Type-Ⅱ Seesaw-like機構を用いた大統一模型における W ボソン質量異常の説明とゲージ結合定数の統一

竹下 昌之介(広島大学)

共同研究者 : 清水 勇介 (広島大学)

Based on

Y. Shimizu and **ST,** Nucl. Phys. B **994** (2023), 116290, arXiv:2303.11070 [hep-ph].

基研研究会 素粒子物理学の進展2023
PPP2023@京大基研

Hiroshima University
Theoretical Particle and Hadron Physics Group

やったこと

Minimal SU(5)大統一模型に10表現のvector-likeフェルミオンを2世代分追加した新しい大統一模型を構築した。

本研究の動機

- W ボソン質量異常
- 陽子崩壊
- ゲージ結合定数の統一

ポイント

本模型では、vector-likeクォーク2重項は、
Type-Ⅱ seesaw-like機構を通じて質量を獲得する。

⟶ Vector-likeクォーク2重項と実3重項スカラーの質量は、強く制限される。

W ボソン質量

CDF W ボソン質量異常

[CDF Collaboration] (2022)
J. de Blas, M. Pierini, L. Reina and L. Silvestrini (2022)

$$M_W^{exp} = 80.4113 \pm 0.0080 \text{ GeV} \longleftrightarrow M_W^{SM} = 80.3500 \pm 0.0056 \text{ GeV}$$

6.5σ

24表現ヒッグスに含まれるSU(2)3重項スカラーに着目。

$$24_H = \begin{pmatrix} \Sigma_8 - \frac{2}{\sqrt{30}}\Sigma_0 & \Sigma_{(\bar{3},2)} \\ \Sigma_{(3,2)} & \Sigma_3 + \frac{3}{\sqrt{30}}\Sigma_0 \end{pmatrix}; \quad \Sigma_8 \sim (8,1,0), \Sigma_3 \sim (1,3,0), \Sigma_0 \sim (1,1,0), \Sigma_{(3,2)} \sim (3,2,-5/6), \Sigma_{(\bar{3},2)} \sim (\bar{3},2,5/6).$$

模型

P. Fileviez Perez, H. H. Patel and A. D. Plascencia (2022)

SMヒッグス H + ハイパーチャージゼロの3重項スカラー T

ラグランジアン : $\mathcal{L}_{scalar} \supset (D_\mu H)^\dagger (D^\mu H) + \mathrm{Tr}(D_\mu T)^\dagger (D^\mu T) - V(H,T)$

共変微分 : $D_\mu H = \partial_\mu H + \mathrm{i} g_1 \frac{B_\mu}{2} + \mathrm{i} g_2 W_\mu,\quad D_\mu T = \partial_\mu T + \mathrm{i}\, g_2 \left[W_\mu, T\right]$

ポテンシャル : $V(H,T) = -m_h^2 H^\dagger H + \lambda_0 (H^\dagger H)^2 + M_T^2 \mathrm{Tr}[T^2] + \lambda_1 \mathrm{Tr}[T^4] + \lambda_2 (\mathrm{Tr}[T^2])^2 + \alpha (H^\dagger H)\mathrm{Tr}[T^2] + \beta H^\dagger T^2 H + \mu H^\dagger T H$

場 : $H = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ (v_h + h^0 + \mathrm{i}G^0)/\sqrt{2} \end{pmatrix},\ T = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} v_T + t^0 & \sqrt{2}t^+ \\ \sqrt{2}t^- & -v_T - t^0 \end{pmatrix}.$

W ボソン質量

$$M_W^2 = \left(M_W^{SM}\right)^2 + g_2^2 v_T^2 \longrightarrow v_T = 4.85 \text{ GeV}$$

treeレベルでの寄与

CDF実験により報告された
W ボソン質量異常が説明可能!

$v_h \gg v_T$ の極限を取ることが可能。

混合角

$$\tan 2\theta_0 = \frac{4v_h v_T(-\mu + 2Av_T)}{8\lambda_0 v_h^2 v_T - 4Bv_T^3 - \mu v_h^2},$$
$$\tan 2\theta_+ = \frac{4v_h v_T}{4v_T^2 - v_h^2}.$$
$$(A = \alpha + \frac{\beta}{2}, B = \lambda_1 + 2\lambda_2)$$

質量固有値

$M_h^2 = 2\lambda_0 v_h^2,$ ⟵ SM-like ヒッグス

$$M_H^2 = Bv_T^2 + \frac{\mu v_h^2}{4v_T},$$
$$M_{H^\pm}^2 = \mu v_T + \frac{\mu v_h^2}{4v_T}.$$
$$\longrightarrow M_H^2 = M_{H^\pm}^2 \approx \frac{\mu v_h^2}{4v_T} (= M_T^2)$$

本模型

H. Georgi and S. L. Glashow (1974)

Minimal SU(5) 大統一模型 + 10表現のvector-likeフェルミオン

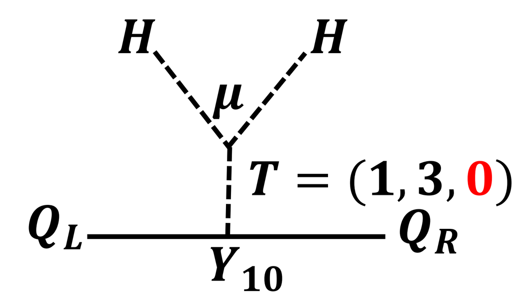
$\bar{5}_L^i, 10_L^i, 5_H, 24_H, A_\mu \qquad 10_{L,R}^{4,5} = Q(3,2,1/6) \oplus U^c(\bar{3},1,-2/3) \oplus E^c(1,1,1)$

・湯川相互作用

$$\mathcal{L}_{SM} \supset \sum_{i,j=1}^{3} Y_1^{ij} 5_H 10_L^i 10_L^j + \sum_{i,j=1}^{3} Y_2^{ij} 5_H^* \bar{5}_L^i 10_L^j + \text{h.c.}$$
$$\mathcal{L}_{VL} \supset \overline{10}_L^4 [Y_{10}^4 24_H + M_{10}^4] 10_R^4 + \overline{10}_L^5 [Y_{10}^5 24_H + M_{10}^5] 10_R^5 + \text{h.c.}$$

混合を禁止するため、Z_3対称性を課している。

Type-Ⅱ seesaw-like機構



本模型では、W ボソン質量異常を説明するために実3重項スカラーは真空期待値を持つ。

⟶ Vector-likeクォーク2重項は、Type-Ⅱ seesaw-like機構を通じて質量を獲得する。

$$\mathcal{L}_{VL-RT} \supset Y_{10}^4 T \bar{Q}_L^4 Q_R^4 + Y_{10}^5 T \bar{Q}_L^5 Q_R^5 + \text{h.c.}$$

質量固有値

$$M_Q^{4,5} = M_{10}^{4,5} - \frac{Y_{10}^{4,5} V_{24}}{4\sqrt{15}} + Y_{10}^{4,5} \frac{\mu v_h^2}{8M_T^2},$$
$$M_U^{4,5} = M_{10}^{4,5} + \frac{Y_{10}^{4,5} V_{24}}{\sqrt{15}}, M_E^{4,5} = M_{10}^{4,5} - \frac{3Y_{10}^{4,5} V_{24}}{2\sqrt{15}}.$$

$M_{10}^4 = \frac{Y_{10}^4 V_{24}}{4\sqrt{15}}$ を仮定。 ⟶

$$M_Q^4 = Y_{10}^4 \frac{\mu v_h^2}{8M_T^2}, \quad M_U^4 = M_E^4 = \frac{5Y_{10}^4 V_{24}}{4\sqrt{15}}.$$

制限

R. S. Chivukula, N. D. Christensen and E. H. Simmons (2008)

・WW 散乱断面積の摂動ユニタリー性からの制限 : $M_H, M_{H^\pm} \lesssim \frac{2\sqrt{\pi} v_h^2}{v_T}$

$$\longrightarrow \mu < \frac{16\pi v_h^2}{v_T} \approx 6.28 \times 10^2 \text{ TeV}$$

$$M_H^2 = M_{H^\pm}^2 \approx \frac{\mu v_h^2}{4v_T}, \quad M_Q^4 = Y_{10}^4 \frac{\mu v_h^2}{8M_T^2} \longrightarrow M_Q^4 \times (M_T)^2 < 4.76 \times Y_{10}^4 \ (\text{TeV})^3$$

許される質量領域

$Y_{10}^4 = 1$ を仮定する。

もし Y_{10}^4 が小さかった場合、質量の上限値が小さくなり、実験的制限と矛盾が生じてしまう。

- $M_Q^4 > 1660$ GeV ⟶ $M_T < 1693$ GeV
- $M_H > 1400$ GeV ⟶ $M_Q^4 < 2428$ GeV
- $M_{H^\pm} > 1000$ GeV ⟶ $M_Q^4 < 4759$ GeV

A. M. Sirunyan et al. [CMS] (2019)
G. Aad et al. [ATLAS] (2020)
G. Aad et al. [ATLAS] (2021)

重いヒッグスの制限 : $1660 < M_Q^4 < 2428$ GeV, $1400 < M_T < 1693$ GeV
荷電ヒッグスの制限 : $1660 < M_Q^4 < 4759$ GeV, $1000 < M_T < 1693$ GeV

結果

繰り込み群方程式に寄与してくる新粒子

$1660 < M_Q^4 < 2428$ GeV, $1400 < M_T < 1693$ GeV
Q^5, U^5, E^5, H_8 : 質量の制限なし

ベンチマークを設定。 ⟶

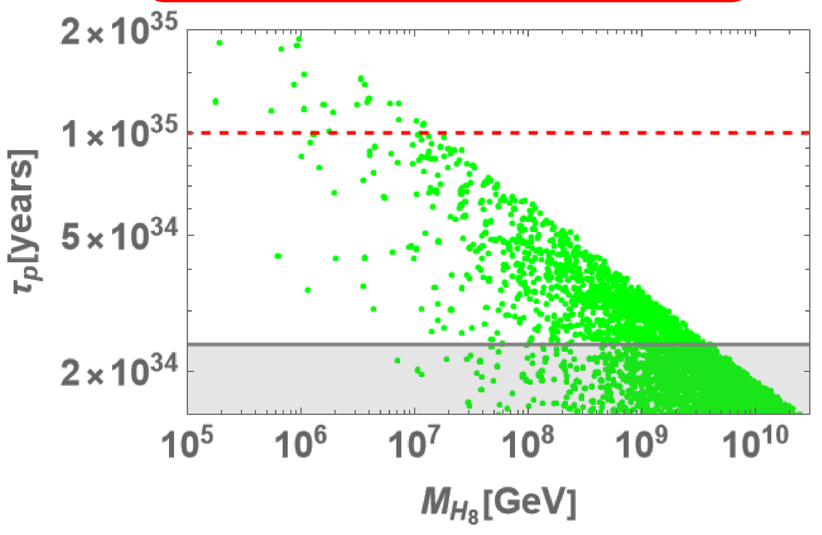
$M_Q^4 = 2000$ GeV, $M_T = 1500$ GeV,
$M_U^5 = M_{H_8} = 10^8$ GeV,
その他の新粒子: GUTスケール

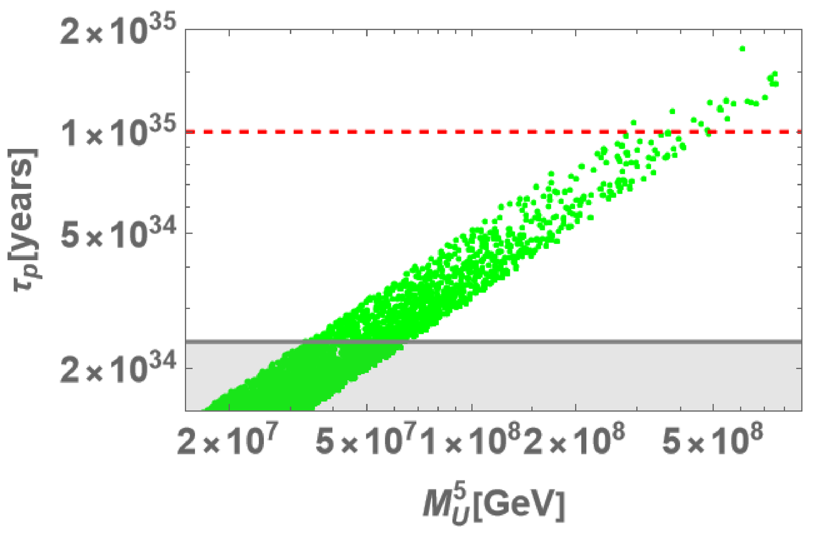
SM粒子の寄与は2ループまで、新粒子の寄与は1ループまで考慮して繰り込み群方程式を解いた。

結果

M_{H_8}, M_U^5: 中間スケール
M_Q^5, M_E^5 : GUTスケール

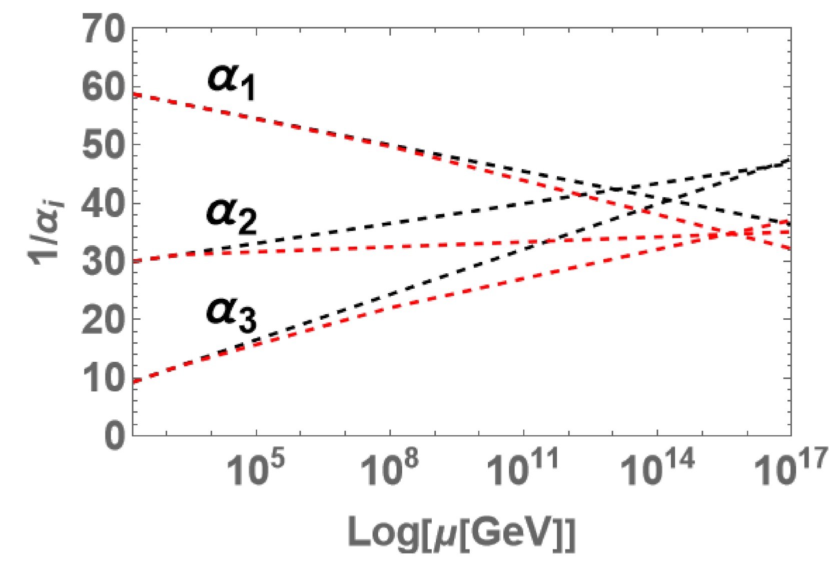
ゲージ結合定数の統一が、1%以内の正確さで実現可能。



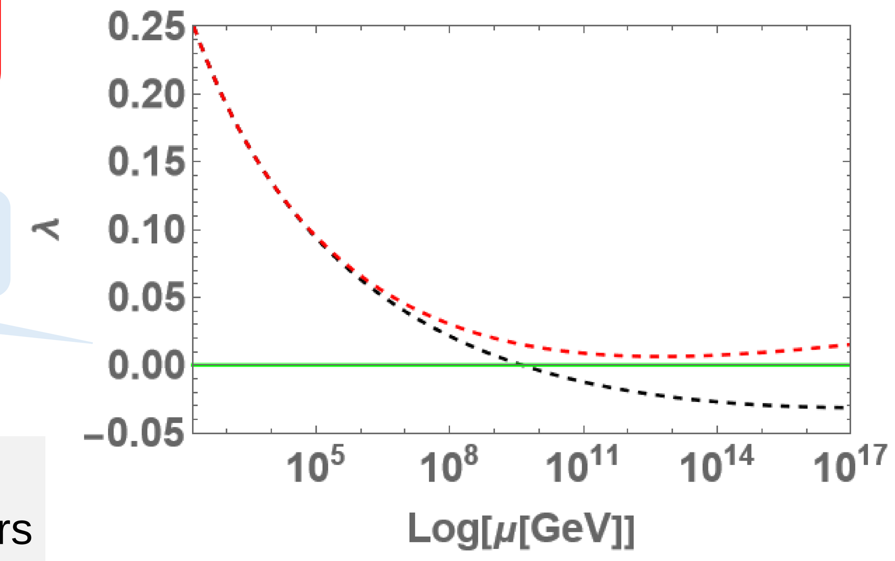


結果

$M_{GUT} \approx 5.1 \times 10^{15}$ GeV,
$\alpha_{GUT} = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \approx 1/34.7,$
$\tau_p(p \to \pi^0 e^+) \approx 4.12 \times 10^{34}$ years.



SMヒッグスポテンシャルは安定となる。



灰色領域: A. Takenaka et al. (2020)
スーパーカミオカンデ : $\tau_p(p \to \pi^0 e^+) > 2.4 \times 10^{34}$ years
赤点線 : HYPER-KAMIOKANDE collaboration (2019)
ハイパーカミオカンデ : $\tau_p(p \to \pi^0 e^+) < 1.0 \times 10^{35}$ years

黒点線: 標準模型
赤点線 : 本模型