

# 原始ブラックホール観測を用いた 電弱一次相転移の検証

---

端野 克哉 (東京理科大学)

Collaborators: 兼村 晋哉<sup>1</sup>, 高橋 智<sup>2</sup> 田中 正法<sup>1</sup> (1. 大阪大学, 2. 佐賀大学)

[K. H., Shinya Kanemura, Tomo Takahashi, PLB, Volume 833, 137261, arXiv:2111.13099]

[K. H., Shinya Kanemura, Tomo Takahashi, Masanori Tanaka, 論文準備中]

# Contents

## 1. Introduction

## 2. Testability of the model with $\varphi_C / T_C > 1$

- $hhh$  coupling
- Gravitational waves from first-order phase transition
- Primordial black holes from first-order phase transition

## 3. Effective field theory

- SMEFT
- naHEFT

## 4. Summary

# Introduction

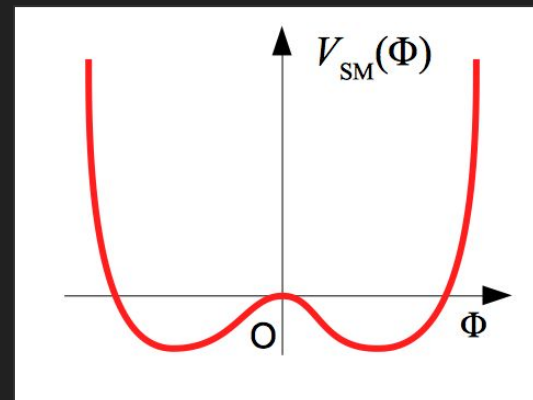
★ 標準模型で説明できない現象がすでに確認されている

- 暗黒物質
- ニュートリノ振動
- 宇宙のバリオン数非対称性

→ 標準模型を拡張する必要がある

★ ヒッグスポテンシャルの形状は不明瞭のままである

$$V_{SM}(\phi) = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4 \quad (\text{The SM case})$$



★ 電弱相転移はポテンシャルの形状に強く依存する

電弱相転移は標準模型で説明できない現象と関係する

→ 例えば、宇宙のバリオン数非対称性

# Introduction

- ★ 宇宙のバリオン数非対称性を説明できるシナリオの一つである電弱バリオン数生成はヒッグス物理に密接に関係する

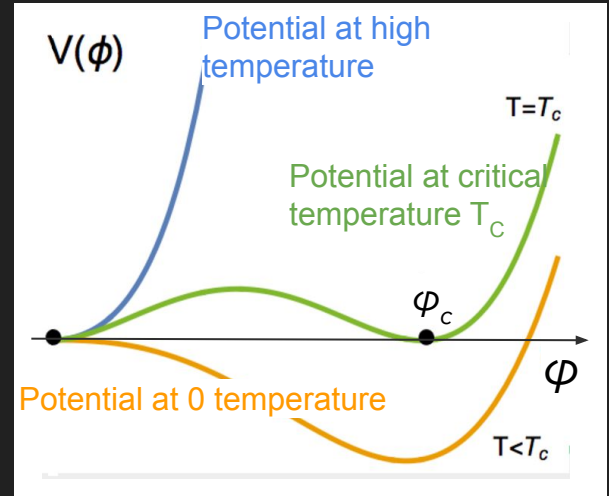
## Sakharov's conditions

[A. D. Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5, 32 (1967)]

- バリオン数の破れ → スファレロン過程
- CとCPの破れ → 模型の拡張
- 平衡状態からの逸脱 → 強い電弱一次相転移 :  $\phi_c / T_c \gtrsim 1$

$$V_{\text{eff}}(\phi, T) = D(T^2 - T_0^2)\phi^2 + (e - ET)\phi^3 + \frac{\lambda(T)}{4}\phi^4$$

$E$  : Loop effects of bosons  
 $e$  : Mixing effects at the tree level



標準模型では一次相転移が実現できない

[Y. Aoki, F. Csikor, Z. Fodor and A. Ukawa, Phys. Rev. D 60, 013001 (1999)]

電弱一次相転移を実現するには新物理模型が必要

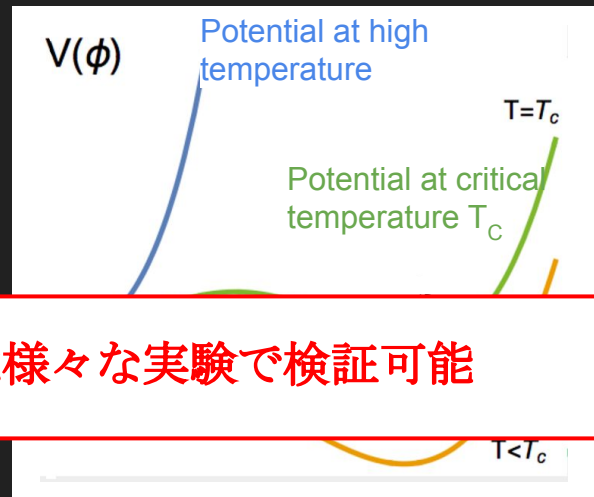
# Introduction

- ★ 宇宙のバリオン数非対称性を説明できるシナリオの一つである電弱バリオン数生成はヒッグス物理に密接に関係する

## Sakharov's conditions

[A. D. Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5, 32 (1967)]

- バリオン数の破れ → スファレロン過程



強い電弱一次相転移を実現できる新物理模型は様々な実験で検証可能

$$V_{\text{eff}}(\varphi, T) = D(T^2 - T_0^2)\varphi^2 + (e - ET)\varphi^3 + \frac{\lambda(T)}{4}\varphi^4$$

$E$  : Loop effects of bosons  
 $e$  : Mixing effects at the tree level

標準模型では一次相転移が実現できない

[Y. Aoki, F. Csikor, Z. Fodor and A. Ukawa, Phys. Rev. D 60, 013001 (1999)]

電弱一次相転移を実現するには新物理模型が必要

# Contents

## 1. Introduction

## 2. Testability of the model with $\varphi_C / T_C > 1$

- *hhh* coupling
- Gravitational waves from first-order phase transition
- Primordial black holes from first-order phase transition

## 3. Effective field theory

- SMEFT
- naHEFT

## 4. Summary

# Testability of the model with $\varphi_c / T_c \gtrsim 1$

強い電弱一次相転移を実現できる新物理模型

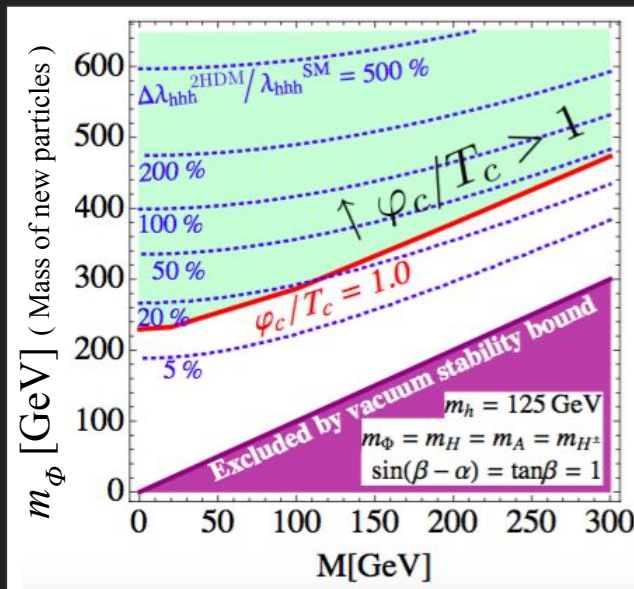
$hhh$  結合の精密測定

$hhh$  結合が数10%以上、SMの値から大きくなる

S. Kanemura, Y. Okada, E. Senaha,  
PLB 606 361 (2005)

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

★ Two Higgs doublet model  $m_\phi^2 \sim \lambda_i v^2 + M^2$



$$\frac{\varphi_c}{T_c} = \frac{E}{2\lambda_T}$$

# Testability of the model with $\varphi_c / T_c \gtrsim 1$

強い電弱一次相転移を実現できる新物理模型

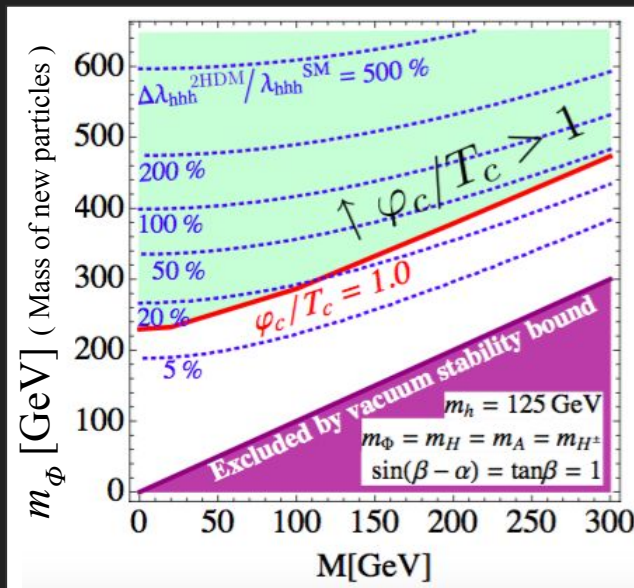
$hhh$  結合の精密測定

$hhh$  結合が数10%以上、SMの値から大きくなる

S. Kanemura, Y. Okada, E. Senaha,  
PLB 606 361 (2005)

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

★ Two Higgs doublet model  $m_\Phi^2 \sim \lambda_i v^2 + M^2$



$$\frac{\varphi_c}{T_c} = \frac{E}{2\lambda_T}$$

$$E \sim \frac{m_\Phi^3}{3\pi v^3}$$

$$\Delta\lambda_{hhh}^{\text{eff}} \sim \frac{m_\Phi^4}{\pi^2 v^3} \left(1 - \frac{M^2}{m_\Phi^2}\right)^3$$



# Testability of the model with $\varphi_c / T_c \gtrsim 1$

強い電弱一次相転移を実現できる新物理模型

LISA: A. Klein et al., PRD93 no. 2,  
(2016) 024003  
DECIGO: K. Yagi and N. Seto,  
PRD83 (2011) 044011

$hhh$  結合の精密測定

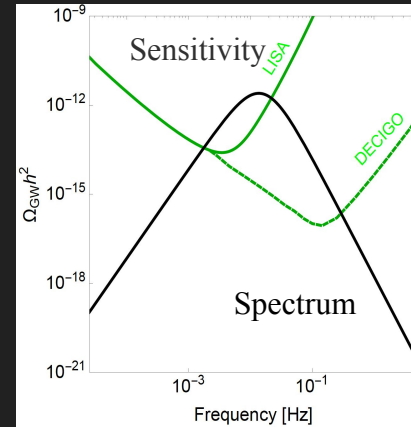
$hhh$  結合が数10%以上、SMの  
値から大きくなる

S. Kanemura, Y. Okada, E. Senaha,  
PLB 606 361 (2005)

電弱一次相転移由来の重力  
波スペクトルの観測

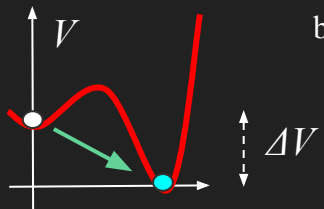
相転移由来の重力波スペクトルは模型  
の詳細(ポテンシャルの形状)に依存す  
る

C. Grojean and G. Servant, PRD 75  
(2007), 043507



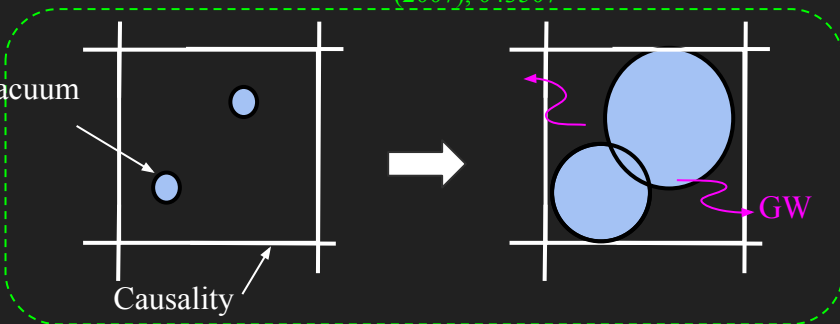
相転移により解放される潜熱  $\alpha$  や  
相転移の継続時間  $\beta$  などに依存する

$$\alpha \sim \Delta V \quad \Gamma(t) = \Gamma_0 e^{\beta t}$$



True vacuum  
bubble

Causality



# Testability of the model with $\varphi_c / T_c \gtrsim 1$

強い電弱一次相転移を実現できる新物理模型

$hhh$  結合の精密測定

$hhh$  結合が数10%以上、SMの値から大きくなる

S. Kanemura, Y. Okada, E. Senaha,  
PLB 606 361 (2005)

電弱一次相転移由来の重力波スペクトルの観測

相転移由来の重力波スペクトルは模型の詳細(ポテンシャルの形状)に依存する

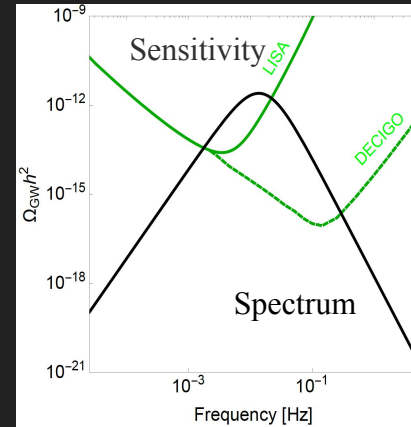
C. Grojean and G. Servant, PRD 75  
(2007), 043507

Correlation

これまでの研究:  $hhh$  結合の精密測定と重力波スペクトルの観測を用いた Correlationによる新物理模型の検証可能性を研究

M. Kakizaki, S. Kanemura and T. Matsui, PRD 92 (2015) no.11, 115007 [arXiv:1509.08394 [hep-ph]], K. H. R. Jinno, M. Kakizaki, S. Kanemura, T. Takahashi and M. Takimoto, PRD 99, no. 7, 075011 (2019) and so on

LISA: A. Klein et al., PRD93 no. 2, (2016) 024003  
DECIGO: K. Yagi and N. Seto, PRD83 (2011) 044011



相転移により解放される潜熱  $\alpha$  や相転移の継続時間  $\beta$  などに依存する

$$\alpha \sim \Delta V$$

$$\Gamma(t) = \Gamma_0 e^{\beta t}$$

# Testability of the model with $\varphi_c / T_c \gtrsim 1$

強い電弱一次相転移を実現できる新物理模型

$hhh$  結合の精密測定

$hhh$  結合が数10%以上、SMの値から大きくなる

S. Kanemura, Y. Okada, E. Senaha,  
PLB 606 361 (2005)

電弱一次相転移由来の重力波スペクトルの観測

相転移由来の重力波スペクトルは模型の詳細 (ポテンシャルの形状) に依存する

C. Grojean and G. Servant, PRD 75 (2007), 043507

電弱一次相転移由来の原始ブラックホールの観測

一次相転移により原始ブラックホールが生じる

J. Liu, L. Bian, R. G. Cai, Z. K. Guo and S. J. Wang,  
[arXiv:2106.05637 [astro-ph.CO]].

Correlation

New correlation

これまでの研究よりも強いCorrelationを用いて強い電弱一次相転移を実現できる  
新物理模型が検証可能

[K. H., Shinya Kanemura, Tomo Takahashi, Physics Letters B, Volume 833, 137261, arXiv:2111.13099]

# Primordial black holes from first-order phase transition

原始ブラックホール: 宇宙の初期に存在する大きな密度揺らぎが重力崩壊を起こして形成されるブラックホール

原始ブラックホールは一次相転移で生成できる

M. J. Baker, M. Breitbach, J. Kopp and L. Mittnacht, [arXiv:2105.07481 [astro-ph.CO]], K. Kawana and K. P. Xie, PLB 824 (2022), 136791 [arXiv:2106.00111 [astro-ph.CO]], M. J. Baker, M. Breitbach, J. Kopp and L. Mittnacht, [arXiv:2110.00005 [astro-ph.CO]], T. H. Jung and T. Okui, [arXiv:2110.04271 [hep-ph]], P. Huang and K. P. Xie, PRD 105 (2022) no.11, 115033, K. Kawana, P. Lu and K. P. Xie, [arXiv:2206.09923 [astro-ph.CO]].



$$\alpha \sim \Delta V \quad \Gamma(t) = \Gamma_0 e^{\beta t}$$

★ その一次相転移由来の原始ブラックホールは相転移パラメータにより評価できる

J. Liu, L. Bian, R. G. Cai, Z. K. Guo and S. J. Wang, Phys. Rev. D 105, no.2, 2 (2022) [arXiv: 2106.05637 [astro-ph.CO]].

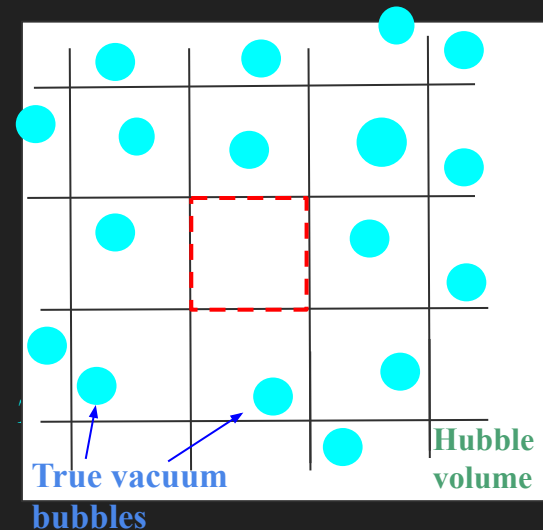
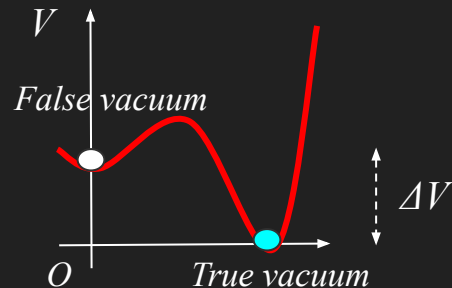
どのようにして一次相転移由来の原始ブラックホールは生成されるのか？

# Primordial black holes from first-order phase transition

- False vacuumとTrue vacuum間のエネルギー密度の差は

$$\text{Vacuum energy density } \rho_V \sim \Delta V \sim \alpha$$

に関する



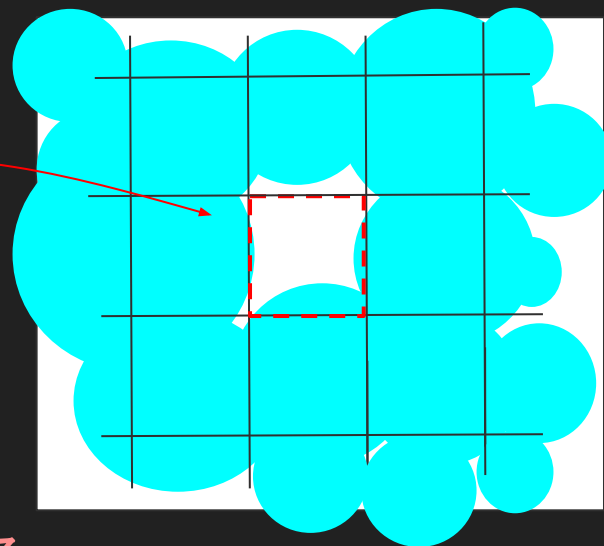
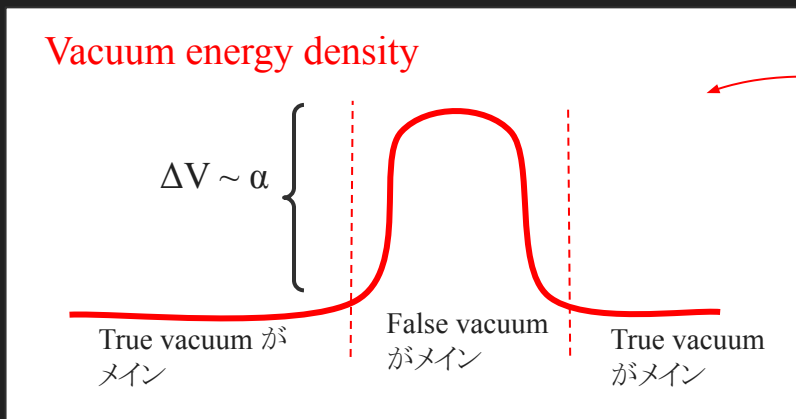
$\Delta V$ は定数なのでエネルギー密度の差は時間経過で増加する

J. Liu, L. Bian, R. G. Cai, Z. K. Guo and S. J. Wang, Phys. Rev. D 105, no.2, 2 (2022) [arXiv: 2106.05637 [astro-ph.CO]].

# Primordial black holes from first-order phase transition

- False vacuumとTrue vacuum間のエネルギー密度の差は

$$\text{Vacuum energy density } \rho_V \sim \Delta V \sim \alpha$$



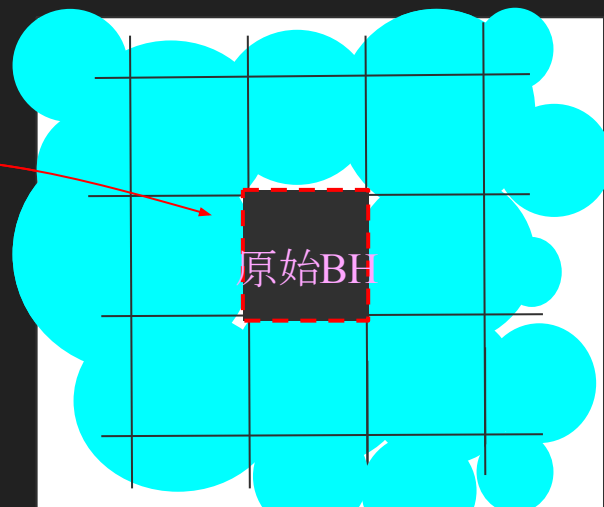
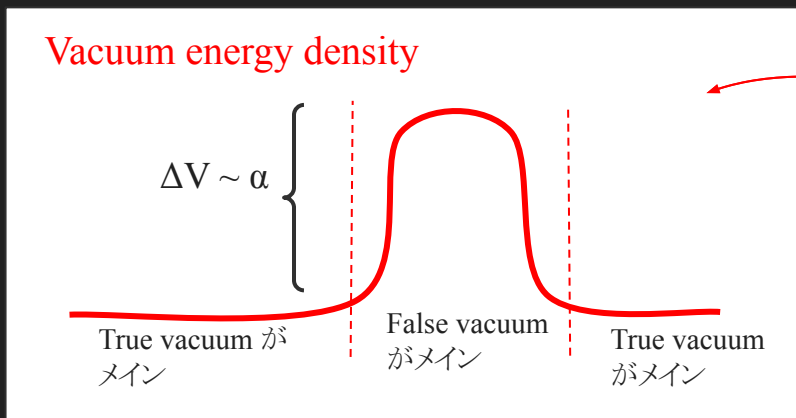
$\Delta V$ は定数なのでエネルギー密度の差は時間経過で増加する

# Primordial black holes from first-order phase transition

- False vacuumとTrue vacuum間のエネルギー密度の差は

J. Liu, L. Bian, R. G. Cai, Z. K. Guo and S. J. Wang, PRD 105, no.2, 2 (2022) [arXiv: 2106.05637 [astro-ph.CO]].

Vacuum energy density  $\rho_V \sim \Delta V \sim \alpha$



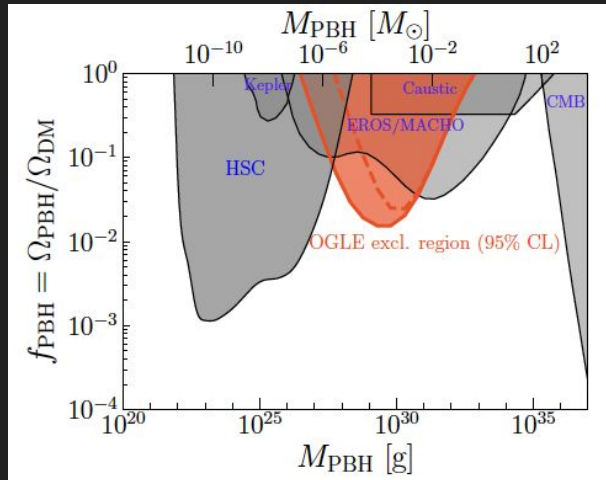
密度揺らぎ  $(\rho_{in} - \bar{\rho}) / \bar{\rho}$  が critical value  $\delta_c = 0.45$  を超えるとhorizon massが原始ブラックホールへと重力崩壊する

[I. Musco, J. C. Miller and L. Rezzolla, Class. Quant. Grav. 22 (2005), 1405, T. Harada, C. M. Yoo and K. Kohri, PRD 88 (2013) no.8, 084051 [erratum: PRD 89 (2014) no.2, 029903].]

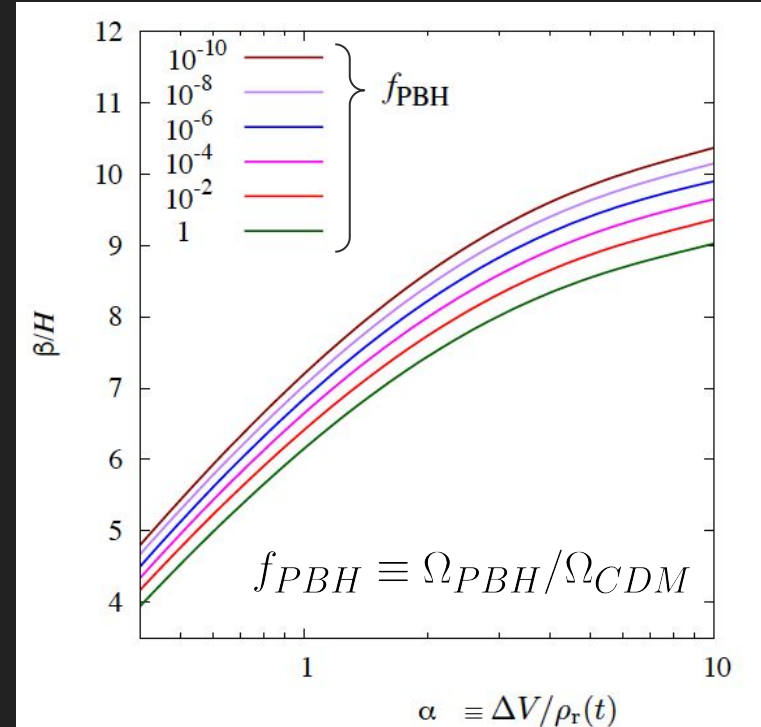
# Primordial black holes from first-order phase transition

- ★ 電弱一次相転移由来の原始ブラックホールの質量

$$M_{PBH} \sim 4\pi H^{-1} \sim 10^{-5} M_{SUN}$$



[Green and Kavanagh, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 48 (2021)]



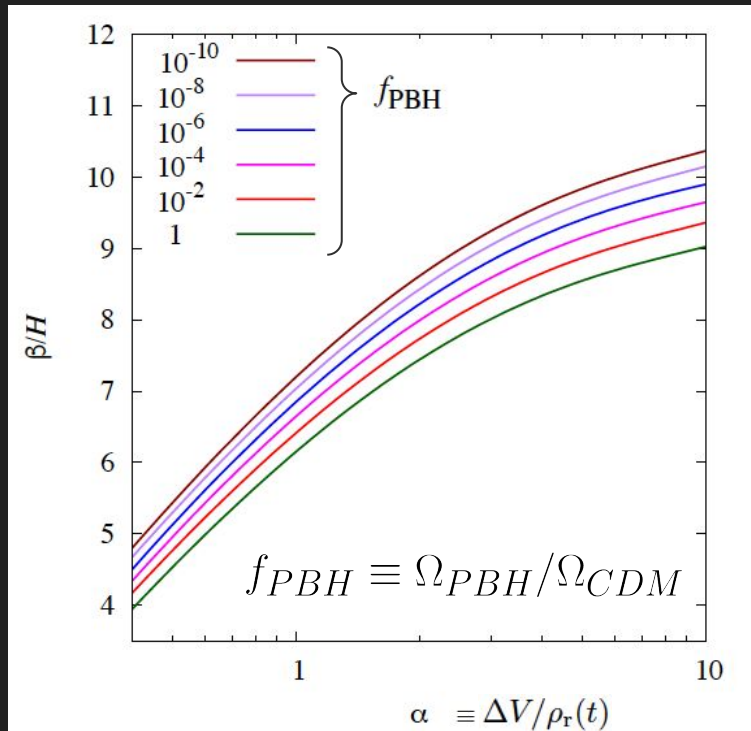
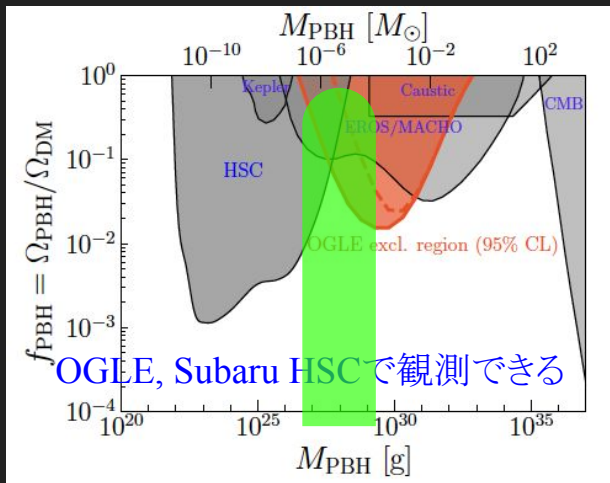
[K. H., S. Kanemura, T. Takahashi, PLB, Volume 833, 137261, arXiv:2111.13099]



# Primordial black holes from first-order phase transition

- ★ 電弱一次相転移由来の原始ブラックホールの質量

$$M_{PBH} \sim 4\pi H^{-1} \sim 10^{-5} M_{SUN}$$



[K. H., S. Kanemura, T. Takahashi, PLB, Volume 833, 137261, arXiv:2111.13099]

# Primordial black holes from first-order phase transition

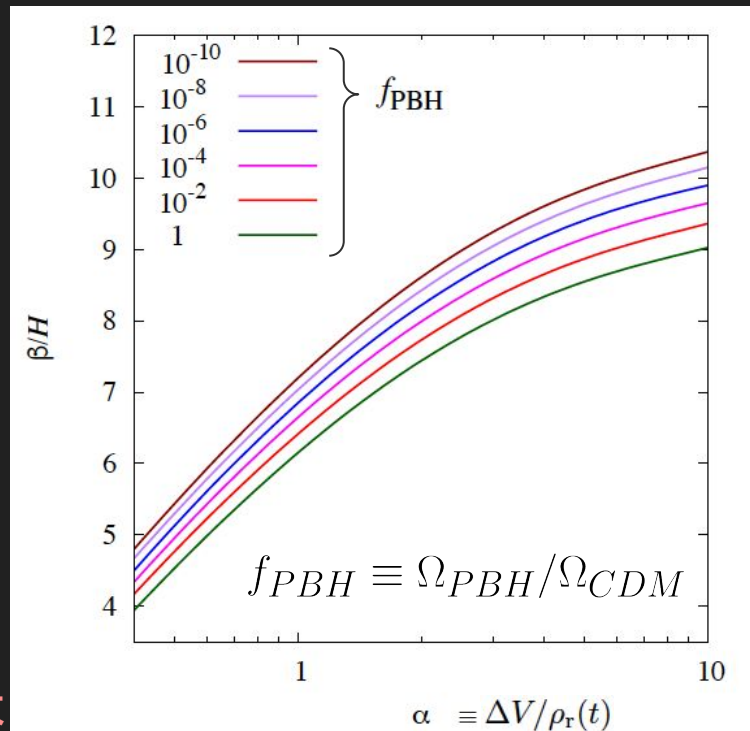
- ★ 電弱一次相転移由来の原始ブラックホールの質量

$$M_{PBH} \sim 4\pi H^{-1} \sim 10^{-5} M_{SUN}$$

- ★ 原始ブラックホール残存量  $f_{PBH}$  は真空の崩壊幅に比例する.

$$\Gamma(t) = \Gamma_0 e^{\beta t} \quad f_{PBH} \text{ は } \beta \text{ パラメータに対して非常に敏感.}$$

$\beta$ パラメータが小さく、 $\alpha$ パラメータが大きい時に  $f_{PBH}$  は大きくなる



# Contents

## 1. Introduction

## 2. Testability of the model with $\varphi_C / T_C > 1$

- $hhh$  coupling
- Gravitational waves from first-order phase transition
- Primordial black holes from first-order phase transition

## 3. Effective field theory

- SMEFT
- naHEFT

## 4. Summary

# Standard model effective field theory

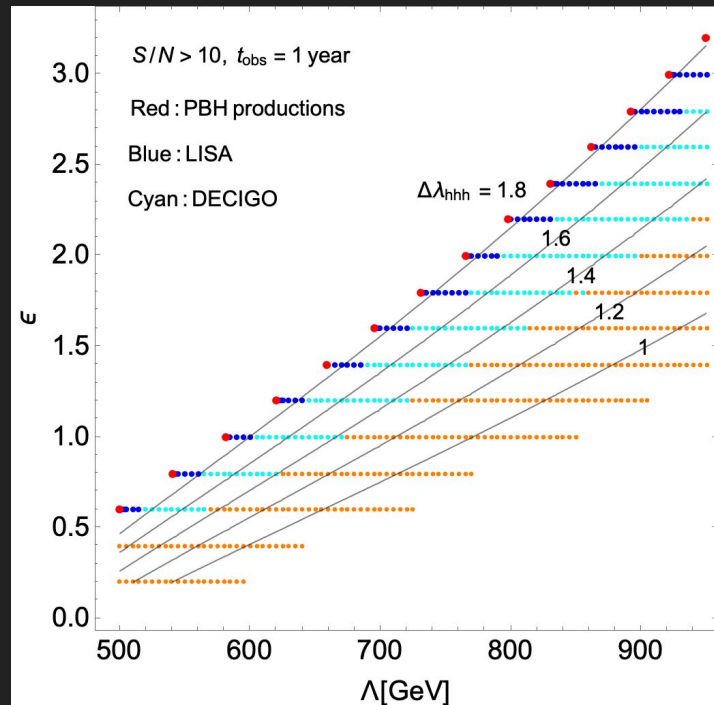
始めに Standard model effective fields theory に注目する

★ Effective potential  $\Delta V_T$ : Finite temperature effects

$$V_{eff}(\varphi, T) = -\frac{\mu^2}{2}\varphi^2 + \frac{\lambda}{4}\varphi^4 + \frac{\epsilon}{8\Lambda^2}\varphi^6 + \frac{1}{16\Lambda^4}\varphi^8 + \Delta V_T$$

- Red points:  $f_{PBH}$  が  $10^{-4}$  を超える
- Blue points: LISA で観測可能な重力波スペクトルが生じる
- Cyan points: DECIGO で観測可能な重力波スペクトルが生じる
- Orange points: 電弱一次相転移が実現可能
- Black contours:  $hhh$  結合の標準模型からのずれ

$$\Delta\lambda_{hhh} \equiv \frac{\lambda_{hhh} - \lambda_{hhh}^{SM}}{\lambda_{hhh}^{SM}}, \quad \lambda_{hhh} \equiv \left. \frac{\partial^3 V_{eff}}{\partial h^3} \right|_{h=v}$$



[K. H., S. Kanemura, T. Takahashi, PLB, Volume 833, 137261, arXiv:2111.13099]

# Nearly aligned Higgs effective field theory

次にnearly aligned Higgs effective field theory に注目する

M. Kakizaki, S. Kanemura and T. Matsui,  
Phys. Rev. D 92 (2015) no.11, 115007

## ★ Effective potential

$$\mathcal{M}^2(\phi) = M^2 + \frac{\kappa_p}{2}\phi^2$$

$$V_{\text{EFT}} = V_{\text{SM}} + \frac{\kappa_0}{64\pi^2} [\mathcal{M}^2(\phi)]^2 \ln \frac{\mathcal{M}^2(\phi)}{\mu^2} + \Delta V_T$$

[S. Kanemura and R. Nagai, JHEP 03 (2022), 194, arXiv:2111.12585 [hep-ph]]

この有効理論はNon-decoupling効果を扱うのに便利

$v_n/T_n$  を強くするには大きなNon-decouplingが必要!

## ★ Free parameters

$$\kappa_0, \kappa_p, M \rightarrow \kappa_0, r, \Lambda$$

$$\Lambda^2 = M^2 + \frac{\kappa_p}{2}v^2,$$

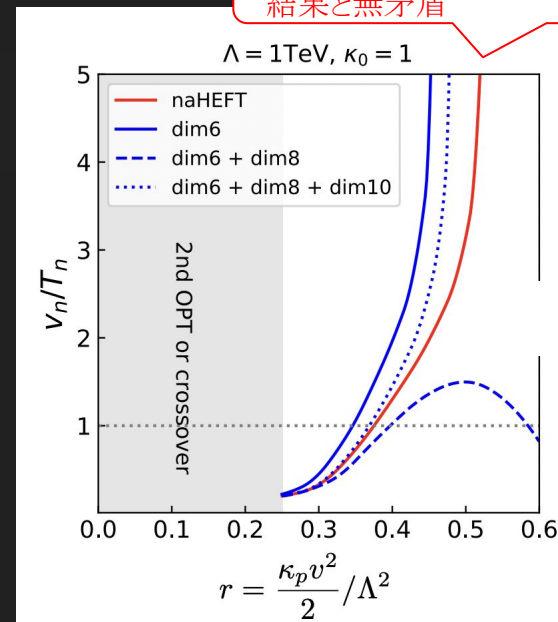
$$r = \frac{\kappa_p v^2}{\Lambda^2} = 1 - \frac{M^2}{\Lambda^2}.$$

$$r \sim 0 \Rightarrow M^2 \gg \frac{\kappa_p}{2}v^2 \quad \text{Decoupling}$$

$$r \sim 1 \Rightarrow M^2 \ll \frac{\kappa_p}{2}v^2 \quad \text{Non-decoupling}$$

パラメータ  $r$  でコントロールできる

SM+singlet scalar fieldの  
結果と無矛盾

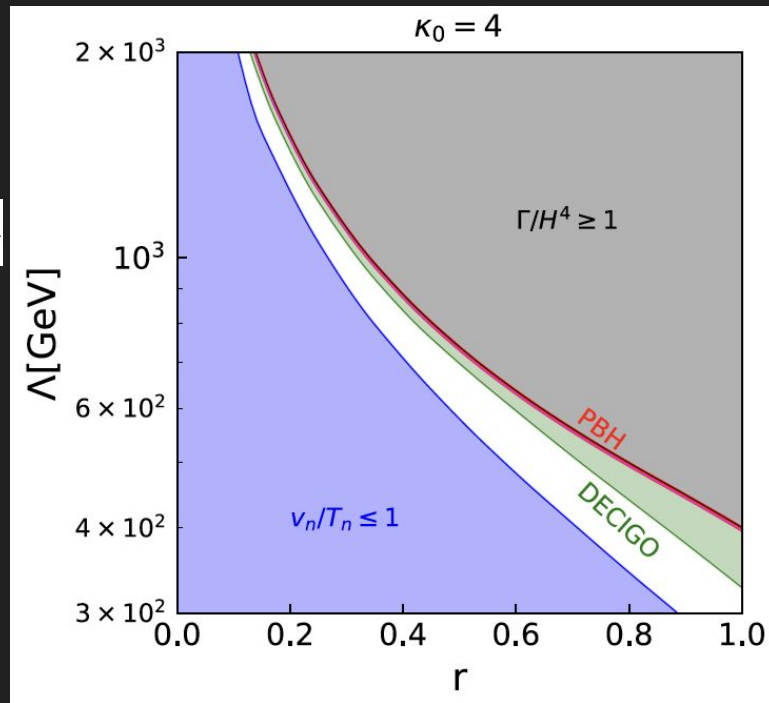
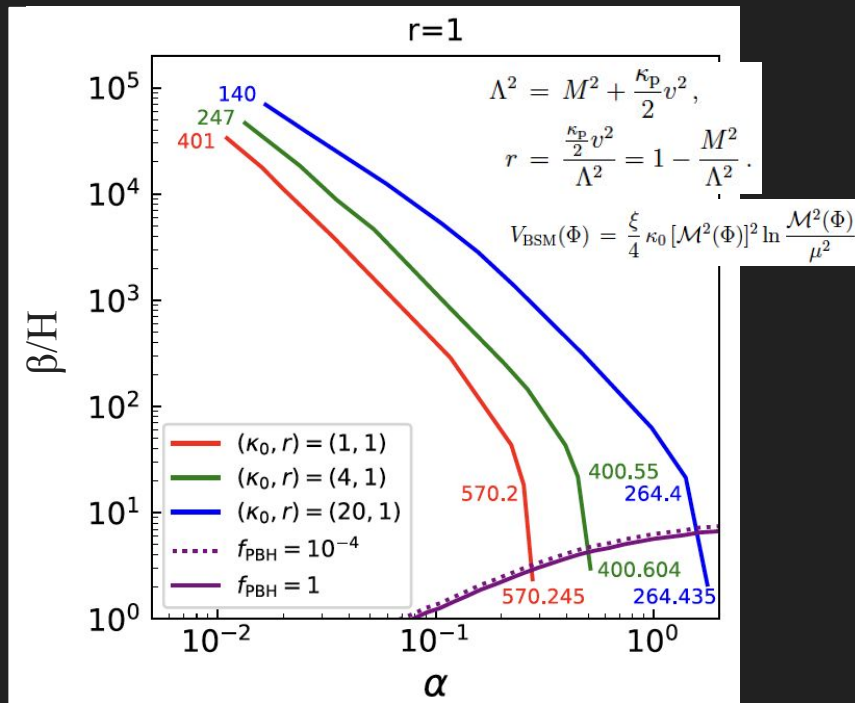


S. Kanemura, R. Nagai and M. Tanaka, JHEP 06  
(2022), 027, [arXiv:2202.12774 [hep-ph]]

# Nearly aligned Higgs effective field theory

## ★ この有効理論での数値結果

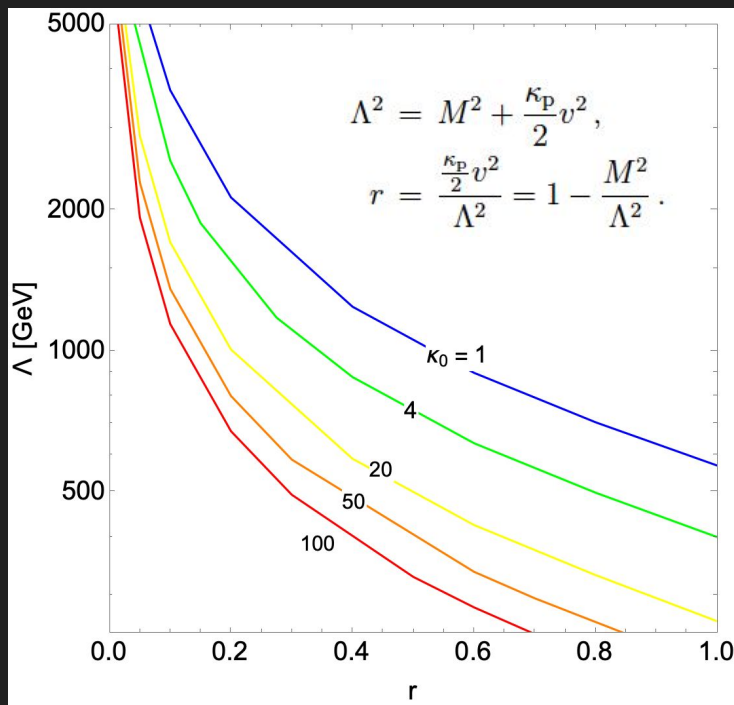
[K. H., S. Kanemura, T. Takahashi, M. Tanaka, 論文準備中]



$f_{\text{PBH}}$  が大きな領域は重力波スペクトルでも検証可能

# Nearly aligned Higgs effective field theory

★ 原始ブラックホールが生成できるパラメータ領域

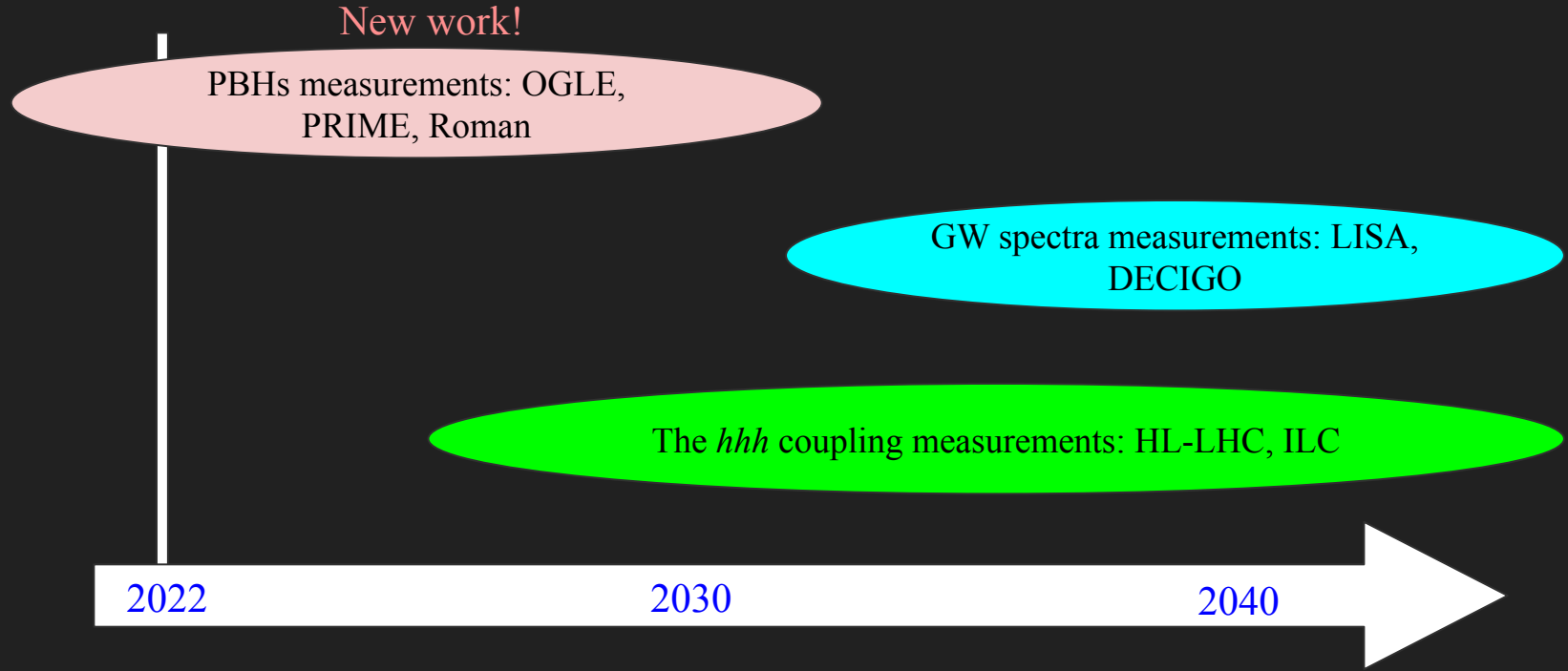


$r \sim 0 \Rightarrow M^2 \gg \frac{\kappa_p}{2}v^2$  Decoupling  
 $r \sim 1 \Rightarrow M^2 \ll \frac{\kappa_p}{2}v^2$  Non-decoupling

[K. H., S. Kanemura, T. Takahashi, M. Tanaka, 論文準備中]

$\kappa_0$ が小さい場合でも、 $r$ が大きければ原始ブラックホールが生成される

# Measurements of PBHs, GW, the $hhh$ coupling



これらの実験で電弱一次相転移の検証できる可能性がある



# Summary

- ★ 強い電弱一次相転移は様々な実験により検証可能である
- ★  $hhh$  結合の精密測定や重力波スペクトルの観測だけでなく、原始ブラックホールの観測がモデルの検証に用いることができる
- ★ 例としてStandard model effective field theory、nearly aligned Higgs effective field theoryに注目した

過冷却で相転移がゆっくりとなるパラメータ領域に対して、原始ブラックホール観測実験が使えるかもしれない

