end{pmatrix} \\
 &\approx \frac{1}{2} \begin{pmatrix} S' & \eta_\psi'^\dagger & \eta_\chi'^\dagger \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{2g_S^2}{\beta} \Lambda_{\text{TC}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \beta \Lambda_{\text{TC}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \beta \Lambda_{\text{TC}}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S' \\ \eta_\psi' \\ \eta_\chi' \end{pmatrix} \\
 &\quad \text{再度Bosonic seesawが起きる} \quad (\beta_\psi = \beta_\chi = \beta)
 \end{aligned}$$

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 が低エネルギーで現れない極限で

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

- ・真空期待値の解 (trivial 以外) :

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

ここで、 $\kappa \ll 1$

pseudo Nambu–Goldstone Bosons

pNGボソンたち

・9人の軽いpNGが出てくる

	Operators	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$
η_χ	$\bar{\chi} i \gamma_5 \chi$	1	0
η_ψ	$\bar{\psi} i \gamma_5 \psi$	1	0
Π_i ($i = 1, 2, 3$)	電荷持っていないから、結構長寿命？	0	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

・pNGの質量

η の質量

$$m_{\eta_\chi}^2 = m_{\eta_\psi}^2 = \beta \Lambda_{\text{TC}}^2$$

Π と Σ の質量 (Dashen formula)

$$m_{\Pi(\Sigma)}^2 f_{\Pi(\Sigma)}^2 = \langle 0 | [Q, [Q, \mathcal{H}]] | 0 \rangle$$

それぞれの質量は

$$m_{\Pi}^2 \simeq \frac{8\pi^2 g_S^4}{\lambda_S} \Lambda_{\text{TC}}^2$$
$$m_{\Sigma}^2 \simeq \frac{16\pi^2 g_S^4}{\lambda_S} \Lambda_{\text{TC}}^2$$

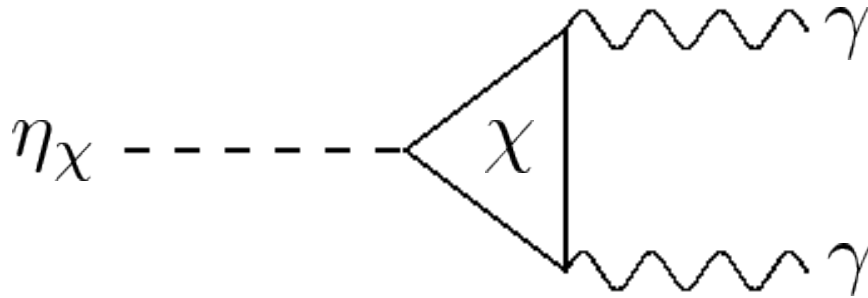
ここで、

$\Lambda_{\text{TC}} = 4\pi f_{\Pi(\Sigma)}$ を用いた

pNGボソンたち

- ・ η_ψ と η_χ の崩壊

η_χ はQCDのアナロジーから2つの光子に崩壊可能



- ・ η_χ の崩壊率

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

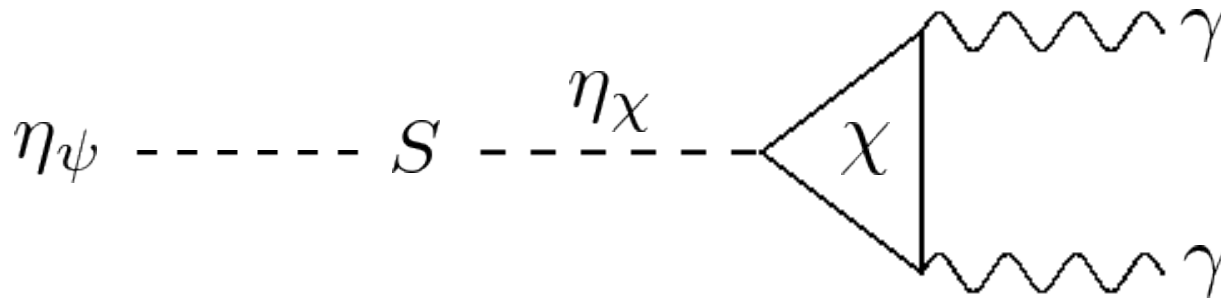
$$\sim 400 \text{MeV}$$

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

pNGボソンたち

- ・ η_ψ と η_χ の崩壊

η_ψ は S との混合を通じて2つの光子に崩壊



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

- ・ η_ψ の崩壊率

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

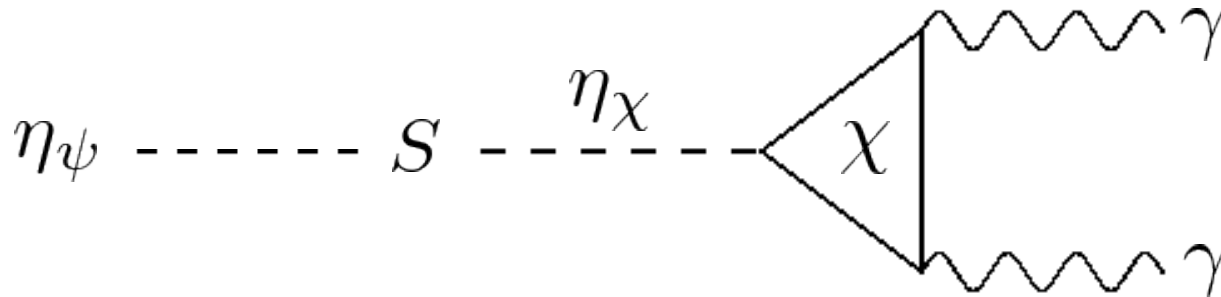
S との混合具合 ($g_S = 0.05, \beta = 1$)

$$(\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) \sim 7.7 \text{ eV})$$

pNGボソンたち

- ・ η_ψ と η_χ の崩壊

η_ψ は S との混合を通じて2つの光子に崩壊



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

- ・ η_ψ の崩壊率

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

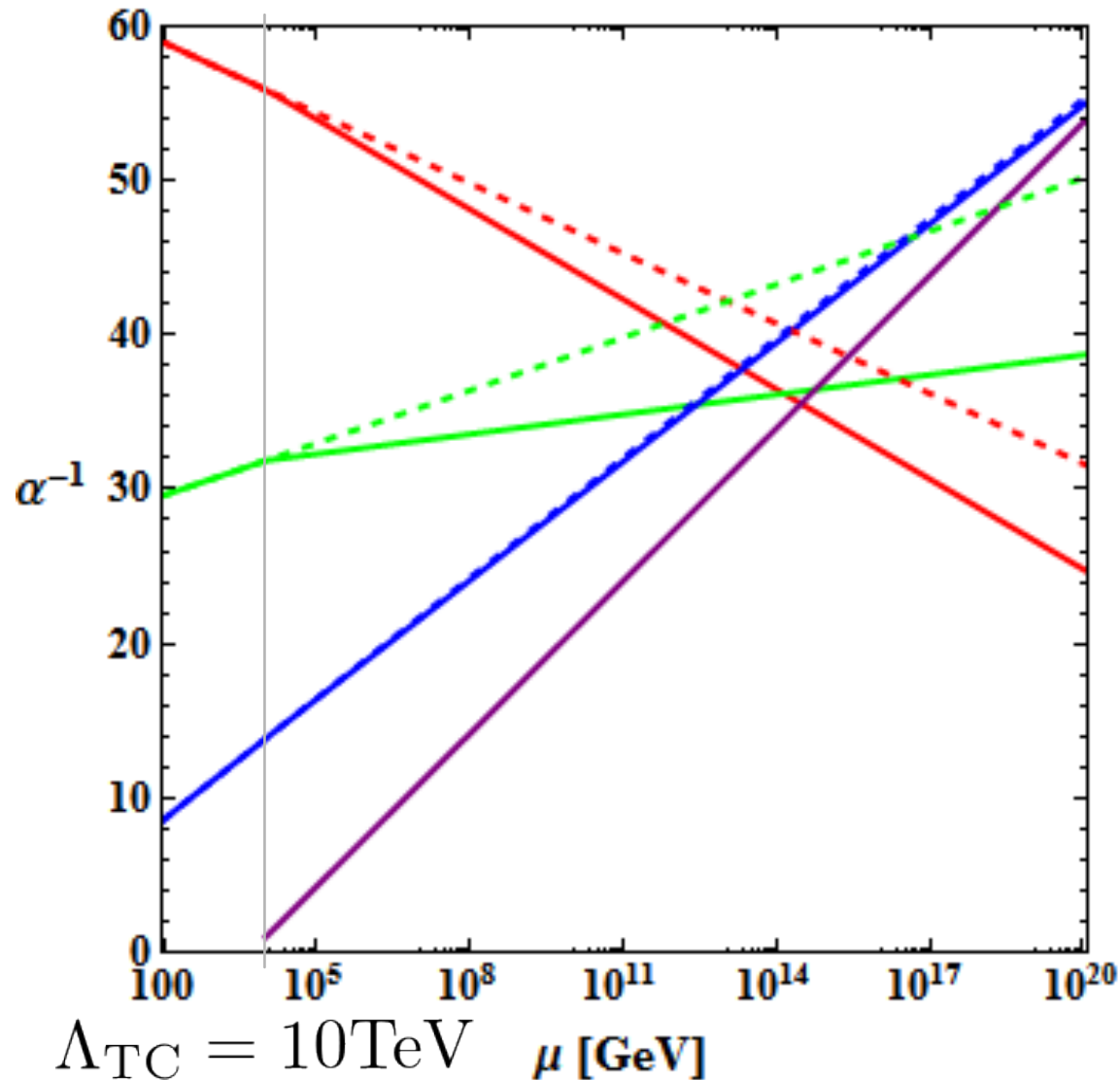
$$\sim 3\text{keV}$$

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

Vacuum stability

真空安定性

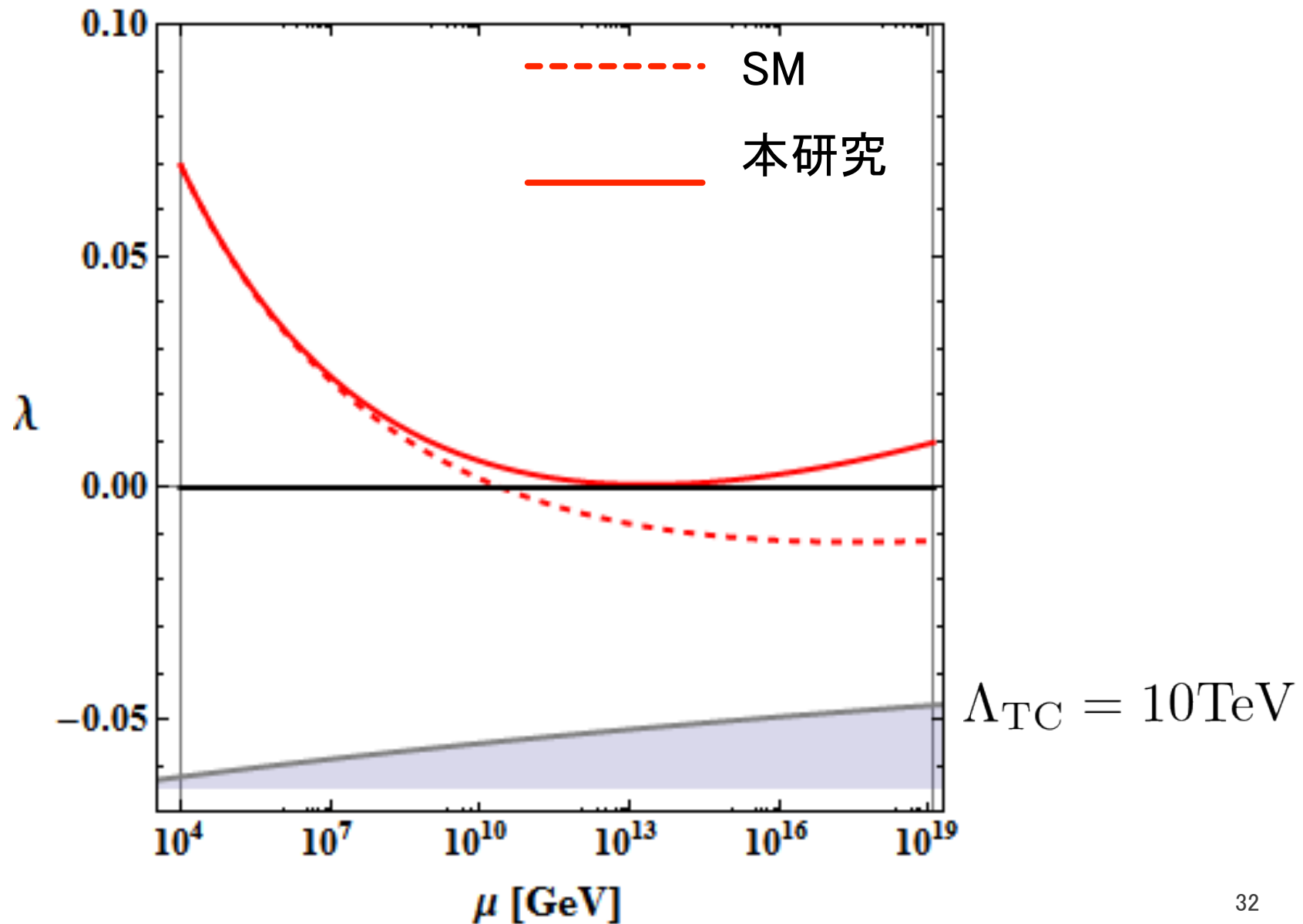
- ・新粒子として、 $SU(2)_L \times U(1)_{Y\text{charged}}$ のものを入れたので



破線: SM
実線: 本研究
赤: U(1)
緑: SU(2)
青: SU(3)
紫: SU(N_{TC})

真空安定性

・ヒッグス4点のランニング



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！
- ・今見ているパラメータ空間ではすべてのpNG bosonsは十分に短寿命
- ・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

