

# ヒッグス自己結合とスファレロン

田中正法 (大阪大学D1)

共同研究者: 兼村晋哉 (大阪大学)

S. Kanemura, M Tanaka: PLB 809 135711 (2020)

基研研究会 素粒子物理学の進展2020 (オンライン)

2020/9/2

# イントロダクション

標準模型(SM)の予言は加速器実験の結果と無矛盾

## ヒッグスセクターの問題

- 基本粒子？複合粒子？
- ヒッグスポテンシャルの全貌
- 電弱対称性の破れのダイナミクス

## SMが説明できない物理現象(BSM)

- 宇宙のバリオン数非対称性(BAU)
- 暗黒物質
- ニュートリノ微小質量

我々の期待:

ヒッグスセクターの拡張 ↔ BSMの解決

# バリオン数非対称性問題

- 宇宙のバリオン数非対称性(BAU):

[PDG 2019]

$$\frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} = (5.8 - 6.6) \times 10^{-10}$$

BAUを説明する機構 → バリオジェネシス

サハロフの条件: [Sakharov 1967]

- ① バリオン数の破れ
- ② C, CPの破れ
- ③ 非熱平衡の実現

電弱バリオン数生成

レプトジェネシス

GUTバリオジェネシス

Affleck・Dineバリオジェネシス

etc...

ヒッグスセクターの拡張と深く関係する電弱バリオン数生成に注目

電弱バリオン数生成: [Kuzmin, et al. : PLB155 (1985)]

- ① スファレロン過程
- ② 新物理の効果 ← EDM
- ③ 一次的な電弱相転移 ← hhh結合の測定

スファレロンを実験で検証することはできないか？

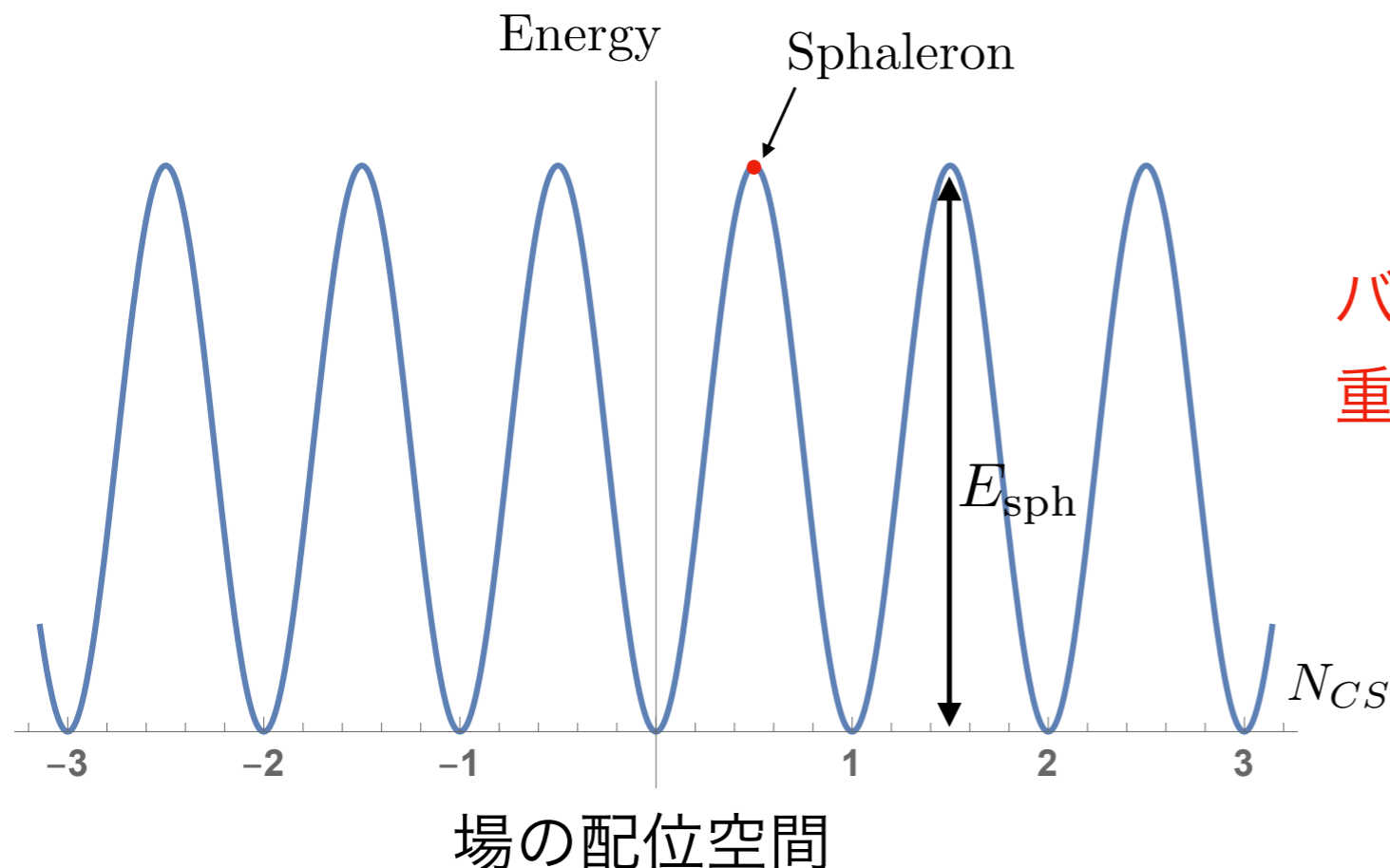
# スファレロン

Sphaleron

語源: a.sphalt の対義語

[Klinkhamer, Manton: PRD.30 (1984)]

- 場の方程式の非摂動解(静的で不安定)
- 無数に縮退した真空の間での場の配位
- 粒子的な場の配位 ( $r_{\text{sph}} \sim 1/m_W$ ,  $E_{\text{sph}} \sim 9 \text{ TeV}$ )
- B+Lを破る真空の遷移過程: スファレロン過程



$$\Delta(B + L) = 6\Delta N_{CS}$$

バリオン数非対称性を説明する際に  
重要な役割を担う

# 標準模型のスファレロン

[Manton: PRD28 (1983)]

- エネルギー汎関数 ( $g' = 0$ )

$$E[W_i^a, \Phi] = \int d^3x \left[ \frac{1}{4g^2} W_{ij}^a W_{ij}^a + (D_i \Phi)^\dagger D_i \Phi + V(\Phi) \right] \quad V^{\text{SM}}(\Phi) = \frac{m_h^2}{2v^2} \left( \Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2} \right)^2$$

[Akiba et al. : PRD38 (1988)]

- スファレロンの性質を捉えた一般解

[Spanowsky, Tamarit : PRD95 (2017)]

$$W_i^a(\vec{r}) = m_W \left[ \epsilon_{aij} n_j \frac{1 - R(r) \cos \theta(r)}{r} + (\delta_{ai} - n_a n_i) \frac{R(r) \sin \theta(r)}{r} \right], \quad n_a = x^a / r$$

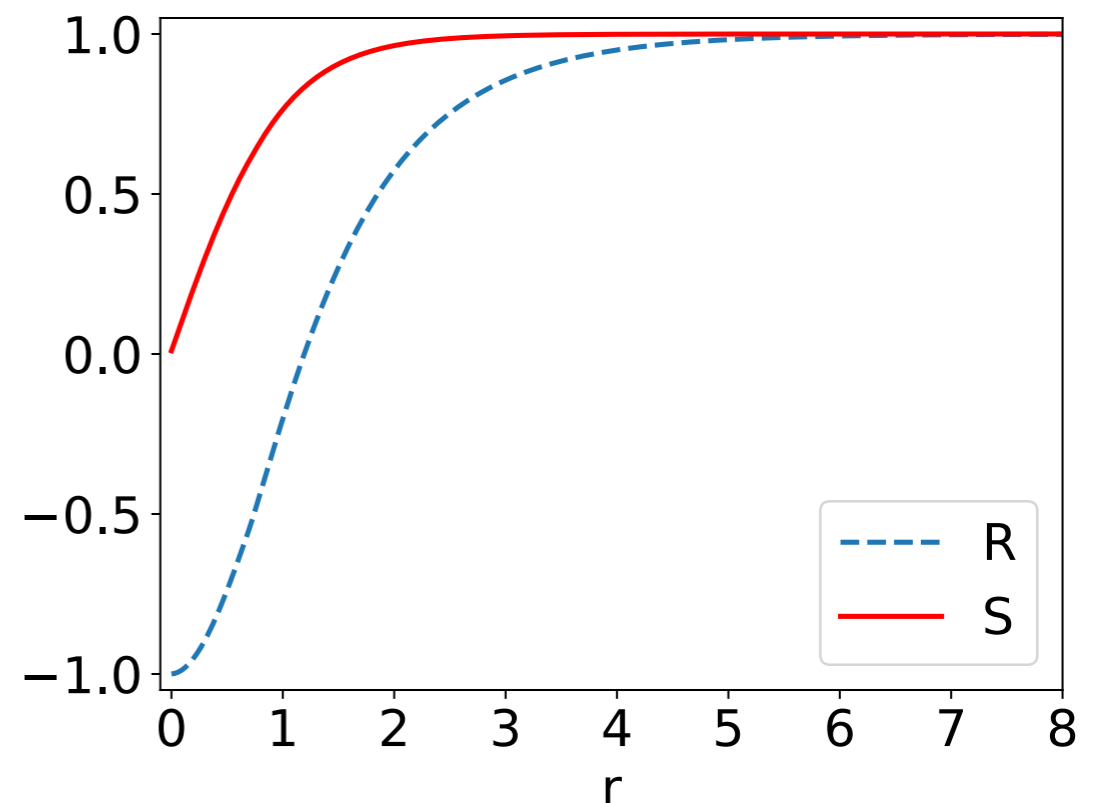
$$\Phi(\vec{r}) = \frac{v}{\sqrt{2}} S(r) e^{i n_a \sigma^a \phi(r)} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

- 場の方程式  $\theta = \pi, \phi = \frac{\pi}{2}$  とおく

$$r^2 R'' - R^3 + R(1 - r^2 S^2) + r^2 S^2 = 0$$

$$S'' + \frac{2}{r} S' - \frac{1}{2r^2} S(1 - R)^2 - \frac{4}{g^2 v^4} \frac{\partial V(S)}{\partial S} = 0$$

SMでは  $E_{\text{sph}}^{\text{SM}} = 9.08 \text{ TeV}$



# ヒッグス3点結合

- ヒッグス自己結合: ヒッグスポテンシャルの形を特徴付ける

$$\left. \frac{\partial^3 V(h)}{\partial h^3} \right|_{h=0} = \lambda_{hhh}^{\text{SM}} \left( 1 + \frac{\Delta\lambda_{hhh}^{\text{new}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}} \right) \quad \lambda_{hhh}^{\text{SM}} = \frac{3m_h^2}{v} \quad \Delta\lambda_{hhh}^{\text{new}} = \lambda_{hhh}^{\text{new}} - \lambda_{hhh}^{\text{SM}}$$

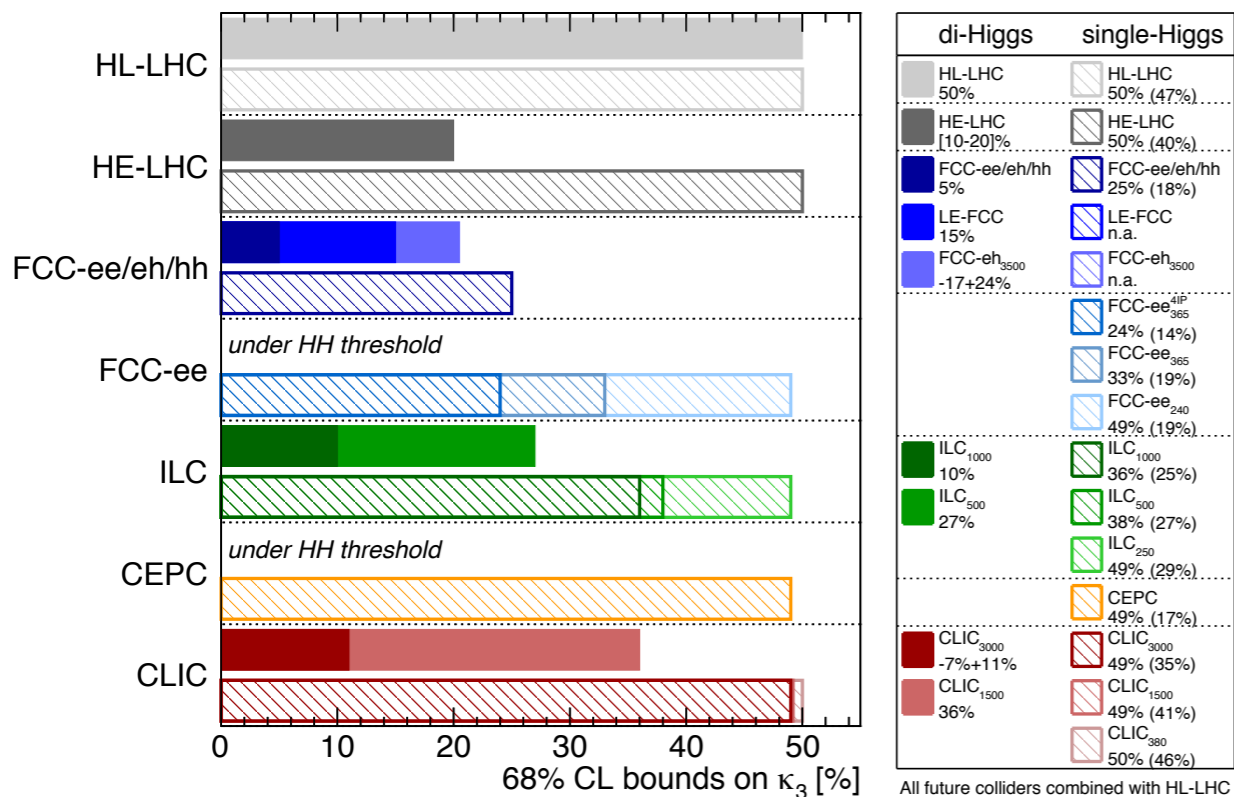
Eg) 2HDM: non-decoupling効果で $O(100)\%$ ずれる [\[Kanemura et al.: PLB606 \(2005\)\]](#)

$$\frac{\Delta\lambda_{hhh}^{2\text{HDM}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}} \ni \frac{m_\Phi^4}{12\pi^2 m_h^2 v^2} \left( 1 - \frac{M^2}{m_\Phi^2} \right)^3 \xrightarrow{M \rightarrow 0} \frac{m_\Phi^4}{12\pi^2 m_h^2 v^2} \quad m_\Phi^2 \simeq M^2 + \lambda_\Phi v^2$$

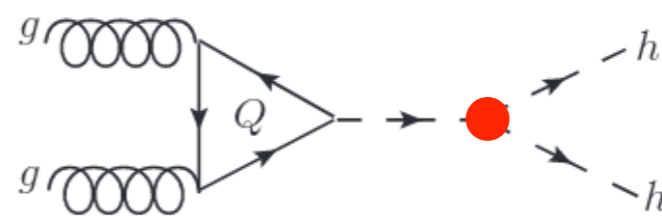
2HDMでは強い一次的な電弱相転移は $\Delta\lambda_{hhh}/\lambda_{hhh} > \text{数}10\%$ で起きる

[\[arXiv: 1905.03764\]](#)

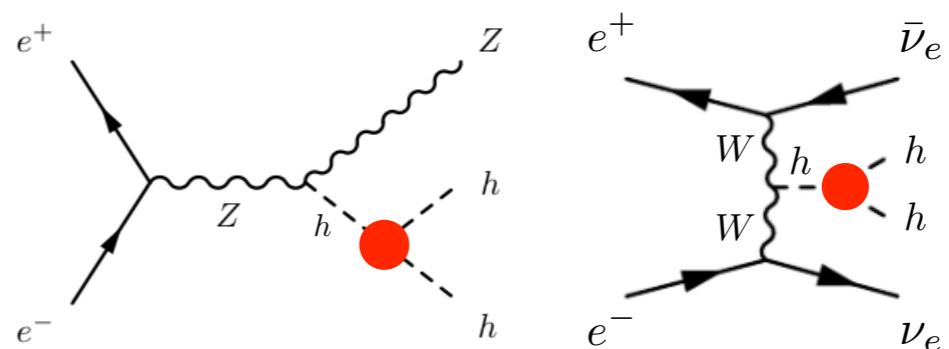
[\[arXiv: 1905.03764\]](#)



- HL-LHCでは50%の精度で測定可能



- ILC(1TeV)では10%の精度で測定可能



# スファレロンの探索

- 加速器でB+Lの破れを引き起こす直接探索の方法 [Aoyama, Goldberg, PLB 188 (1987)]

$$\Delta(B + L) = +6 \quad qq \rightarrow lllqqqqqqqqqqqq$$

$\sqrt{s} > E_{\text{sph}} \simeq 9 \text{ TeV}$ の高エネルギー散乱実験でB+Lの破れが起きるのか？

[Tye, Wong, PRD 92 (2015)] [Funakubo, Fuyuto, Senaha, arXiv: 1612.05431]

B+Lを破る過程の散乱断面積の計算で現れる主要な問題点

- ① トンネリング因子は効くのか？
- ②  $N_{\text{cs}}$ を変化させるには、大量のWボソンとヒッグス粒子の生成が必要であるが、その過程は指数関数的に抑制される。この抑制を相殺するような機構は存在するのか？

[Tye, Wong, PRD 96 (2017)]

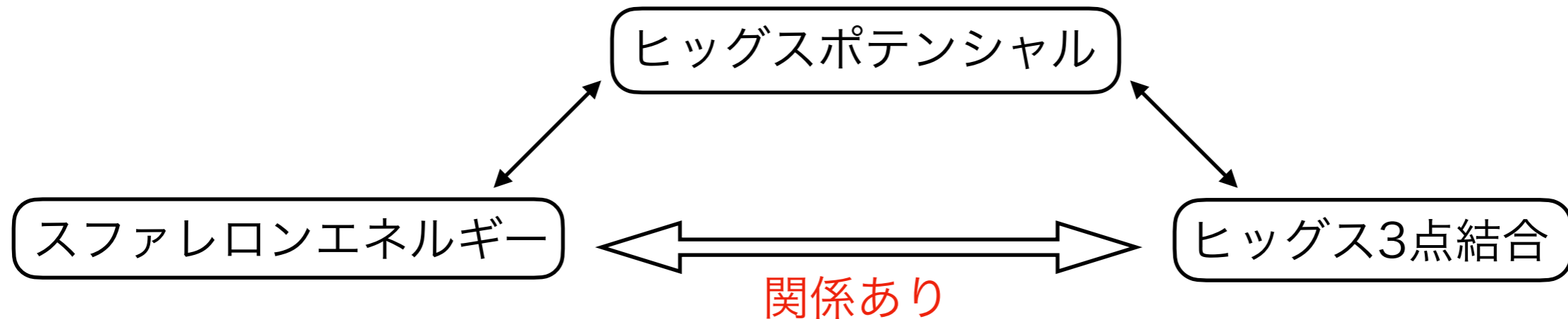
肯定的な推定では $\sqrt{s} > 25 \text{ TeV}$ ならば見える可能性が指摘されている

← QMを用いた推定で、QFTによる基礎づけは行われていない

議論は収束していないため、加速器実験でのB+Lの破れの観測可能性は未知

# スファレロンと新物理模型

- 間接探索の方法(我々の提案)



- ヒッグスセクターの拡張  $\rightarrow E_{\text{sph}}$  が変化

$$E_{\text{sph}}^{\text{new}} = E_{\text{sph}}^{\text{SM}} + \Delta E_{\text{sph}}^{\text{new}}$$

- 我々が明らかにした関係

$$\Delta E_{\text{sph}}^{\text{new}} \simeq -A^{\text{new}} \frac{\Delta \lambda_{hhh}^{\text{new}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}}$$

スファレロンの性質  $\leftrightarrow$  ヒッグス結合の測定



# 次元6演算子を加えた有効場の理論

[Grojean et al.: PRD71 (2005)] [Gan et al.: PRD96 (2017)]

- ヒッグスポテンシャル:  $V(\Phi) = \frac{m_h^2}{2v^2} \left( \Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2} \right)^2 + \frac{1}{\Lambda^2} \left( \Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2} \right)^3$

スファレロンは計算されたが、将来の加速器実験での測定可能量との関係を明確にした研究はこれまでにない

- スファレロンエネルギー:  $\Delta E_{\text{sph}}^{\text{dim6}} \simeq -\frac{\pi v^2 m_h^2}{4m_W^3} \frac{2v^4}{m_h^2 \Lambda^2} \int_0^\infty dr [1 - S(r)]^3$

- ヒッグス3点結合:  $\frac{\Delta \lambda_{hhh}^{\text{dim6}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}} = \frac{2v^4}{m_h^2 \Lambda^2}$

$\Lambda$ に依存しない

$\Rightarrow \Delta E_{\text{sph}}^{\text{dim6}} \simeq -A^{\text{dim6}} \frac{\Delta \lambda_{hhh}^{\text{dim6}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}}$   $A^{\text{dim6}} = \frac{\pi v^2 m_h^2}{4m_W^3} \int_0^\infty dr [1 - S(r)]^3 = 0.149 \text{ TeV}$

Eg)  $\Delta \lambda_{hhh}^{\text{dim6}} / \lambda_{hhh}^{\text{SM}} = 96\%$  ( $\Lambda = 700 \text{ GeV}$ )では  $\Delta E_{\text{sph}}^{\text{dim6}} / E_{\text{sph}}^{\text{SM}} = -1.54\%$

零温度での数%のずれは有限温度の効果を含めると重要となる

スファレロンのエネルギー  $\leftrightarrow$  ヒッグス3点結合

# 有限温度での有効場の理論

・有限温度の有効ポテンシャル

[Grojean et al.: PRD71 (2005)]

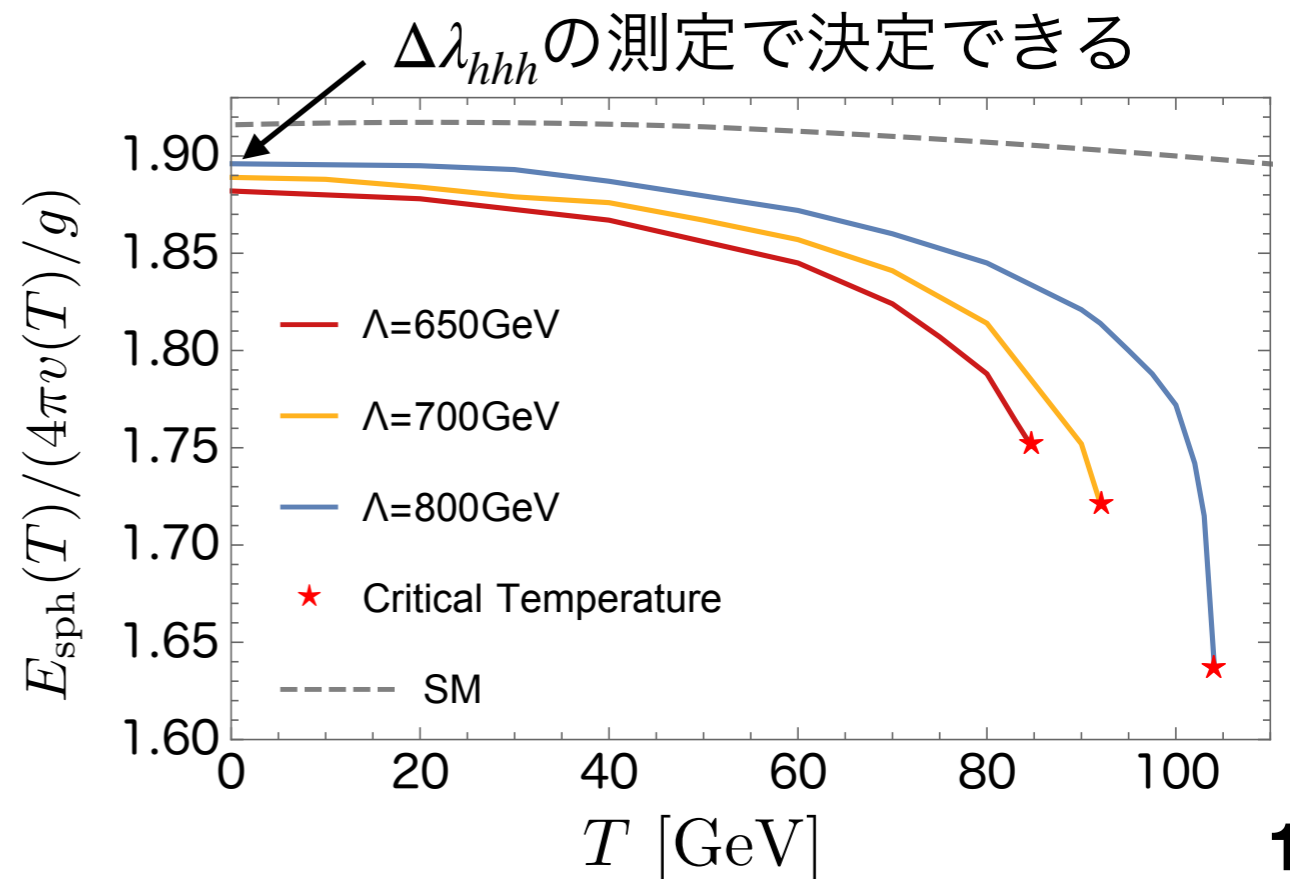
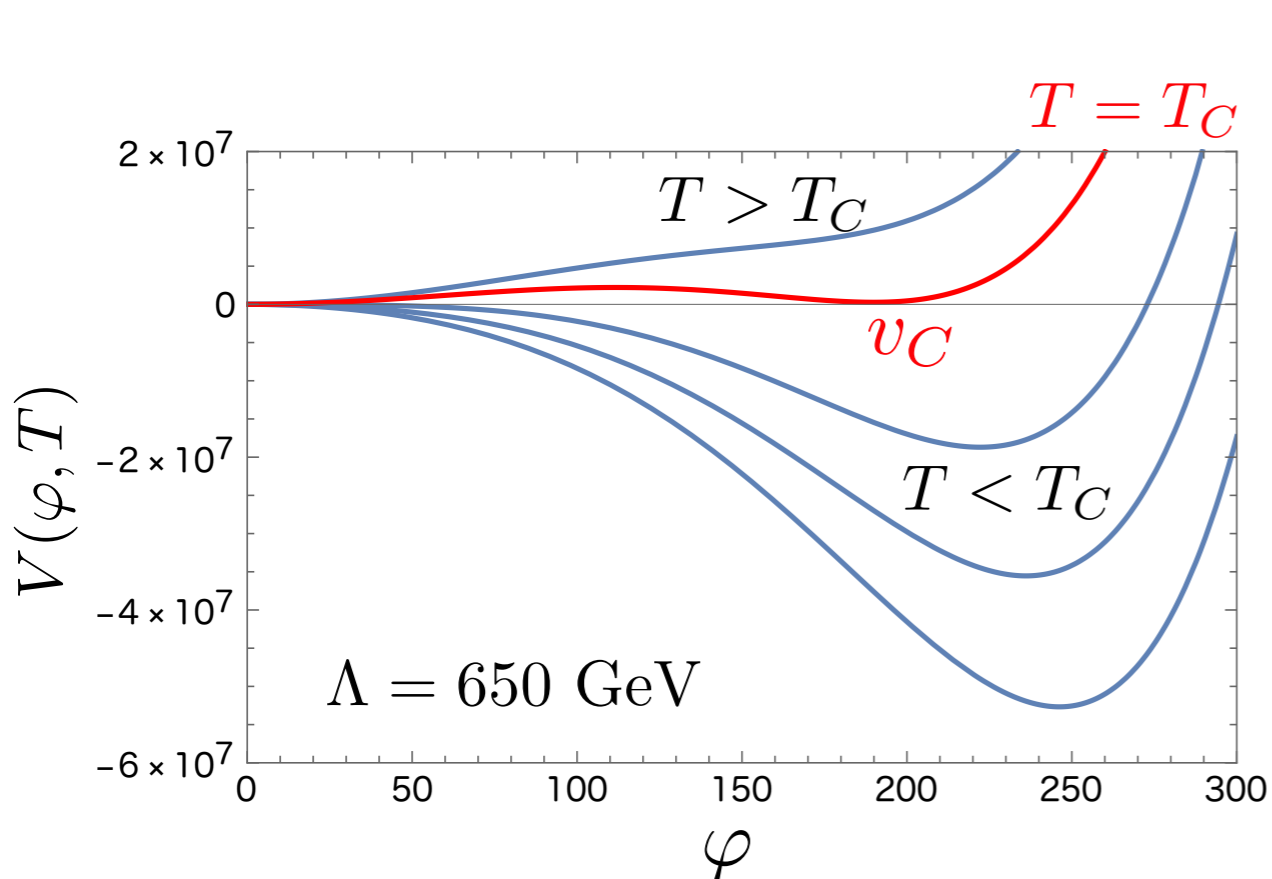
$$V(\Phi, T) = \frac{m_h^2}{2v^2} \left( \Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2} \right)^2 + \frac{1}{\Lambda^2} \left( \Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2} \right)^3 + \underline{c_T T^2 \Phi^\dagger \Phi}$$

・ $\Delta E_{\text{sph}}(T)$ は $T = 0$ で数%でも臨界温度 $T_C$ では数10%に増幅

← スファレロン脱結合条件に影響

・ $\Delta E_{\text{sph}}(T = T_C)$ は $\Delta\lambda_{hhh}$ と $\Delta E_{\text{sph}}(T = 0)$ の対応関係を通じて決まる

$$\Delta\lambda_{hhh}^{\text{dim6}} \leftrightarrow \Delta E_{\text{sph}}^{\text{dim6}}(T = 0) \leftrightarrow \Delta E_{\text{sph}}^{\text{dim6}}(T = T_C)$$



# スファレロン脱結合条件

電弱相転移後にスファレロン過程が脱結合する

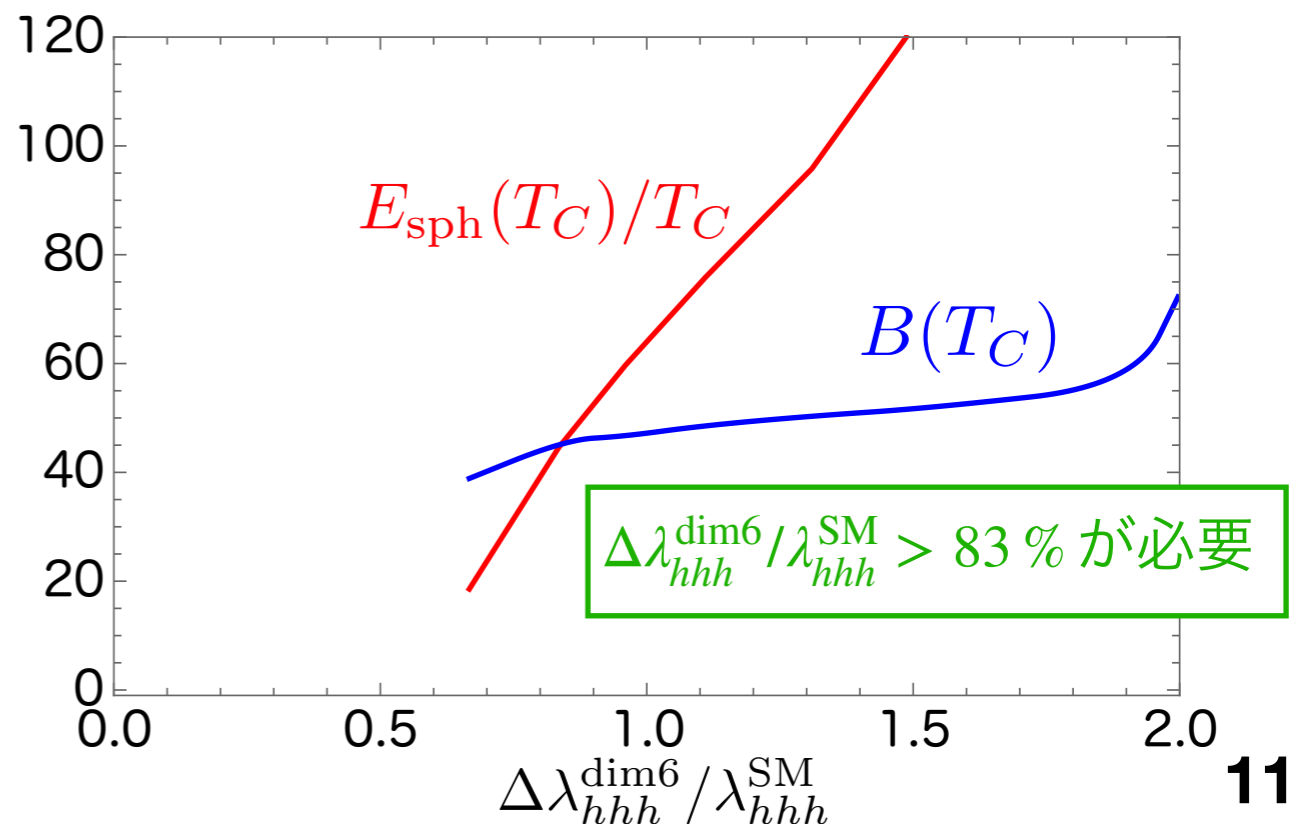
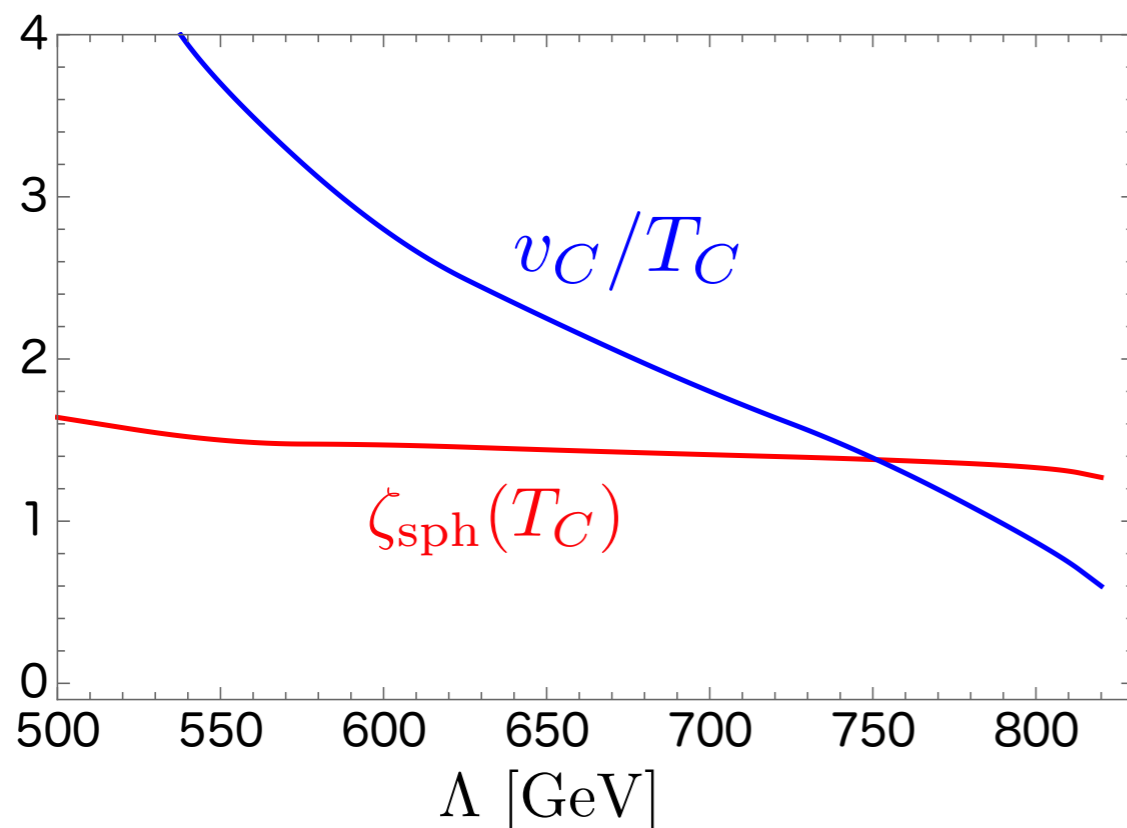
[Arnold, McLerran: PRD36 (1987)]

$$\Gamma_{\text{sph}}(T_C) < H(T_C) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{v_C}{T_C} > \zeta_{\text{sph}}(T_C) \quad \text{or} \quad \frac{E_{\text{sph}}(T_C)}{T_C} > B(T_C)}$$

$$\Gamma_{\text{sph}}(T) = A(T)e^{-E_{\text{sph}}(T)/T} \quad B(T) \simeq 42.8 + 7 \ln \frac{v(T)}{T} - \ln \left( \frac{T}{100\text{GeV}} \right) = \frac{4\pi\mathcal{E}(T)}{g} \zeta_{\text{sph}}(T)$$

- 有効場の理論では  $\Delta\lambda_{hhh}^{\text{dim6}}/\lambda_{hhh}^{\text{SM}} > 83\%$  ( $\Lambda < 750$  GeV)が要求
- $\zeta_{\text{sph}}(T_C)$ と  $E_{\text{sph}}(T_C)/T_C$ は  $\lambda_{hhh}$ の測定を通じて決定可能

$$\Delta\lambda_{hhh}^{\text{new}} \leftrightarrow \Delta E_{\text{sph}}^{\text{new}}(T=0) \leftrightarrow \Delta E_{\text{sph}}^{\text{new}}(T=T_C)$$



# スカラー一重項をN個追加したモデル

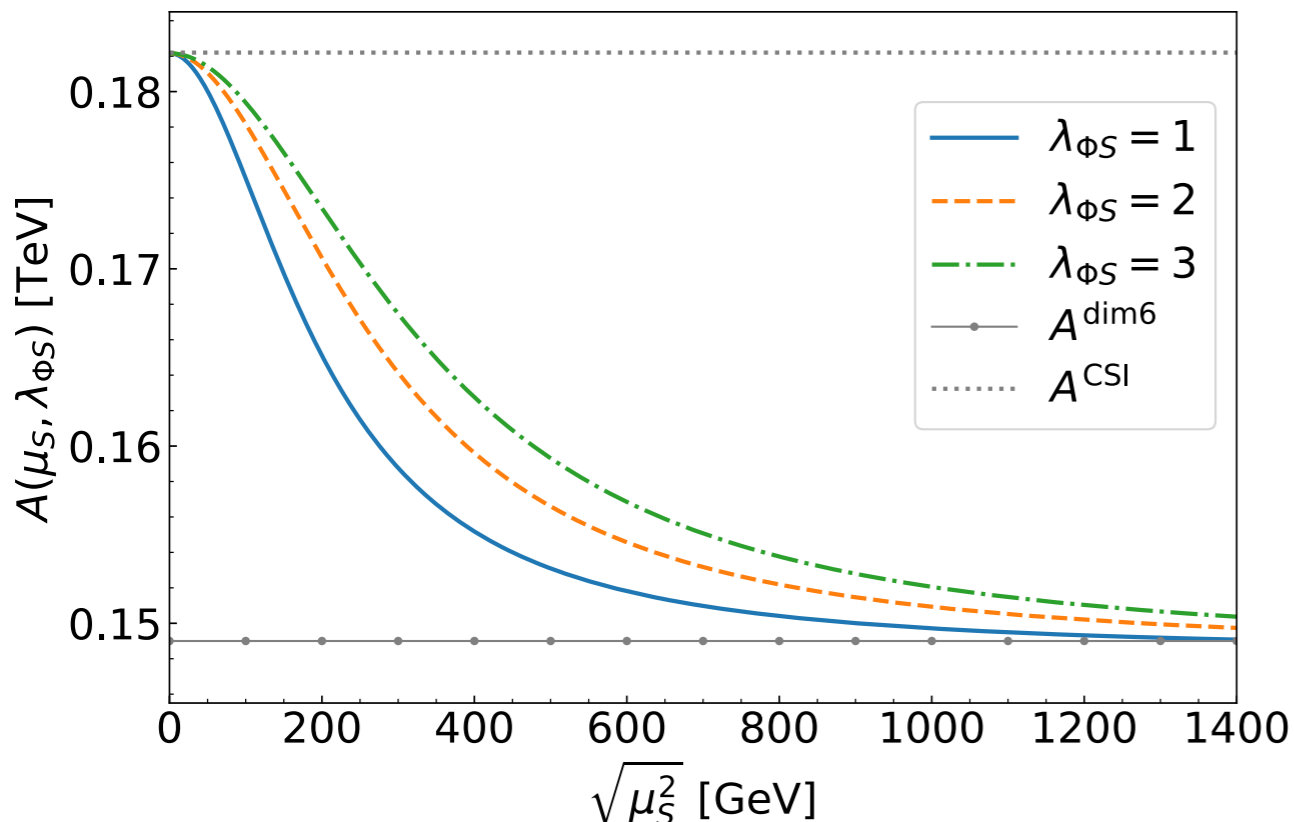
- ヒッグスポテンシャル(tree)  $\vec{S} = (S_1, S_2, \dots, S_N)$   $\mu_S^2 > 0$

$$V_0(\Phi, \vec{S}) = -\mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda(\Phi^\dagger \Phi)^2 + \frac{\mu_S^2}{2} |\vec{S}|^2 + \frac{\lambda_S}{4} |\vec{S}|^4 + \lambda_{\Phi S} \Phi^\dagger \Phi |\vec{S}|^2 \quad M_S(v)^2 = \mu_S^2 + \lambda_{\Phi S} v^2$$

- 1ループ効果を含む有効ポテンシャルで  $E_{\text{sph}}$  を評価 [Coleman, Weinberg.: PRD7 (1973)]

$$\Delta E_{\text{sph}}^{N \text{ scalar}} = -A(\mu_S^2, \lambda_{\Phi S}) \frac{\Delta \lambda_{hhh}^{N \text{ scalar}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}}$$

$$\frac{\Delta \lambda_{hhh}^{N \text{ scalar}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}} = \frac{N M_S^4}{12\pi^2 m_h^2 v^2} \left(1 - \frac{\mu_S^2}{M_S^2}\right)^3$$



係数Aはモデルの間で対応関係がある

$$A(\mu_S^2, \lambda_{\Phi S}) \rightarrow \begin{cases} A^{\text{dim6}} & (\mu_S^2 \gg v^2), \\ A^{\text{ND}} & (\mu_S^2 \rightarrow 0) \end{cases}$$

Eg) Non-decouplingの場合 ( $\mu_S^2 = 0$ )

$$\frac{\Delta \lambda_{hhh}^{N \text{ scalar}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}} = \frac{3}{2} \Rightarrow \frac{\Delta E_{\text{sph}}^{N \text{ scalar}}}{E_{\text{sph}}^{\text{SM}}} = -1.2\%$$

# 電弱バリオン数生成のシナリオの検証

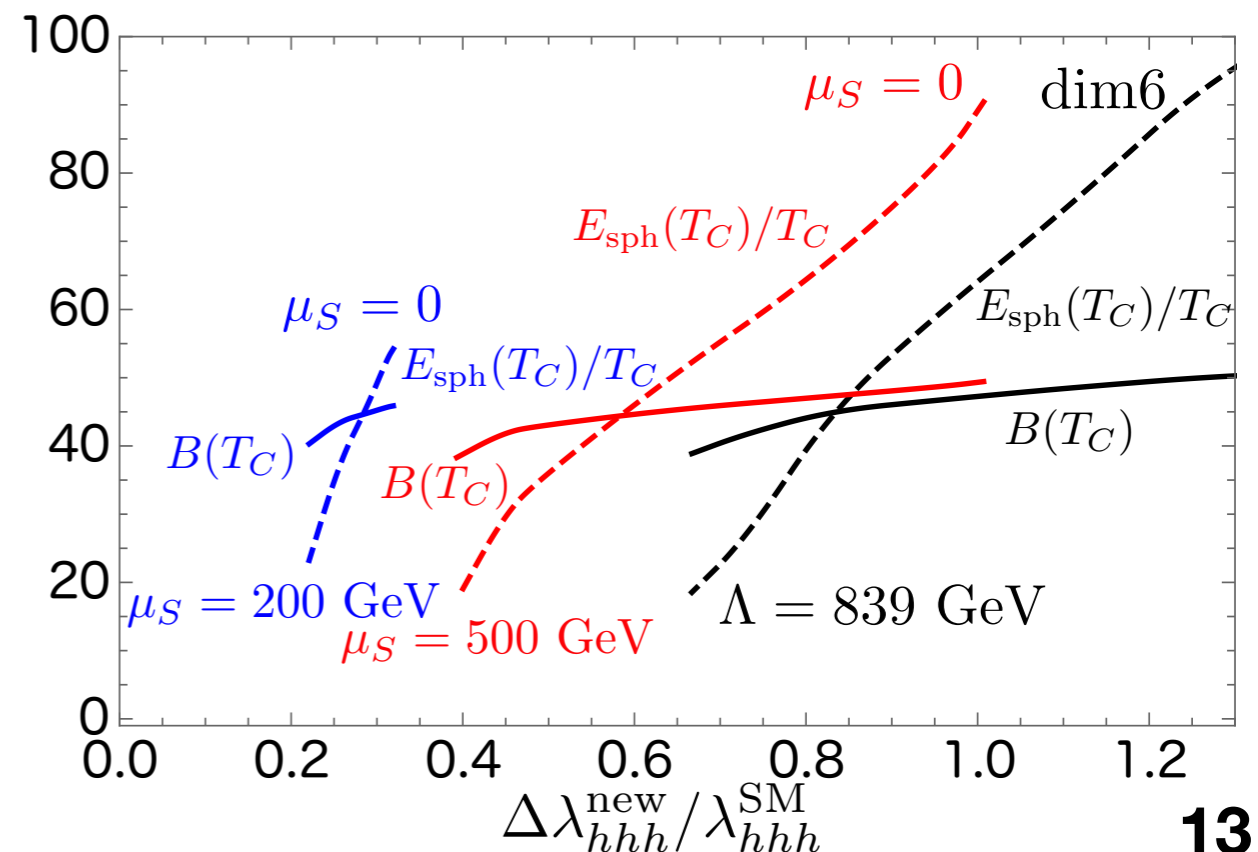
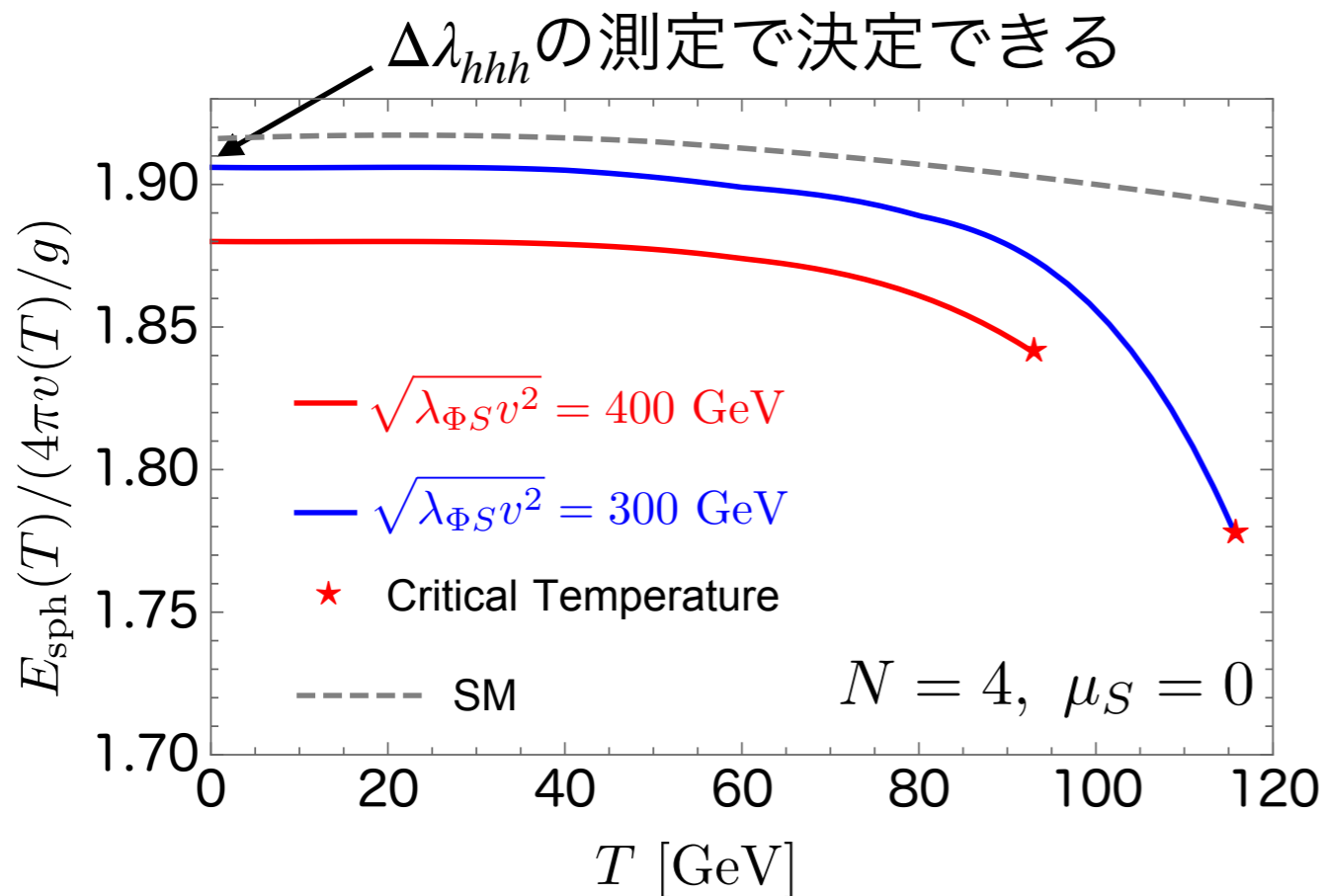
・N=4として有限温度の効果を考慮する(2HDMに相当)

$$M_S(v)^2 = \mu_S^2 + \lambda_{\Phi_S} v^2$$

・ $\lambda_{\Phi_S} v^2$ が小さくなると $E_{\text{sph}}(T_C)/T_C > B(T_C)$ を満足しない

←  $\Delta\lambda_{hhh}^{\text{Nsclar}}/\lambda_{hhh}^{\text{SM}} > 22\%$  (N=4)を満足する必要がある

$\Delta\lambda_{hhh}$ の測定から $E_{\text{sph}}(T_C)/T_C$ を決定することで、電弱バリオン数生成を実現するモデルの一貫性を検証できる



# 今後の展望

- CP violationのソースを含まないモデルを扱った
  - ←電弱バリオン数生成は強い1次的な電弱相転移に加えてCP violationを要求
  - CP violationを含む現実的な拡張ヒッグスモデルでのスファレロンと観測量の関係
- 1ループまでの有効ポテンシャルを扱った
  - より高次のループ効果を含めたモデルでのスファレロン
- ヒッグスセクターの違いがhhh結合に現れるモデルを扱った
  - hWW, hZZ結合などのずれとスファレロンエネルギーの関係

# まとめ

- ① スファレロンはバリオン数生成で重要だが、その性質は実験で検証されていない
- ② スファレロンとヒッグス3点結合がいずれもヒッグスポテンシャルと関係している点に注目し、将来の加速器実験でのヒッグス3点結合の測定からスファレロンエネルギーを決定できることを示した

$$\Delta E_{\text{sph}}^{\text{new}} \simeq -A^{\text{new}} \frac{\Delta \lambda_{hhh}^{\text{new}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}}$$

- ③  $A_{\text{new}}$  はモデルに依存するが、モデル間の対応関係がついていることを確認した
- ④  $\Delta \lambda_{hhh}$  の測定から  $\zeta_{\text{sph}}(T_C)$  か  $E_{\text{sph}}(T_C)/T_C$  を決定することで、電弱バリオン数生成を実現するモデルの一貫性を検証できる
- ⑤ 有効場の理論で強い一次的な電弱相転移が起きるには  $\Delta \lambda_{hhh}^{\text{dim6}} / \lambda_{hhh}^{\text{SM}} > 83\%$  を満たす必要がある
- ⑥ スカラー一重項を4個追加したモデル(2HDMに相当する)で強い一次的な電弱相転移が実現するには  $\Delta \lambda_{hhh}^{\text{Nscalar}} / \lambda_{hhh}^{\text{SM}} > 22\%$  を満たす必要がある