

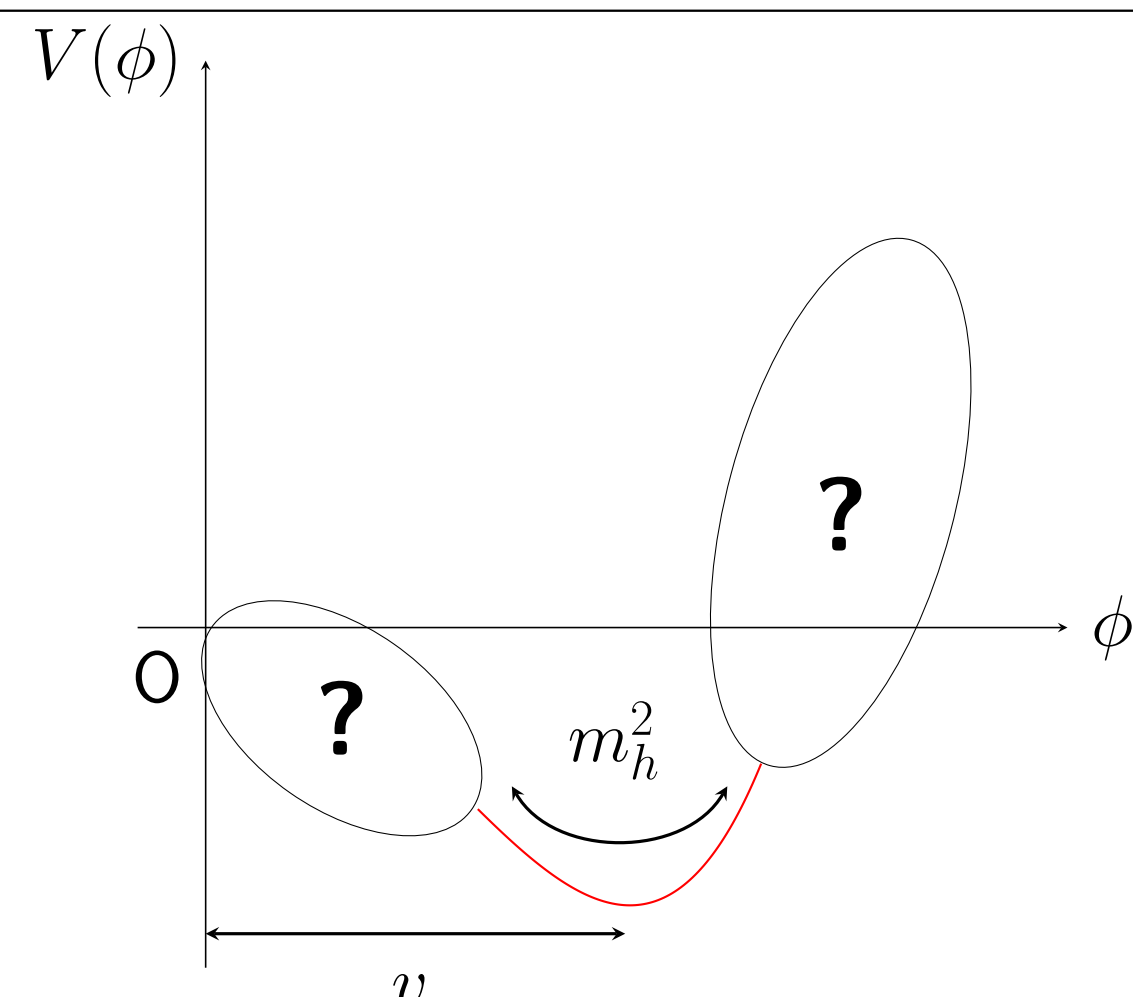
## イントロダクション

- 素粒子標準理論 (SM):  $\Lambda < \mathcal{O}(1)$  TeV のエネルギー領域をうまく記述可能
- 現象論的な問題: 標準理論を超えた現象が存在  
例: 宇宙のバリオン数非対称性、暗黒物質の存在等
- 理論的な問題: ヒッグスセクターの構造は未解明  
例: 指導原理が存在しない... 素粒子であるか? 複合粒子であるか? 複数存在するのか?

拡張ヒッグス模型: 標準理論を超えた現象を説明する候補の一つ

ヒッグスポテンシャルの詳細な形状を用いた拡張ヒッグス模型の特徴に注目

## ヒッグスポテンシャル



$V(\phi)$ : ヒッグスポテンシャル  
 $\phi$ : 古典場

- 真空期待値 (VEV):  $0 = \frac{\partial V}{\partial \phi}|_{\phi=v}$   
測定値:  $v = 246$  GeV  
[S. Navas et al. (Particle Data Group), 2024]
- ヒッグス粒子の質量:  $m_h^2 = \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2}|_{\phi=v}$   
測定値:  $m_h = 125.11 \pm 0.11$  GeV  
[ATLAS Collaboration, 2023]
- 3点ヒッグス結合:  $\lambda_{hhh} = \frac{\partial^3 V}{\partial \phi^3}|_{\phi=v}$
- 3点ヒッグス結合の比:  $\kappa_\lambda := \frac{\lambda_{hhh}}{\lambda_{hhh}^{SM}}$

## 3点ヒッグス結合の制限

現在の制限: [ATLAS Collaboration, 2023; CMS Collaboration, 2022]

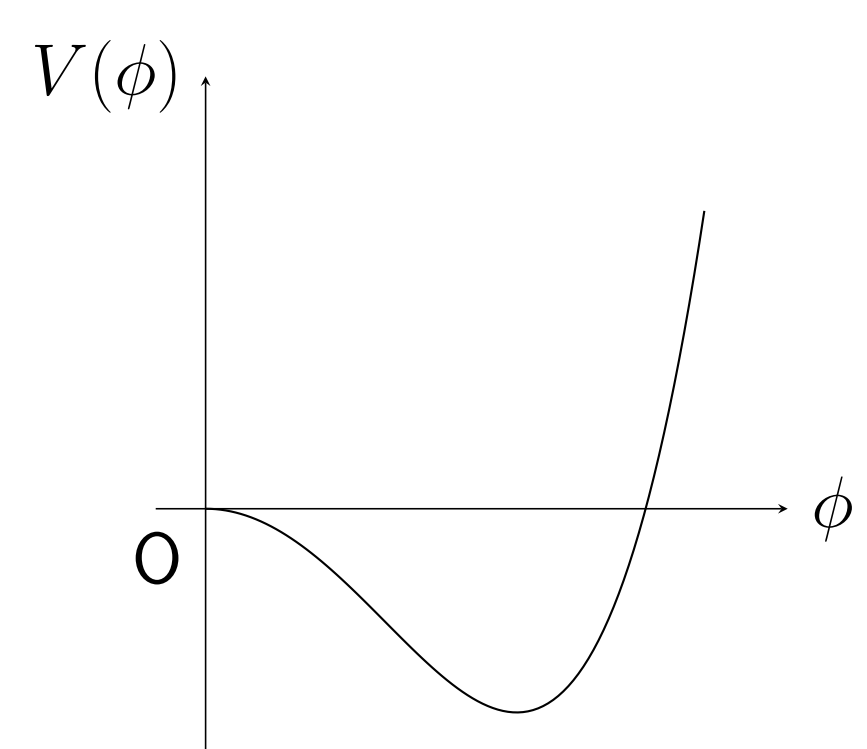
- ATLAS ( $\sqrt{s} = 13$  TeV,  $\mathcal{L} = 126 - 139$  fb<sup>-1</sup>):  $-0.4 < \kappa_\lambda < 6.3$  at 95% C.L.
- CMS ( $\sqrt{s} = 13$  TeV,  $\mathcal{L} = 138$  fb<sup>-1</sup>):  $-1.24 < \kappa_\lambda < 6.49$  at 95% C.L.

将来加速器実験で期待される制限:

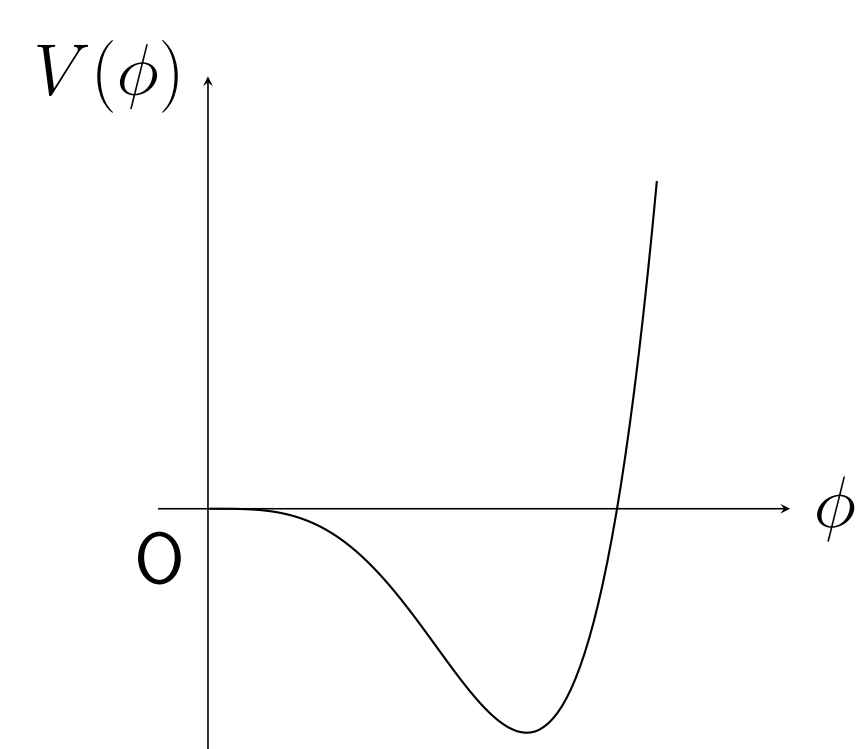
- 高輝度 LHC (HL-LHC) [ATLAS Collaboration, 2022; CMS Collaboration, 2021]
  - ATLAS ( $\sqrt{s} = 14$  TeV,  $\mathcal{L} = 3000$  fb<sup>-1</sup>):  $0.5 < \kappa_\lambda < 1.6$  at 68% C.L.
  - CMS ( $\sqrt{s} = 14$  TeV,  $\mathcal{L} = 3000$  fb<sup>-1</sup>):  $0.35 < \kappa_\lambda < 1.9$  at 68% C.L.
- 国際リニアコライダー (ILC) [ILC International Development Team, 2022]  
 $\sqrt{s} = 1$  TeV,  $\mathcal{L} = 5$  ab<sup>-1</sup>:  $\kappa_\lambda = 1$  の測定精度は 68% C.L. で約 10%
- 100 TeV 陽子衝突型加速器 (FCC-hh and SppC) [B. Di Micco, M. Gouzevitch, J. Mazzitelli, C. Vernieri, J. Alison, K. Androsov, J. Baglio, E. Bagnaschi, S. Banerjee and P. Basler, et al., 2020]  
 $\mathcal{L} = 30$  ab<sup>-1</sup>:  $\kappa_\lambda = 1 \pm 5\%$  at 68% C.L.
- ミューオン加速器 [C. Accettura, D. Adams, R. Agarwal, C. Ahdida, C. Aimè, N. Amapane, D. Amorim, P. Andreotto, F. Anulli and R. Appleby, et al., 2023]  
 $\sqrt{s} = 3$  TeV,  $\mathcal{L} = 2$  ab<sup>-1</sup>:  $0.85 < \kappa_\lambda < 1.16$  at 68% C.L.

## ヒッグスポテンシャルの形状

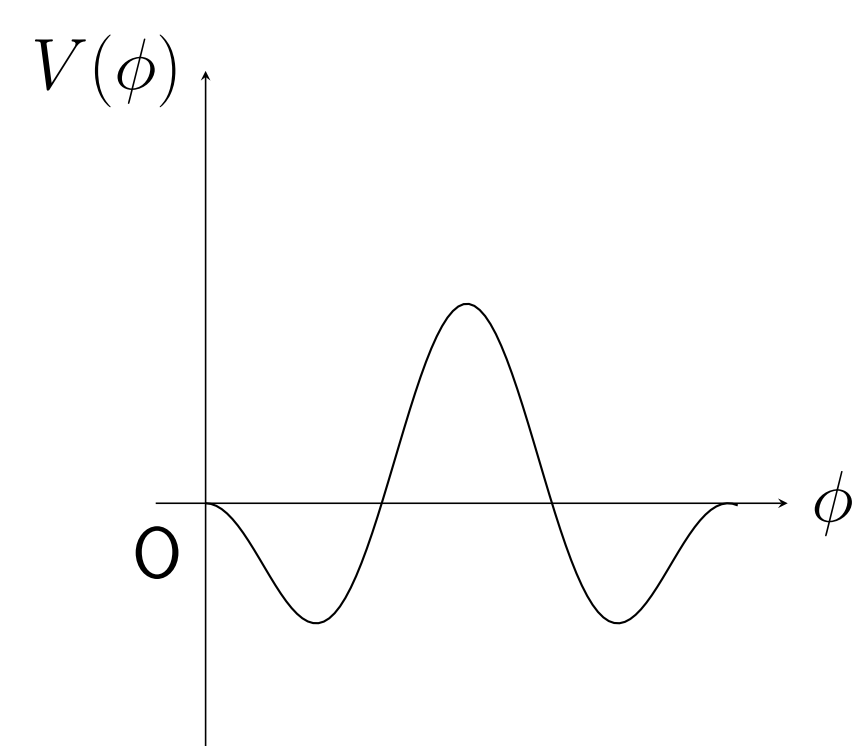
代表的な拡張ヒッグス模型のヒッグスポテンシャル  
(詳細: P. Agrawal, D. Saha, L. X. Xu, J. H. Yu and C. P. Yuan, 2020)



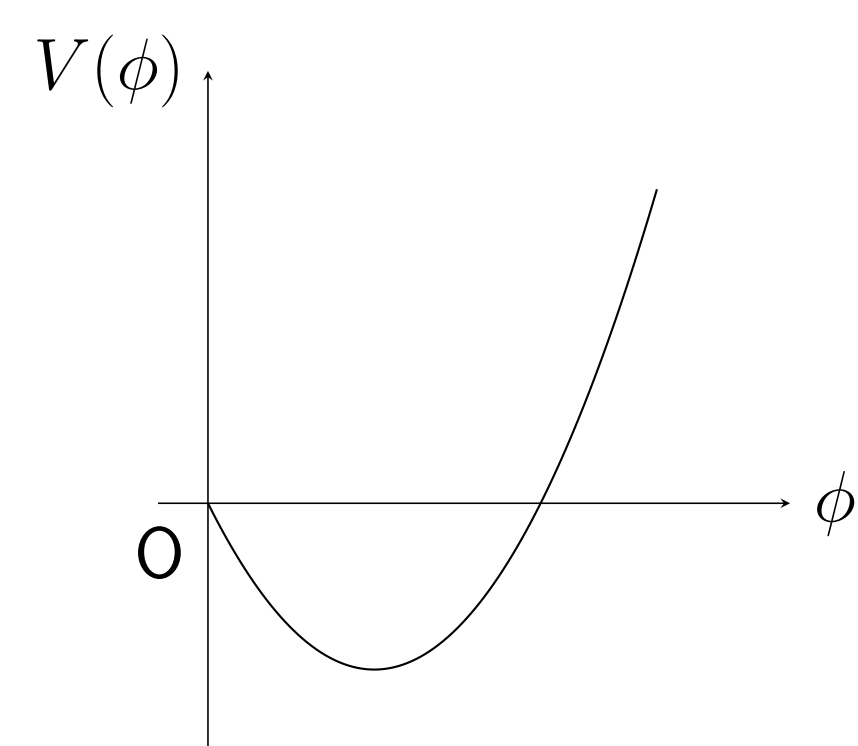
Type 1. 標準理論 (SM)



Type 2. 古典的スケール不変模型 (CSI)



Type 3. 擬南部ゴールドストーンボソン模型 (pNGB)



Type 4. タドポール誘起模型 (Tadpole)

## 3点ヒッグス結合のワンループ補正

ワンループレベルでのSMの3点ヒッグス結合:

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

トップクォークのワンループ補正はSMの3点ヒッグス結合  $\lambda_{hhh}^{SM}$  を 10% 程度減少  
→ 将来加速器実験において無視できない大きさ

ヒッグスポテンシャルの形状から拡張ヒッグス模型を精査するには、ワンループ補正を考慮する必要あり

## 擬南部ゴールドストーンボソン模型

特徴 [D. B. Kaplan and H. Georgi, 1984; R. Contino, 2010]

- 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定
- ヒッグスポテンシャルはコールマン-ワインバーグ機構によって生成

ワンループレベルのヒッグスポテンシャル:

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

ただし、 $f$  は  $G \rightarrow H$  が起こるスケール。

ワンループレベルの3点ヒッグス結合:

$$\lambda_{hhh}^{\text{pNGB}} = \frac{3m_h^2}{v} \sqrt{1-\xi} \quad \left( \xi := \frac{v^2}{f^2} = \sin^2 \frac{v}{f} = 1 - \left(\frac{A}{2B}\right)^2 \right)$$

## タドポール誘起模型

特徴 [J. Galloway, M. A. Luty, Y. Tsai and Y. Zhao, 2014; S. Chang, J. Galloway, M. Luty, E. Salvioni and Y. Tsai, 2015]

- 標準理論に重い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
- SMのヒッグス粒子の4点結合  $\lambda$  は十分小さいと仮定

ワンループレベルのヒッグスポテンシャル:

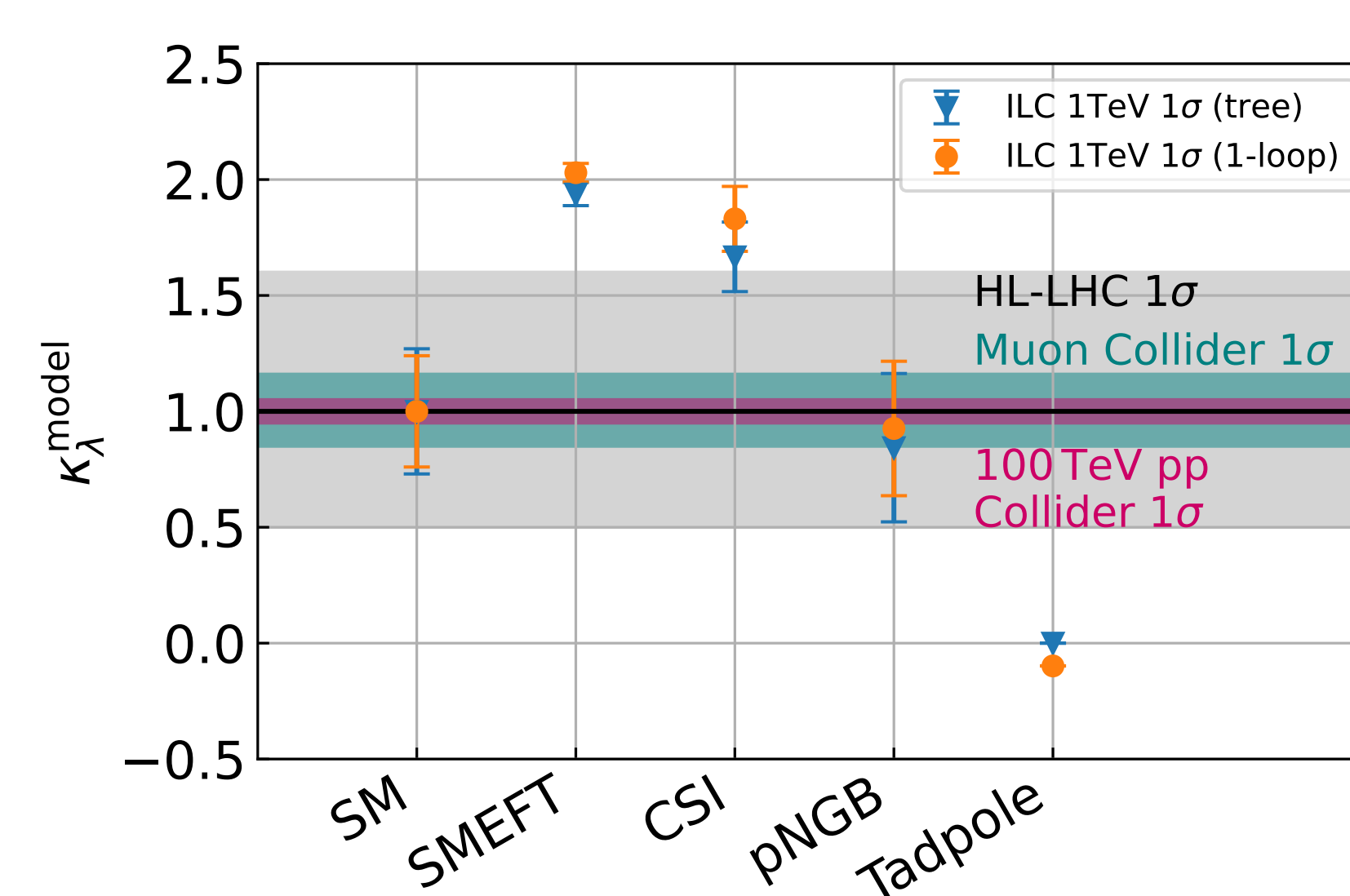
$$V(\phi) \simeq A\phi^2 - B\phi - \frac{3}{16\pi^2} \frac{m_t^4}{v^4} \phi^4 \ln \frac{\phi^2}{v^2}$$

ワンループレベルの3点ヒッグス結合:

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

## 結果

将来加速器実験で期待される代表的な拡張ヒッグス模型のワンループレベルの3点ヒッグス結合



- HL-LHCにおいて、タドポール誘起模型は確認することが可能
- ILC 1 TeV で  $\kappa_\lambda = 1$  を測定した場合、古典的スケール不変模型を区別することが可能

## まとめ

- ヒッグスセクターの拡張は標準理論を超えた現象を説明する方法として提案されている
- 拡張ヒッグス模型の拡張可能性に対して、制限を設ける必要がある
- 代表的な拡張ヒッグス模型のワンループレベルの3点ヒッグス結合を計算した
- 標準理論のワンループレベルの3点ヒッグス結合はツリーレベルの値に比べて 10% 減少する
- タドポール誘起模型は稼働が決定しているHL-LHCにおいて 68% C.L. で識別することが可能である
- 先行研究 [H. Bahl, J. Braathen, M. Gabelmann and G. Weiglein, 2023] で扱われていない繰り込み不可能な模型も含めて計算を行った