

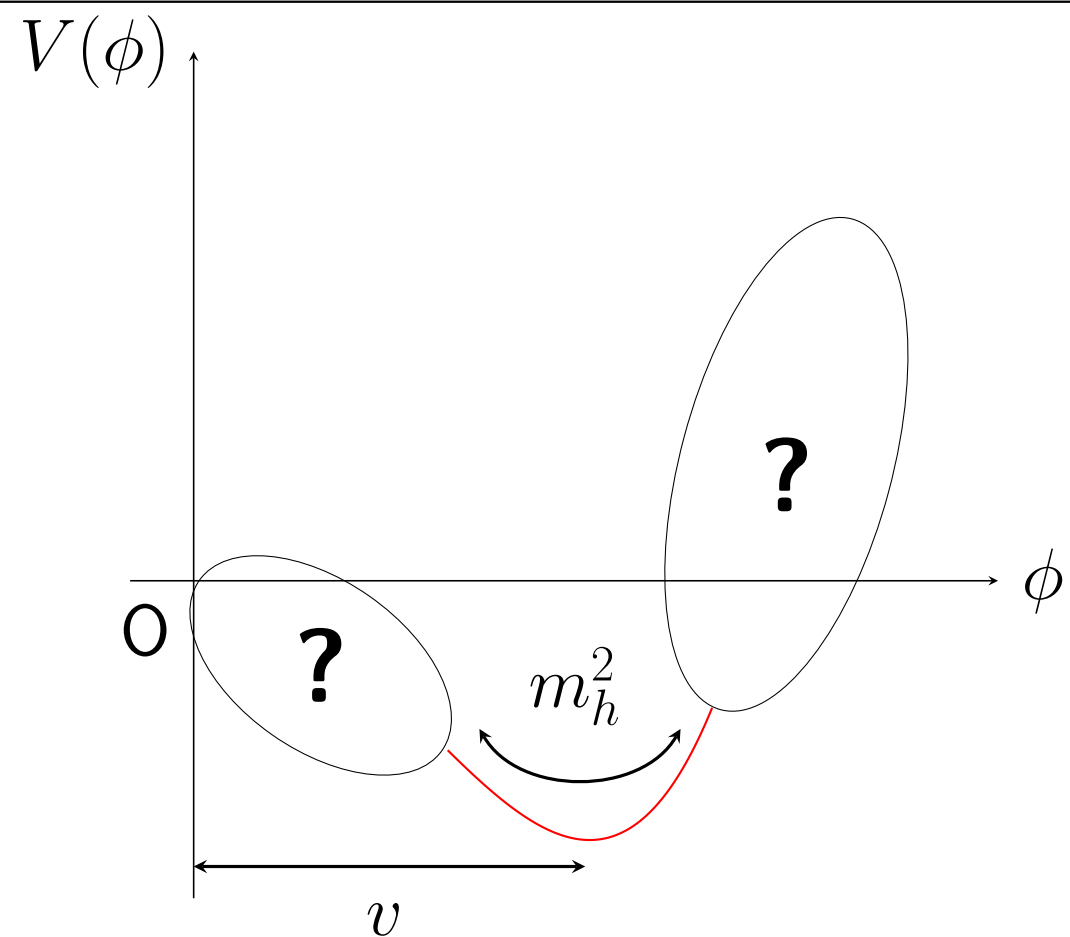
イントロダクション

- 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、暗黒物質の存在など
- 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

拡張ヒッグス模型を3点ヒッグス結合によって、どの程度正確に区別できるか?

ヒッグスポテンシャル



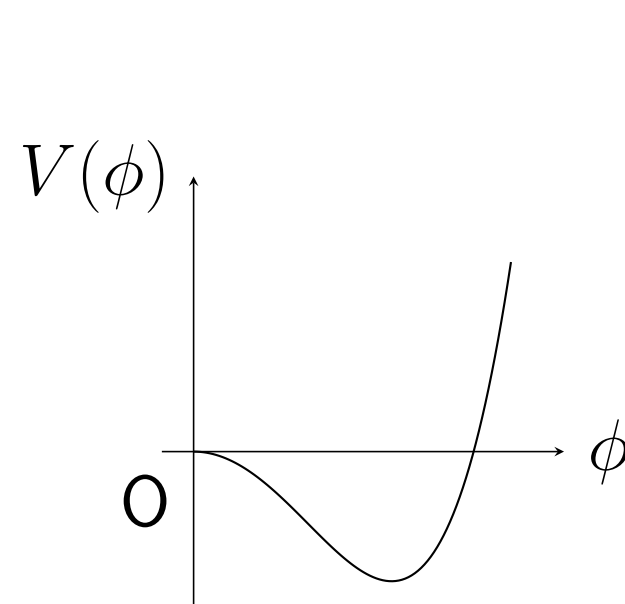
$V(\phi)$: ヒッグスポテンシャル
 ϕ : 古典場

- 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: $\kappa_\lambda := \frac{\lambda_{hhh}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}}$

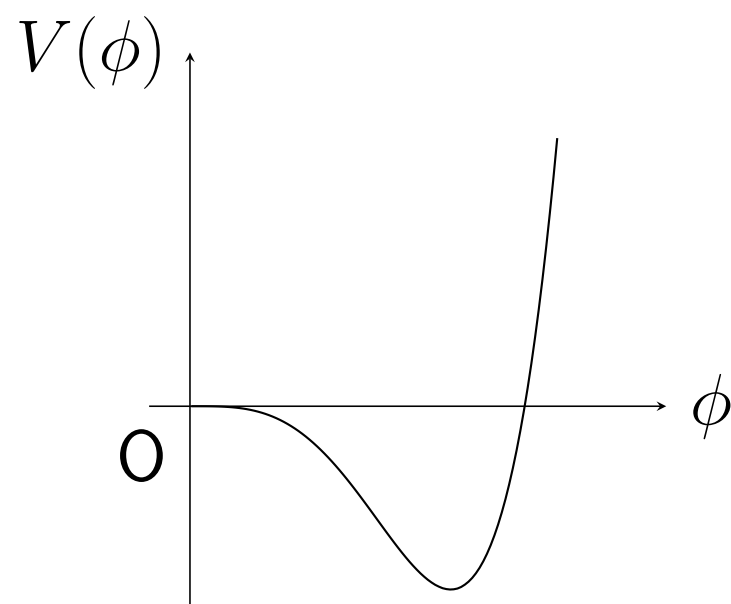
ヒッグスポテンシャルの形状

代表的な拡張ヒッグス模型のヒッグスポテンシャル [P. Agrawal, et al., 2020]

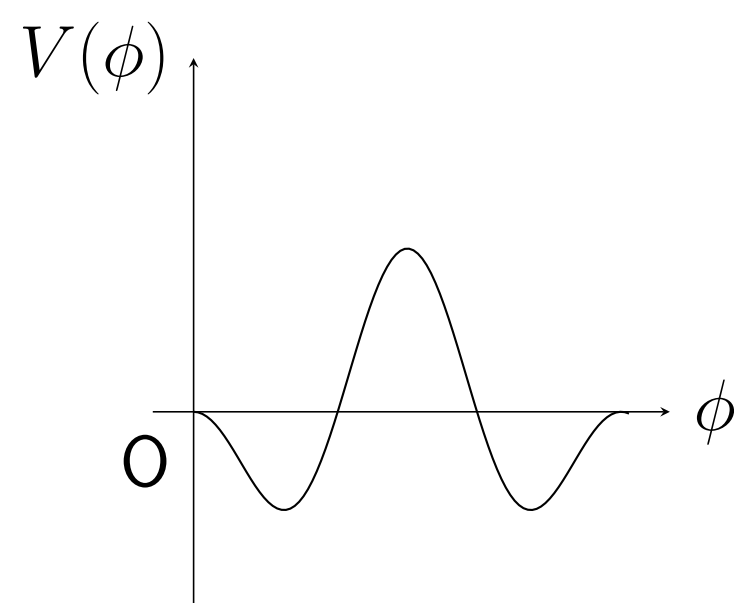
扱う拡張ヒッグス模型: 一つの古典場 ϕ でヒッグスポテンシャルをよく近似できる模型



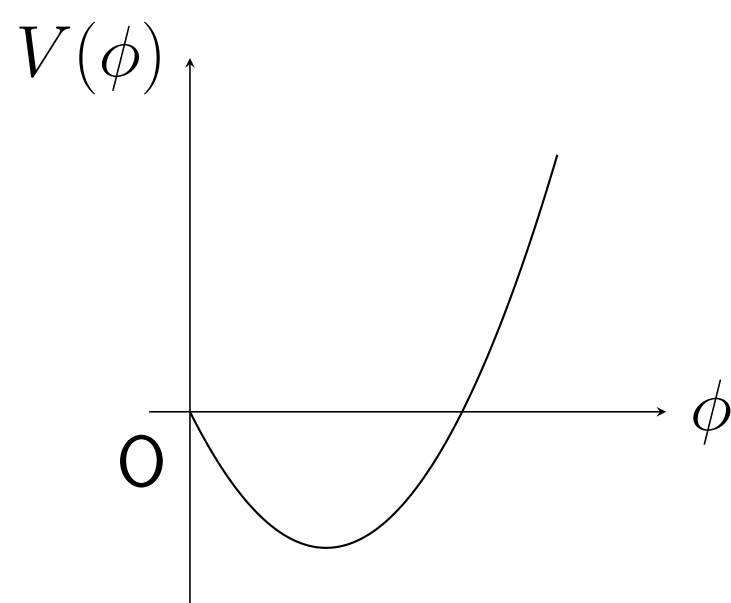
Type 1. 標準理論 (SM)



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点ヒッグス結合の制限

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

- ATLAS ($\sqrt{s} = 13$ TeV, $\mathcal{L} = 126 - 139$ fb⁻¹): $-0.4 < \kappa_\lambda < 6.3$ at 95% C.L.
- CMS ($\sqrt{s} = 13$ TeV, $\mathcal{L} = 138$ fb⁻¹): $-1.24 < \kappa_\lambda < 6.49$ 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⁻¹): $0.5 < \kappa_\lambda < 1.6$ at 68% C.L.
 - CMS ($\sqrt{s} = 14$ TeV, $\mathcal{L} = 3000$ fb⁻¹): $0.35 < \kappa_\lambda < 1.9$ 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⁻¹: $\kappa_\lambda = 1$ 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, et al., 2020]
 $\kappa_\lambda = 1$ の測定精度は 68% C.L. で約 5%
- ミューオン加速器 [C. Accettura, et al., 2023]
 $\sqrt{s} = 3$ TeV, $\mathcal{L} = 2$ ab⁻¹: $0.85 < \kappa_\lambda < 1.16$ at 68% C.L.

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:

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

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 $\lambda_{hhh}^{\text{SM}}$ 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

ウィークボソンの寄与が支配的な場合におけるワンループレベルのヒッグスポテンシャル:

$$V_{\text{type1}}(\phi) = -A f^4 \sin^2\left(\frac{\phi}{f}\right) + B f^4 \sin^4\left(\frac{\phi}{f}\right)$$

トップクォークとウィークボソンの寄与が支配的な場合におけるワンループレベルのヒッグスポテンシャル:

$$V_{\text{type2}}(\phi) = A f^4 \cos\left(\frac{\phi}{f}\right) - B \sin^2\left(\frac{\phi}{f}\right) + C f^4 \sin^4\left(\frac{\phi}{f}\right)$$

ただし、 A, B, C は模型に依存するパラメータ、 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:

$$\lambda_{hhh}^{\text{pNGB1}} = \frac{3m_h^2}{v} \sqrt{1-\xi} \quad \left(\xi := \frac{v^2}{f^2} = \sin^2\left(\frac{v}{f}\right) \right)$$
$$\lambda_{hhh}^{\text{pNGB2}} = \lambda_{hhh}^{\text{tree}} \sqrt{1-\xi} \left(1 - \frac{8v^2}{m_h^2} C \xi \right)$$

タドポール誘起模型

特徴 [J. Galloway, et al., 2014; S. Chang, et al., 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 λ 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:

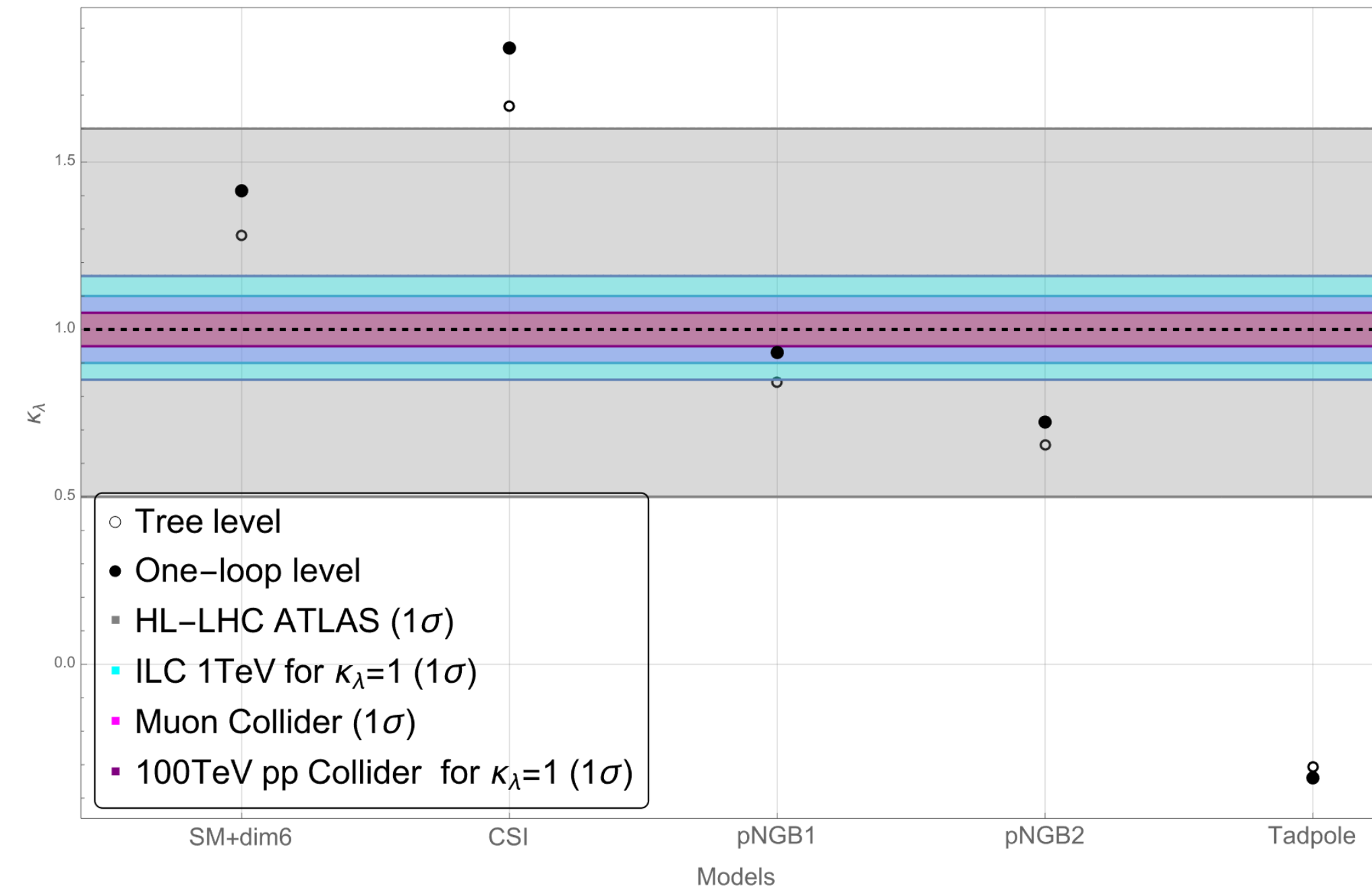
$$V(\phi) \simeq A\phi^2 - B\phi - \frac{3}{16\pi^2} \frac{m_t^4}{v^4} \phi^4 \ln \frac{\phi^2}{v^2}$$

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

・将来加速器実験におけ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

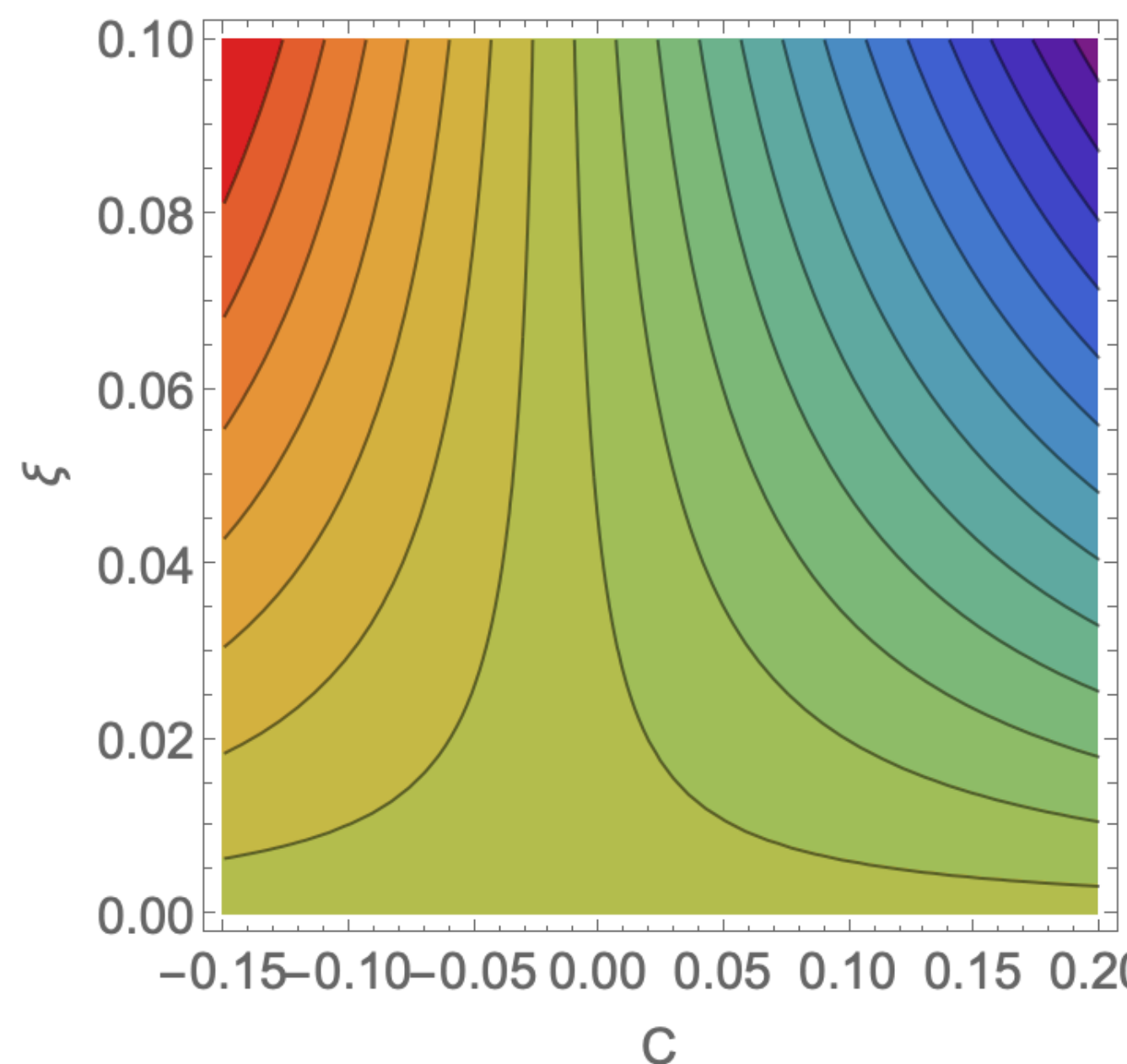


ツリーレベル:
 $\lambda_{hhh}/\lambda_{hhh}^{\text{SM, tree}}$

ワンループレベル:
 $\lambda_{hhh}/\lambda_{hhh}^{\text{SM, one-loop}}$

- HL-LHC(灰色)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(シアン)において、古典的スケール不変模型を区別することが可能

・真空のずれ ξ と係数 C に対する $\kappa_\lambda^{\text{pNGB2}}$ の等高線図



κ_λ constraint
at HL-LHC

- $\sin^4(\phi/f)$ の係数 C は $\kappa_\lambda^{\text{pNGB2}}$ と ξ で制限
- 有効ポテンシャルの計算が摂動論的であるという仮定のために、係数 C は $\mathcal{O}(1)$ のパラメータ
- HL-LHCで期待される C の制限:
 $-0.15 < C < 0.2$.

まとめ

- 一つの古典場で近似可能な拡張ヒッグス模型の3点ヒッグス結合をワンループレベルで計算
- 拡張ヒッグス模型を3点ヒッグス結合によって分類し、将来加速器実験による実現可能性を探索
- 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