

将来加速器実験による拡張ヒッグス模型の識別に向けた3点ヒッグス結合計算

大澤周平¹ 共同研究者：柿崎充¹ 広島渚^{1,2}

Work in Progress

¹富山大学 ²理研 iTHEMS



イントロダクション

大型ハドロン衝突型加速器(LHC)によるヒッグス粒子の発見により、素粒子標準理論が確立

標準理論の問題点

- ヒッグスセクターに指導原理が存在しない
- 標準理論を超える現象(宇宙のバリオン数非対称性等)を説明できない

ヒッグスセクターの構造を明らかにすることは、標準理論を超える現象への足がかりとなる可能性あり

ヒッグスポテンシャルと加速器実験

真空期待値(VEV): $0 = \frac{\partial V}{\partial \phi} \Big|_{\phi=v}$

ヒッグス質量: $m_h^2 = \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} \Big|_{\phi=v}$

ヒッグス3点結合: $\lambda_{hhh} = \frac{\partial^3 V}{\partial \phi^3} \Big|_{\phi=v}$

LHCによって測定された値[2]:

$v = 246 \text{ GeV}$, $m_h = 125 \pm 0.17 \text{ GeV}$

$-0.4 < \kappa_\lambda := \frac{\lambda_{hhh}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}} < 6.3$ (2σ)

ヒッグス3点結合の制限をより厳しくする必要あり

将来加速器実験

- 高輝度LHC[1]: $0.5 < \kappa_\lambda < 1.6$ (1σ)
- 国際リニアコライダー(ILC1 TeV)[4]: $\kappa_\lambda = 1$ の場合、約10%の測定精度

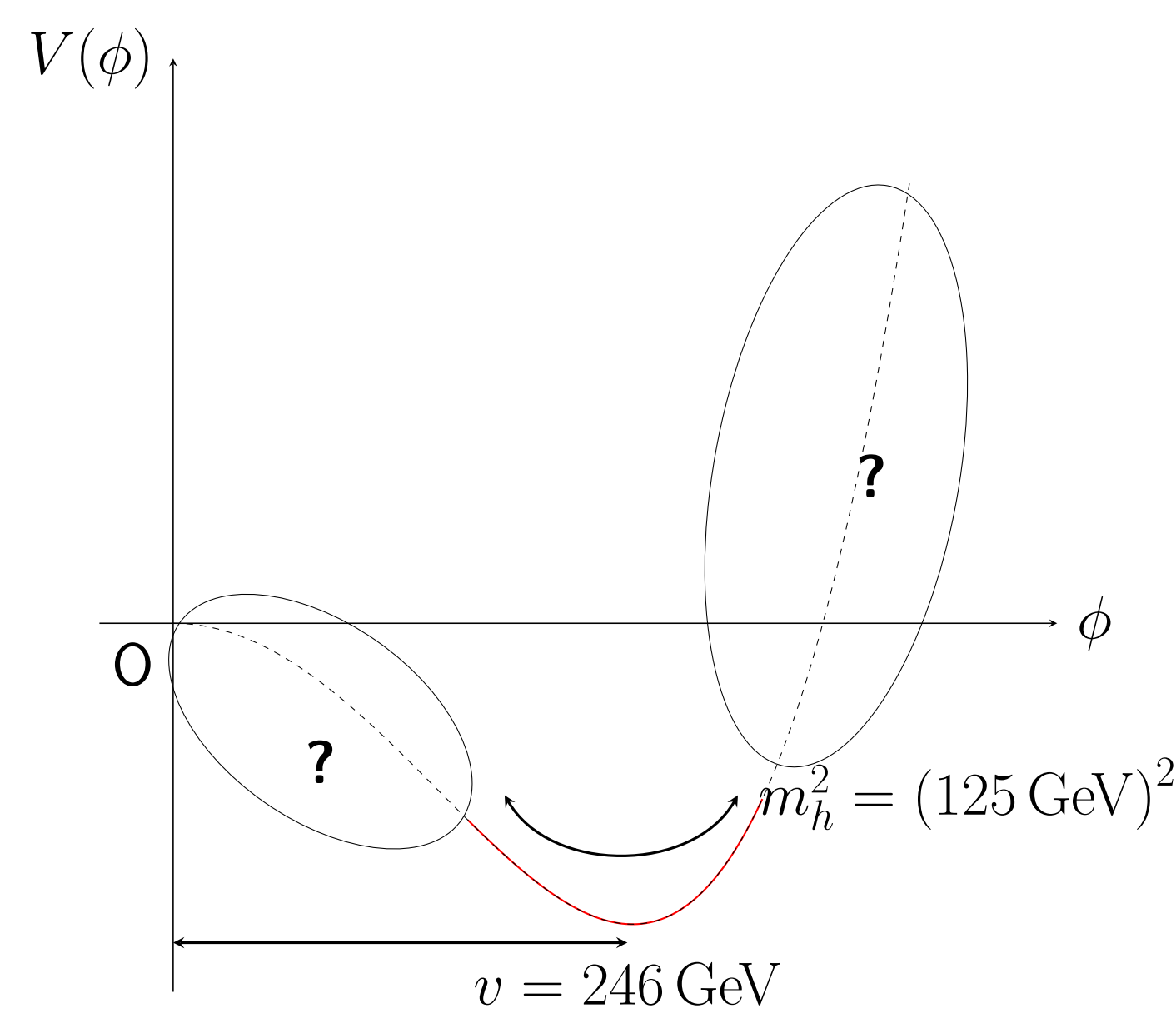


Figure 1. ヒッグスポテンシャル $V(\phi)$ と観測値の関係

ヒッグスポテンシャルの形状

任意の拡張ヒッグス模型のヒッグスポテンシャルは4つのタイプに分類可能[3]

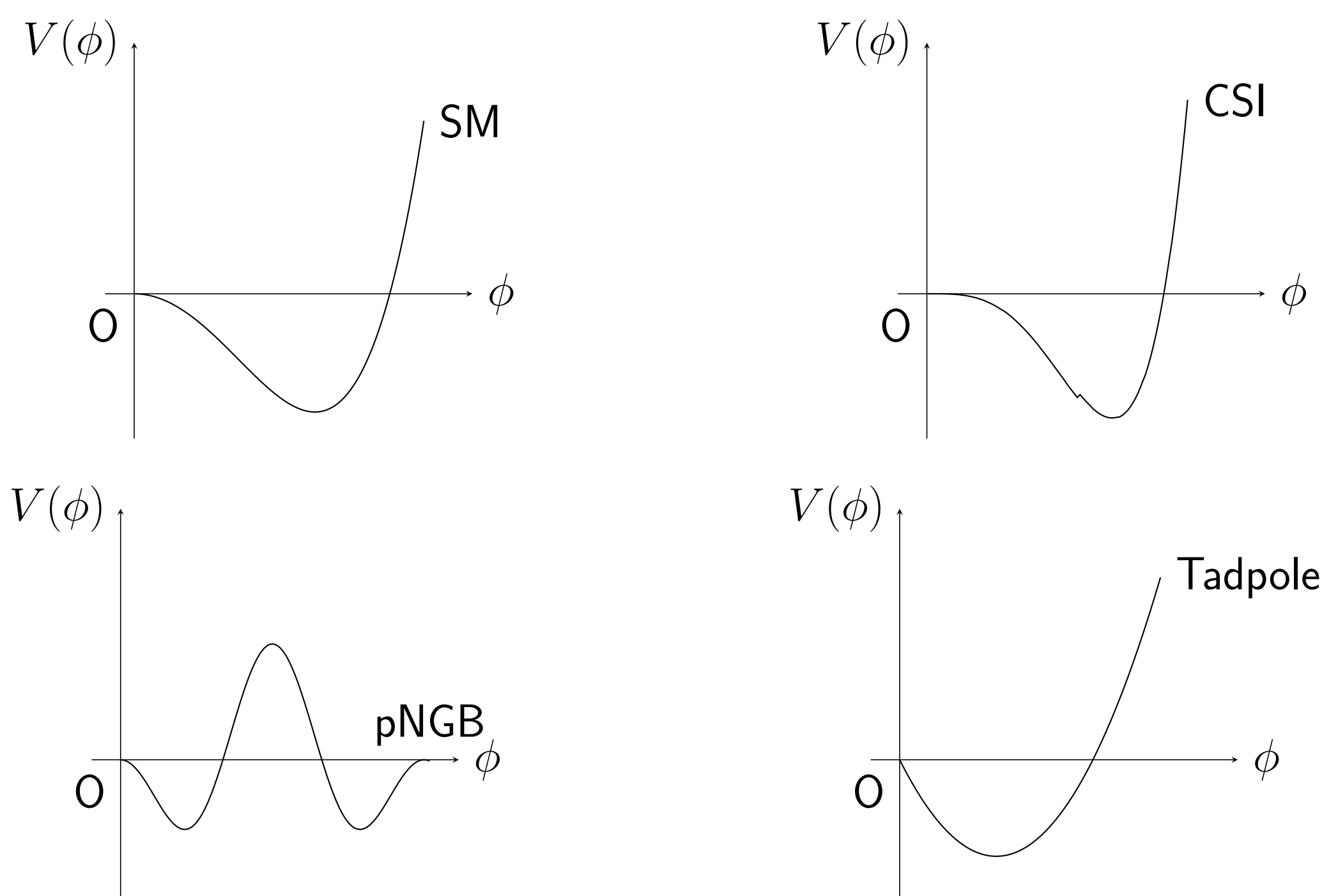


Figure 2. 左上は標準理論タイプ(SM)、右上は古典的スケール不変模型タイプ(CSI)、左下は擬南部ゴールドストーン模型タイプ(pNGB)、右下はタドポール模型タイプ(Tadpole)の概形

高次補正の重要性

標準理論において

$$\lambda_{hhh}^{1\text{-loop}} = \frac{3m_h^2}{v} \left(1 - \frac{1}{\pi^2} \frac{m_t^4}{v^2 m_h^2} \right) = \lambda_{hhh}^{\text{tree}} - \frac{3}{\pi^2} \frac{m_t^4}{v^3}$$

ただし、 $\lambda_{hhh}^{\text{tree}} = 3m_h^2/v$ である。

$\lambda_{hhh}^{\text{tree}}$ に対するトップクォークの寄与は約10% → 将来実験において無視できない補正

拡張ヒッグス模型の分類をヒッグスポテンシャルの形状から行うためには、1-loopレベルまで考慮する必要あり

まとめ

- 高次補正を含めたヒッグスポテンシャルの形状による拡張ヒッグス模型を分類を行った
- どの拡張ヒッグス模型も本研究が扱うポテンシャルの形状のどれかに帰着されるため、効率的なやり方である
- 先行研究[5]では取り扱っていない繰り込み不可能な模型に対しても進行中

古典的スケール不変模型タイプ

動機: 階層性問題の解決[8, 9]
特徴

- 古典レベルにおいてスケール不変性を持つ
- 輻射補正によって自発的対称性の破れを引き起こす

ヒッグスポテンシャル:

$$V(\phi) = A\phi^4 + B\phi^4 \ln \frac{\phi^2}{Q^2}$$

ただし、

$$A = \frac{1}{64\pi^2 v^4} \left[\sum_S M_S^4 \ln \frac{M_S^2}{v^2} - 3 \right] - 4 \left[\sum_F M_F^4 \ln \frac{M_F^2}{v^2} - 3 \right] + 3 \left[\sum_V M_V^4 \ln \frac{M_V^2}{v^2} - 5 \right], \quad B = \frac{1}{64\pi^2 v^4} \left[\sum_S M_S^4 - 4 \sum_F M_F^4 + 3 \sum_V M_V^4 \right]$$

1-loopレベルにおけるヒッグス3点結合:

$$\lambda_{hhh}^{\text{CSI}} = \frac{5}{3} \cdot \frac{3m_h^2}{v}$$

擬南部ゴールドストーン模型タイプ

動機: 階層性問題の解決[6]
特徴

- 大域的対称性 G がその一部の対称性 H に自発的に対称性が破れる
- 対称性の破れ $G \rightarrow H$ で現れる(擬)南部-ゴールドストーン粒子をヒッグス粒子と同一

ヒッグスポテンシャル:

$$V(\phi) = -A f^4 \sin^2 \left(\frac{\phi}{f} \right) + B f^4 \sin^4 \left(\frac{\phi}{f} \right)$$

ただし、 f は $G \rightarrow H$ が起こるスケール。

ヒッグス3点結合:

$$\lambda_{hhh}^{\text{pNGB}} = \frac{3m_h^2}{v} \frac{1-2\xi}{\sqrt{1-\xi}}, \quad \xi := \frac{v^2}{f^2} = \sin^2 \frac{v}{f}$$

タドポール模型タイプ

動機: 階層性問題の解決[7]
特徴

- 標準理論のヒッグス粒子に加えて、追加のスカラー粒子を導入
- ヒッグス粒子と追加したスカラー粒子の線形項により対称性の破れを引き起こす

ヒッグスポテンシャル:

$$V(\phi) = A\phi^2 - B\phi - \frac{3}{16\pi^2} \frac{m_t^4}{v^4} \phi^4 \ln \frac{\phi^2}{v^2}$$

ヒッグス3点結合:

$$\lambda_{hhh}^{\text{Tadpole}} = -\frac{3}{\pi^2} \frac{m_t^4}{v^3}$$

結果

- CSIタイプとタドポールタイプは模型のパラメーターに依らず、一定である。

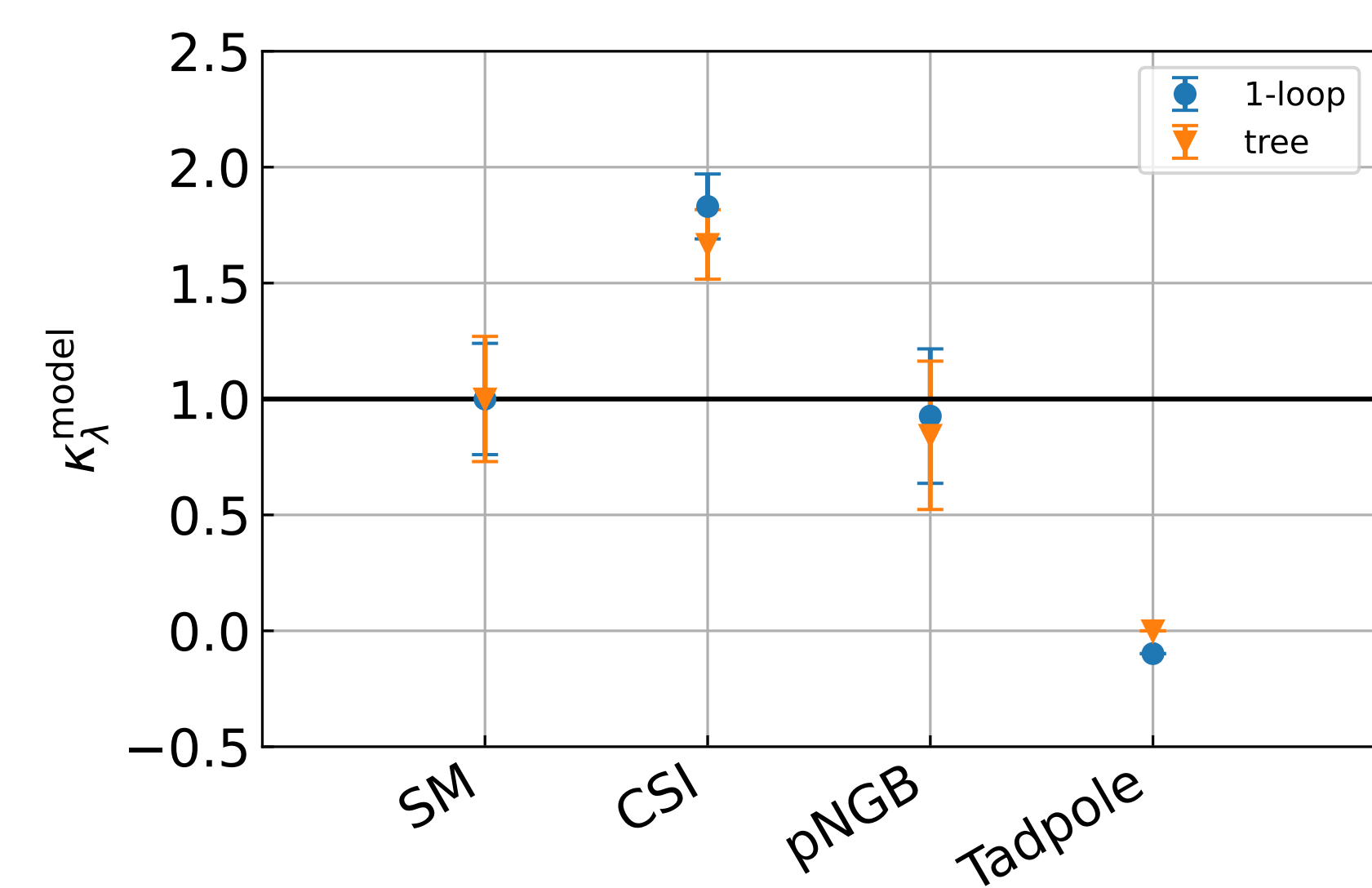


Figure 3. ILC1TeVを想定した1-loopレベルにおけるヒッグス3点結合の値[4]

参考文献

- Projected sensitivity of Higgs boson pair production combining the $b\bar{b}\gamma\gamma$ and $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ final states with the ATLAS detector at the HL-LHC. 2022.
- Georges Aad et al. Constraints on the Higgs boson self-coupling from single- and double-Higgs production with the ATLAS detector using pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *Phys. Lett. B*, 843:137745, 2023.
- Pankaj Agrawal, Debashis Saha, Ling-Xiao Xu, Jiang-Hao Yu, and C. P. Yuan. Determining the shape of the Higgs potential at future colliders. *Phys. Rev. D*, 101(7):075023, 2020.
- Alexander Aryshev et al. The International Linear Collider: Report to Snowmass 2021. 3 2022.
- Henning Bahl, Johannes Braathen, Martin Gabelmann, and Georg Weiglein. anyH3: precise predictions for the trilinear Higgs coupling in the Standard Model and beyond. 5 2023.
- Roberto Contino. The Higgs as a Composite Nambu-Goldstone Boson. In *Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics: Physics of the Large and the Small*, pages 235–306, 2011.
- Jamison Galloway, Markus A. Luty, Yuhsin Tsai, and Yue Zhao. Induced Electroweak Symmetry Breaking and Supersymmetric Naturalness. *Phys. Rev. D*, 89(7):075003, 2014.
- Eldad Gildener and Steven Weinberg. Symmetry Breaking and Scalar Bosons. *Phys. Rev. D*, 13:3333, 1976.
- Katsuya Hashino, Shinya Kanemura, and Yuta Orikasa. Discriminative phenomenological features of scale invariant models for electroweak symmetry breaking. *Phys. Lett. B*, 752:217–220, 2016.