

# 重力の影響を含む場合のvacuum decay

後藤 裕平 (信州大)

共同研究者：奥山 和美 (信州大)

@ 松江素粒子物理学研究会

Y. G and K. Okuyama, arXiv:1601.07632 [hep-ph]

# Outline

---

- Introduction
- Coleman – de Luccia Tunneling
- Thin-wall approximation
- Analysis (Periodic potential )
- Summary

# Introduction

## Coleman-de Luccia instanton :

vacuum decay in the presence of gravity

( Scalar + Gravity model )

e.o.mが非線形方程式  $\longrightarrow$  解けない

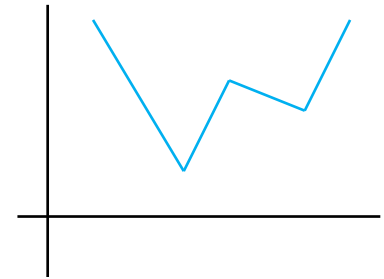
$\longrightarrow$  直接、数値計算する

様々な近似を用いる

ex )

- thin-wall approximation  $V_+ \sim V_-$
- triangular potential approximation

[S.-H.H Tye, D.Wohns & Y.Zhang,  
Int.J.Mod. Phys.A 25, 1019 (2010)]



これらの近似は良い近似なのか？

# CdL tunneling

## A single scalar field theory

### 重力あり

$$S_E = \int d^4x \sqrt{-g} \left( \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi + V - \frac{1}{16\pi G} \right)$$

O(4)対称性を仮定  $ds^2 = d\tau^2 + a(\tau)^2 d\Omega_3^2$

### 運動方程式

$$\frac{d^2\phi}{d\tau^2} + \frac{3\dot{a}}{a} \frac{d\phi}{d\tau} - \frac{dV}{d\phi} = 0$$

摩擦項

$$\left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{1}{a^2} + \frac{1}{3M_{\text{pl}}^2} \left( \frac{\dot{\phi}^2}{2} - V \right) \quad M_{\text{pl}}^2 = \frac{1}{8\pi G_N}$$

$a(\tau)$ の解は調和振動子

$$a(\tau) = \frac{1}{\omega} \sin \omega \tau, \quad \omega^2 = \frac{V_+}{3M_{\text{pl}}^2}$$

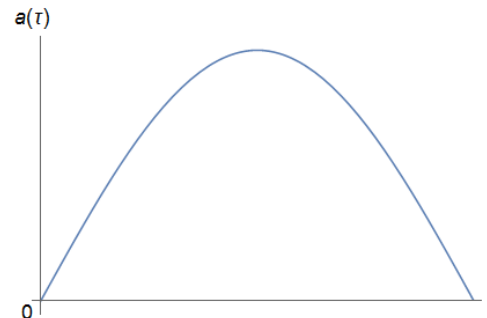
### 重力なし

$$S_E = \int d^4x \left( \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^2 + V(\phi) \right)$$

### 運動方程式

$$\frac{d^2\phi}{dr^2} + \frac{3}{r} \frac{d\phi}{dr} - \frac{dV}{d\phi} = 0$$

摩擦項



# CdL Tunneling

Vacuum decay rate

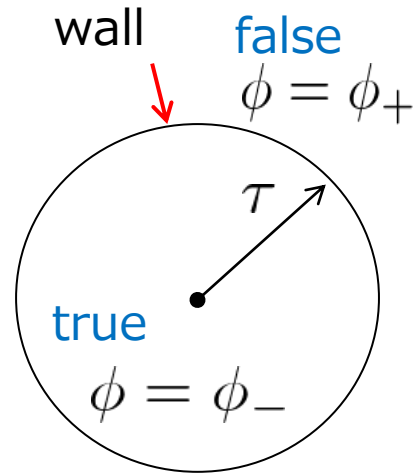
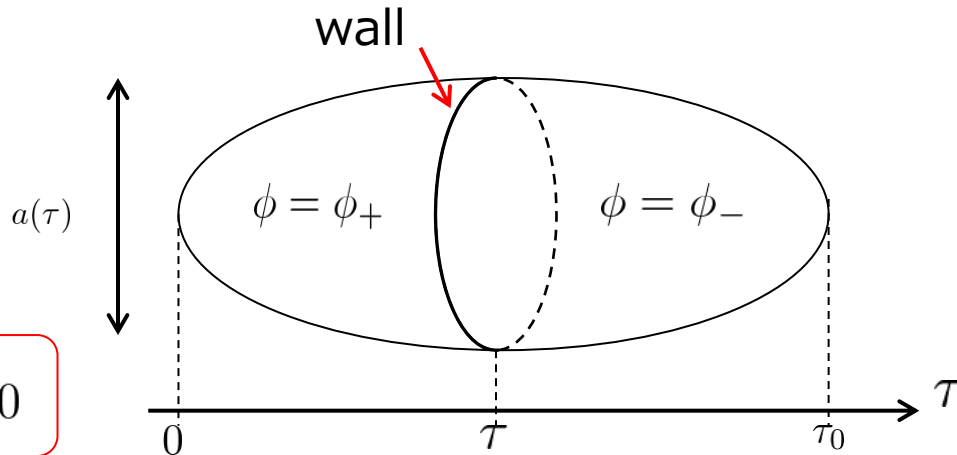
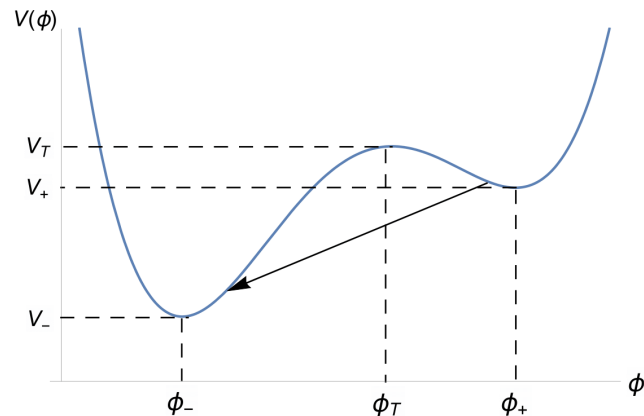
$$\Gamma \simeq Ae^{-B}$$

( in the semi-classical approximation )

**Bounce factor**

$$B = S_E(\phi) - S_E(\phi_+)$$

$$S_E(\phi) = 4\pi^2 \int_0^{\tau_{\max}} d\tau [a(\tau)^3 V(\phi(\tau)) - 3M_{pl}^2 a(\tau)]$$



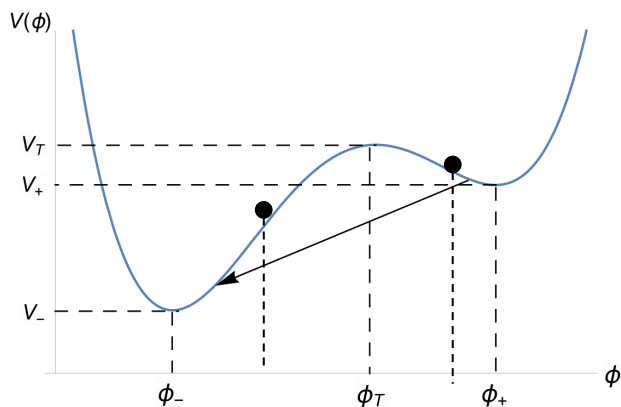
$$a(0) = a(\tau_{\max}) = 0$$

# CdL Tunneling

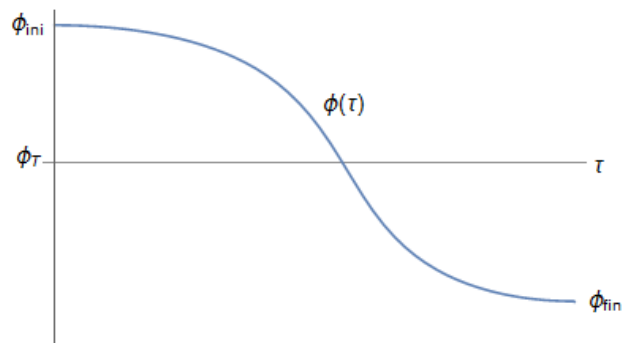
一般に

$$\phi_+ \neq \phi_{\text{ini}}, \phi_- \neq \phi_{\text{fin}}$$

Gibbons – Hawking 温度よる熱的揺らぎ  $\longrightarrow$  さらにズれる



ポテンシャルの形状  
により変化



$$\phi_{\text{ini}} \rightarrow \phi_T$$

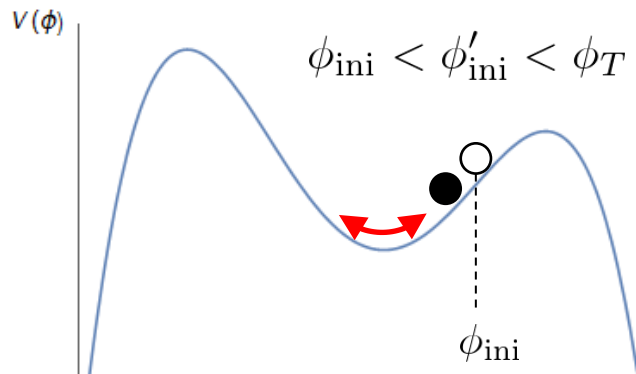
$$B_{\text{HM}} = S_E(\phi_T) - S_E(\phi_+) = 24\pi^2 M_{\text{pl}}^4 \left( -\frac{1}{V_T} + \frac{1}{V_+} \right)$$

( Hawking-Moss tunneling )

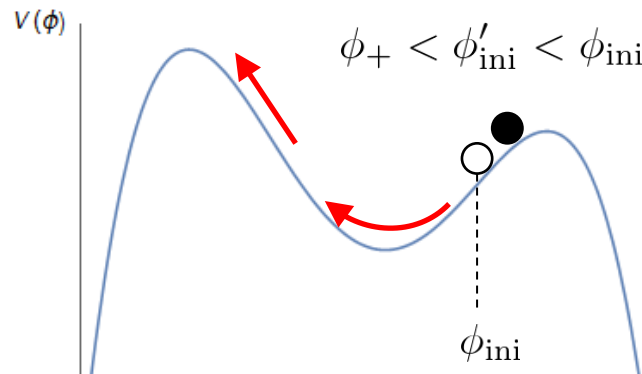
ポテンシャル障壁の頂点における解

# CdL Tunneling

Euclidean potential

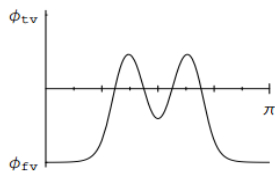
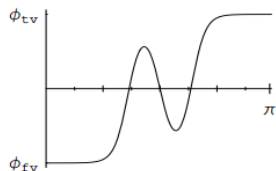
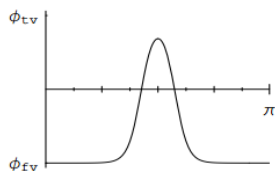
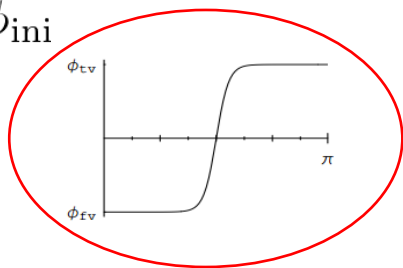


oscillating



overshooting

$$\phi'_{ini} = \phi_{ini}$$



振動が増えるほど、  
崩壊率が低くなっていく

今回の解析では考えない

# Thin-wall Approximation

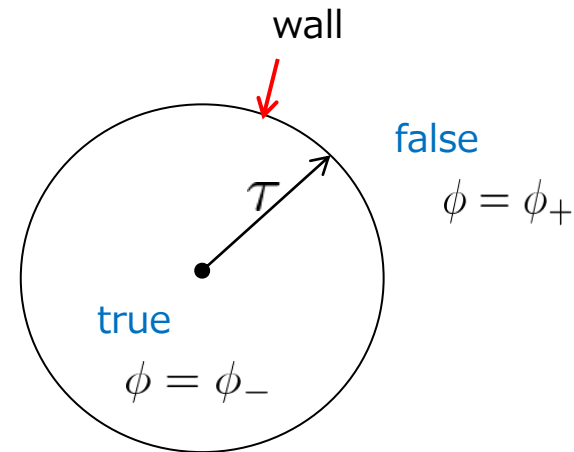
Thin-wall approximation :

$\phi_+ \rightarrow \phi_-$  への素早い転移を想定

$$\longrightarrow V_+ \sim V_-$$

bounce factor  $B_{\text{tw}}$

{ Bubbleの中(true vacuum)  
   外(false vacuum)  
 Wall上に分割して計算



$$B_{\text{tw}} = 2\pi^2 a^3 T$$

$$+ 12\pi^2 M_{pl}^4 \left[ \frac{1}{V(\phi_-)} \left( \left( 1 - \frac{a^2 V(\phi_-)}{3M_{pl}^2} \right)^{3/2} - 1 \right) - \frac{1}{V(\phi_+)} \left( \left( 1 - \frac{a^2 V(\phi_+)}{3M_{pl}^2} \right)^{3/2} - 1 \right) \right]$$

$T$  : wall tension  $\longrightarrow$  true & false vacuum で決まる

ポテンシャルの形によってbounce factor が決まる



# Analysis

Periodic potential

$$V(\phi) = \Lambda^4 (v_0 + v_1 \cos(\phi/f))$$

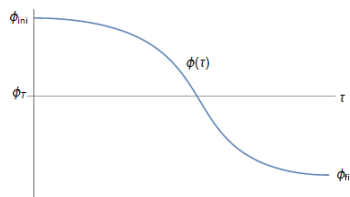
$\Lambda$  : non-perturbatively generated scale

$f$  : axion decay constant

$dS \rightarrow dS$  の場合を考える

$$V(\phi) > 0$$

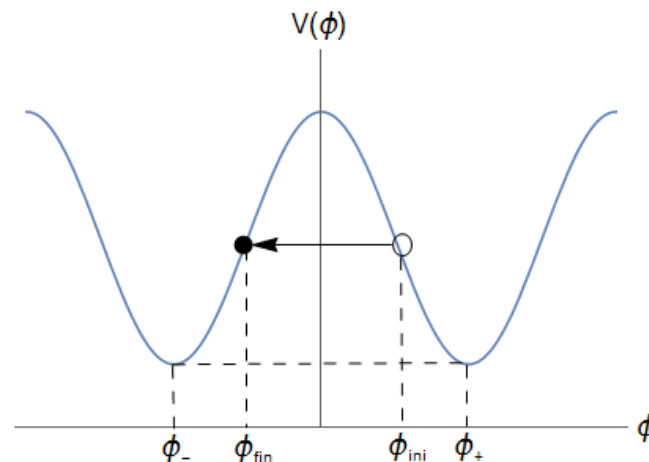
振動が起こる場合の崩壊は考えない  
(振動なしに比べて確率が小さい)



initial conditions

$$a(0) = \underline{10^{-100}}, \dot{a}(0) = 1, \phi(0) = \phi_{ini}, \dot{\phi}(0) = 0$$

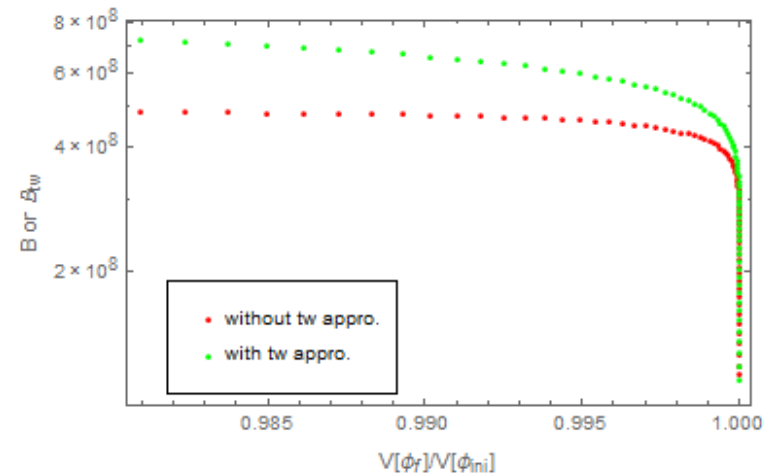
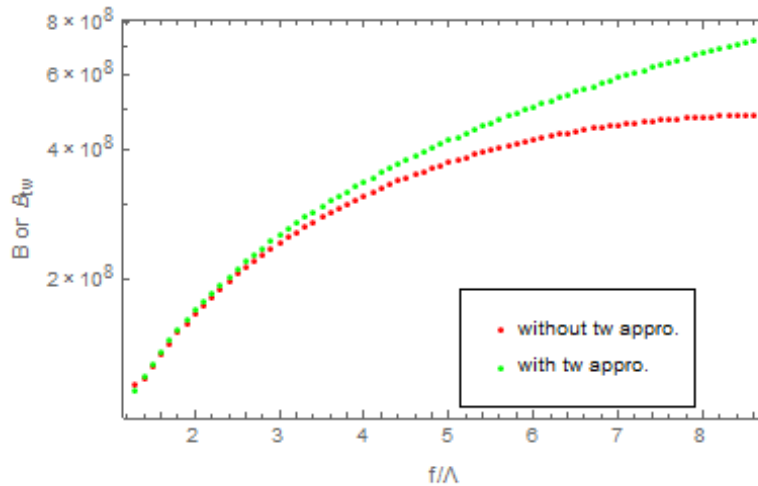
数値解析のために  
少しズラしておく



# Analysis

$$V(\phi) = \Lambda^4(v_0 + v_1 \cos(\phi/f))$$

$$\underline{V_T = 1, V_T - V_+ = 1/200, \Lambda/M_{pl} = 1/100}$$



$$1.3 < f/\Lambda < 8.6$$

$V(\phi_{ini}) \rightarrow V_+$

$V(\phi_{ini}) \rightarrow V_T$

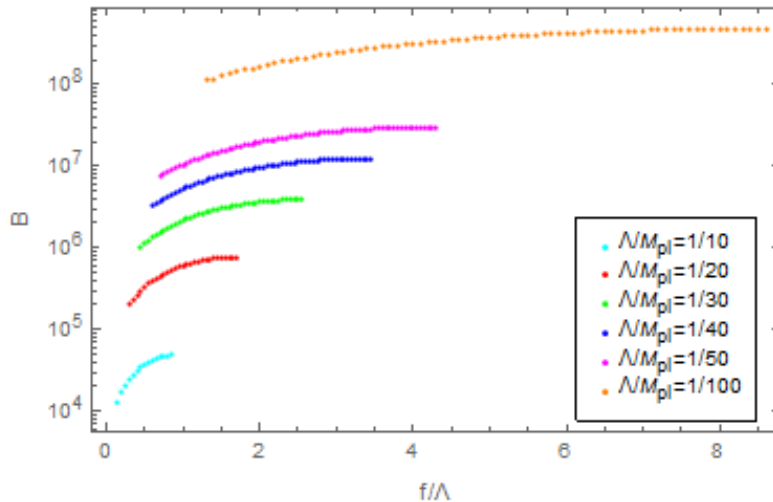
initial stateがfalse vacuumから離れるにつれて  
thin-wall近似が良くなっていく

$$V_+ < V(\phi_{ini}) < V_T \iff f_{min} < f < f_{max}$$

# Analysis

$$\underline{V_T = 1, V_T - V_+ = 1/200}$$

non-perturbatively generated scaleを**変化**

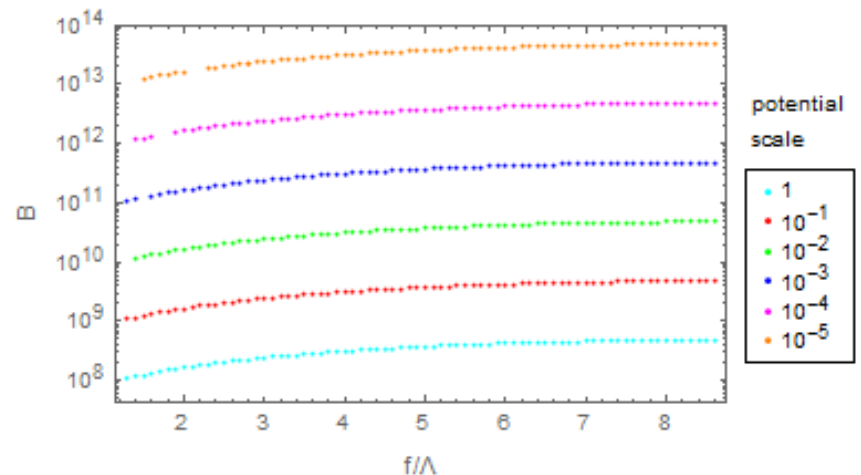


Potential scaleが $10^{-1}$ 小さくなると、 $B$ がおおよそ10倍大きくなる。  
Axion decay constantの取り得る値は変わらない。

$\Lambda$ がPlankスケールから離れるほど、Axion decay constantの取り得る値は広がる。  
また、崩壊率は小さくなる。

$$\Gamma \simeq Ae^{-B}$$

$(V_T - V_+)/V_T = 1/200, \Lambda/M_{pl} = 1/100$   
potential scaleを**変化**



# Summary

---

- 重力を含む場合の vacuum decay rate を数値的に解析できることを確かめた.
- 特に, 周期的ポテンシャル(axionポテンシャル)について考え,  $dS \rightarrow dS$ への vacuum decay rate をポテンシャルのパラメータを計算した.
- スカラー場が振動しないでトンネリングが起こるのは、ポテンシャルのある一点のみである.

## < 課題 >

- 宇宙論・現象論的なモデルに適応する.  
(inflaton potential etc)
- 有限温度系による熱的揺らぎによる真空崩壊について計算する.