
Primordial black holes from inverted bubble collapse

桜井 巨大 (鶴岡高専)



共同研究者:

高橋 史宜 (東北大)、村井 開 (東北大)

[*JHEP* 07 (2025) 065]

目次

- インTRODクシヨン
- inverted bubble collapse mechanism (反転バブル崩壊機構)
- 具体的な模型への適用
- まとめ

暗黒物質

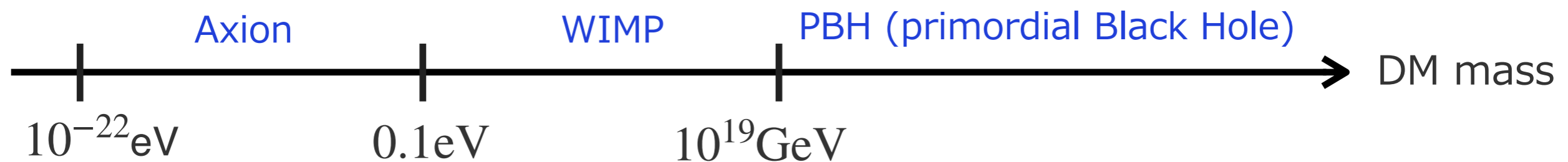
- 様々な暗黒物質(DM)の観測的証拠がある:

銀河の回転曲線, 重力レンズ効果,
宇宙の大規模構造、CMBのゆらぎ,...

- DMの正体は未解明だが、いくつかの性質はわかっている:

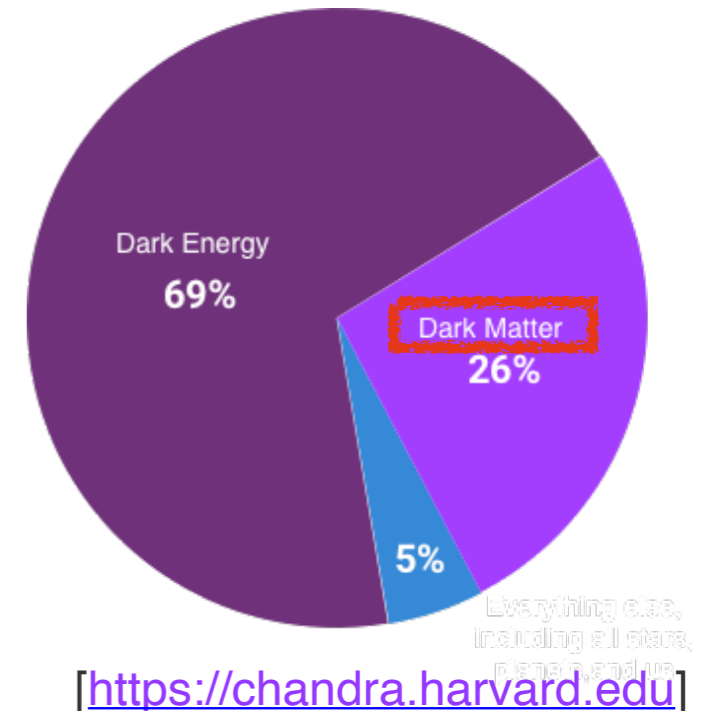
- 安定
- 電氣的に中性
- 弱い相互作用
- 冷たい。

- 広い質量スケール



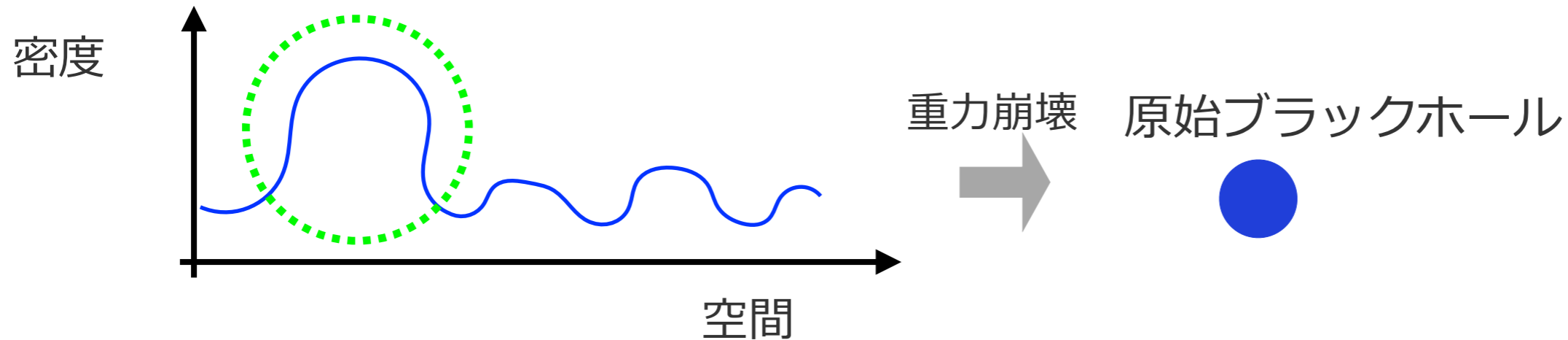
- 有望な候補: **原始ブラックホール (primordial black Hole, PBH)**

- 新粒子を必要としない。
- 標準理論では十分な量のPBHを生成できない。PBHを生成する為にはBSMが必要。



原始ブラックホール

- 宇宙初期に大きな密度揺らぎがあるとその領域が重力崩壊してブラックホールが生成される。



- 様々な質量を持ち得る： $10^{-5}\text{g} \lesssim M_{\text{PBH}} \lesssim 10^{17-18}M_{\odot}$ $M_{\odot} = 1.988 \times 10^{30} \text{ kg}$

(星の進化から作られるブラックホールの質量の下限は、太陽質量の約3倍程度。)

- 原始ブラックホールは暗黒物質の性質を満たしている：

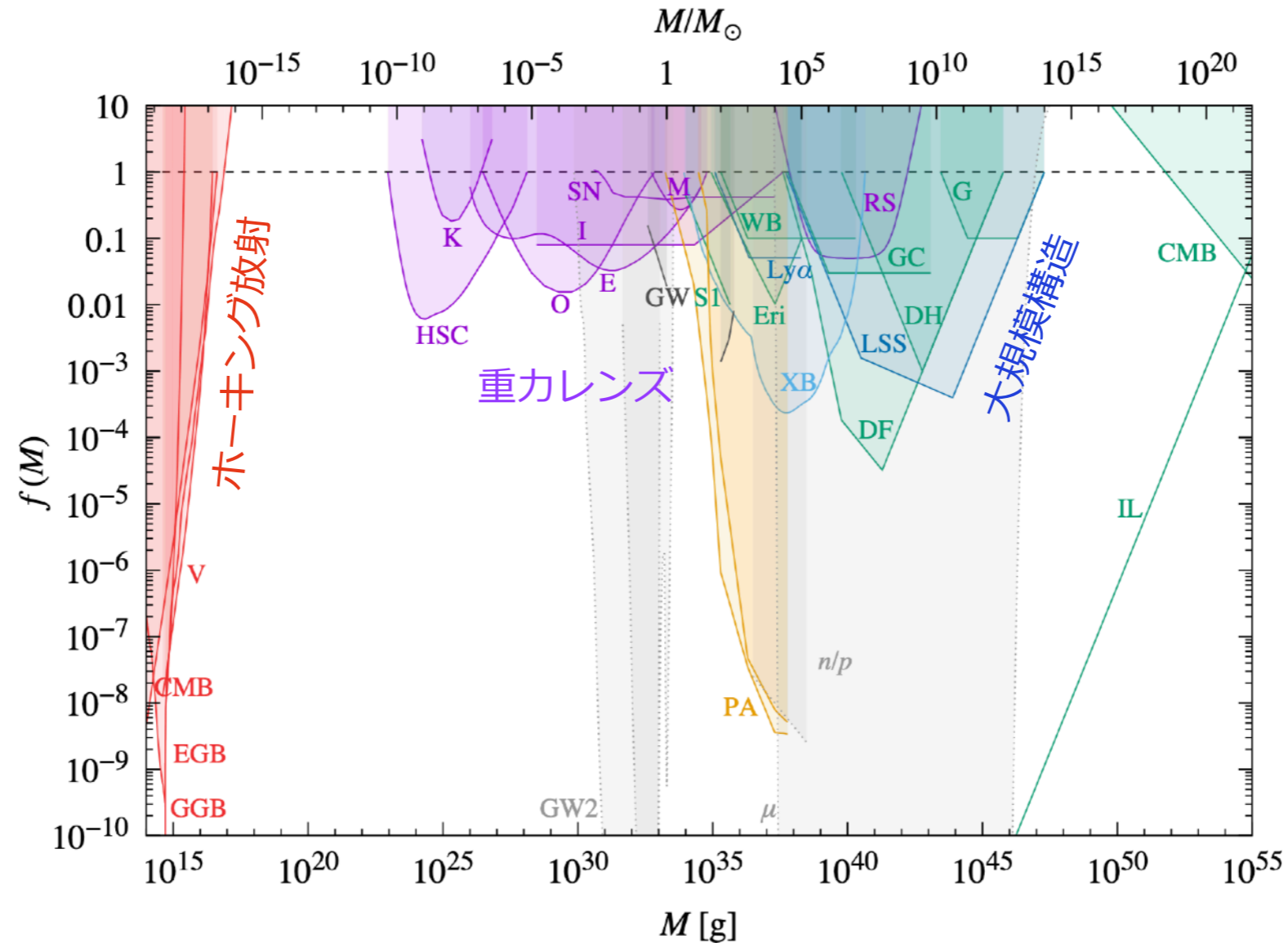
- 10^{15}g 以上のBHは安定 (これ以下の質量だとホーキング放射で現在までに蒸発)
- ブラックホールは電氣的に中性
- 重力しか相互作用しない。
- ほとんど止まった状態で作られる。

暗黒物質の性質：

- 安定、宇宙年齢より長寿命。
- 電氣的に中性。
- 通常物質や自分自身と弱い相互作用しかしない。
- 冷たい (ほとんど動かない)。

PBHに対する制限

[Carr, Kohri, Sendouda, Yokoyama, Rept.Prog.Phys. 84 (2021) 11, 116902]



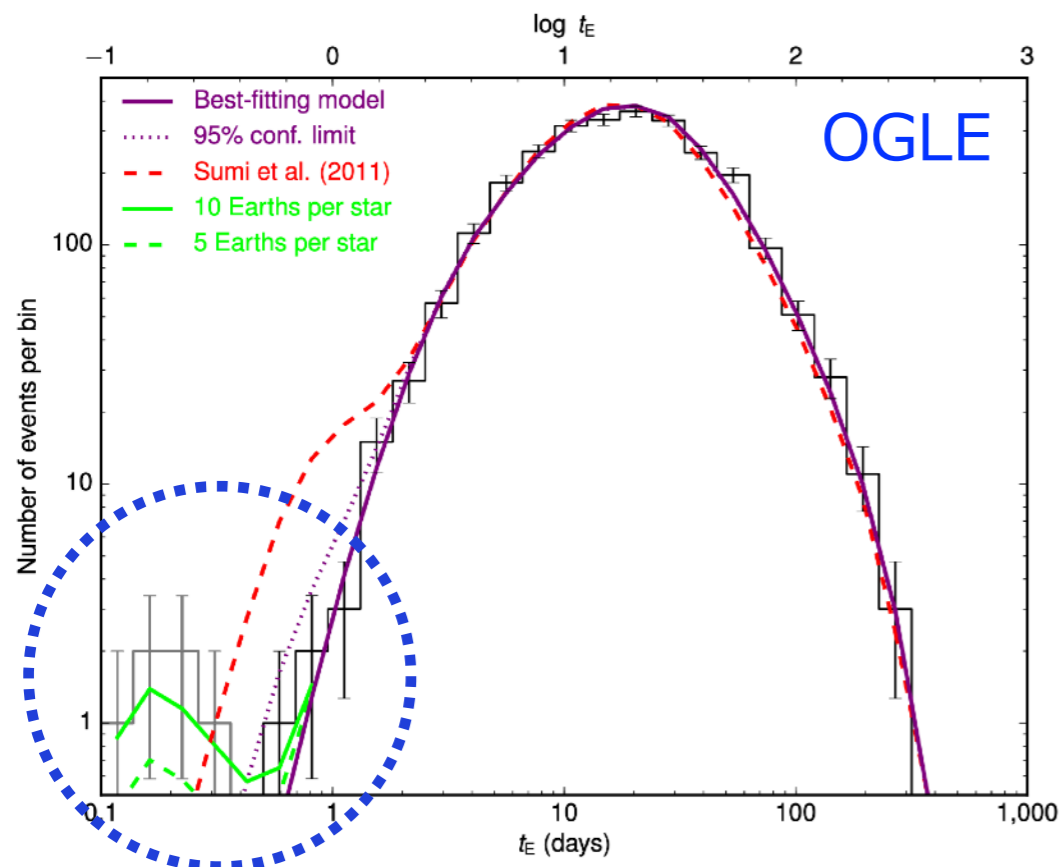
$$f = \frac{\rho_{\text{PBH}}}{\rho_{\text{CDM}}}$$

- 様々な質量領域が制限されている。
 - $M \lesssim 10^{15} \text{g}$: ホーキング放射により蒸発 → ガンマ線・電子・ニュートリノ放出
 - $10^{15} \text{g} \lesssim M \lesssim M_{\odot}$: 重力レンズにより探索
 - $M_{\odot} \lesssim M$: 銀河形成、大規模構造 (LSS)、星団 (GC)、X線連星 (XB) などの影響
- $M \sim 10^{-10} M_{\odot}$ の場合、暗黒物質の主要成分になれる。

Hints of PBH in the Earth mass region

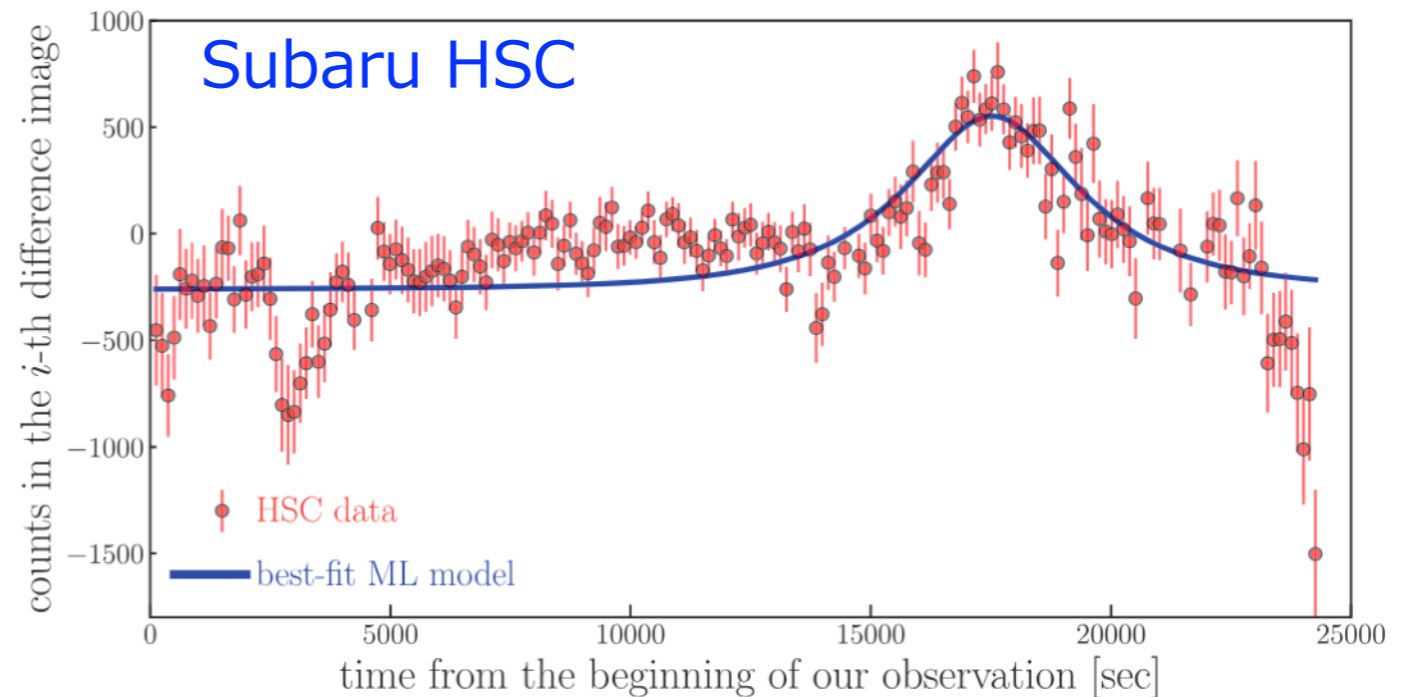
- OGLEは銀河バルジにおける星の観測を5年間行い、短時間領域における6つの超過イベントを観測した。(長時間領域は主系列星や白色矮星等の標準的な重力レンズイベントで説明できる)これは $M \sim 10^{-6} M_{\odot}$ 程度のPBHを示唆する。
- すばるHSCはアンドロメダ銀河の観測を行い、変光天体からのBGを除外した後、1時間程度の短時間スケールの重力レンズイベントを一つ発見した。これは $M \sim 10^{-8} M_{\odot}$ のPBHを示唆。

[Mroz, et. al., Nature 548 (2017)]



[Niikura, et. al., Nature Astron. 3 (2019)]

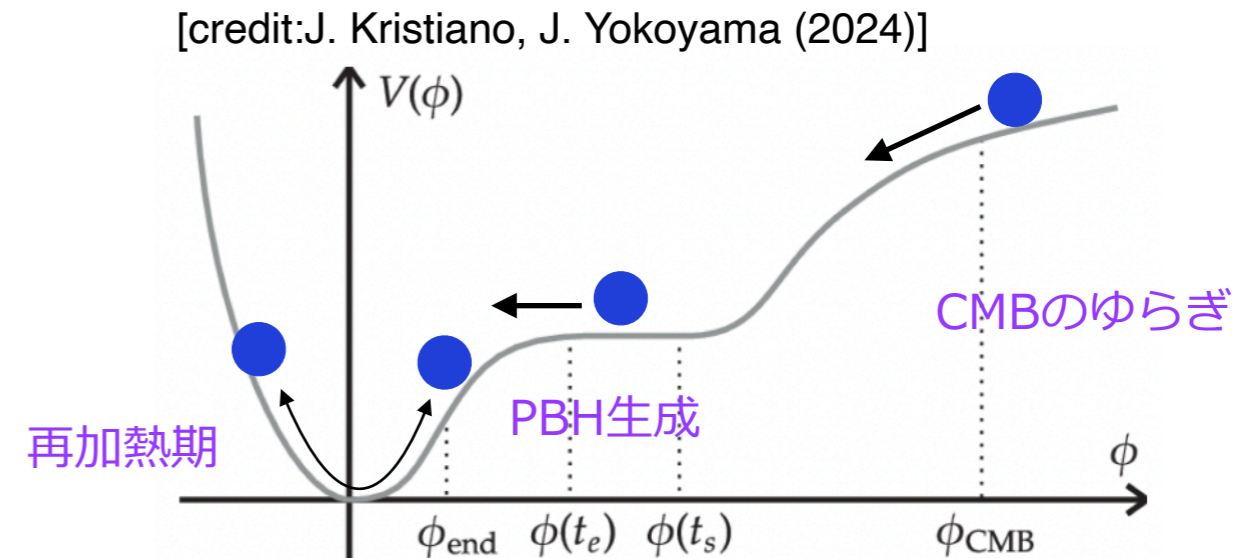
ML: マイクロレンズモデル



PBH生成シナリオ

- **インフレーション:** [S. W. Hawking, Commun. Math. Phys. 25, 152 (1972); B. J. Carr, S. W. Hawking, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 168, 399 (1974); B. J. Carr, Astrophys. J. 201, 1 (1975); Y. B. Zel'dovich, I. D. Novikov, Sov. Astron. 10, 602 (1967), etc.]

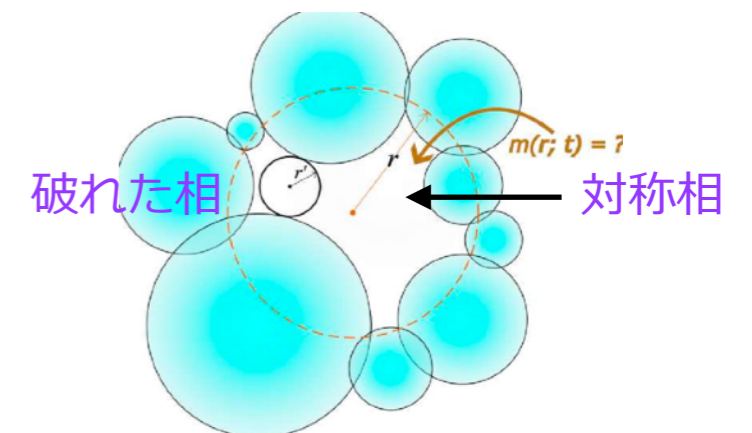
- インフレーションの間に大きな曲率揺らぎを作る。
- インフラトンポテンシャルの微調整問題。



- **強い一時相転移** [K. Sato, M. Sasaki, et. al., Prog. Theor. Phys. 65, 1443 (1981), Prog. Theor. Phys. 66, 2052 (1981), PLB 108, 98; H. Kodama, M. Sasaki, K. Sato, Prog. Theor. Phys. 68, 1979 (1982); K. Jedamzik, J. C. Niemeyer, PRD 59,124014 (1999); etc.]

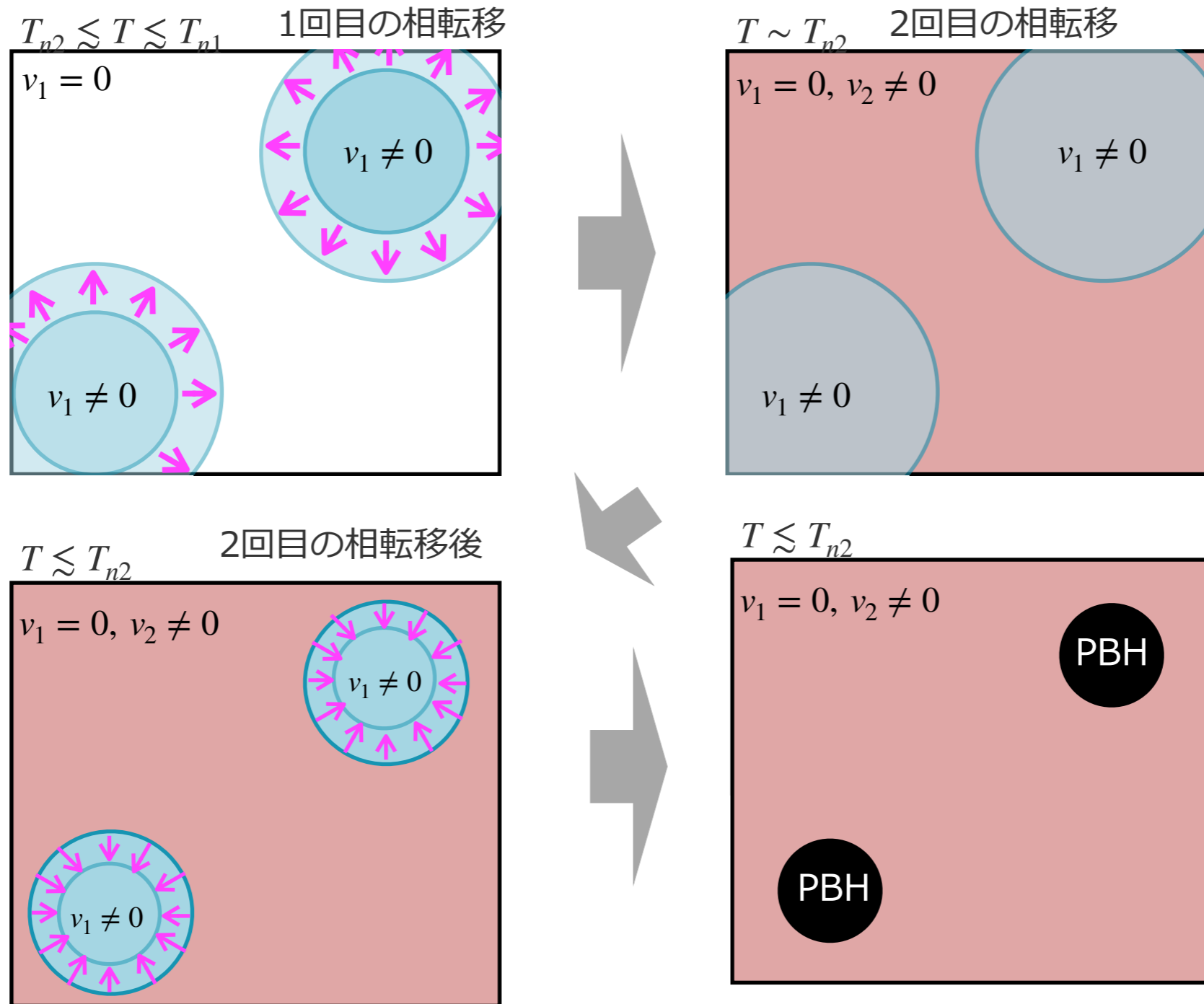
- 相転移時に、エネルギーのムラができ、過密領域がPBHを形成。
- 過密領域が球対称からずれている可能性がある。

[credit:Piotr Toczek]



➡ これらのシナリオに代わる新しいPBH生成シナリオを提案する。

反転バブル崩壊機構の概観



- バブル同士は互いに衝突しない。
- 生成したバブルは球対称。

- 二つ目の相転移は1次でも2次でもどちらでもよい。

反転バブル崩壊機構

セットアップ： **標準理論** + X_1 + X_2 X_1, X_2 : 付加的ヒッグス

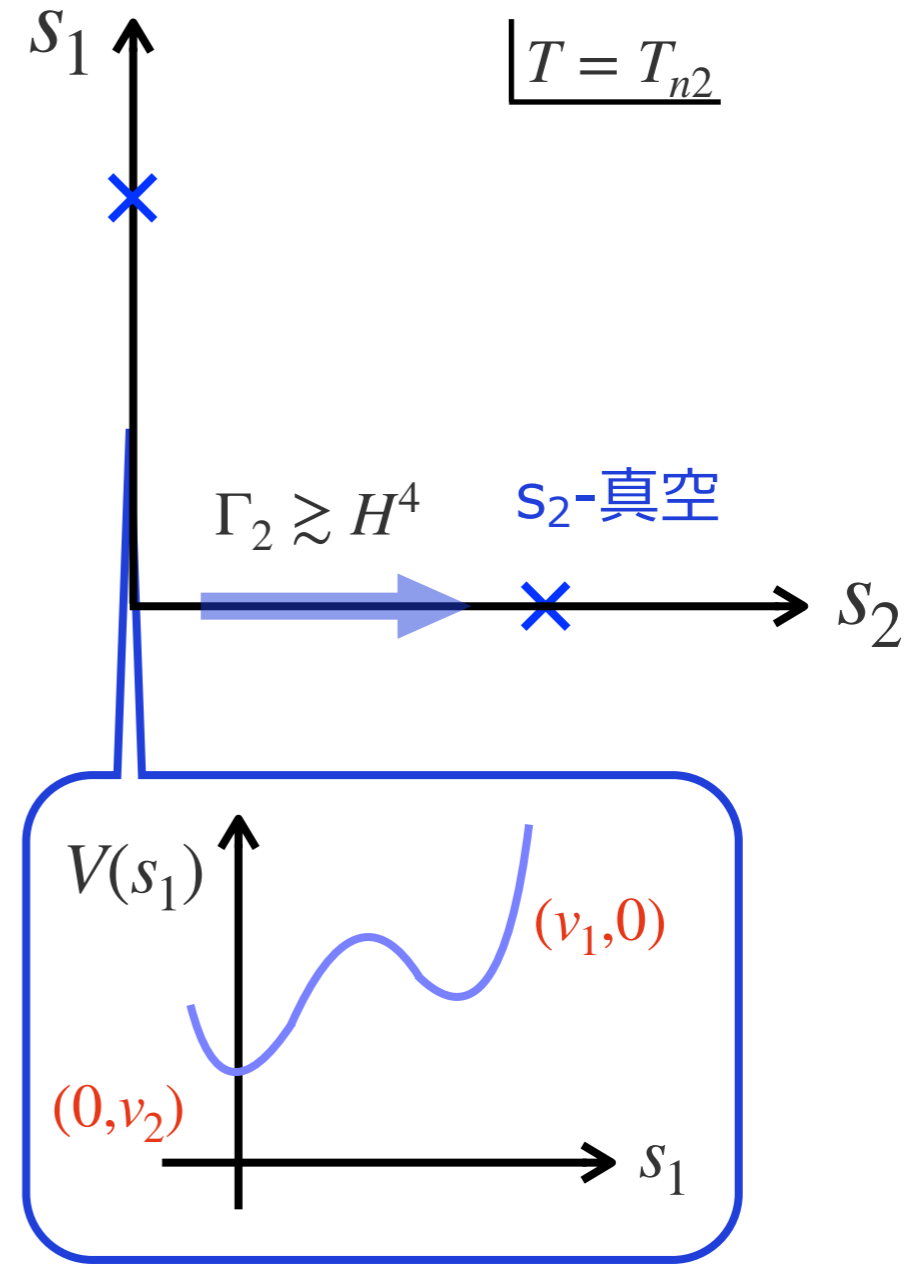
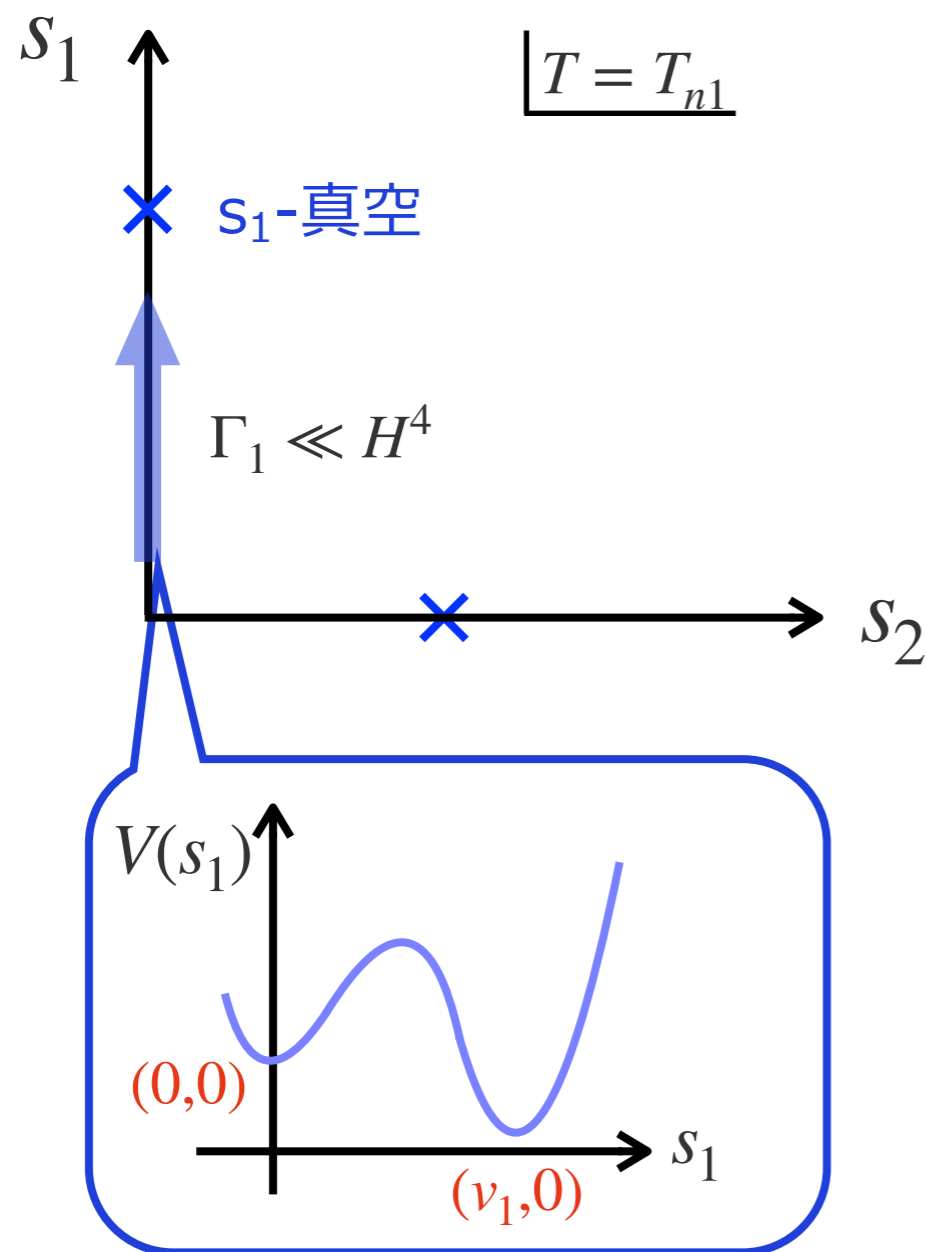
- 追加するヒッグスのスケールに依らない。
- シングレット模型への応用を考える。 $(X_1, X_2) = (S_1, S_2)$ S_1, S_2 : Singlet Higgs
- 追加したヒッグスの真空期待値が電弱スケール($\sim 246\text{GeV}$)程度だとすると、PBHの質量は $\mathcal{O}(10^{-6}-10^{-5})M_\odot$ 程度となる。

$$M_{\text{PBH}} \sim M_H \sim \frac{M_{\text{pl}}^3}{T^2} \sim 10^{-5} M_\odot \quad \begin{array}{l} [\because \text{ホライズン質量 } M_H \simeq \frac{4\pi}{3} R_H^3 \rho] \\ [\because \text{放射優勢期を仮定 } \rho = \rho_r = \frac{\pi^2}{30} g_* T^4] \end{array}$$

↔ スバル望遠鏡実験やOGLEで観測されているマイクロレンズイベントを説明できる。

- PBH生成可能性やPBHそれ自身の性質はスカラーポテンシャルの形状に直結

相転移の概略図



①: 最初の相転移は s_1 方向に起きる。

- この相転移は**完了しない**。
- $(v_1, 0)$ は**真の真空**。

②: 二つ目の相転移は s_2 方向に起きる。

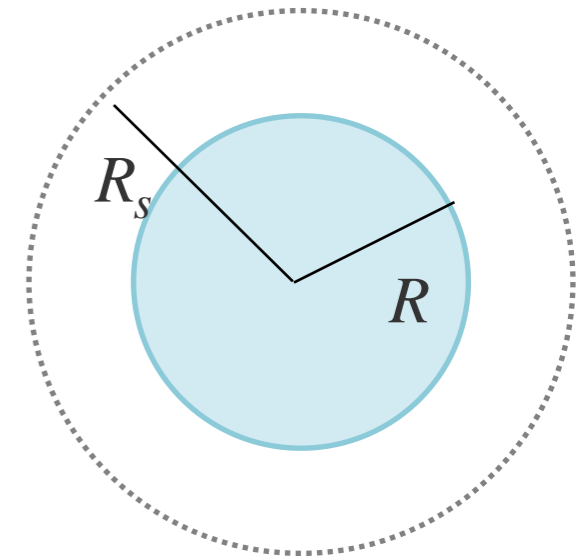
- この相転移は**完了する**。
- $(v_1, 0)$ は**偽真空**。

PBH形成の条件

- バブルの大きさがシュバルツバルト半径以下になる。

$$R_s = 2G\epsilon M_b \gtrsim \delta$$

(δ : バブルウォールの厚さ)



- バブルの壁がランナウェイ(加速し続ける)になる。

- 真空エネルギーがバブル壁の運動エネルギーに転換される。

- バブルの壁が加速される。

- エフィシエンシーファクター $\epsilon (\lesssim 1)$ $\epsilon = \frac{E_{\text{kin}}^W}{M_b}$ (M_b : バブルのエネルギー)

→ ランナウェイケース $\epsilon = 1$

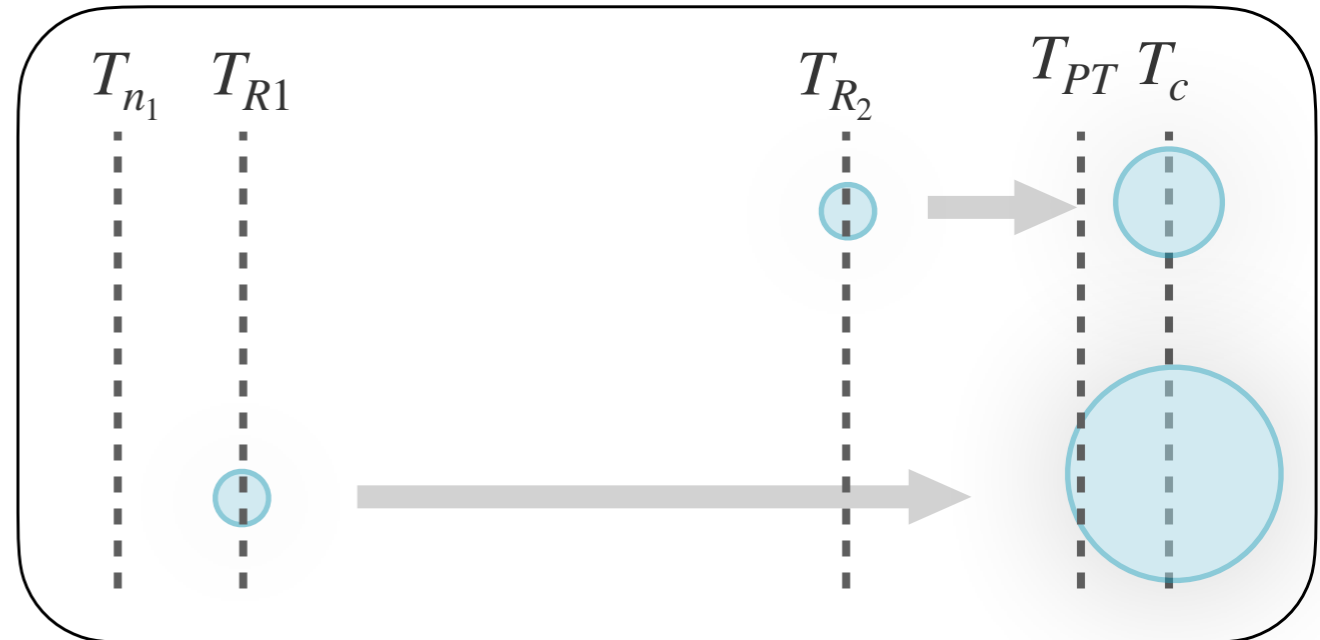
PBH質量

$$M \simeq M_b \simeq \frac{4\pi}{3} R^3 \Delta V \simeq \frac{4\pi}{3} \left\{ \frac{1}{H_c} \left(1 - \frac{T_c}{T_R} \right) \right\}^3 \Delta V, \quad H_c \simeq \left(\frac{\pi^2}{90 m_{\text{pl}}^2} g_* \right)^{1/2} T_c^2$$

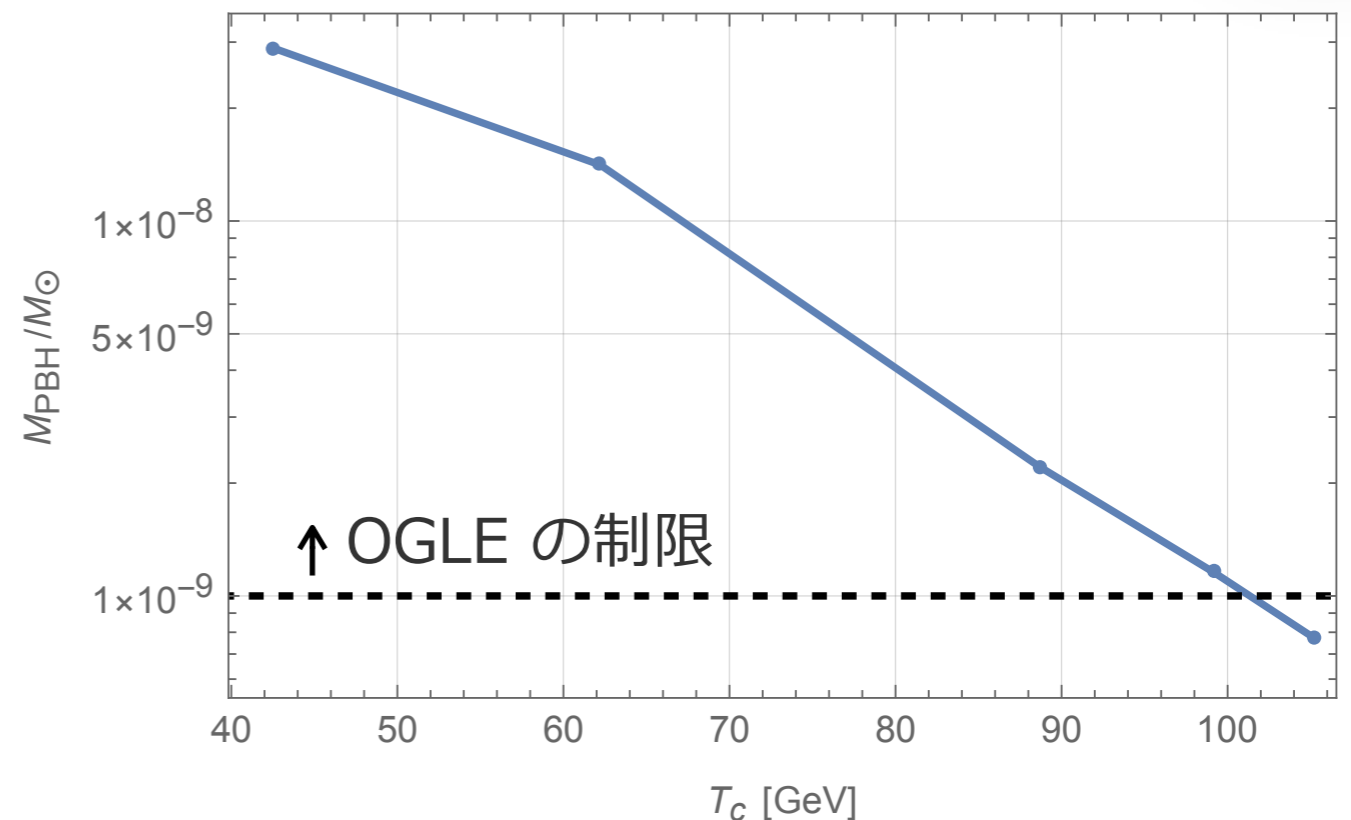
- PBH質量Mは T_c と T_R に依存する。

T_R : 半径Rになる泡が生成される温度

T_c : 泡が収縮する温度



- T_c が小さい場合, M は T_c^{-6} で成長する。



PBH残存量[1/2]

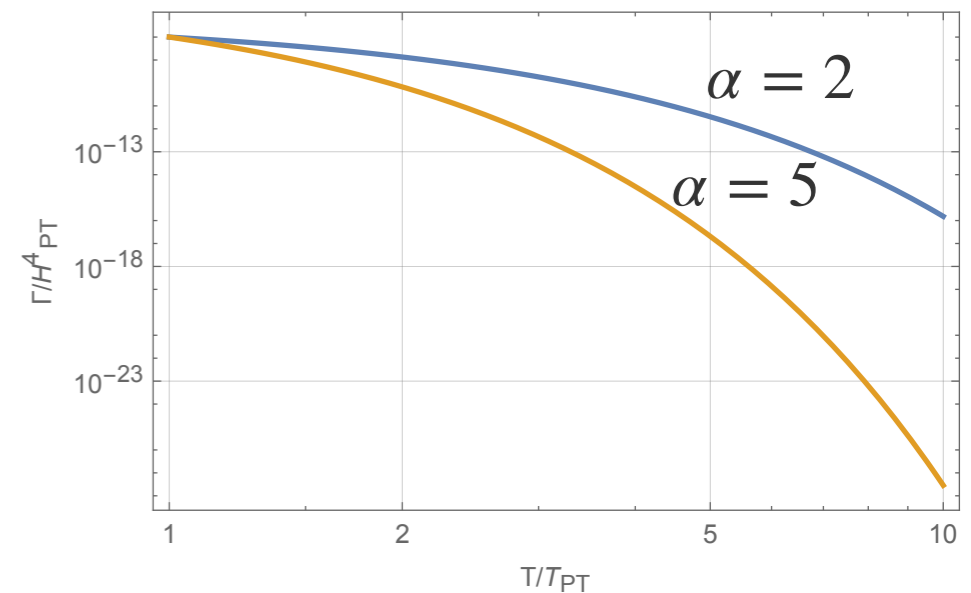
$$\frac{d\rho_{\text{PBH}}}{d \ln M}(t) = M \frac{dn_b}{dR}(t_c) \frac{dR}{d \ln M_b} \left(\frac{a(t_c)}{a(t)} \right)^3 = \frac{MR \Gamma(T_R) t_R^2}{3 v t_c^2} \left(\frac{a(t_c)}{a(t)} \right)^3,$$

➔ $\frac{df_{\text{PBH}}}{d \ln M} \simeq \frac{1}{0.44 \text{ eV}} \frac{45}{2\pi^2 g_{*s}(T_c) T_c^3} \frac{c M H_{\text{PT}}^4}{3v} \left(\frac{3M}{4\pi\epsilon\Delta V} \right)^{1/3} \left[\frac{T_c}{T_R} \right]^4 \propto M^{4/3}$

[$\alpha = 0$]

- 2回目の相転移付近でバブル核形成率を次のように仮定

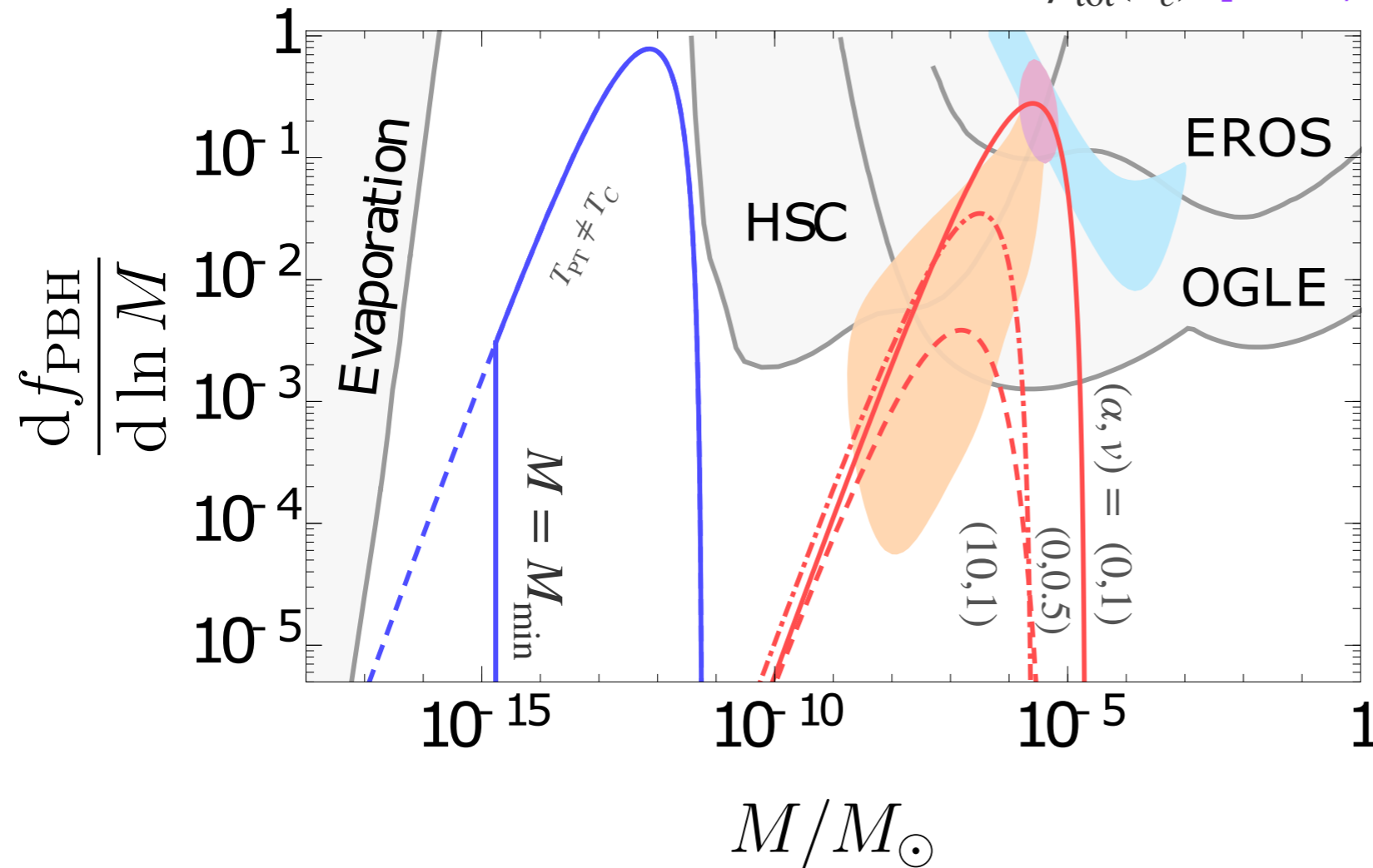
$$\Gamma(T) \simeq \begin{cases} c H_{\text{PT}}^4 e^{-\alpha \frac{T - T_{\text{PT}}}{T_{\text{PT}}}} & \text{for } T \geq T_{\text{PT}} \\ 0 & \text{for } T < T_{\text{PT}} \end{cases}$$



- PBH質量の式: $M \simeq M_b \simeq \frac{4\pi}{3} R^3 \Delta V$

PBH残存量[2/2]

$\nu = 1, \epsilon = 1, \alpha = 0, \Delta V = 0.1\rho_{\text{tot}}(T_c)$ [Murai, KS, Takahashi]



	(a)	(b)
$T_{\text{PT}}[\text{GeV}]$	15	3×10^4
$T_c[\text{GeV}]$	15	2.8×10^4
c	10^{-8}	10^{-11}

- 重カレンズイベント (スバルHSC)
- 重カレンズイベント (OGLE)
- Combined results

[Sugiyama, Takada, Kusenko, PLB 840 (2023)]

- 小さい ν 又は大きな α は f_{PBH} を減らす。
- $T_{\text{PT}} \neq T_c$ の場合 $M = M_{\text{min}}$ になり得る (これは $t_R = t_{\text{PT}}$ に対応)。
- (a) $T_c = \mathcal{O}(10)\text{GeV}$ の場合重カレンズイベントを説明できる。
- (b) $T_c = \mathcal{O}(10^3)\text{GeV}$, 暗黒物質の主要な成分となれる。

具体的な模型: two real singlet scalar 模型

- particle contents: Z_2 対称性

$$\Phi = \begin{bmatrix} G^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v + \phi + iG^0) \end{bmatrix} \quad : \text{電弱相転移, } Z_2 \text{ even}$$

$$S_1 = v_1 + s_1 \quad : s_1 \text{方向の相転移, } Z_2\text{-even}$$

$$S_2 = v_2 + s_2 \quad : s_2 \text{方向の相転移, } Z_2\text{-odd}$$

- Physical states: h, H_1, H_2 $\begin{pmatrix} \phi \\ s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} = R_\theta \begin{pmatrix} h \\ H_1 \\ H_2 \end{pmatrix},$

- ヒッグスポテンシャル:

V は shift invariant $s_1 \rightarrow s_1 + v'_1$.

$$V(\Phi, S_1, S_2) = \left. \begin{aligned} & -m_\Phi^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4 + \mu_{\Phi 1} |\Phi|^2 S_1 + \lambda_{\Phi 1} |\Phi|^2 S_1^2 \\ & + t_1 S_1 - m_1^2 S_1^2 + \mu_1 S_1^3 + \lambda_1 S_1^4 \\ & - m_2^2 S_2^2 + \lambda_2 S_2^4 + \lambda_{\Phi 2} |\Phi|^2 S_2^2 + \lambda_{12} S_1^2 S_2^2 + \mu_{12} S_1 S_2^2, \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \longrightarrow v_1 = 0 \\ \Phi + S_1 \\ S_2 \end{array}$$

- 電弱相転移.
- (S_1, S_2) 平面における相転移
- ポテンシャルの温度依存性に関する。

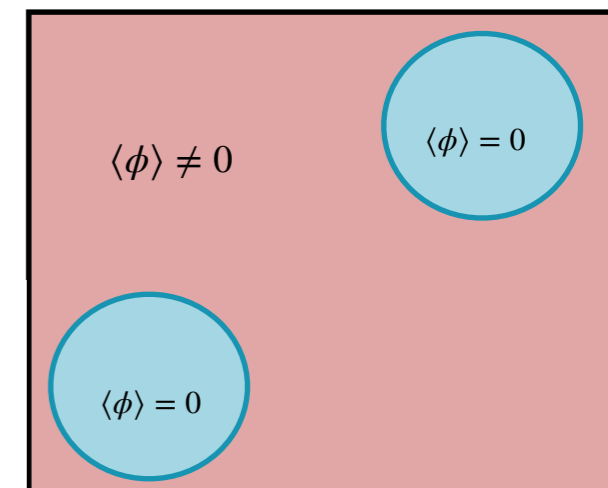
反転バブル崩壊機構の適用

- 一般には3次元方向の相転移が起きる: (ϕ, s_1, s_2)
- PBH生成機構が上手くいく為にはバブルの壁がランナウェイになる必要がある。
 - さもなくば、バブルのエネルギーはプラズマに消失する。
 - 生成されたバブルはPBHになることなく消える。

- バルク相転移が電弱相転移の場合、ランナウェイは起こらない。

[Bödeker, Moore, JCAP 05 (2017) 025]

- 弱ゲージボソンがバブルの壁を通過すると質量を獲得する。
- ソフトな弱ゲージボソンが放出される。これは泡の加速に対して、摩擦として働く。



不完全な相転移 (一回目) : S_1 - 方向

バルク相転移 (二回目) : S_2 - 方向

ベンチマークポイント [1/2]

$$\theta_i = 0, \quad m_{H_1} \simeq 223 \text{ GeV}, \quad m_{H_2} = 246 \text{ GeV},$$

$$\lambda_{12} = 0.5, \quad \mu_1 \simeq -190 \text{ GeV}, \quad \lambda_1 = 0.335,$$

$$v_2 = 70 \text{ GeV}, \quad \lambda_{\Phi 1} = -0.14$$

Tree level potential:

$$V_0 = -m_1^2 s_1^2 + \mu_1 s_1^3 + \lambda_1 s_1^4$$

$$- m_2^2 s_2^2 + \lambda_2 s_2^4 + \lambda_{12} s_1^2 s_2^2,$$

● アライメントリミット：コライダー制限の緩和、 $\rightarrow t_1 s_1 = \mu_{12} s_1 s_2^2 = 0, \quad \mu_{1\Phi} s_1 |\Phi|^2 = 0$
ポテンシャルパラメータを減らす。

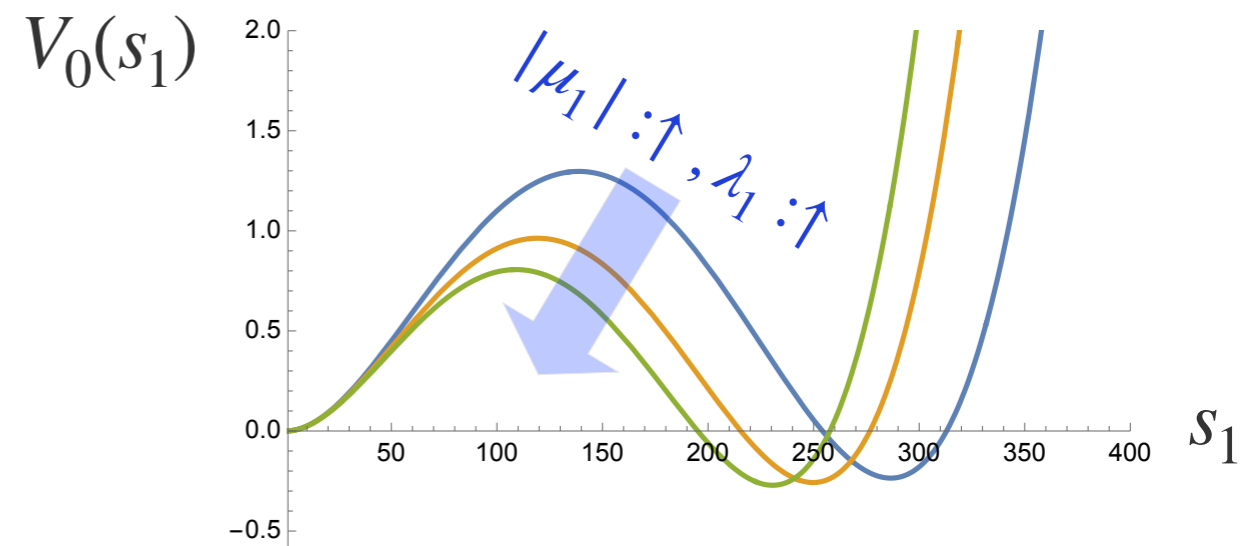
● 電弱スケールの相転移 $\rightarrow T_{n1}, T_{n2} \sim \mathcal{O}(100) \text{ GeV}$

● 有効ポテンシャル V_{eff} の温度依存性を減らす。 $\rightarrow \Gamma_{n1}(T_{n1}) \approx \text{const.}$ より豊富なPBH

$$V_{\text{eff}} \approx V_0 + (c_1 \lambda_{12} + d_1 \lambda_{1\Phi}) T^2 s_1^2 + c_2 \lambda_{12} T^2 s_2^2$$

● $\mu_1 \approx m_2^2, \lambda_1 \sim \mathcal{O}(0.1)$ よりポテンシャルバリアを高くし、浅い真空が得られる。

$$\rightarrow \Gamma_{n1}(T_{n1}) \ll H^4$$



ベンチマークポイント [2/2]

$$\theta_i = 0, m_{H_1} \simeq 223 \text{ GeV}, m_{H_2} = 246 \text{ GeV},$$

$$\lambda_{12} = 0.5, \mu_1 \simeq -190 \text{ GeV}, \lambda_1 = 0.335,$$

$$v_2 = 70 \text{ GeV}, \lambda_{\Phi_1} = -0.14$$

Tree level potential:

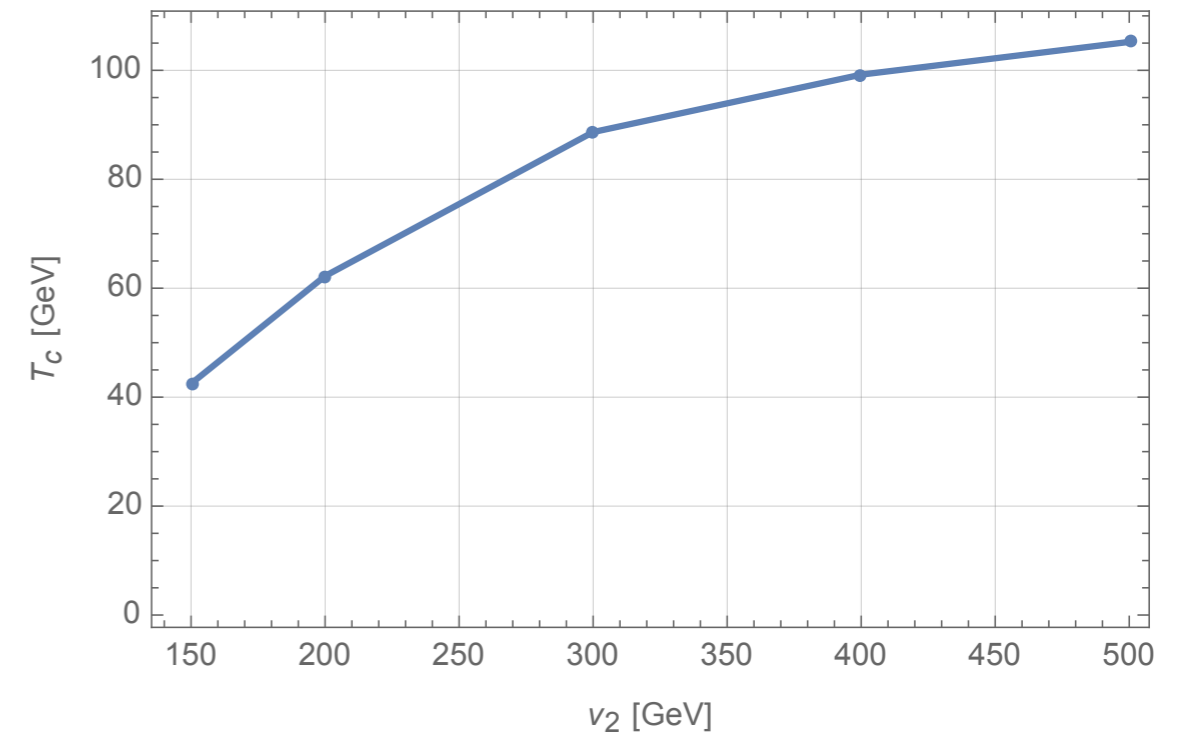
$$V_0 = -m_1^2 s_1^2 + \mu_1 s_1^3 + \lambda_1 s_1^4$$

$$- m_2^2 s_2^2 + \lambda_2 s_2^4 + \lambda_{12} s_1^2 s_2^2,$$

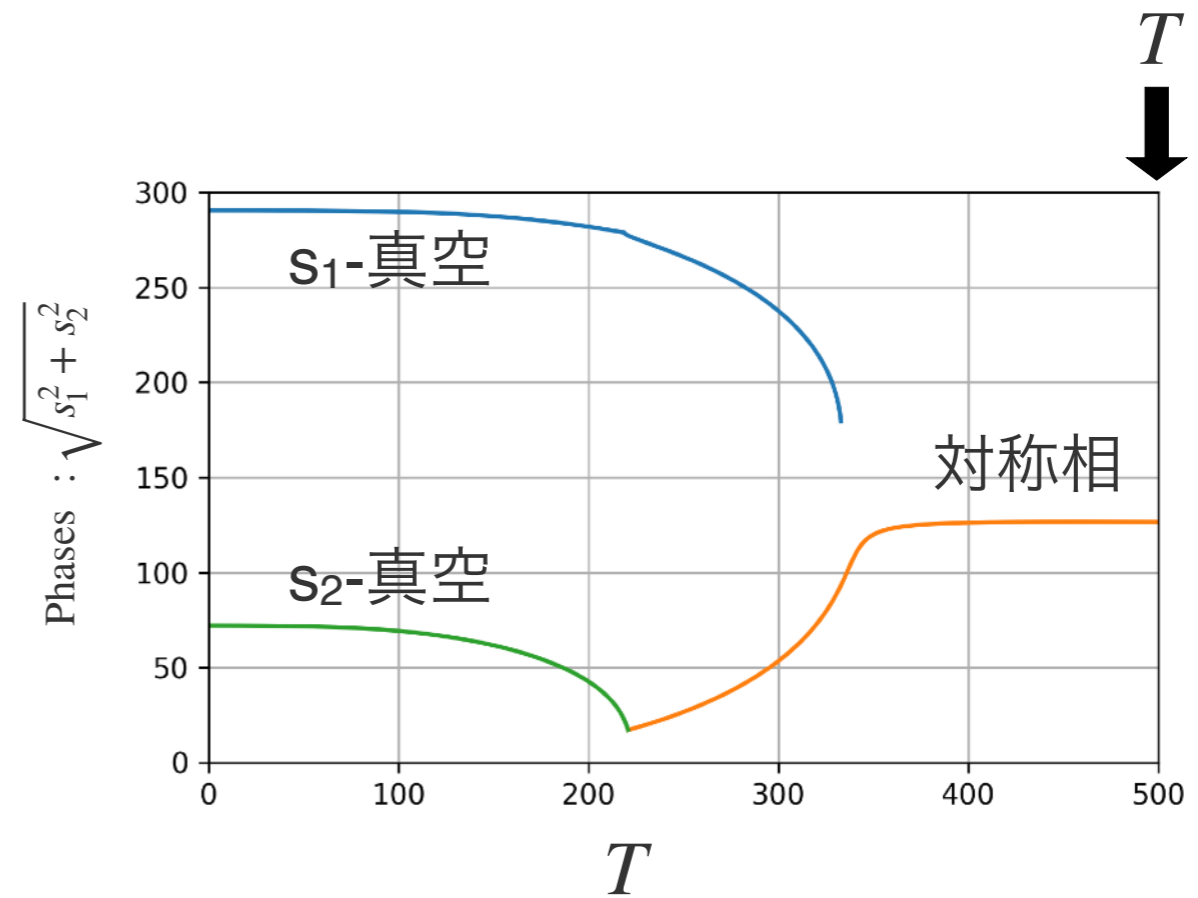
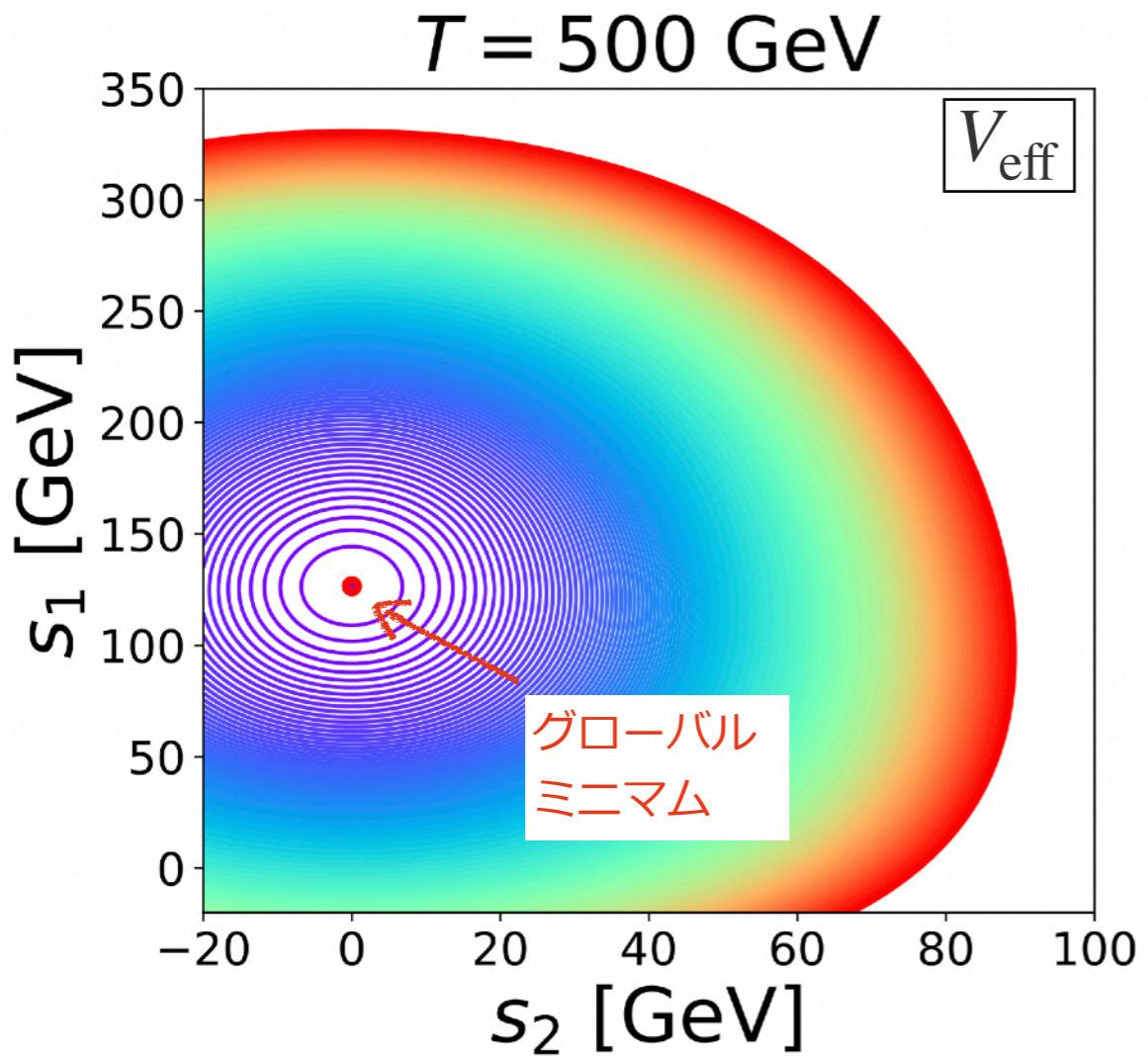
○ v_2 を小さくすると T_c が小さくなる。



PBH質量を大きくすると残存量が大きくなる。

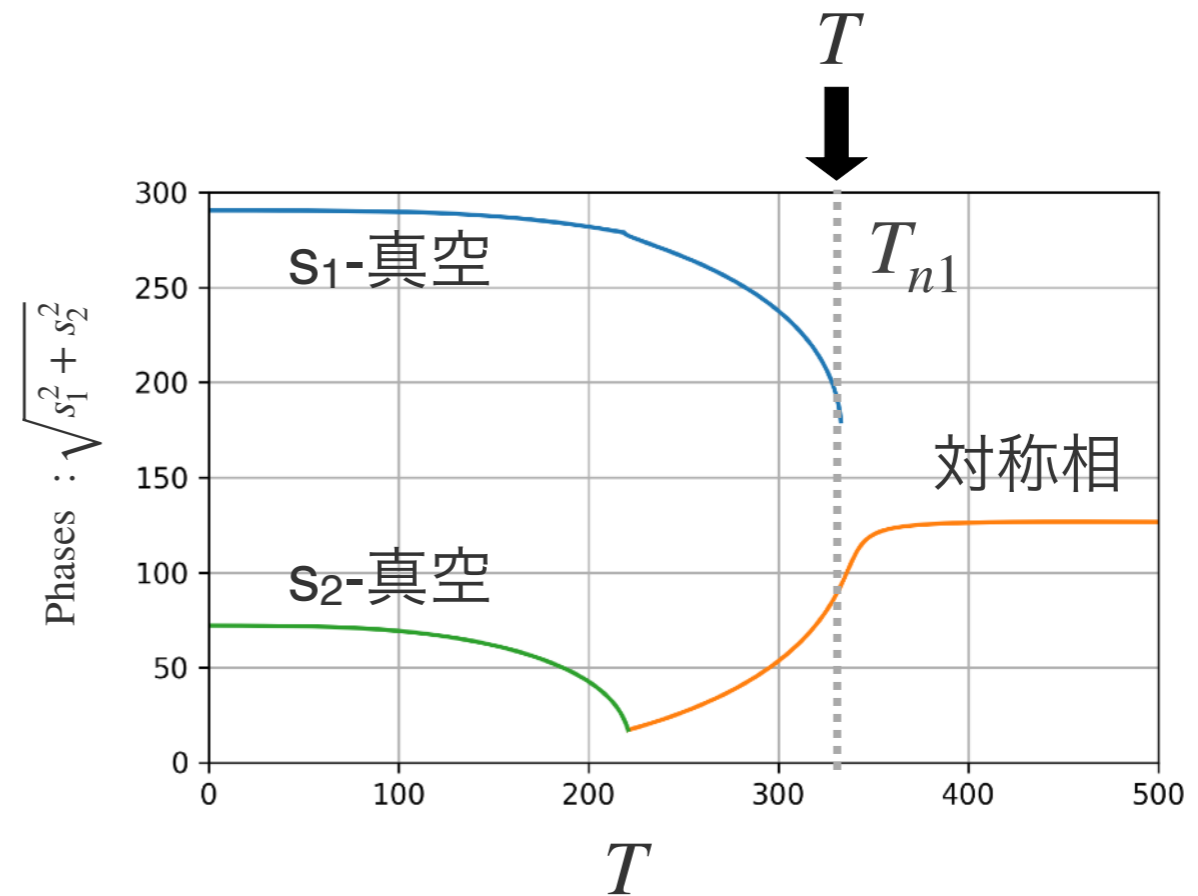
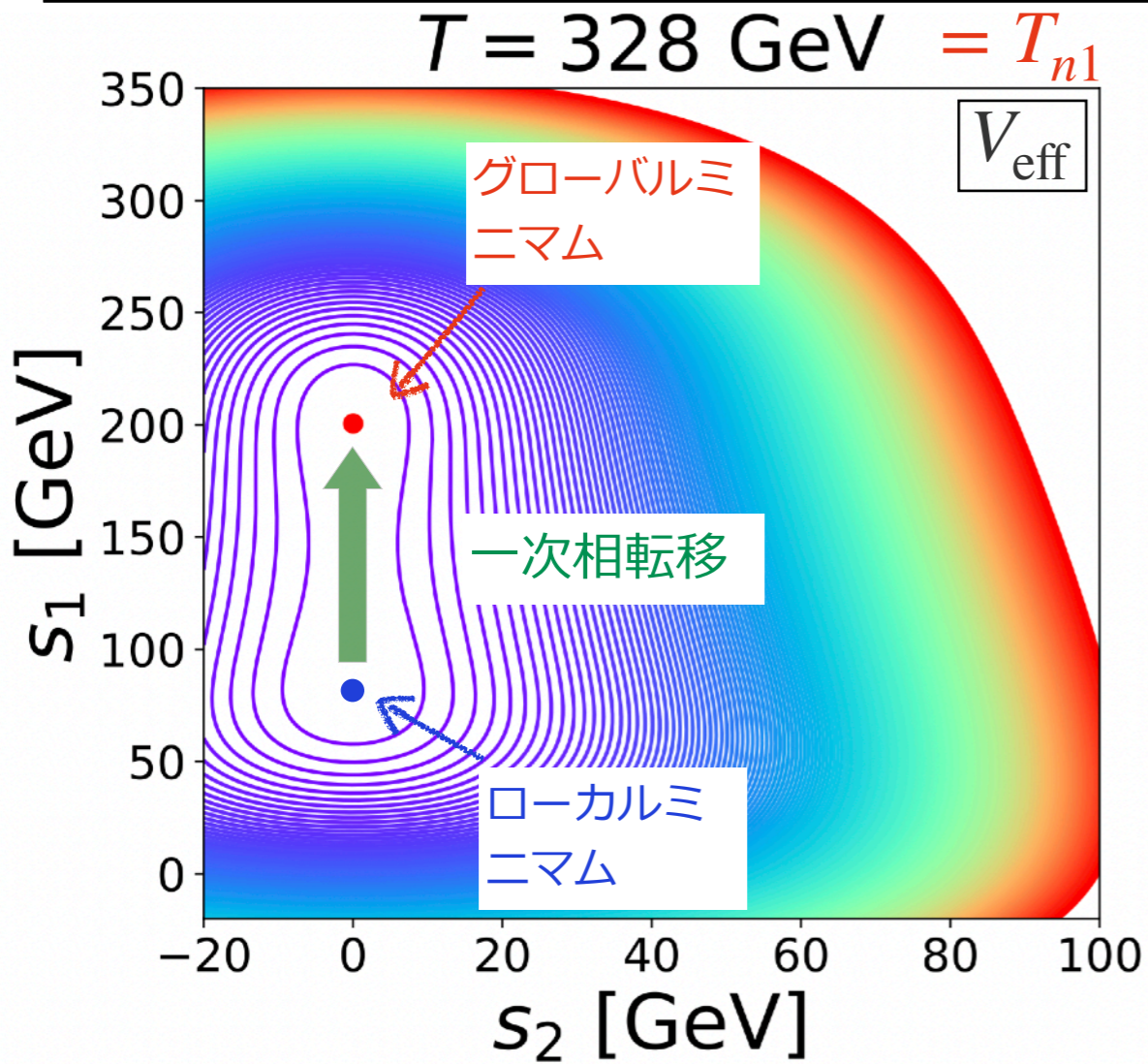


有効ポテンシャルの温度依存性 [1/4]



- 高温ではトリビアルな真空のみ存在する.

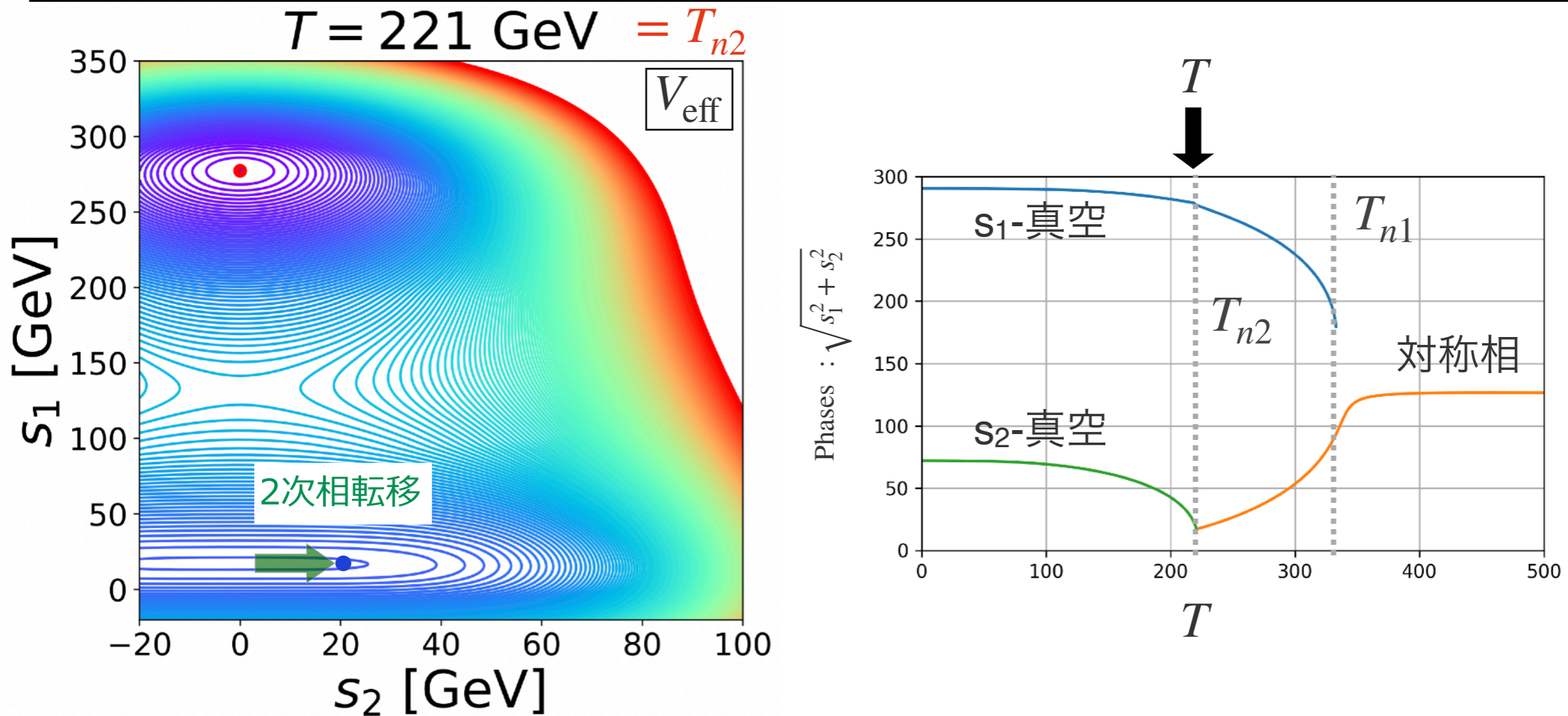
有効ポテンシャルの温度依存性 [2/4]



- 元々存在していた真空は偽真空になる。
- 対称相 \rightarrow s_1 -真空の遷移が起きる。

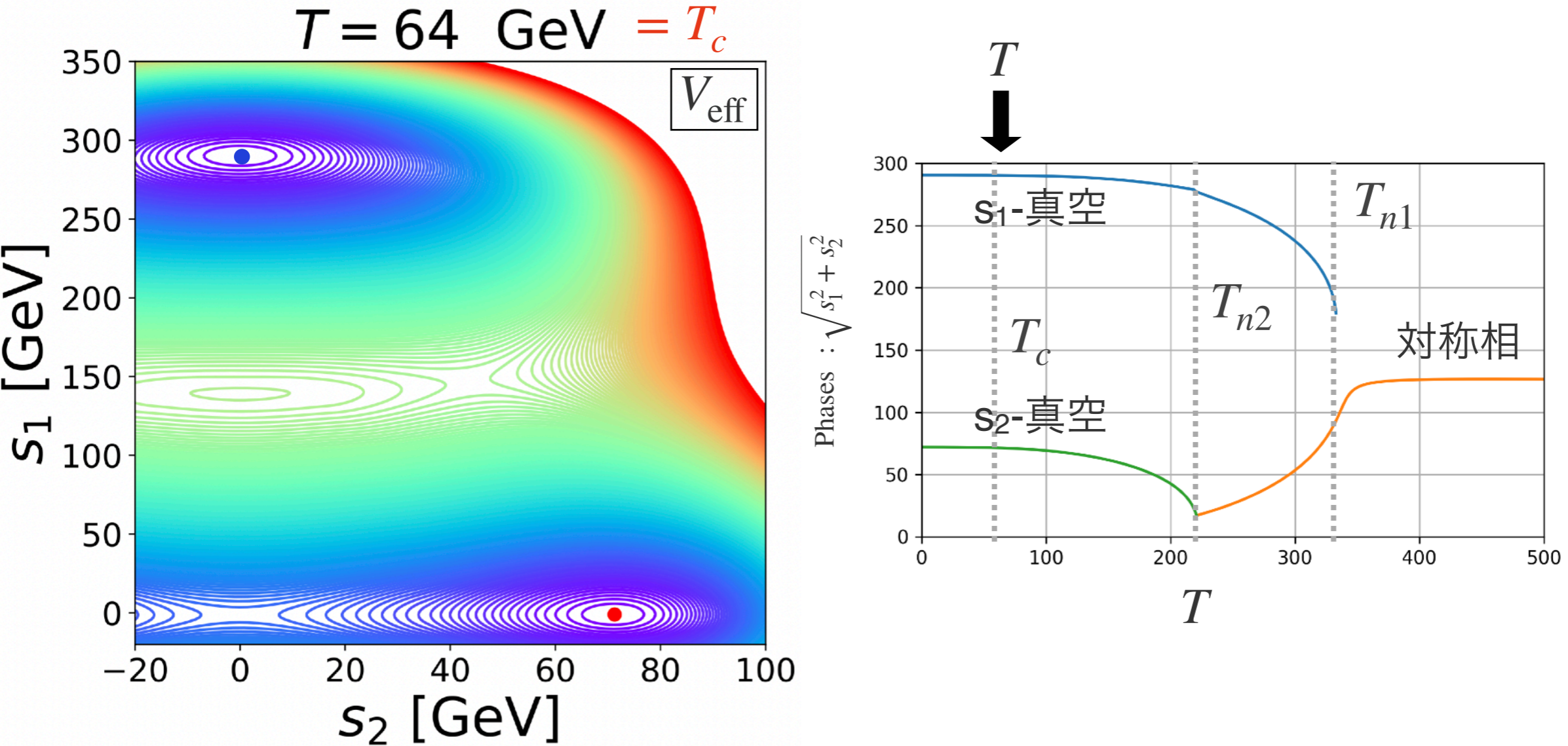
$$\Gamma_{n1}/H^4 \Big|_{T=T_{n1}} \sim \mathcal{O}(10^{-10})$$

有効ポテンシャルの温度依存性[3/4]



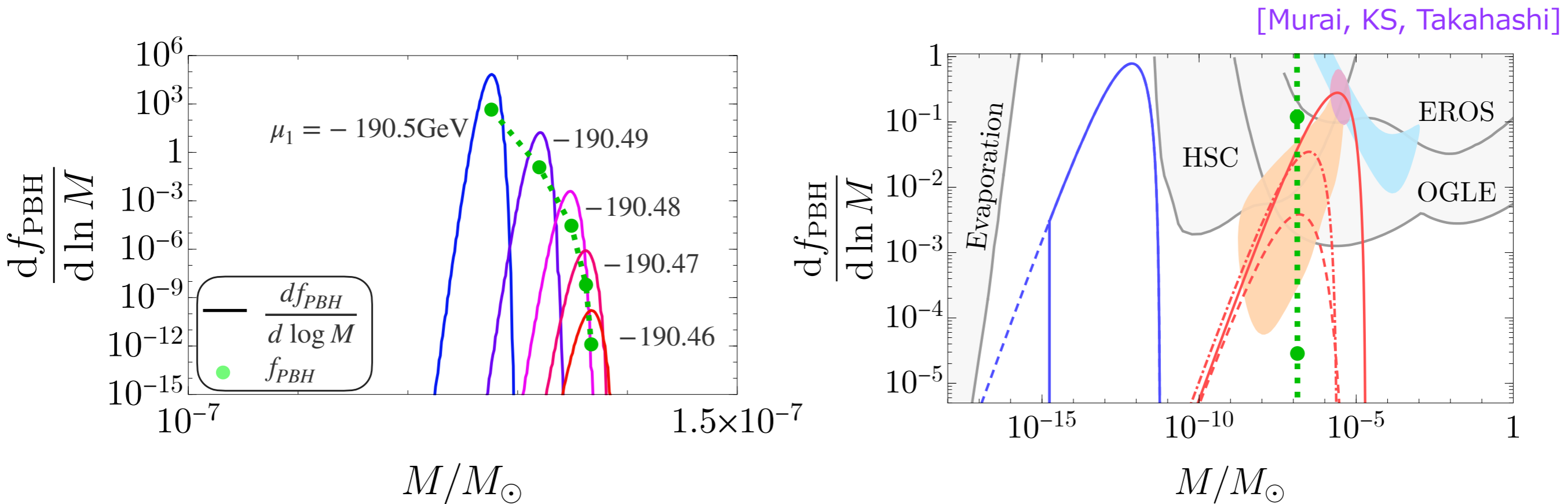
- ポテンシャル障壁により, 対称相 \rightarrow s_1 -真空の遷移が抑制される。
- $T = T_{n2}$ で s_2 方向の相転移が起こる。

有効ポテンシャルの温度依存性[4/4]



- 2回目の相転移後, s_1 -真空: 偽真空, s_2 -真空: 真の真空となる。
- $T = T_c$ で s_1 -真空と s_2 -真空の高さが入れ替わる。
- 選んだBPで反転バブル崩壊機構がワークしている。
- 相転移の解析により, Γ_{n1} , ΔV , T_c が計算される。 ➡ PBHの残存量が計算される。

シングレットモデルにおけるPBHの予言



- ピークなPBH質量が得られる。
 - スバルHSCとOGLEの重力レンズイベントを説明可能。(Tcを下げるとOGLEの結果も再現できる。)
 - 得られるPBHは、ポテンシャルの構造に強く依存している。
- ➡ 具体的なセットアップでも重力レンズイベントを説明出来るシナリオや $f_{PBH}=1$ のシナリオを実現出来る。

まとめ

- PBH生成の新しい機構について議論した。
- 1回目の不完全な相転移で過密領域を生成し、2回目の相転移で二つの真空の高さが反転し、バブルが崩壊しPBHが形成される。
- 過密領域は球対称に作られる。
- 模型のセットアップ依らない一般的なPBHの生成機構。
- two real singlet 模型のセットアップを考えるとOGLEやSubaru HSCのマ
イクロレンズイベントを説明出来る(バブル収縮温度 T_c の調節より小惑星
質量領域のPBHも実現可能)。