

# Radion Stabilization and supercooled phase transition

PPP2024

Kohei Fujikura in collaboration with  
Masaki Yamada, Yuichiro Nakai, Motoo Suzuki, Sudhakantha Girmohanta, Zihao Zhang

## Randall-Sundrum 模型

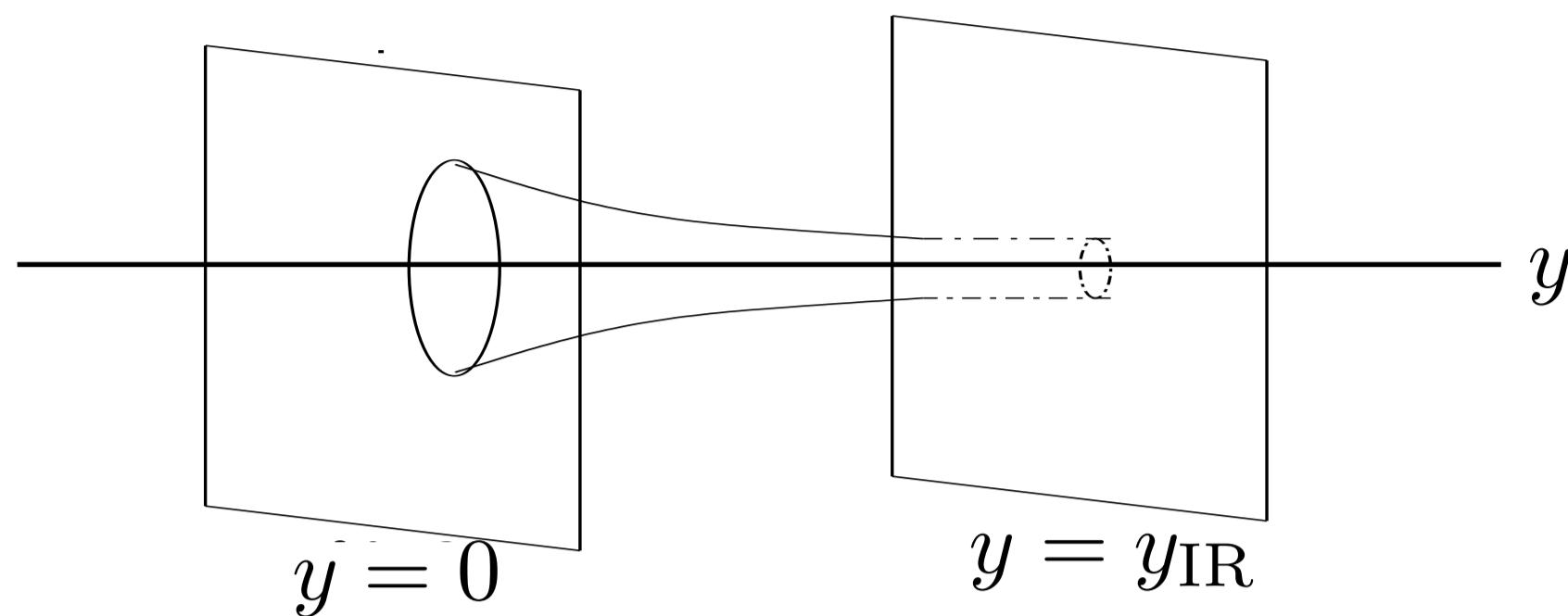
5次元Anti de-Sitter spacetimeに複数のブレーン

$$\mathcal{M} = \mathbf{R}^4 \times S^1/Z_2 \quad Z_2 : y \leftrightarrow -y \quad [\text{Randall and Sundrum (1999)}]$$

$$ds^2 = e^{-2kT(x)|y|} g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu - T^2(x) dy^2$$

$k$ : AdS curvature  $T(x)$ : radius of fifth dimension

$$\text{Gravitation's zero mode} \propto e^{-ky}$$



元々の動機は、Higgs質量の階層性問題の解決手法のひとつとして提案された。

$$M_{\text{Pl}}^2 = \frac{M_5^3}{k} (1 - e^{-kT_0}) \quad M_{\text{Pl}} : \text{four dimensional Planck scale}$$

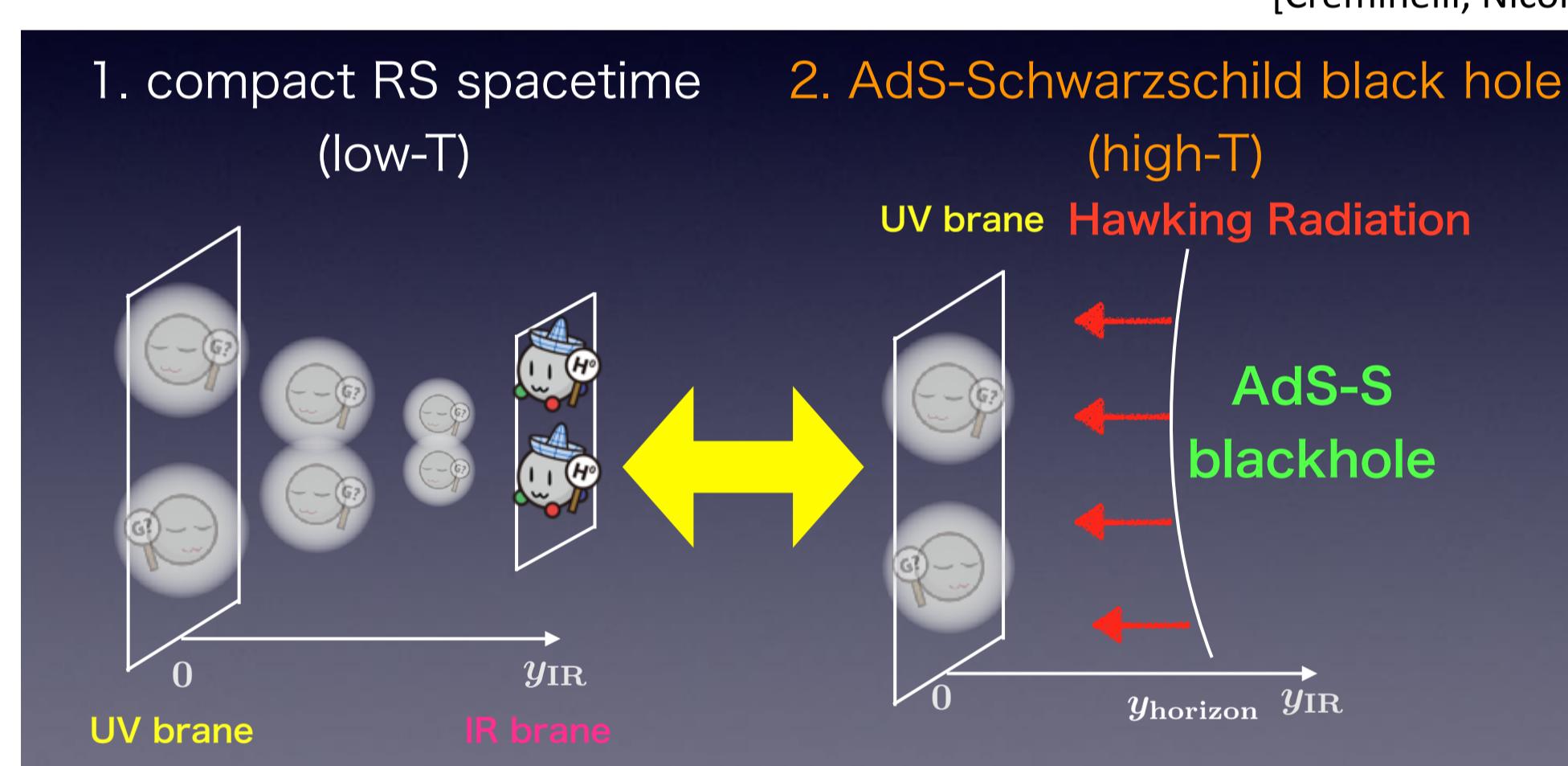
$M_5$ : five dimensional Planck mass

この模型のHolographic dualは強結合な(近似的)共形対称性を持つ4次元のゲージ理論だと信じられている。

## Thermal effects and blackhole

高温では、RS時空(+radion stabilization mechanism)より,AdS Schwarzschild時空の方がfree energyが小さい。

[Creminelli, Nicolis and Rattazzi (2001)]



AdS-Schwarzschild spacetime 計量 (Planar horizon):

$$ds^2 = k^2 \rho^2 \left(1 - \frac{\rho_H^4}{\rho^4}\right) dt^2 - k^2 \rho^2 \sum_{i=1}^3 dx_i^2 - \frac{d\rho^2}{k^2 \rho^2 \left(1 - \frac{\rho_H^4}{\rho^4}\right)}$$

宇宙の温度が低くなると, AdS時空へ相転移が起きる (Hawking Page-likeな相転移)

[Hawking and Page (1983)]

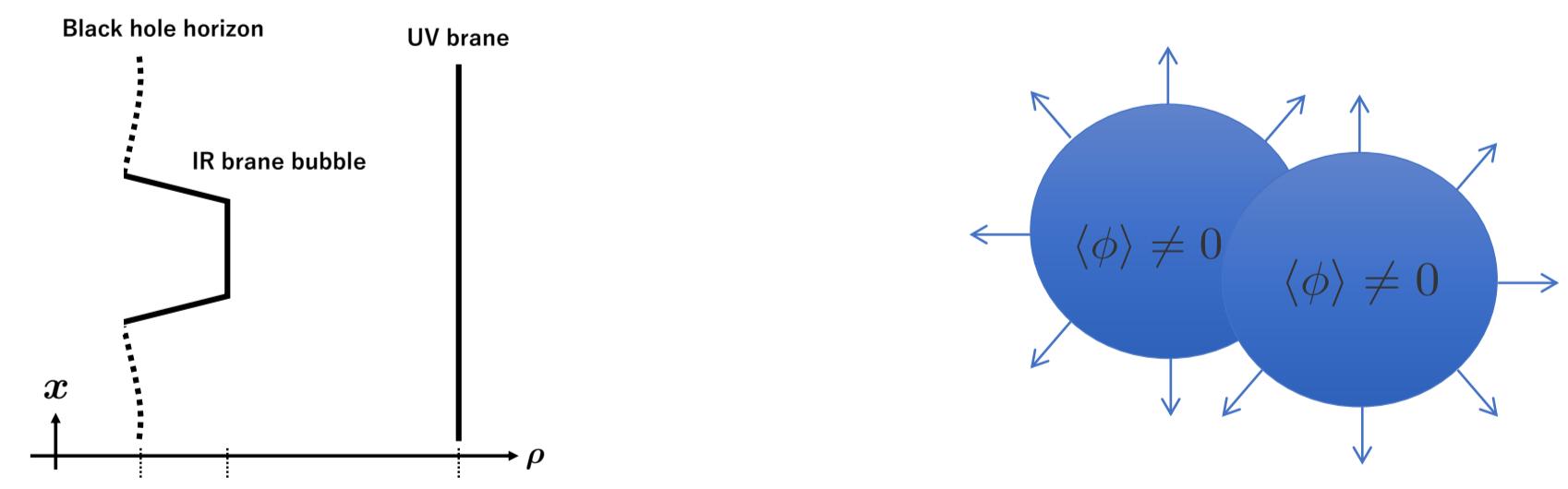
[Witten (1998)]

$$F_{\text{AdS-S}}(T_H) = \frac{3}{8} \pi^2 N^2 T_H^4 - \frac{1}{2} \pi^2 N^2 T_H^3 T \quad T_H : \text{Hawking temperature}$$

$$F_{\text{RS}} = V(\mu_{\min}) - V(0) \quad N \equiv 2\pi \left(\frac{M_5}{k}\right)^{3/2}$$

## Gravitational Wave

IR brane nucleationで相転移は進行

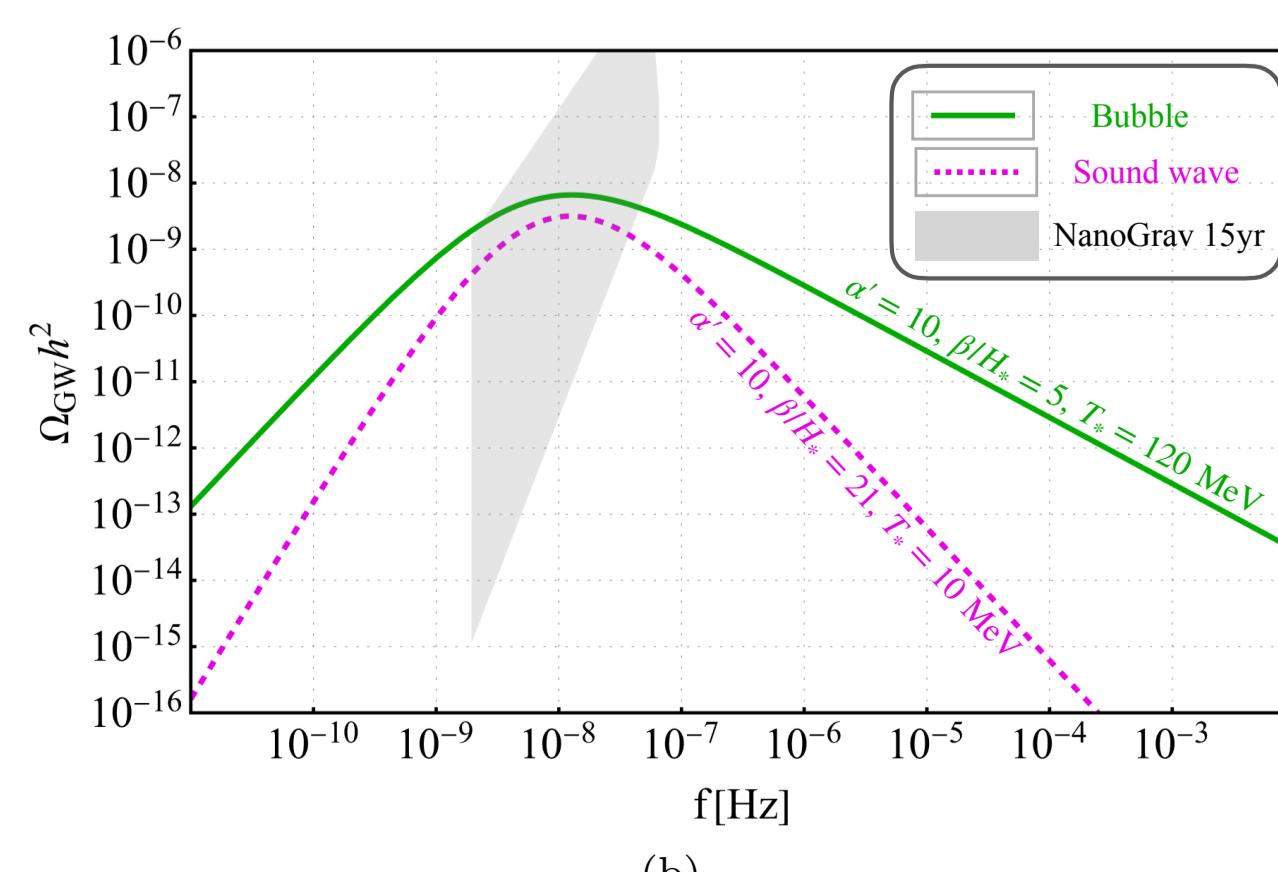
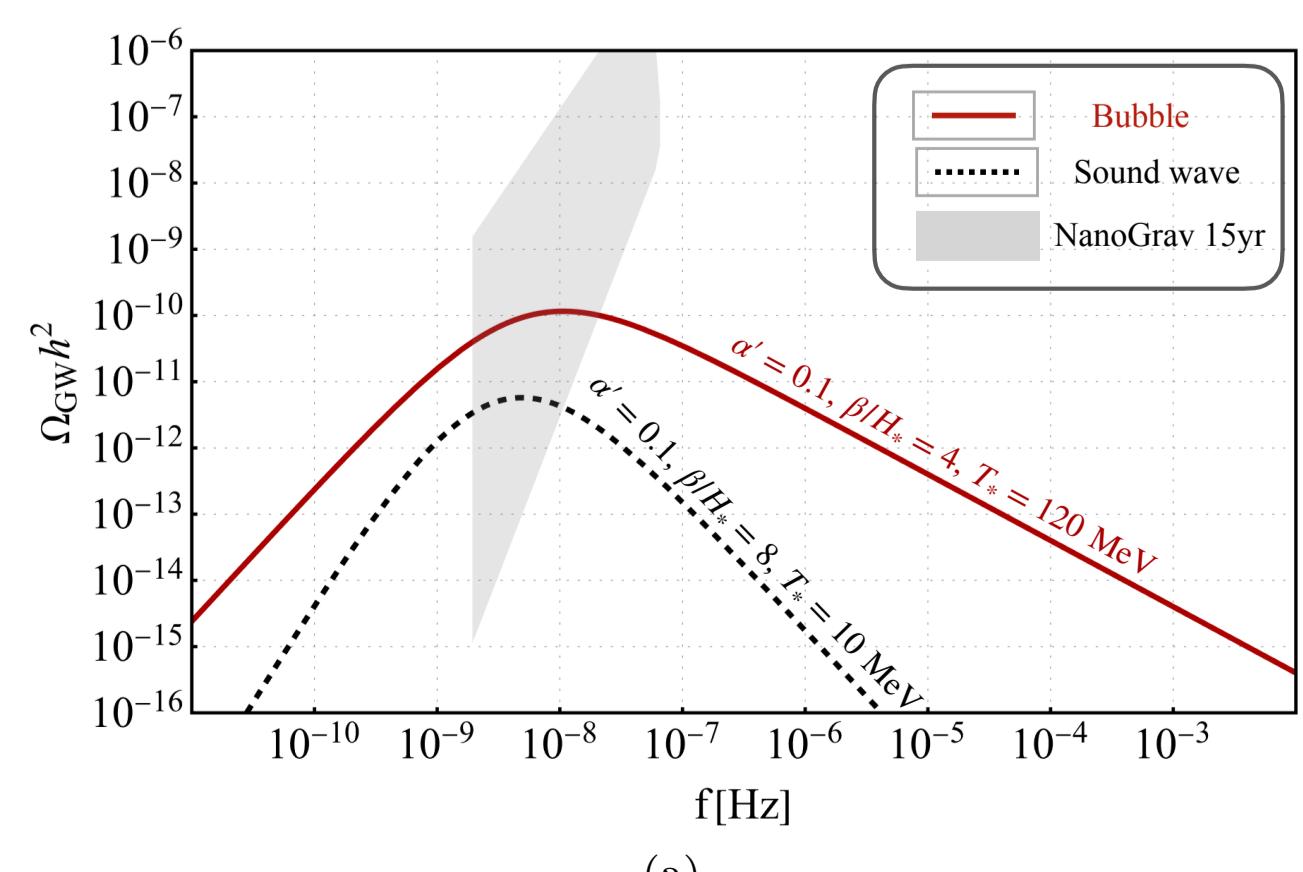


バブルの衝突,もしくは,プラズマの圧縮で重力波が生成されると (Holographic dualの観点から)期待されている。

[Baratella, Pomarol and Rompineve (2018)]

およそ余剰次元のサイズのスケールに対応する振動数に重力波のピークが現れる。[Fujikura, Suzuki, Nakai and Girmohanta (2023)]

$$\mu_{\min} \sim \mathcal{O}(100) \text{ MeV}, N = 21, N_H = 11$$



NANOGravの重力波を説明できるが,robustではない。

## Radion stabilization

余剰次元の長さをdynamicalに決める(radion stabilization)

Bulkに閉じ込めを起こすpure Yang-Mills SU(NH)ゲージ理論の存在を仮定

[Fujikura, Yamada and Nakai (2019)]

$$S_{SU(N_H)} = \int d^5x \sqrt{G} \left[ -\frac{1}{4g_5^2} F_{AB} F^{AB} \right]$$

閉じ込めのエネルギーのスケールは余剰次元の半径に依存

$$4\text{次元のゲージ結合定数: } \frac{1}{g_4^2(Q, \mu)} \sim \frac{\log(\frac{k}{\mu})}{kg_5^2} - \frac{b_{\text{YM}}}{8\pi^2} \log\left(\frac{k}{Q}\right)$$

$$\mu \equiv ke^{-kT(x)/2} : \text{radion} \quad Q : \text{renormalization scale}$$

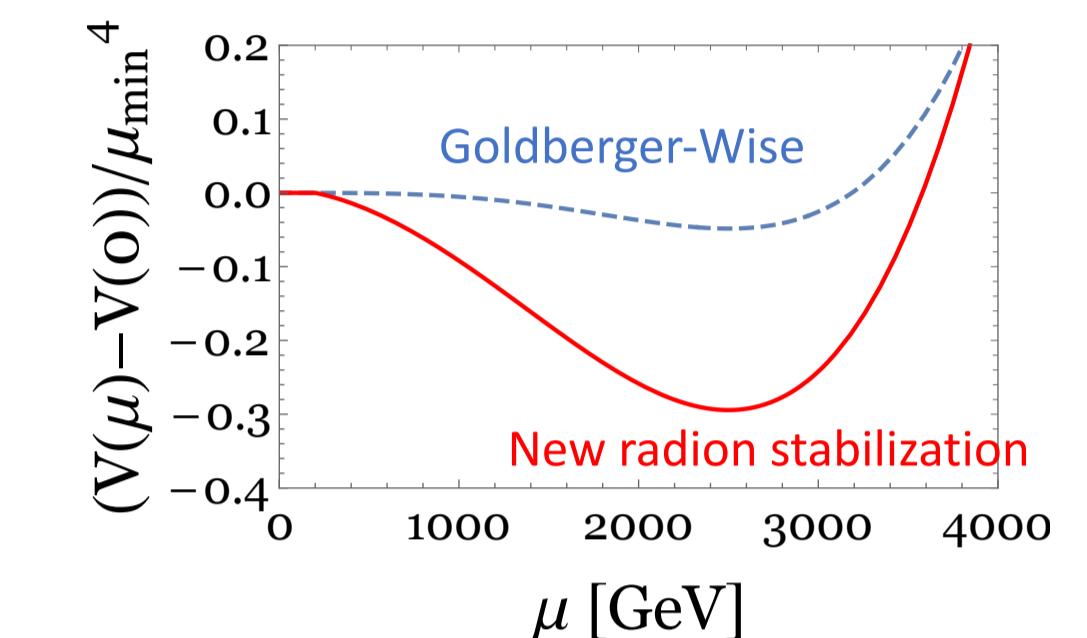
$$\text{閉じ込めのスケール: } g_4(\Lambda_H, \mu) \rightarrow \infty \quad \Lambda_H \propto \mu^n, 0 < n < 1$$

Brane tensionとBulkのCasimir energyの釣り合いで余剰次元の半径が決まる

$$V_{\text{tot}} = V_{\text{confinement}} + V_{\text{brane}}$$

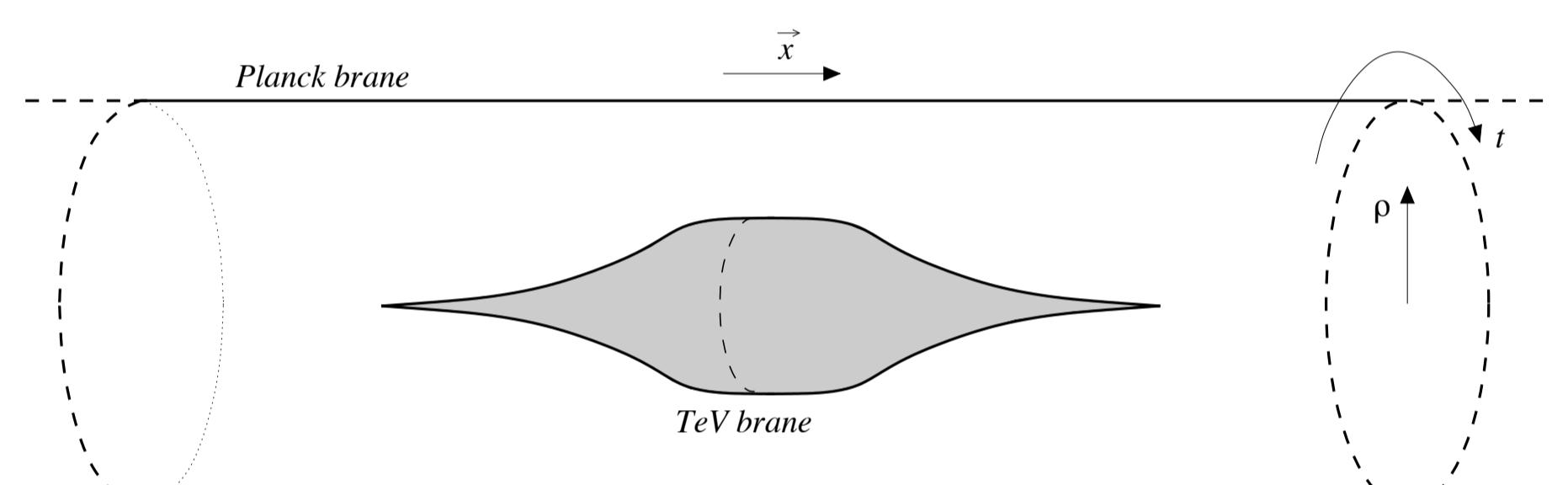
$$V_{\text{confinement}} \sim -b_{\text{YM}} \langle F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \rangle \sim -b_{\text{YM}} \mu^{4n}$$

$$V_{\text{brane}} \sim \lambda \mu^4$$

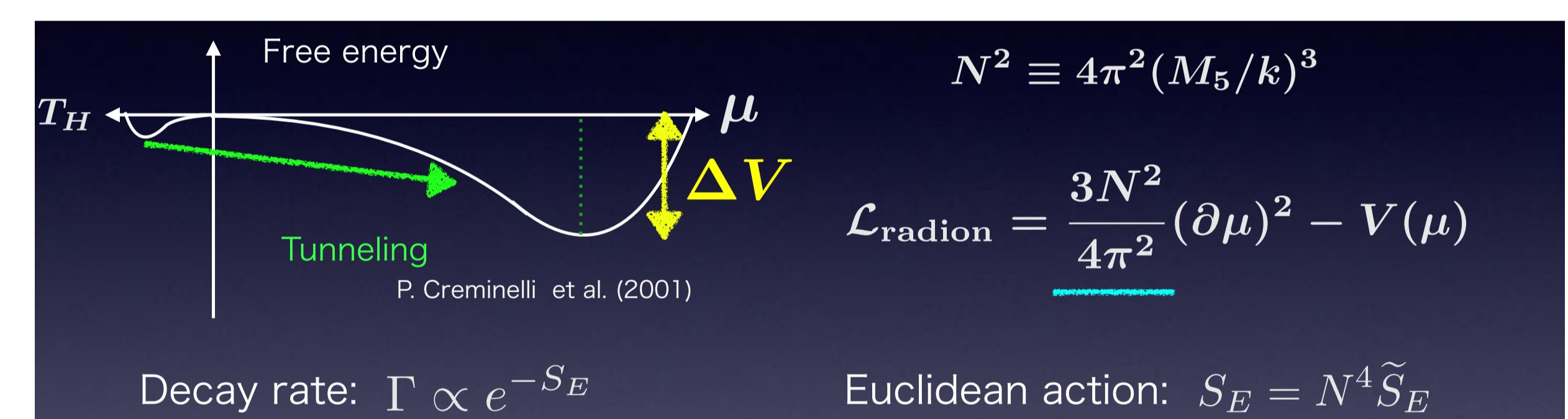


## First-order Phase Transition

考えるべきInstanton解のschematic picture



Hawking温度とradionを相転移中に重要なmodeと仮定して相転移を解析



重力の準古典近似が良いところでは真空の崩壊率は抑制

$$S_E \propto N^4 \gg 1$$

結果として、強い過冷却を伴う一次相転移が起きる。

## Baryogenesis and dark matter

過冷却により、相転移前はradionの真空エネルギーが支配的になり、(mini) inflationが起きる

$$N_e \sim 5.3 : \text{e-folding number}$$

相転移前に存在する物質は加速膨張で薄められる!

cold electroweak baryogenesisの方法を使い、相転移後に十分なバリオン非対称性と暗黒物質が生成できることを示した。

大雑把なOutline: [Fujikura, Nakai, Zhang and Girmohanta (2024)]

1. 相転移後にDark Higgsのtexture configurationを生成
2. Textureの崩壊時にSU(2)D gauge場のChern-Simons数を生成
3. Chiral Anomalyを通じてdark baryon numberの非対称性を生成
4. Portal couplingを通じてバリオン非対称性やdark matterに転換

Fields	$SU(N_H)$	$SU(2)_D$	$U(1)_D$
$H_D$	1	2	0
$L_{\chi,i} \equiv (\psi_{1,i}, \psi_{2,i})$	1	2	1
$\chi_{1,i}, \chi_{2,i}$	1	1	-1
$f_j$	$N_H$	1	$1/N_H$
$\bar{f}_j$	$\bar{N}_H$	1	$-1/N_H$

CP-violating coupling:

$$\mathcal{O}_{\text{CPV}} = \frac{H_D^\dagger H_D}{\Lambda_{\text{CP}}^2} \frac{g_d^2}{32\pi^2} W^{\mu\nu} \widetilde{W}_{\mu\nu}$$

Table I. The dark sector particles and their representations. Here,  $i = 1, 2, \dots, N_{D_L}$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_{D_B}$  denote the generational indices. The total dark number is  $D = D_L + D_B$ , where  $L_\chi, \chi$  carry  $D_L$  number, while  $f, \bar{f}$  carry  $D_B$ .

詳しく知りたいor興味があれば是非セミナーに呼んでください！