

重い付加的ヒッグスを伴うモデルの 検証方法としての重力波

田中正法 (大阪大学)

共同研究者: 兼村晋哉 (大阪大学)

arXiv: 2201.04791

素粒子と重力波 2022/2/22

イントロダクション

- ・バリオン数非対称性問題 $\frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} = 5.8 - 6.5 \times 10^{-10}$ [PDG 2021]

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

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

- ① スファレロン過程
- ② ヒッグスセクターのCPの破れ
- ③ 強い電弱1次相転移 $v_n/T_n > 1$

- ・標準模型における電弱相転移は1次相転移ではない [O'nofrio and Rummukainen, PRD 96 (2016)]

- ・重い新粒子の効果を有効的に記述する理論では, 800GeV以下に新物理が存在しなければ強い電弱1次相転移が起きない [Grojean et al., PRD 71 (2005)]

[Delaunay et al., JHEP04 (2008)]

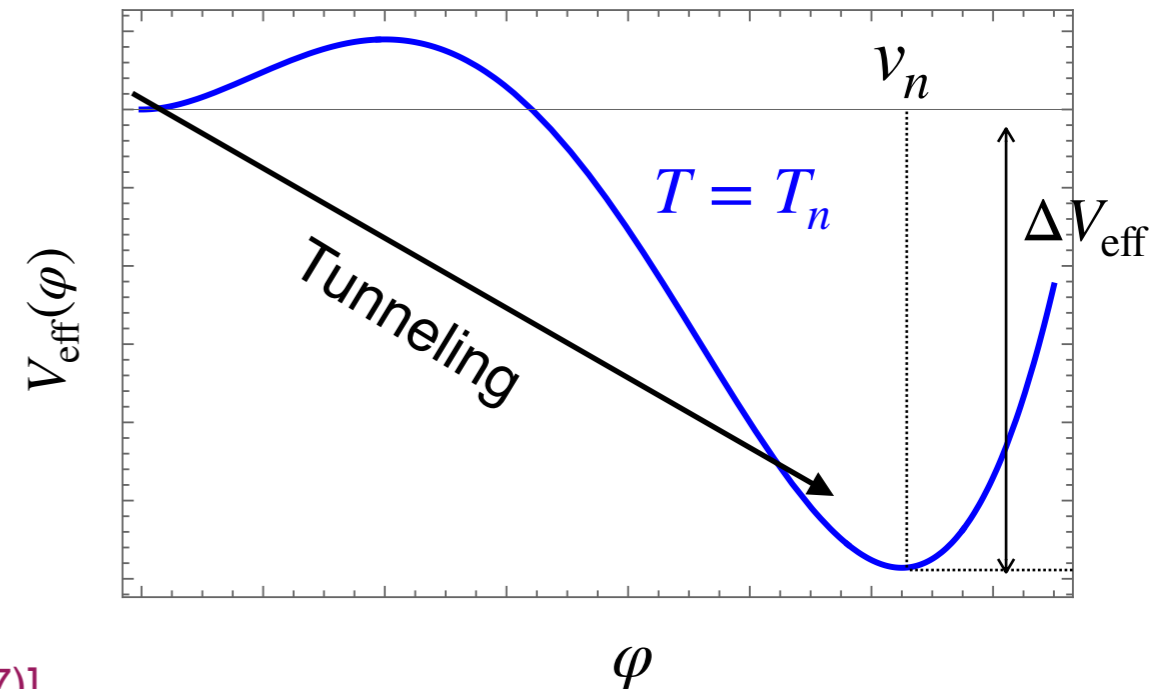
数TeV程度の新粒子を含む具体的なモデルで強い電弱1次相転移は可能？

1次相転移を特徴づけるパラメータ

- 有効ポテンシャル (高温展開)

$$V_{\text{eff}}(\varphi, T) \simeq DT^2\varphi^2 - ET\varphi^3 + \frac{\lambda}{4}\varphi^4$$

ボソンループのみ寄与: 新スカラー場が必要



- 1次相転移を特徴付けるパラメータ

[Grojean and Servant, PRD 75 (2007)]

T_n : 1次相転移が始まる温度

α_{GW} : 1次相転移の潜熱

β_{GW} : 1次相転移が継続する時間の逆数

v_b : 真空泡の膨張速度

$$\Gamma_{\text{bubble}}/H_{\text{Hubble}}^4 \Big|_{T=T_n} = 1$$

$$\alpha_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_{\text{rad}}} \left[-\Delta V_{\text{eff}} + T \frac{\partial \Delta V_{\text{eff}}}{\partial T} \right] \Big|_{T=T_n}$$

$$\tilde{\beta}_{\text{GW}} \equiv \frac{\beta_{\text{GW}}}{H_{\text{Hubble}}} \equiv T \frac{d}{dT} \left(\frac{S_3}{T} \right) \Big|_{T=T_n}$$

- 強い電弱1次相転移の条件

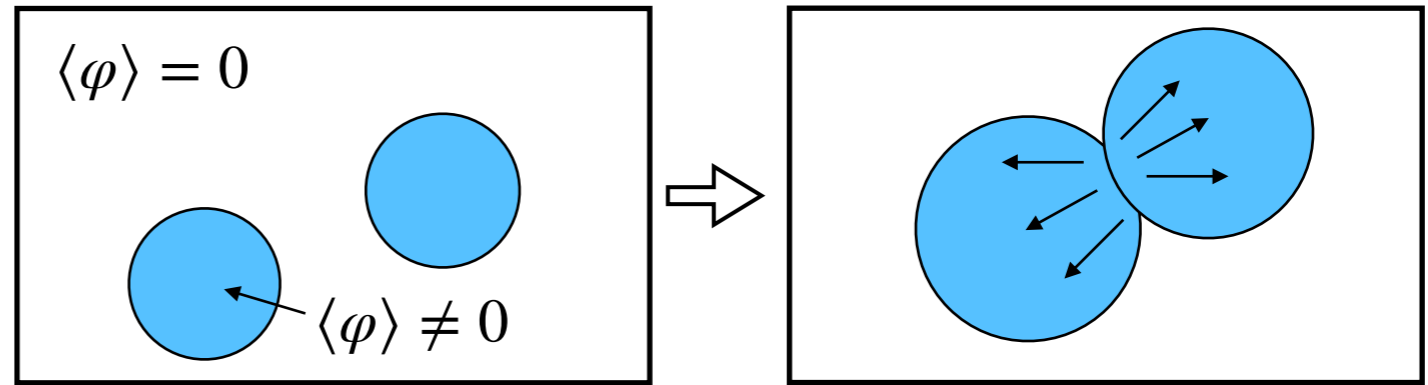
$$\frac{v_n}{T_n} > \zeta_{\text{sph}}(T_n) \simeq 1$$

スファレロン過程がバリオン数を washoutしないための条件

1次相転移由来の重力波

[Caprini et al., JCAP 04 (2016)]

- ① 泡の衝突
- ② プラズマの疎密波(音波)
- ③ 磁気流体力学的乱流



Eg) プラズマの疎密波

$$\Omega_{\text{SW}}(f)h^2 = \Omega_{\text{SW}}^{\text{peak}}h^2 \times (f/\tilde{f}_{\text{SW}})^3 \left(\frac{7}{4 + 3(f/\tilde{f}_{\text{SW}})^2} \right)^{7/2}$$

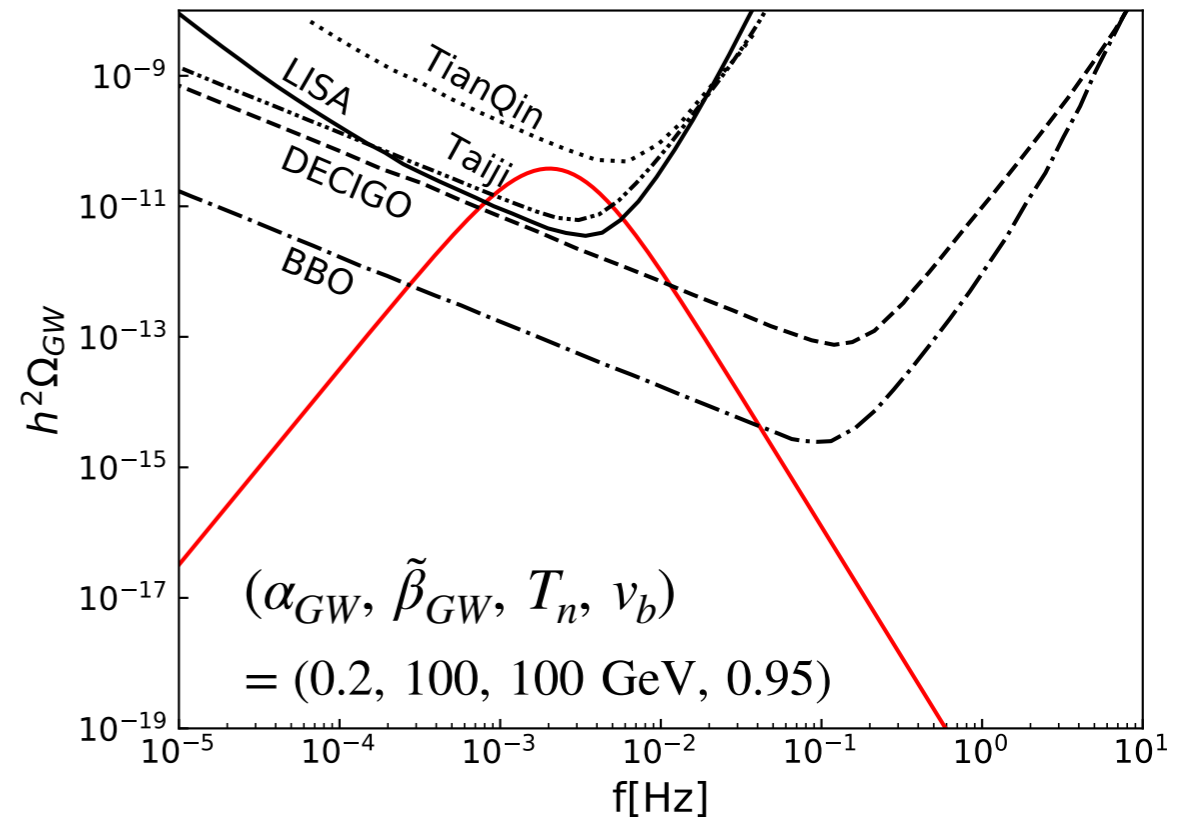
ピークの高さ

$$\Omega_{\text{SW}}^{\text{peak}}h^2 \simeq 2.65 \times 10^{-6} v_b \tilde{\beta}_{\text{GW}}^{-1} \left(\frac{\kappa_{\text{SW}} \alpha_{\text{GW}}}{1 + \alpha_{\text{GW}}} \right)^2 \left(\frac{100}{g_*} \right)^{1/3}$$

ピーク振動数

κ_{SW} : efficiency factor

$$f_{\text{SW}} \simeq 1.9 \times 10^{-2} \frac{1}{v_b} \tilde{\beta}_{\text{GW}} \left(\frac{T_n}{100 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{g_*}{100} \right)^{1/6} \text{ mHz}$$



LISA: arXiv:1702.00786,
 DECIGO: Phys. Rev. Lett. 87(2001),
 BBO: NASA mission concept study, NASA, 2004
 TianQin: 1512.02076
 Taiji: 1807.09495

Two Higgs Doublet Model

- ソフトに破れた Z_2 対称性を持つTwo Higgs doublet model (2HDM)

$$V_0(\Phi_1, \Phi_2) = m_1^2 |\Phi_1|^2 + m_2^2 |\Phi_2|^2 - m_3^2 (\Phi_2^\dagger \Phi_1 + \text{h.c.})$$

$$+ \frac{\lambda_1}{2} |\Phi_1|^4 + \frac{\lambda_2}{2} |\Phi_2|^4 + \lambda_3 |\Phi_1|^2 |\Phi_2|^2 + \lambda_4 |\Phi_2^\dagger \Phi_1|^2 + \frac{\lambda_5}{2} \left[(\Phi_2^\dagger \Phi_1)^2 + \text{h.c.} \right]$$

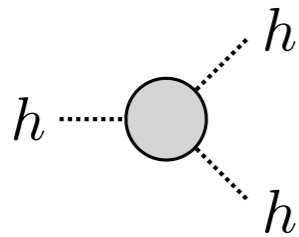
m_3^2, λ_5 は実

- 電弱バリオン数生成の実現に必要なCPの破れと1次相転移が実現できる

- モデルのパラメータ $M_\Phi^2 = M^2 + \lambda_\Phi v^2$

$$m_{H^\pm}, m_A, m_H, \tan \beta = v_2/v_1, M = \sqrt{m_3^2 / (\sin \beta \cos \beta)}, \sin(\beta - \alpha)$$

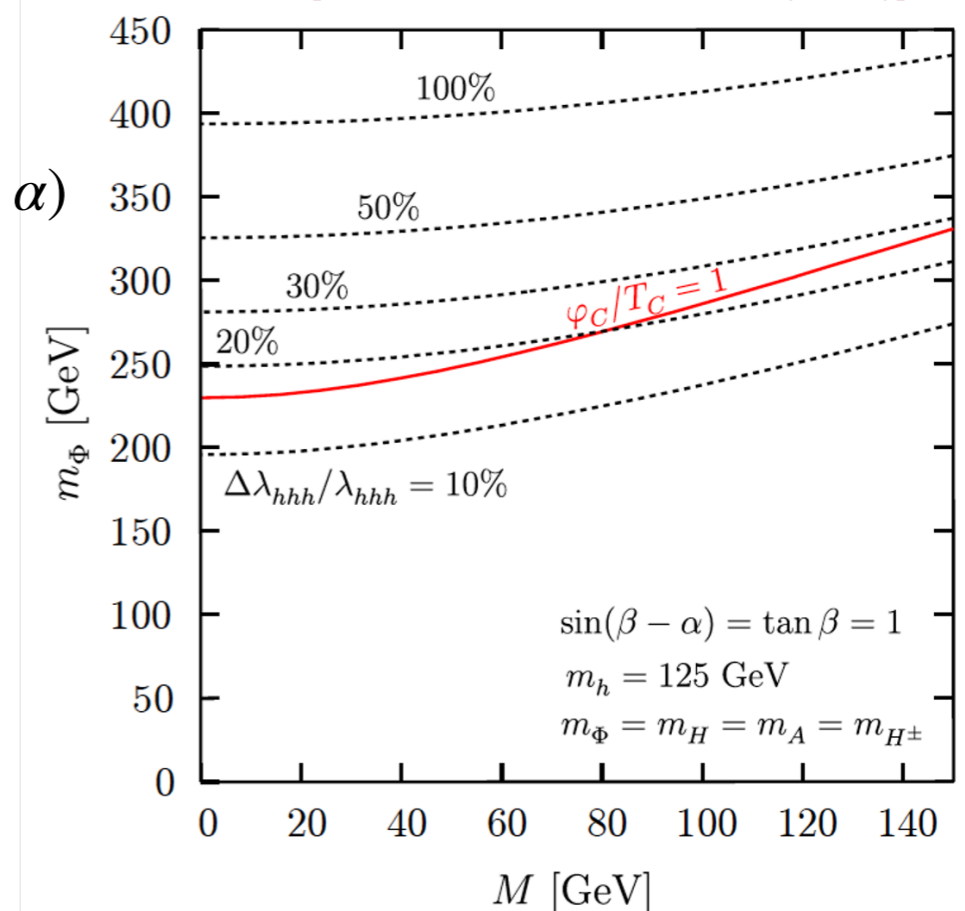
- 強い電弱1次相転移の実現に $\Delta\lambda_{hhh}/\lambda_{hhh} > 20\%$ が必要



$$\frac{\Delta\lambda_{hhh}}{\lambda_{hhh}} \equiv \frac{\lambda_{hhh}^{2\text{HDM}} - \lambda_{hhh}^{\text{SM}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}}$$

$m_\Phi > 1\text{TeV}$ のような重い時はどうなるのか？

[Kanemura et al., PLB606 (2005)]



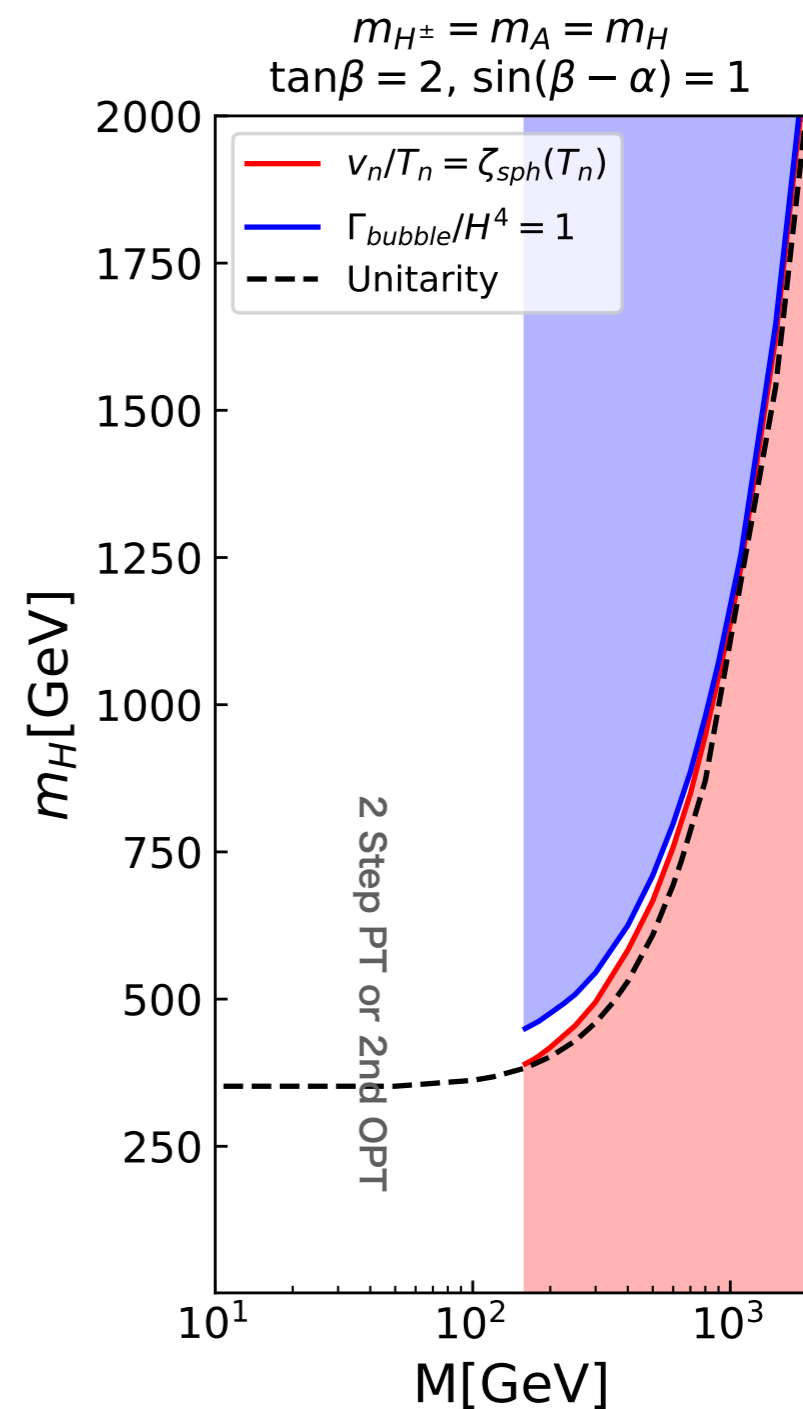
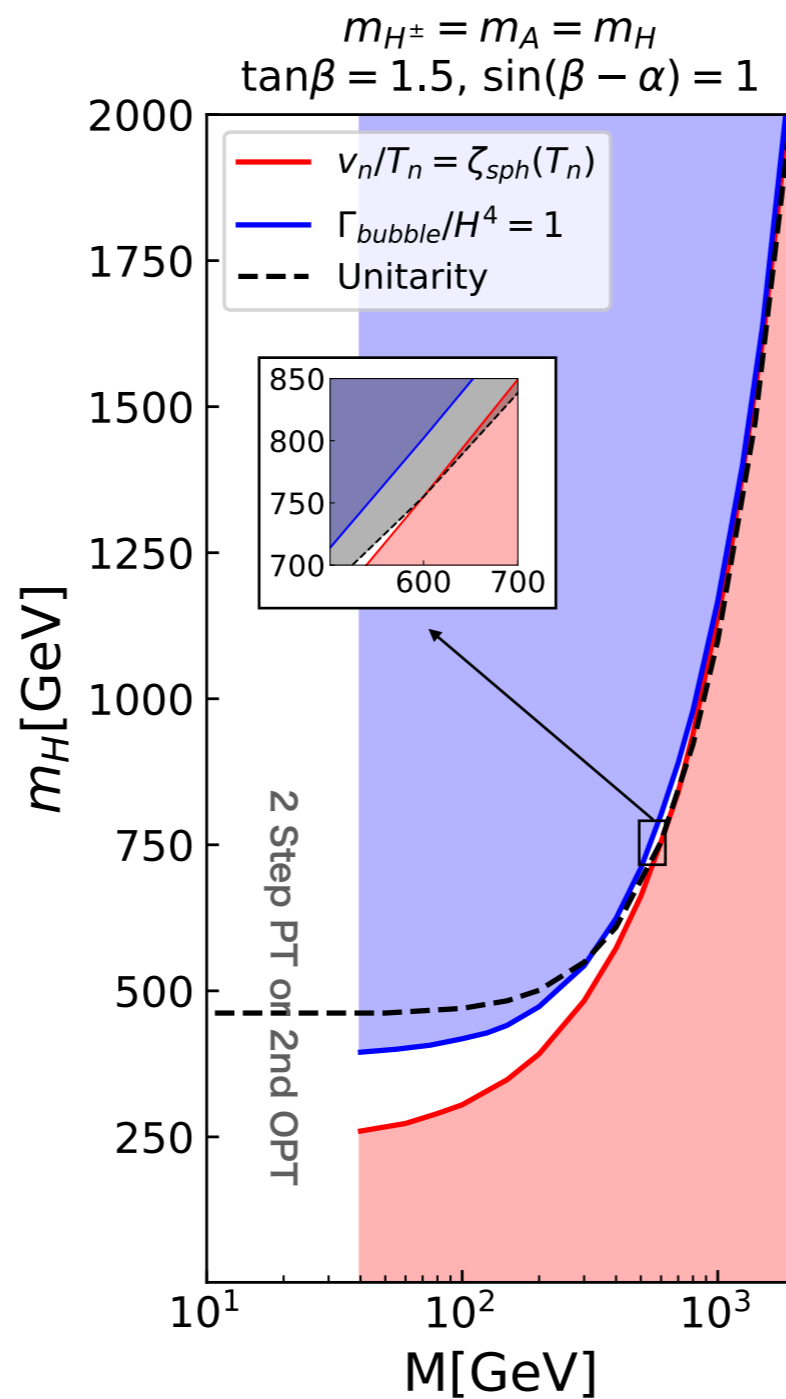
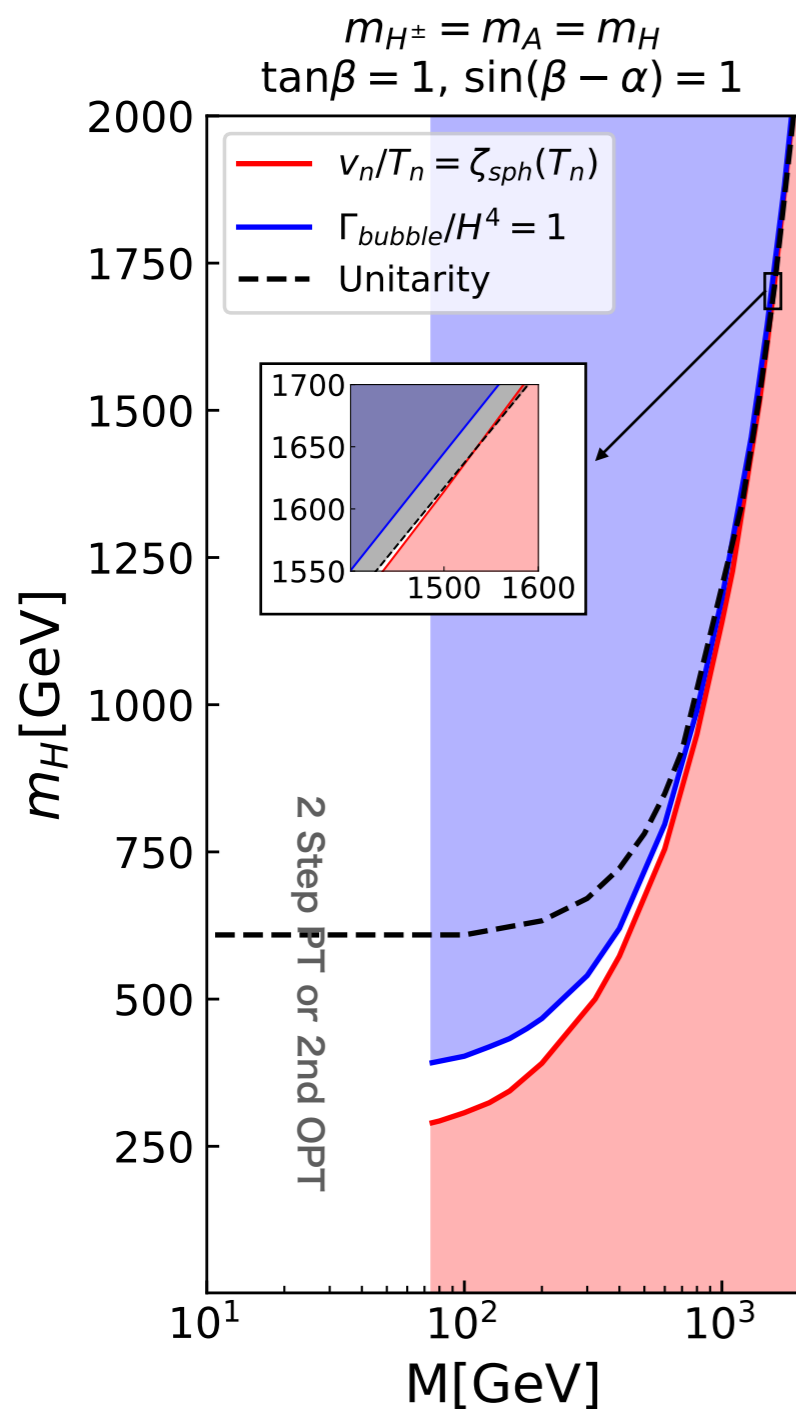
2HDMにおける電弱相転移

摂動ユニタリティを満足しながら強い電弱1次相転移を実現するには

$$M_{\Phi}^2 = M^2 + \lambda_{\Phi} v^2$$

付加的ヒッグスの質量 < 1.6-2 TeV

[Kanemura and Tanaka, arXiv:2201.04791]



2HDMにおける重力波

電弱相転移由来の重力波を通じて、ヒッグスセクターの構造に迫れる

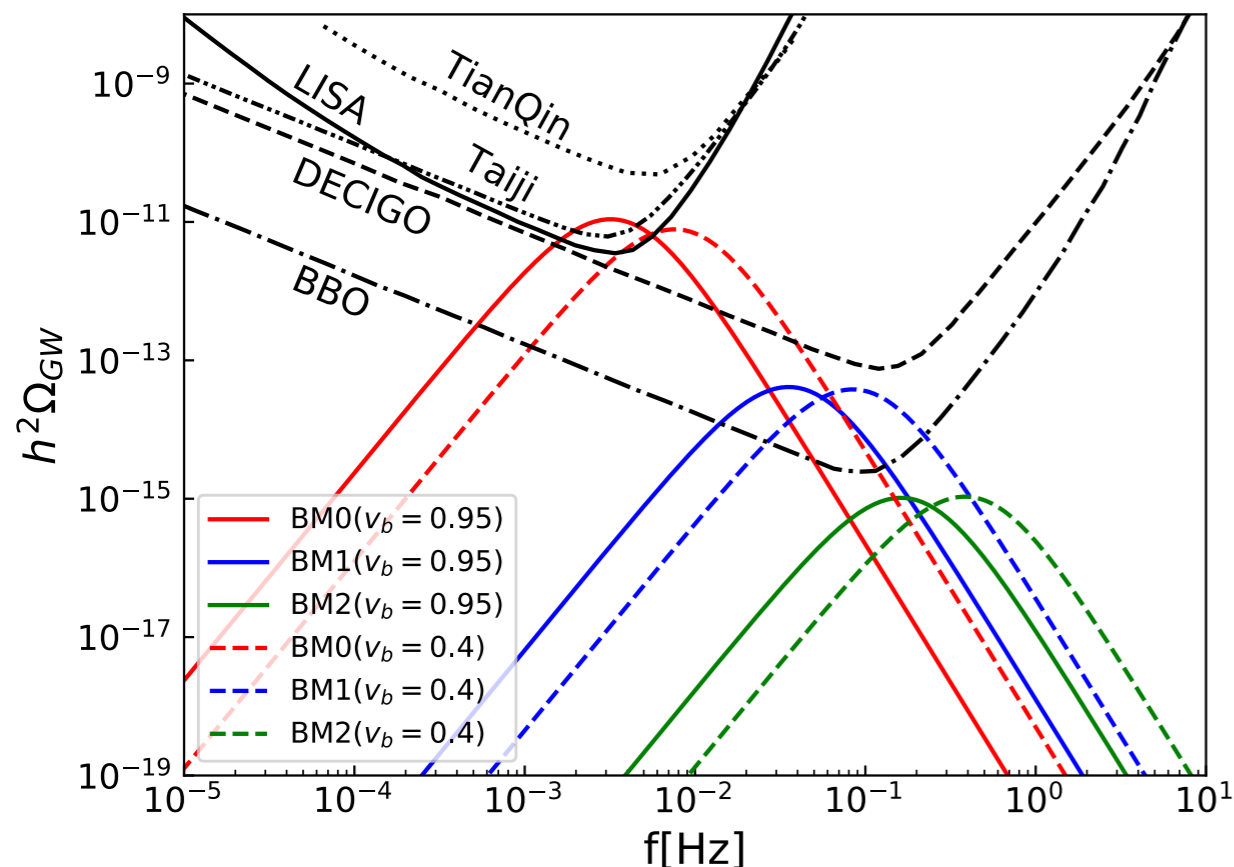
[Kakizaki et al., PRD 92 (2015), Hashino et al., PRD 94 (2016), Hashino et al., PRD 99 (2019)]

	m_{H^\pm}	m_A	m_H	M	$\tan \beta$	$\Delta\lambda_{hhh}^{1\ell}/\lambda_{hhh}^{\text{SM}}$	$\Delta\lambda_{hhh}^{2\ell}/\lambda_{hhh}^{\text{SM}}$	v_n/T_n
BM0	373GeV	373GeV	373GeV	50GeV	1	71.5%	86.4%	3.80
BM1	464GeV	464GeV	373GeV	200GeV	1.8	80.2%	112%	2.60
BM2	891GeV	891GeV	800GeV	720GeV	1.8	80.2%	125%	2.37

$$\sin(\beta - \alpha) = 1$$

$$m_\Phi^2 = M^2 + \lambda_\Phi v^2$$

[Kanemura and Tanaka, arXiv:2201.04791]



大きいhhh結合 + 大きい $\Omega_{\text{GW}}^{\text{peak}}$

⇒ 軽い付加的ヒッグスの可能性

大きいhhh結合 + 小さい $\Omega_{\text{GW}}^{\text{peak}}$

⇒ 重い付加的ヒッグスの可能性

加速器実験での直接探索が困難でも重力波とhhh結合のバランスを通じて検証可能

- ・ 重い付加的ヒッグスでの1次相転移はあまり考えられていなかった
 - TeV領域でも強い電弱1次相転移が実現できることを確認した
- ・ 繰り込み可能な拡張ヒッグスモデルでは、摂動ユニタリティとスファレロン脱結合条件から、質量の上限1.6-2TeVが得られた
- ・ 付加的ヒッグスが軽いか重いかを区別するには、 hhh 結合の測定と電弱相転移由来の重力波スペクトルの観測の両方が重要となる
 - 将来のLHC実験での直接探索、ILCでのヒッグス結合や湯川結合、そして hhh 結合の精密測定とLISA, DECIGOなどの重力波観測で多角的にヒッグスセクターが検証できる