

# 初期宇宙における一次相転移由来の 原始ブラックホールとその検証可能性

岩井 喬也

大阪大学 素粒子理論研究室 修士1年 指導教員: 兼村晋哉

原子核三者若手 夏の学校

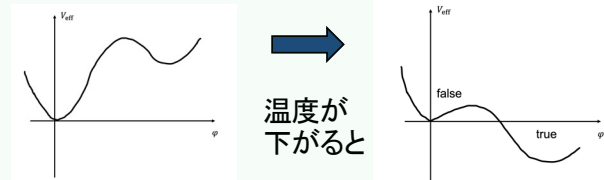
発表年度: 2023年度

## はじめに

標準理論では説明できない現象の一つに物質・反物質の非対称性の問題がある。この問題を説明するためには、宇宙初期に一次相転移が起こる必要があるが、標準模型はクロスオーバーであり相転移は起こらない。したがって一次相転移を引き起こすような、標準模型を拡張した新物理模型を考える必要がある。新物理模型の検証方法としてはコライダー実験や重力波を用いたものが知られているが、ここでは一般の一次相転移によって原始ブラックホール(PBH)が形成されることを説明し、PBHを用いた一次相転移の検証可能性について述べる[1]。

## 一次相転移でのPBH形成

場の真空期待値は有効ポテンシャルの最小値によって決まる。一次相転移では場の真空期待値が不連続に変化する。真空崩壊が起こりfalse真空からtrue真空へ遷移する過程は、トンネル効果によって非同時に起こる。



true vacuumに遷移した領域は泡のように見立てることができる。臨界半径より大きい真空泡が形成されると、泡同士が衝突、結合しながら成長し、相転移完了後は宇宙全体を覆う。

真空泡の核形成率は

$$\Gamma(t) = \Gamma_0 e^{\beta t} \quad \beta = -\frac{dS_3}{dt} \approx \frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{dt}$$

1/β: 相転移の速さを表すパラメータ S<sub>3</sub>: 有限温度でのユークリッド作用 False真空に留まっている割合は

$$F(t) = \exp \left[ -\frac{4\pi}{3} \int_{t_i}^t dt' \Gamma(t') a^3(t') r^3(t, t') \right]$$

a: スケールファクタ r: 共動半径

宇宙のエネルギー保存の式は、

$$\frac{d(\rho_r + \rho_w)}{dt} + 4H(\rho_r + \rho_w) = \left( -\frac{d\rho_v}{dt} \right)$$

H: ハッブルパラメータ ρ<sub>r</sub>, ρ<sub>w</sub>, ρ<sub>v</sub>: 輻射, 泡の壁, 真空のエネルギー密度

α(t) =  $\frac{\Delta V}{\rho_r(t)}$  とすると、αは相転移中に真空が輻射浴に解放したエネルギー(潜熱)の割合を表し、相転移の強さを表すパラメータとなる。

相転移完了条件は

$$\left. \frac{\Gamma}{H^4} \right|_{T=T_*} \approx 1$$

で与えられる。

泡が成長する過程で、泡同士の衝突が起こる。この際泡表面のエネルギーが重力波として解放される。発生する重力波のエネルギースペクトルΩ<sub>GW</sub>とピーク周波数f<sub>p</sub>はそれぞれ次のようになる。

$$\Omega_{GW} h^2(f_p) \approx 1 \times 10^{-6} \left( \frac{H_*}{\beta} \right)^2 \left( \frac{\kappa \alpha_*}{1 + \alpha_*} \right)^2$$
$$f_p \approx \left( \frac{\beta}{H_*} \right) \frac{T_*}{100 \text{ GeV}} \approx 1 \times 10^5 \text{ Hz} \quad * : \text{相転移の温度でのパラメータ}$$

個々のハッブル体積における真空の崩壊は確率的であり、真空崩壊が遅れる確率がある

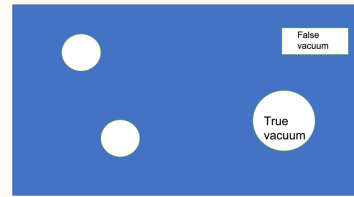
$$P(t_n) = \exp \left[ -\frac{4\pi}{3} \int_{t_i}^{t_n} dt \Gamma(t) a^3(t) \right]$$

ρ<sub>r</sub>, ρ<sub>w</sub> ∝ a(t)<sup>-4</sup>, ρ<sub>v</sub> = constであるから、相転移が遅れた領域のエネルギー密度が他の領域と比べ高くなる。 $\frac{\rho_{\text{inside}}}{\rho_{\text{outside}}}$ が閾値1 + δ<sub>c</sub>

(δ<sub>c</sub> = 0.45)を超えると重力崩壊を起こしPBHを形成する。この時のPBHの質量は

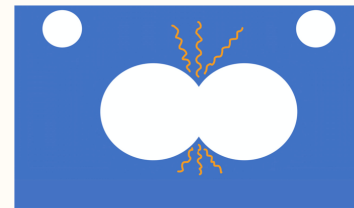
$$M \approx \frac{4\pi}{3} \gamma H^{-3}(t_{PBH}) \rho_c = 4\pi H^{-1}(t_{PBH})$$

## 相転移のイメージ



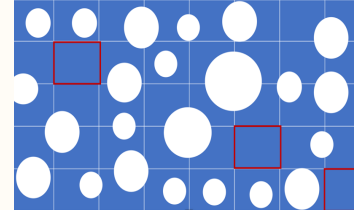
相転移が始まると、真空泡の核形成が始まる。臨界半径より大きい真空泡は成長し宇宙を覆っていく

### GW生成のメカニズム



泡が成長し泡が衝突する現象が空間の各点で起こる。泡が衝突し結合する際、表面のエネルギーが重力波として宇宙に放射される。

### PBH生成のメカニズム



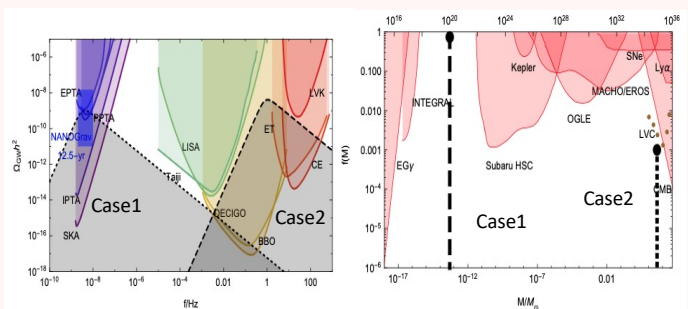
相転移が遅れ、falseの真空中に留まるハッブル体積の領域ができる。これらの領域は相転移が完了した領域よりもエネルギー密度が高くなり、 $\frac{\rho_{\text{inside}}}{\rho_{\text{outside}}}$ が閾値1 + δ<sub>c</sub> (δ<sub>c</sub> = 0.45)を超えると重力崩壊を起こしPBHを形成する。

PBHの残存量はαが大きくβが小さいほど多くなる

PBHの質量は相転移中のハッブル体積に依存する。

## PBHとGWを用いた一次相転移の検証可能性

αは相転移の強さを表すパラメータであり、α > 1は強い相転移、α < 1は弱い相転移を表す。以下ではPeccei-Quinn axion modelを例に強い相転移(Case1)と弱い相転移(Case2)を考える。



Case1では、PBHは10<sup>20</sup>gとなり全てのダークマタを構成できる可能性があり、GWは既存の観測結果を満たしながら、DECIGOなどの将来実験で観測できる。Case2では、γ = 1/5とするとρ<sub>PBH</sub>/ρ<sub>DM</sub> = 10<sup>-3</sup>となりLIGO-Virgoで観測された合体現象を説明でき、GWはNANO Grvによって観測されたスペクトルを説明できる可能性がある。

## 電弱一次相転移への応用

電弱一時相転移由来のPBHの質量は

$$M \approx 10^{-5} M_{\odot}$$

この質量のPBHは、OGLE、Subaru HSCで観測できる。[2]

[1] Liu et al. Phys. Rev. D 105, L021303(2022)

[2] K. Hashino, S. Kanemura and T. Takahashi, Phys. Lett. B 833 (2022), 137261.