

Bouncing Universe from othing

— 膨張、収縮、再膨張する宇宙 —

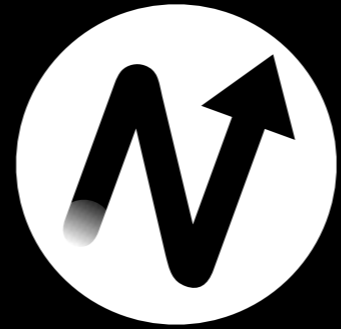
寺田 隆広

KEK (JSPS fellow) → CTPU, IBS

松井 宏樹, 高橋 史宜, 寺田 隆広,

*Phys. Lett. B*795 (2019) 152, arXiv:1904.12312 [gr-qc]

[cf. 松井君による関連したポスター発表]



宇宙の膨張と収縮

今回考える枠組み

4次元一般相対論 (Einstein 重力) と実スカラー場 1つ

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{1}{2} R - \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - V(\phi) \right)$$

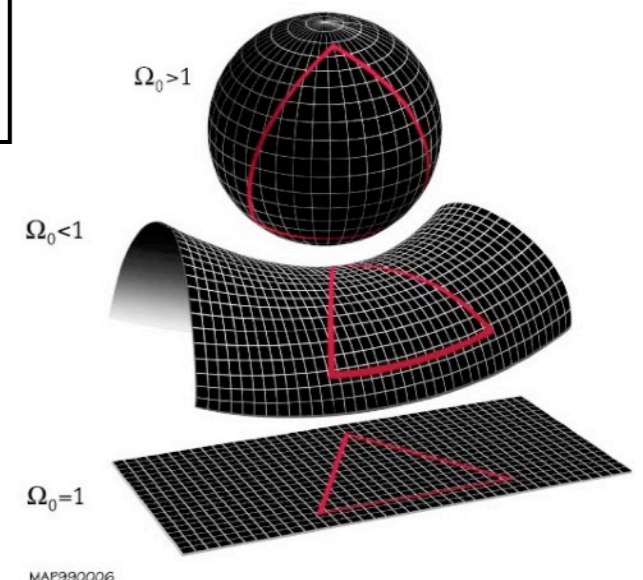
(reduced Planck unit: $8\pi G = 1$)

簡単のため、一様等方 (FLRW) 時空を仮定

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - \mathcal{K}r^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right]$$

空間曲率

正 (閉じた宇宙), ゼロ (平坦な宇宙), 負 (開いた宇宙)



宇宙の膨張→収縮の条件

Hubble parameter: 膨張速度

エネルギー密度

圧力

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

$$\rho$$

$$P$$

(Null Energy Condition (NEC): $\rho + P \geq 0$)

Friedmann 方程式

$$\begin{aligned} H^2 &= \frac{\rho}{3} &= \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) \\ \dot{H} &= -\frac{1}{2}(\rho + P) &= -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 \end{aligned}$$

宇宙の膨張→収縮の条件

Hubble parameter: 膨張速度

エネルギー密度

圧力

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

ρ

P

(Null Energy Condition (NEC): $\rho + P \geq 0$)

Friedmann 方程式

$$H^2 = \frac{\rho}{3} - \frac{\mathcal{K}}{a^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) - \frac{\mathcal{K}}{a^2}$$

$$\dot{H} = -\frac{1}{2}(\rho + P) + \frac{\mathcal{K}}{a^2} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{\mathcal{K}}{a^2}$$

宇宙の膨張→収縮の条件

H = 0 にする為に、運動項を相殺する候補：

1. 負のポテンシャル ($V < 0$)
2. 正の曲率 ($K > 0$) → 後で考える

Friedmann 方程式


$$H^2 = \frac{\rho}{3} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right)$$
$$\dot{H} = -\frac{1}{2}(\rho + P) = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2$$

宇宙の膨張→収縮の条件

H = 0 にする為に、運動項を相殺する候補：

1. 負のポテンシャル ($V < 0$)
2. 正の曲率 ($K > 0$) → 後で考える

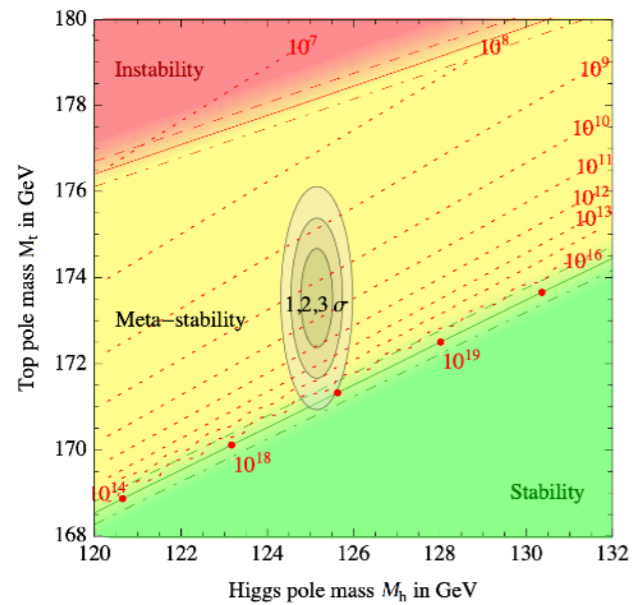
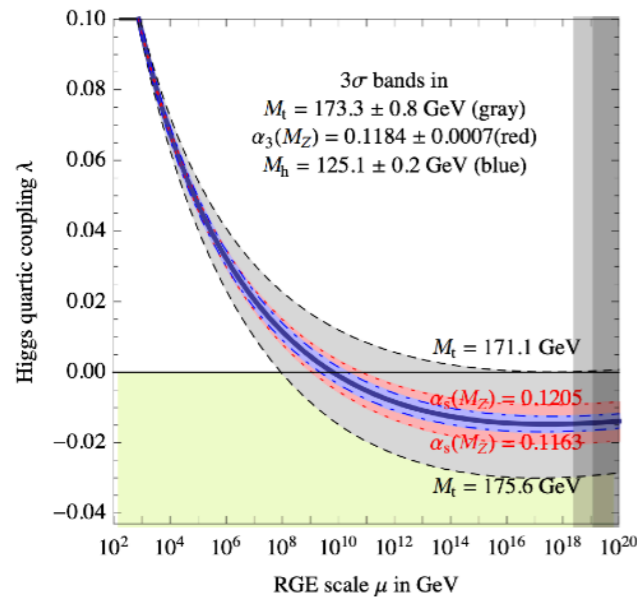
Friedmann 方程式

$$H^2 = \frac{\rho}{3} - \frac{\mathcal{K}}{a^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) - \frac{\mathcal{K}}{a^2}$$


$$\dot{H} = -\frac{1}{2}(\rho + P) + \frac{\mathcal{K}}{a^2} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{\mathcal{K}}{a^2}$$

V < 0 はそれ程強い仮定ではない

標準模型



[Buttazzo et al., 1307.3536]

超重力理論

R-symmetry breaking,
 negative semi-definite

$$V = e^K \left(g^{\bar{j}i} D_i W \bar{D}_{\bar{j}} \bar{W} - 3|W|^2 \right)$$

SUSY breaking,
 positive semi-definite

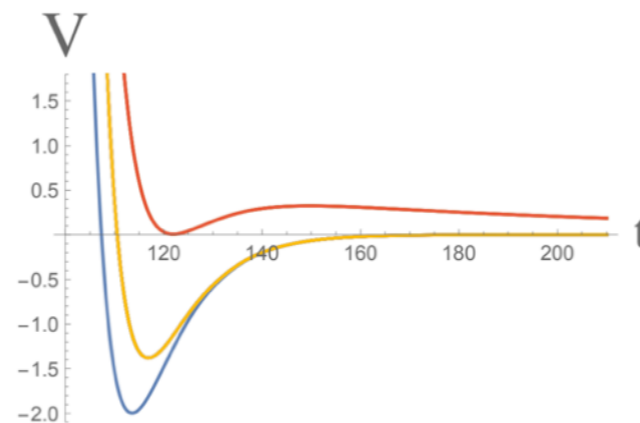
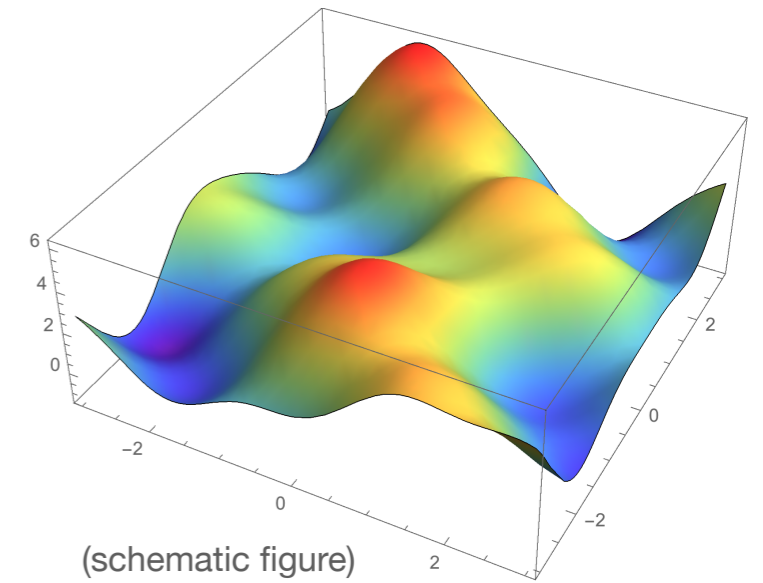


figure from [Kallosh et al., 1808.09428]

超弦理論のランドスケープ

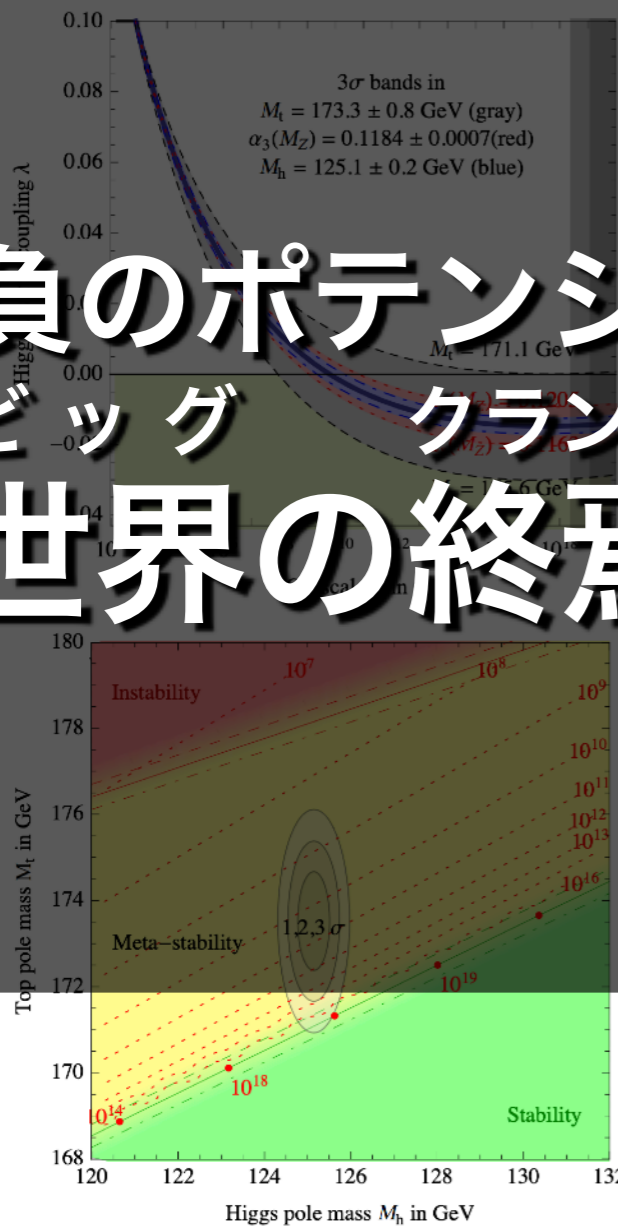


De Sitter 真空の構築が困難
 である事は悪名高い。

(cf. Swampland de Sitter conjecture)
[\[Obied et al., 1806.08362\]](#)

V < 0 はそれ程強い仮定ではない

標準模型



[Buttazzo et al., 1307.3536]

超重力理論

R-symmetry breaking,
 negative semi-definite

$$V = e^K (g^{j\bar{i}} D_i W D_{\bar{j}} \bar{W} - 3|W|^2)$$

positive semi-definite

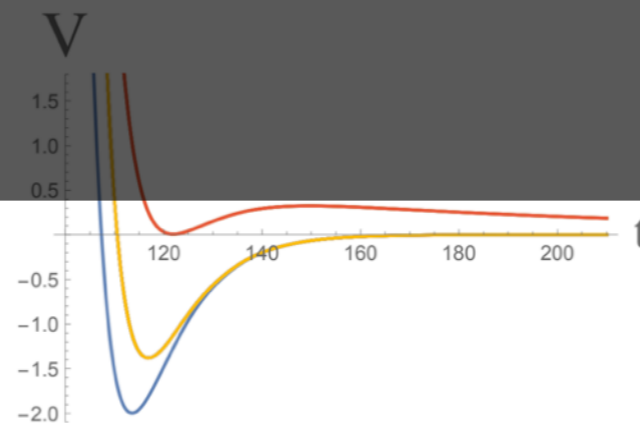
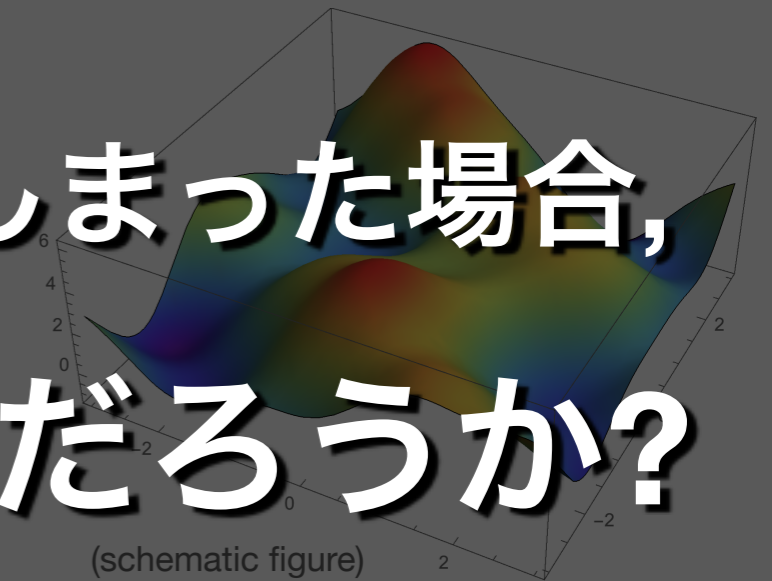


figure from [Kallosh et al., 1808.09428]

超弦理論のランドスケープ



De Sitter 真空の構築が困難である事は悪名高い。

(cf. Swampland de Sitter conjecture)
[\[Obied et al., 1806.08362\]](#)

負のポテンシャルに落ち込んでしまった場合、
 ビッグ クランチ
 世界の終焉は免れないのだろうか?

宇宙の収縮→膨張の条件

Friedmann 方程式

$$H^2 = \frac{\rho}{3} - \frac{\mathcal{K}}{a^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) - \frac{\mathcal{K}}{a^2}$$

$$\dot{H} = -\frac{1}{2}(\rho + P) + \frac{\mathcal{K}}{a^2} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{\mathcal{K}}{a^2}$$

$\dot{H} > 0$ は再膨張 ($H < 0 \rightarrow H > 0$) の必要条件。

→ 正の曲率 ($\mathcal{K} > 0$) が必要。

$\dot{H} > 0$ を保ったまま再び $H = 0$ を実現すればよい。

宇宙の収縮→膨張の条件

Friedmann 方程式

$$H^2 = \frac{\rho}{3} - \frac{\mathcal{K}}{a^2} = \frac{1}{3} \left(\quad + V \quad \right) - \frac{\mathcal{K}}{a^2}$$

$$\dot{H} = -\frac{1}{2}(\rho + P) + \frac{\mathcal{K}}{a^2} = \quad + \frac{\mathcal{K}}{a^2}$$

* スカラー場無し (正の宇宙定数のみ) の場合は簡単に可能。

$$\mathcal{K} > 0 \quad \rho = -P = \Lambda \quad (\text{cosmological constant})$$

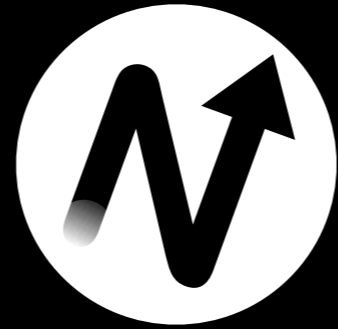
➔

$$a(t) = \sqrt{\frac{3\mathcal{K}}{\Lambda}} \cosh \left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} t \right)$$

* 膨張→収縮→膨張 となると非自明になる。

今回の研究のポイント

- **Null Energy Condition** を破らないし、
エネルギー密度や曲率が発散しない (**non-singular bounce**)。
- インフレーション模型の文脈でよく考えられているような、
なるべく自然な、**平坦なポテンシャル**を使う。
- **再膨張時にインフレーション**するので、観測事実と矛盾しない。
正の曲率が観測で検証できるかもしれない。
(cf. ランドスケープから生まれるバブル宇宙と対照的)
- 同じく正の曲率に基づく、
「無からの宇宙創生/宇宙無境界仮説」のシナリオとの親和性が高い。



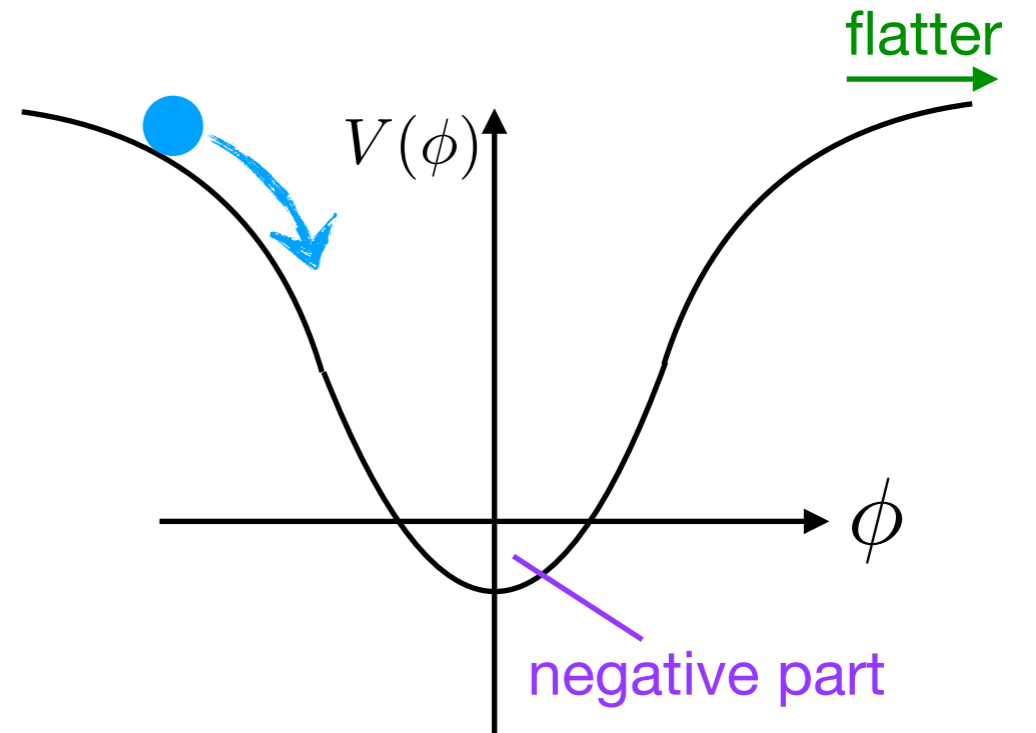
機構のアイディア・概要

1. はじめの膨張期

運動方程式

$$H^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) - \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$
$$\dot{H} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$
$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0.$$

スカラーポテンシャル



最初は、 $H, V > 0$

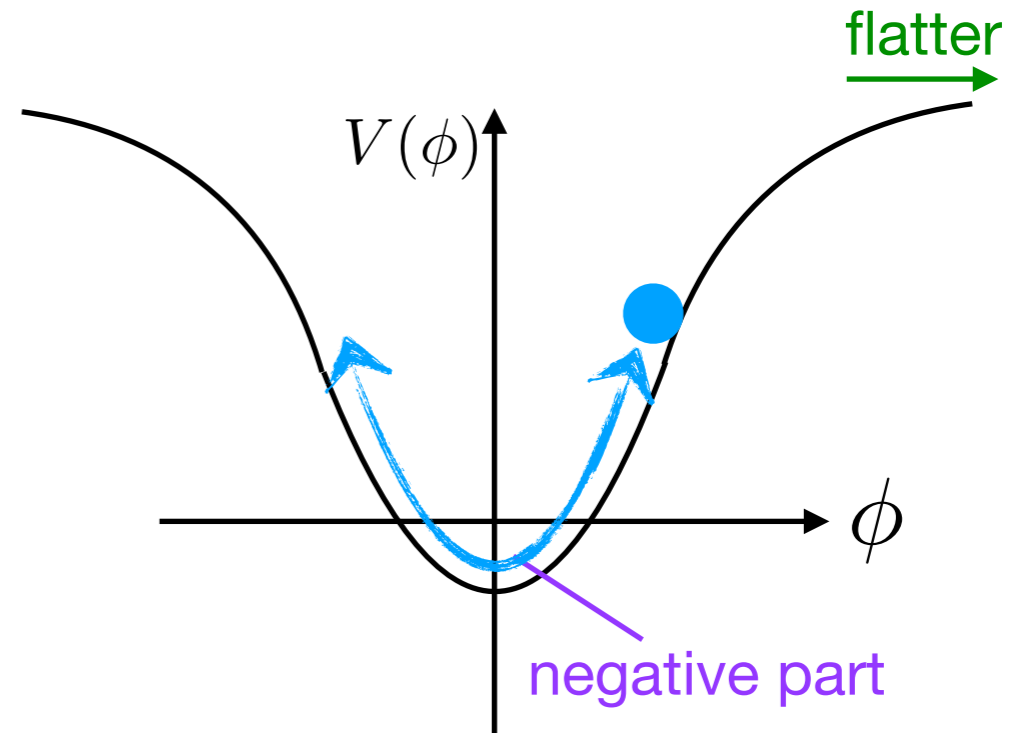
$\rho \gg \mathcal{K}/a^2 > 0$ とする。

1. はじめの膨張期

運動方程式

$$H^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) - \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$
$$\dot{H} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$
$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0.$$

スカラーポテンシャル



最初は、 $H, V > 0$

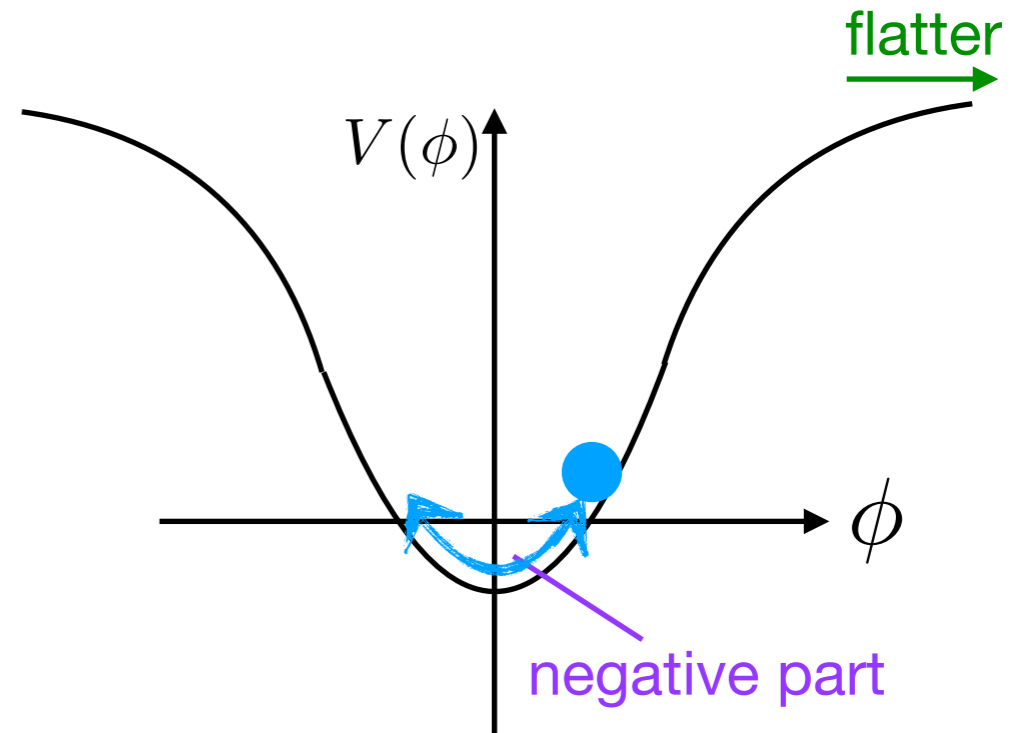
$\rho \gg \mathcal{K}/a^2 > 0$ とする。

1. はじめの膨張期

運動方程式

$$H^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) - \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$
$$\dot{H} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$
$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0.$$

スカラーポテンシャル



最初は、 $H, V > 0$

$\rho \gg \mathcal{K}/a^2 > 0$ とする。

2. 収縮期

運動方程式

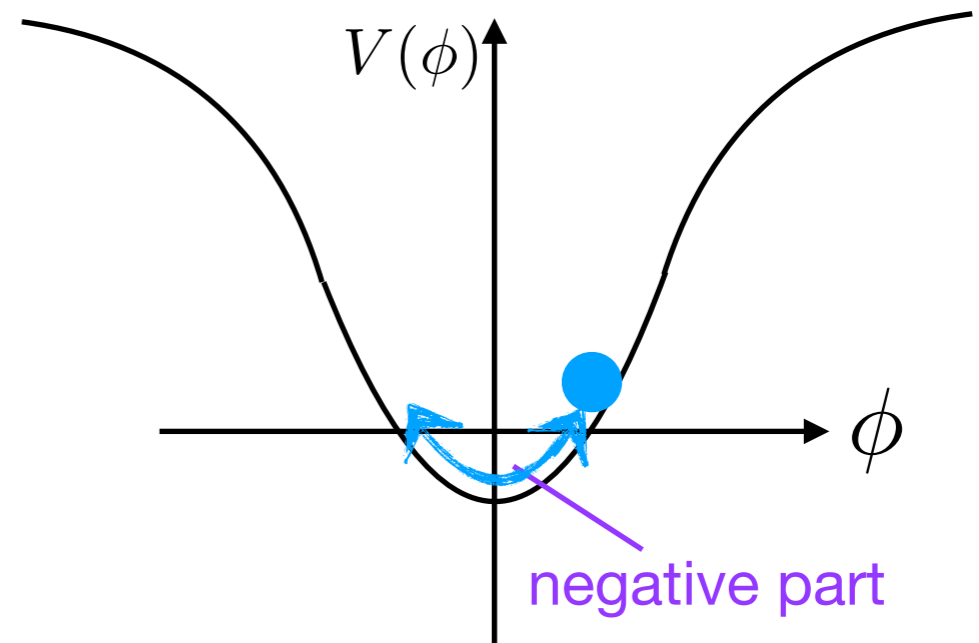
$$H^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) - \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$

$$\dot{H} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0.$$

収縮中は、 $H < 0$ が負の摩擦として働く。

スカラーポテンシャル



2. 収縮期

運動方程式

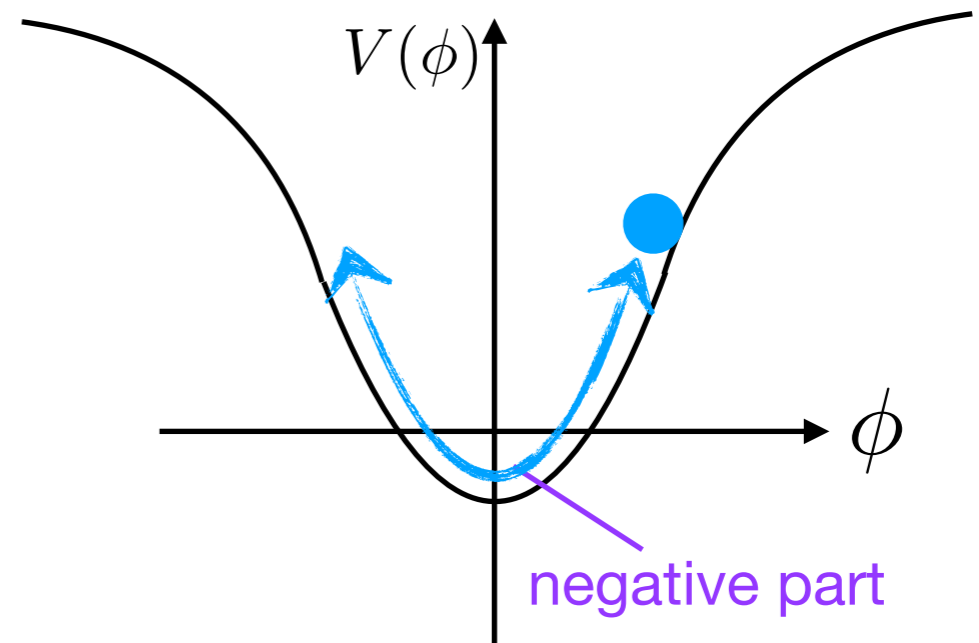
$$H^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) - \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$

$$\dot{H} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0.$$

収縮中は、 $H < 0$ が負の摩擦として働く。

スカラーポテンシャル



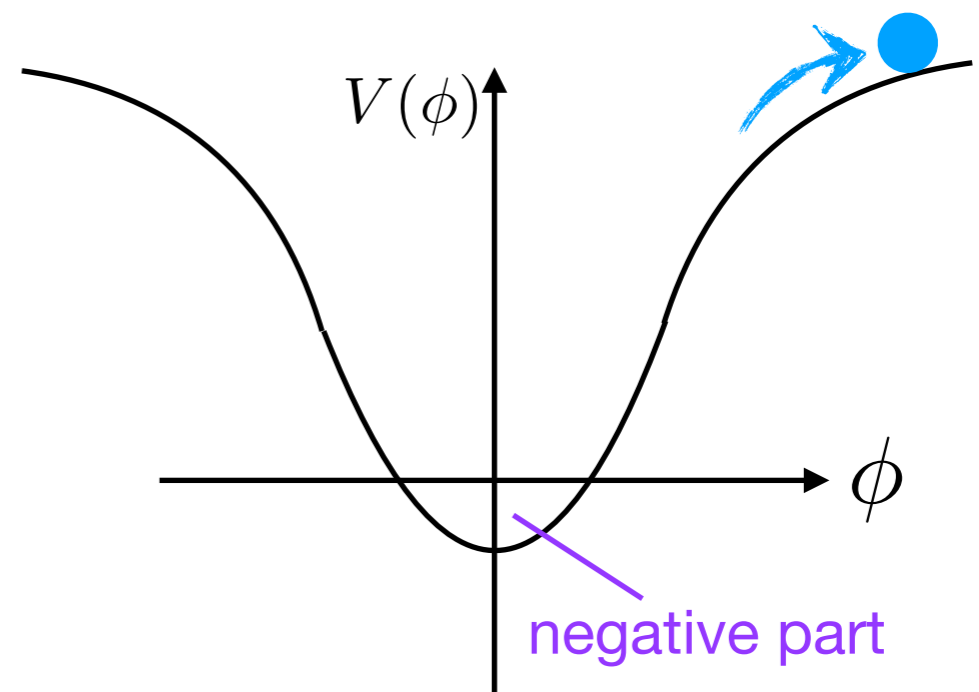
2. 収縮期

運動方程式

$$H^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) - \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$
$$\dot{H} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{\mathcal{K}}{a^2},$$
$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0.$$

収縮中は、 $H < 0$ が負の摩擦として働く。

スカラーポテンシャル



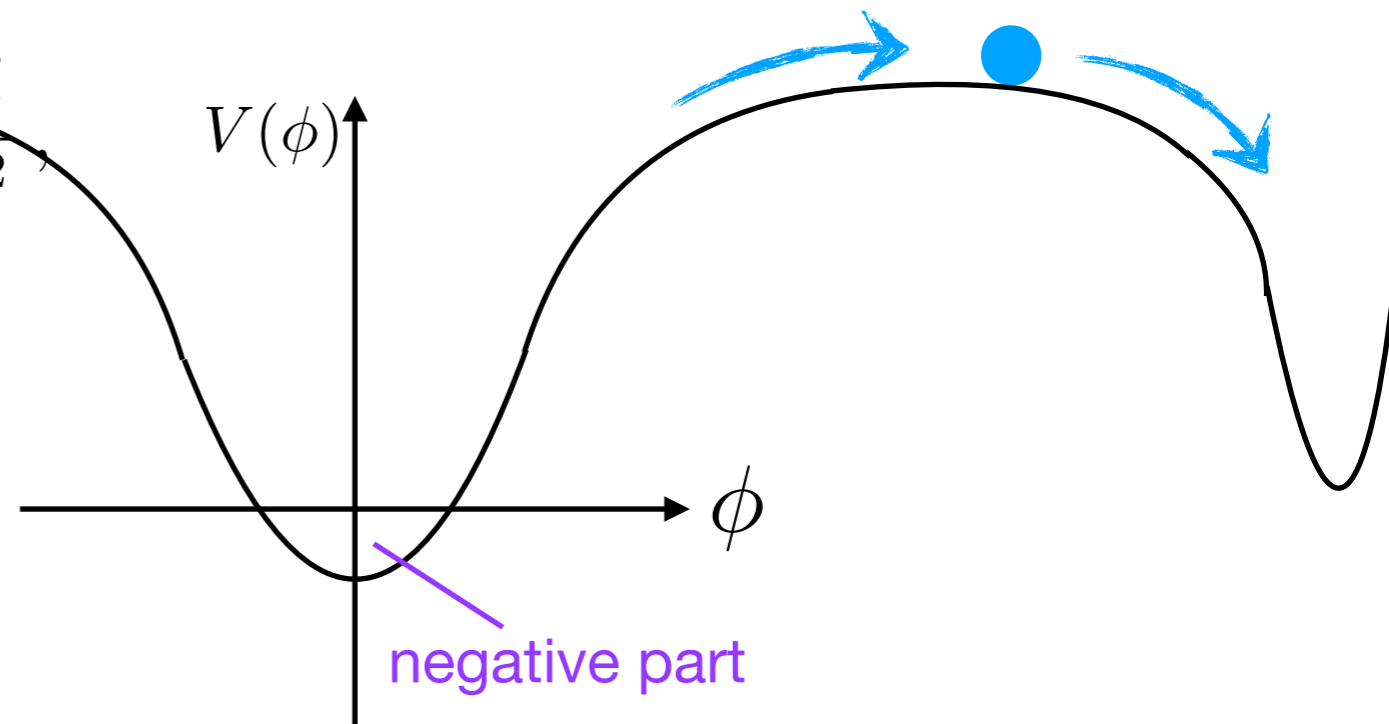
もし平らになった辺りで運動項が十分抑えられていたら、
正の曲率が成長してバウンスが可能。

3. 二度目の膨張期

運動方程式

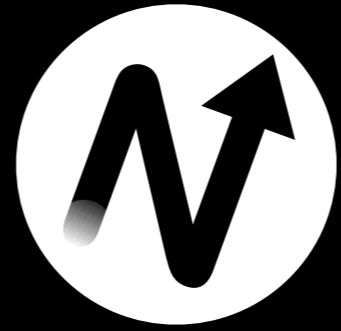
$$H^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) - \frac{\kappa}{a^2},$$
$$\dot{H} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{\kappa}{a^2},$$
$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0.$$

スカラーポテンシャル



バウンスの為に導入した平らなポテンシャルが、
スローロールインフレーションを可能にする。

(インフレーションの期間が十分長ければ) 観測と consistent.



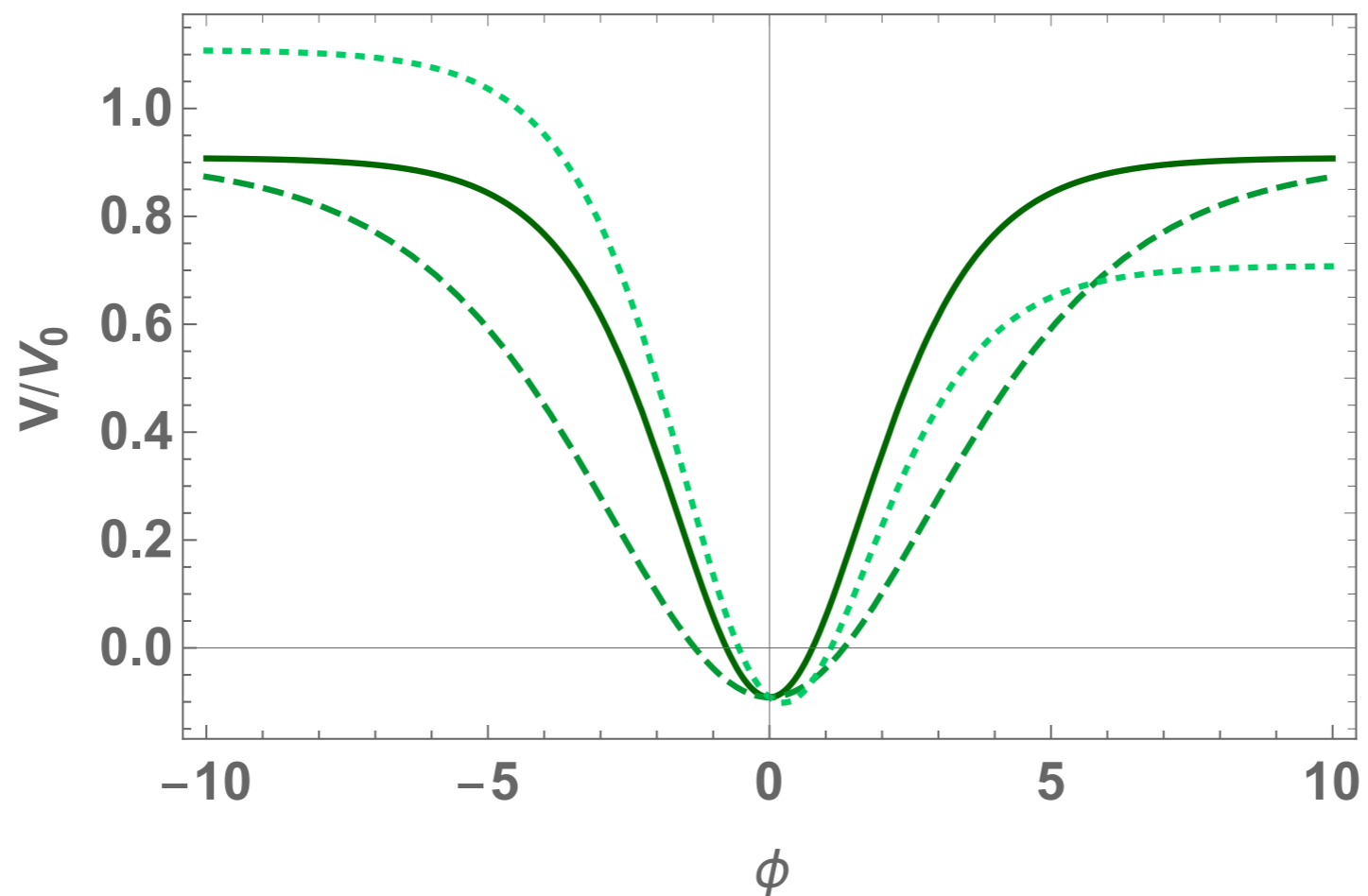
具体例と数値計算

例の模型

スカラーポテンシャル

$$V(\phi) = V_0 \left(\tanh^2 \left[\frac{\phi}{\sqrt{6\alpha}} \right] + \beta \tanh \left[\frac{\phi}{\sqrt{6\alpha}} \right] + \gamma \right)$$

$$\alpha > 0, -1 < \beta < 1, -1 < \gamma \leq 0$$



数値計算結果

$$V(\phi) = V_0 \left(\tanh^2 \left[\frac{\phi}{\sqrt{6\alpha}} \right] + \beta \tanh \left[\frac{\phi}{\sqrt{6\alpha}} \right] + \gamma \right)$$

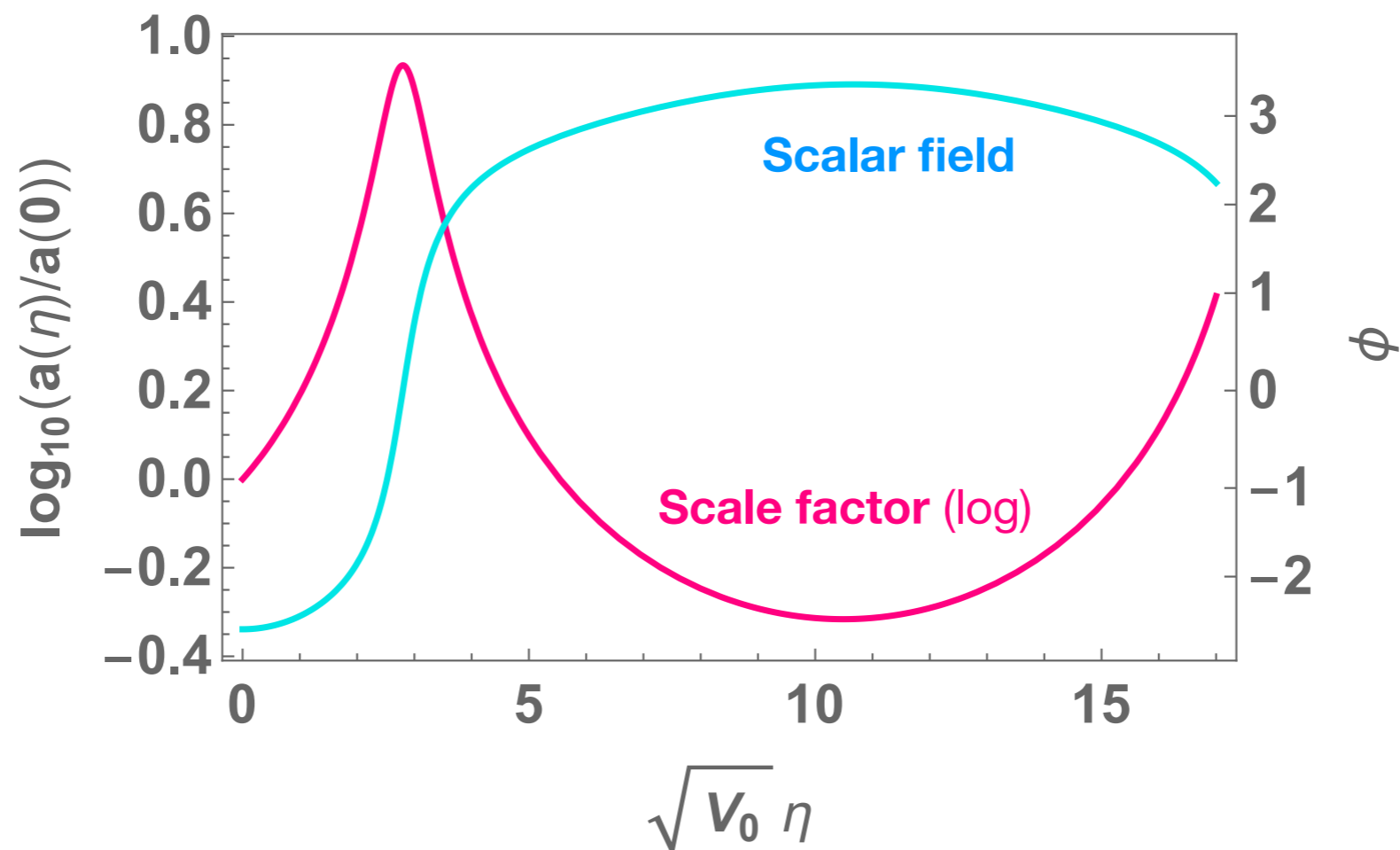
適用した初期条件・パラメター

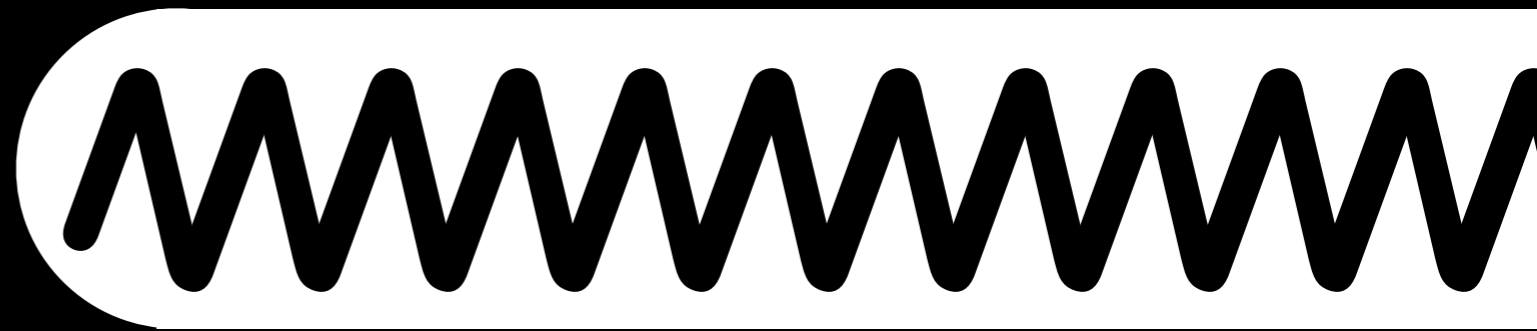
$$\phi(0) = -\sqrt{6\alpha}, \quad \dot{\phi}(0) = 0, \quad \text{and}$$

$$\alpha = 1, \quad \beta = 0, \quad \gamma = -0.09143$$

$$\frac{\mathcal{K}}{a(0)^2} = 0.05\sqrt{V_0}.$$

[別のパラメターでの結果は付録参照]





サイクリック宇宙

宇宙の膨張→収縮の条件

H = 0 にする為に、運動項を相殺する候補：

1. 負のポテンシャル ($V < 0$)

2. 正の曲率 ($K > 0$)

Friedmann 方程式

$$H^2 = \frac{\rho}{3} - \frac{\mathcal{K}}{a^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \right) - \frac{\mathcal{K}}{a^2}$$

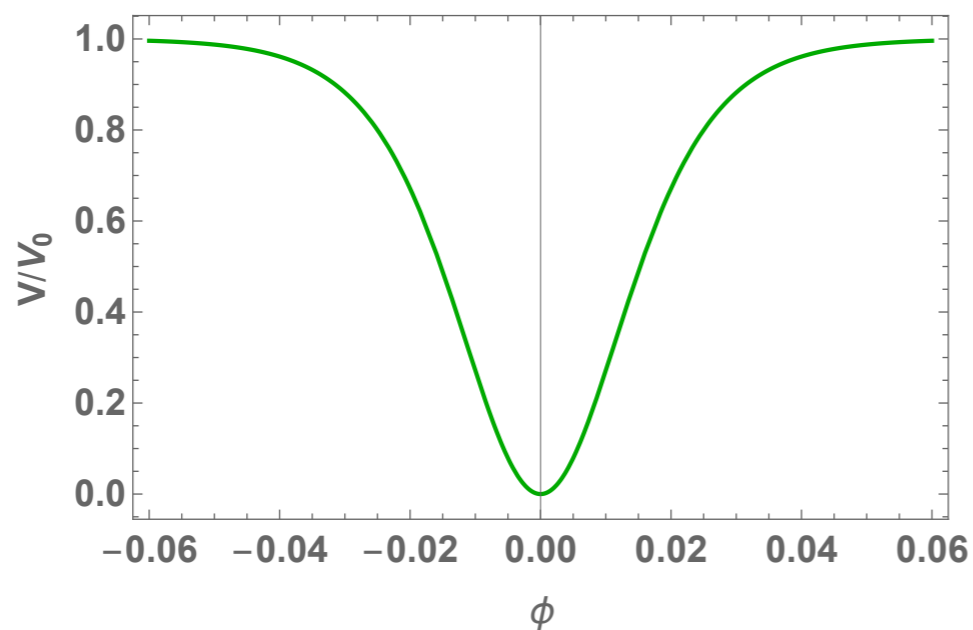
$$\dot{H} = -\frac{1}{2}(\rho + P) + \frac{\mathcal{K}}{a^2} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + \frac{\mathcal{K}}{a^2}$$

サイクリック解

Scalar potential

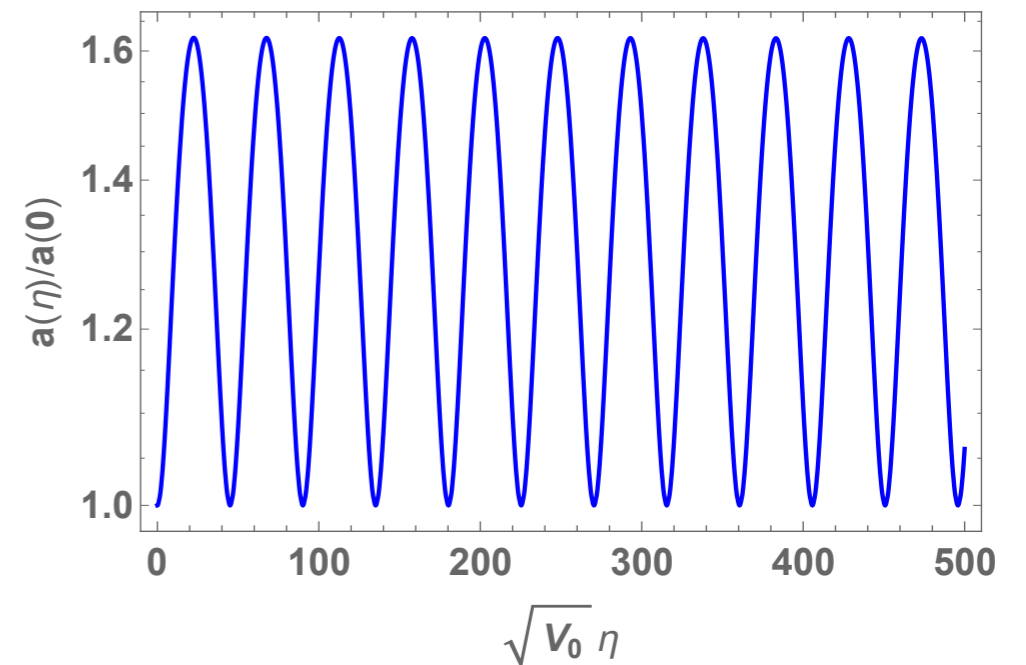
$$V(\phi) = V_0 \left(\tanh^2 \left[\frac{\phi}{\sqrt{6\alpha}} \right] + \beta \tanh \left[\frac{\phi}{\sqrt{6\alpha}} \right] + \gamma \right)$$

$$\alpha > 0, \quad -1 < \beta < 1, \quad -1 < \gamma \leq 0$$



Numerical results

$$\alpha = 5 \times 10^{-5}, \quad \beta = \gamma = 0, \quad \mathcal{K} = 0.05V_0$$



Initial conditions for numerical calculation

$$a(0) = \sqrt{\frac{3\mathcal{K}}{V(\phi)}} \quad \dot{a}(0) = 0 \quad \phi(0) = -3\sqrt{6\alpha} \quad \dot{\phi}(0) = 0$$

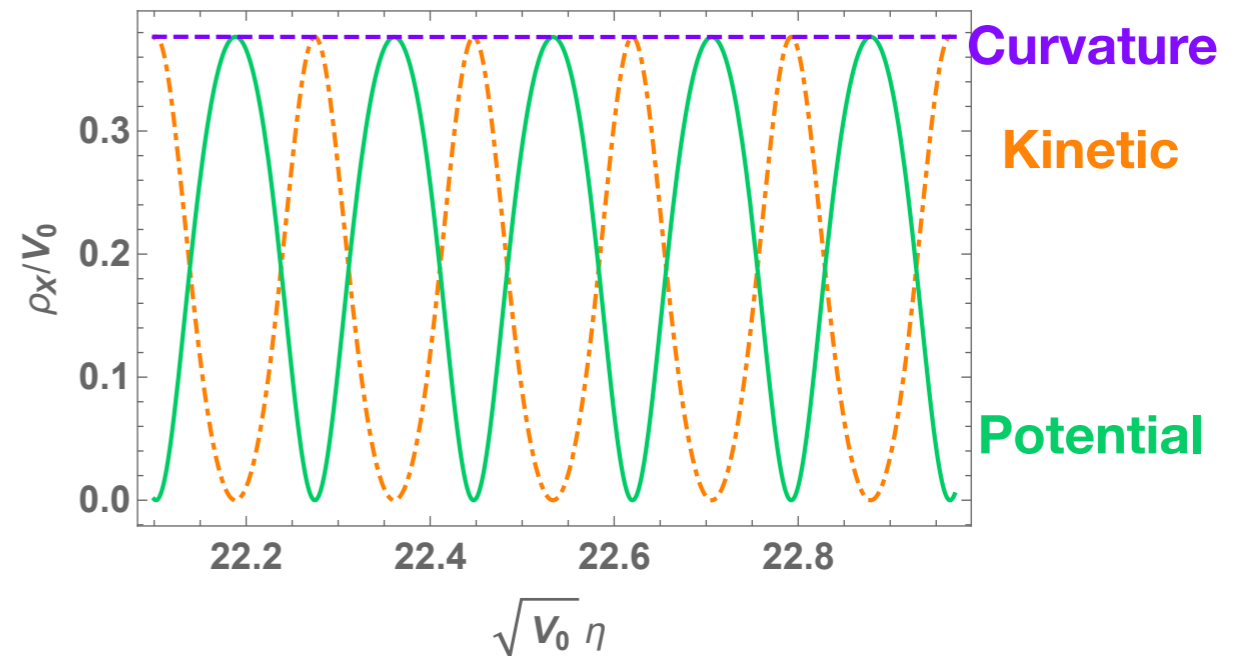
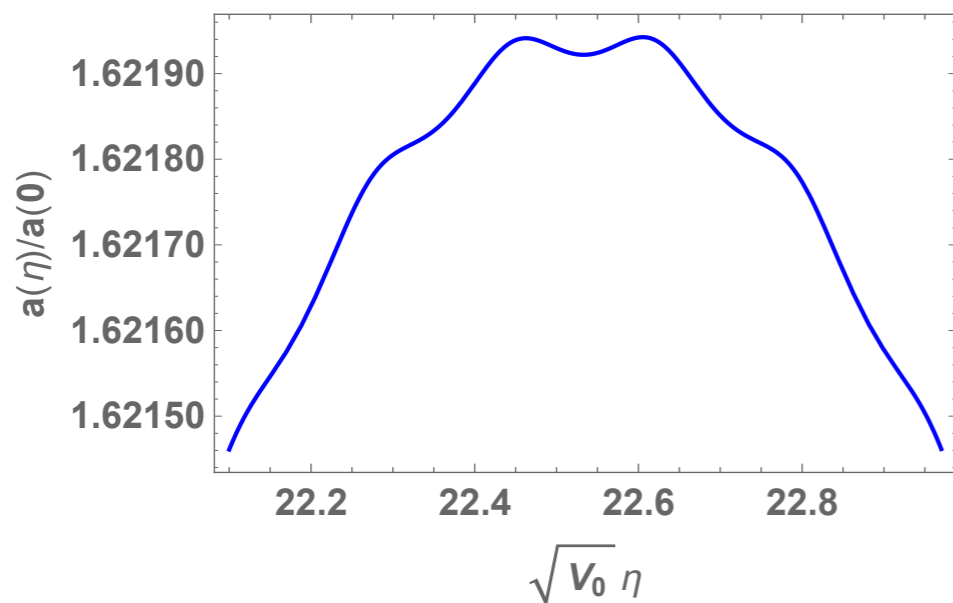
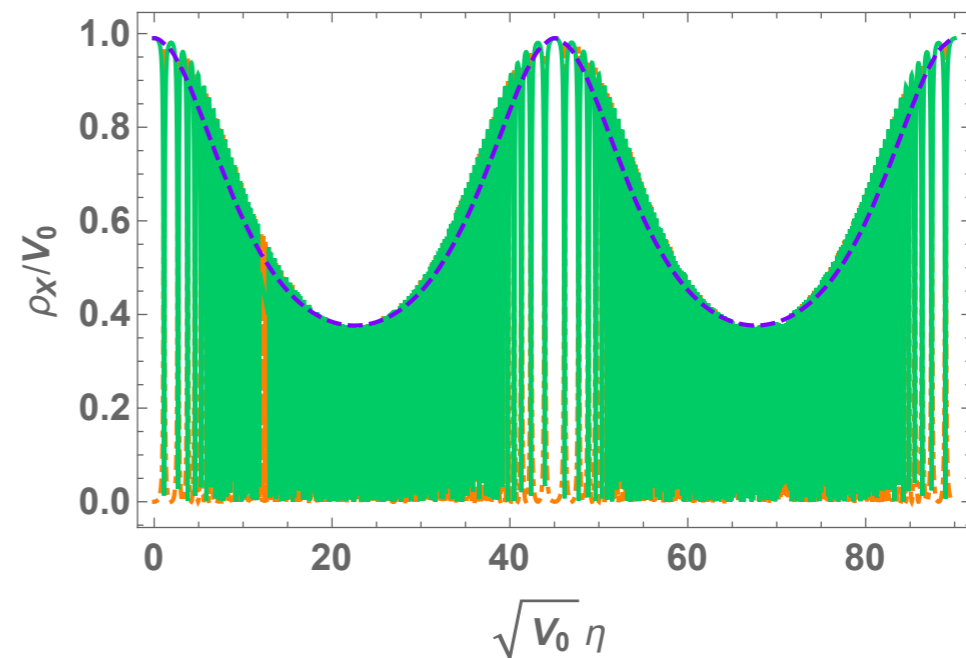
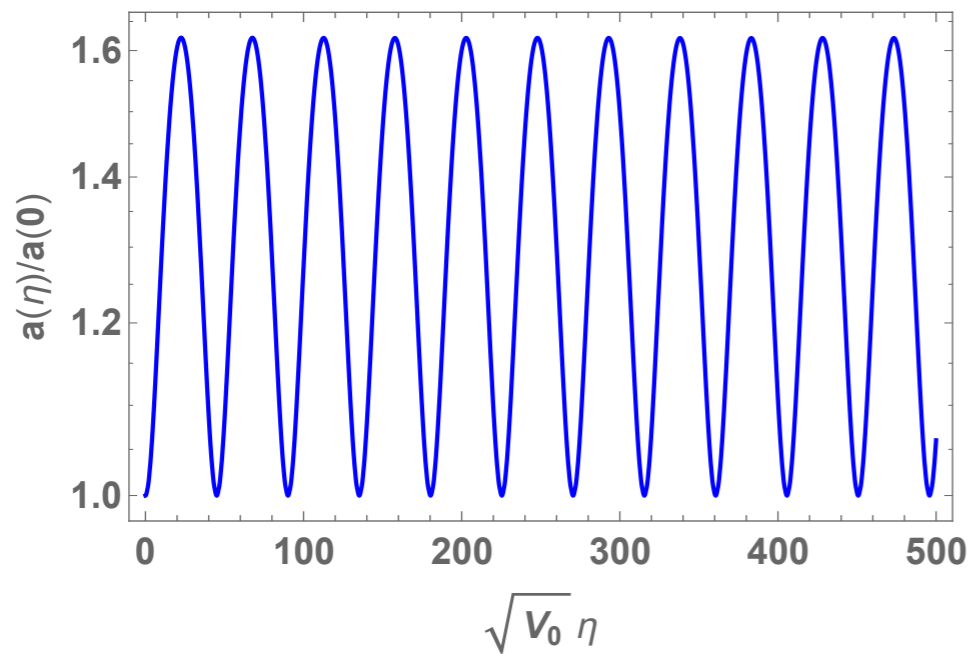
(詳細は次のスライド)

サイクリック解

Scale factor

$$\alpha = 5 \times 10^{-5}, \quad \beta = \gamma = 0, \quad \mathcal{K} = 0.05V_0$$

Energy densities



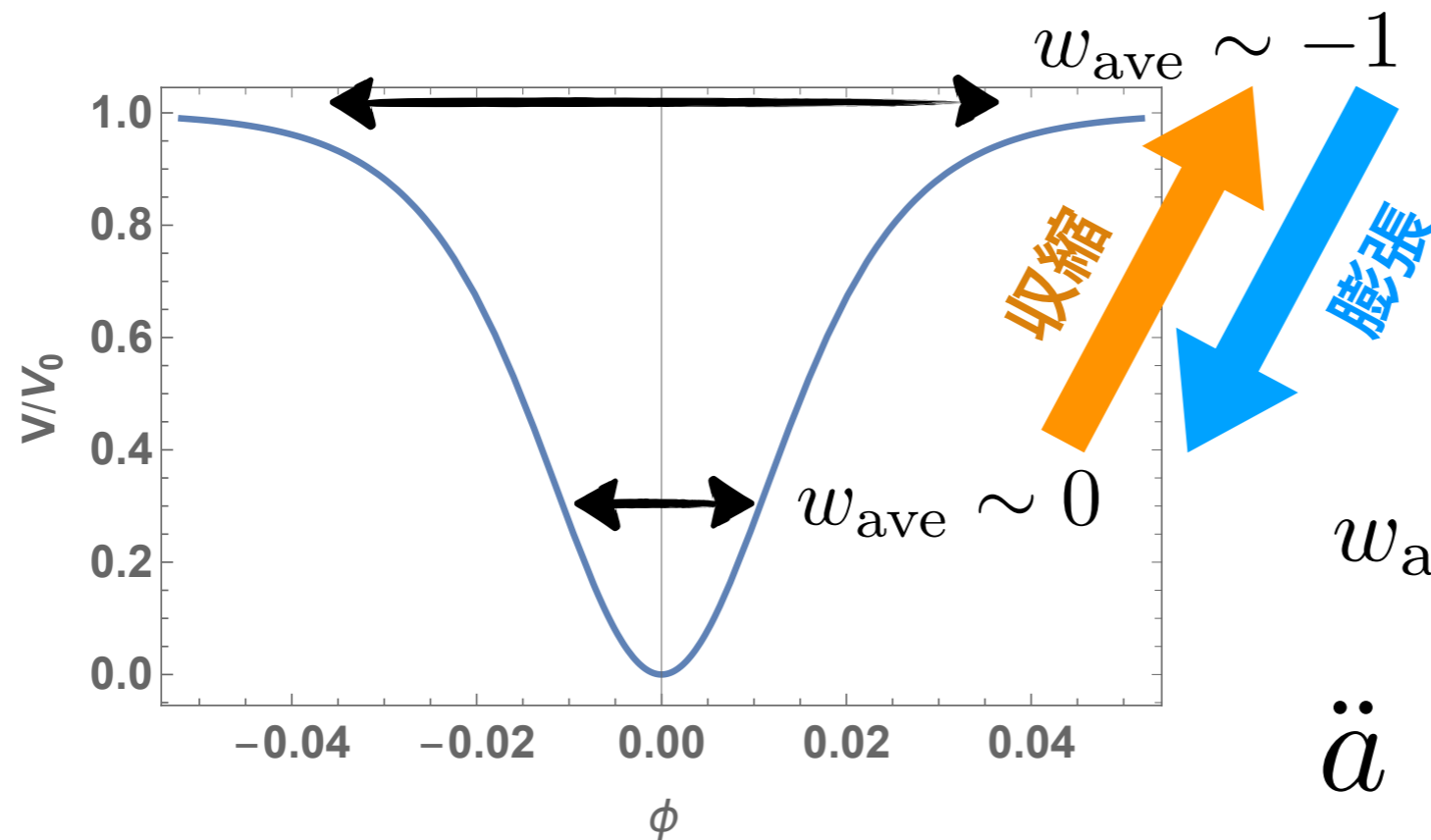
サイクルの機構

スカラー場の振動平均をとり粗視化する。

状態方程式パラメター

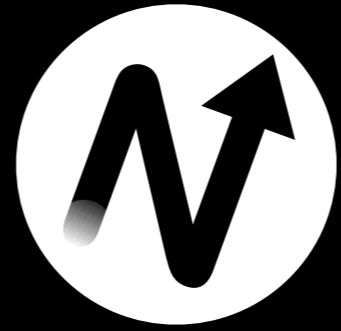
$$w = P/\rho$$

$$w_{\text{ave}} = \langle w \rangle_{\text{osc}}$$



w_{ave} は $-1/3$ のまわりで振動する。

$$\ddot{a} \gtrsim 0 \quad \Leftrightarrow \quad w \lesssim -\frac{1}{3}$$



議論・結論

Discussion

[いくつかのトピックの詳細は付録参照]

Discussion

- **過去**に起きた可能性に加えて、**将来**起こる可能性もある。

Discussion

- **過去**に起きた可能性に加えて、**将来**起こる可能性もある。
- 収縮期間が長い程**チューニングが必要**. 人間原理的な正当化?

Discussion

- **過去**に起きた可能性に加えて、**将来**起こる可能性もある。
- 収縮期間が長い程**チューニングが必要**。人間原理的な正当化？
- インフレーション期間は**エターナル**永久か、**丁度必要な分**か。観測可能な効果？

Discussion

- **過去**に起きた可能性に加えて、**将来**起こる可能性もある。
- 収縮期間が長い程**チューニングが必要**。人間原理的な正当化？
- インフレーション期間は**エターナル**永久か、**丁度必要な分**か。観測可能な効果？
- **CMBデータ**はやや正の曲率を示唆。**H₀ テンション**の低減。

Discussion

- **過去**に起きた可能性に加えて、**将来**起こる可能性もある。
- 収縮期間が長い程**チューニングが必要**。人間原理的な正当化？
- インフレーション期間は**エターナル**永久か、**丁度必要な分**か。観測可能な効果？
- **CMBデータ**はやや正の曲率を示唆。**H₀ テンション**の低減。
- **超弦ランドスケープ**からの泡宇宙では負の曲率なので対照的。

Discussion

- **過去**に起きた可能性に加えて、**将来**起こる可能性もある。
- 収縮期間が長い程**チューニングが必要**。人間原理的な正当化？
- インフレーション期間は**エターナル**永久か、**丁度必要な分**か。観測可能な効果？
- **CMBデータ**はやや正の曲率を示唆。**H₀ テンション**の低減。
- **超弦ランドスケープ**からの泡宇宙では負の曲率なので対照的。
- 収縮期に**真空のエネルギー**が**変化**するシナリオと組み合わせられる。

[いくつかのトピックの詳細は付録参照]

Discussion

- **過去**に起きた可能性に加えて、**将来**起こる可能性もある。
- 収縮期間が長い程**チューニングが必要**。人間原理的な正当化？
- インフレーション期間は**エターナル**永久か、**丁度必要な分**か。観測可能な効果？
- **CMBデータ**はやや正の曲率を示唆。**H₀ テンション**の低減。
- **超弦ランドスケープ**からの泡宇宙では負の曲率なので対照的。
- 収縮期に**真空のエネルギー**が**変化**するシナリオと組み合わせられる。
- 任意の**高いエネルギー**スケールでの**バウンス**が可能かもしれない。

[いくつかのトピックの詳細は付録参照]

まとめと結論

まとめと結論

- **新しい非自明な宇宙論的解を発見した。**
 - (無からの創世 →) 膨張 → 収縮 → 再膨張 (インフレーション)
 - (無からの創世 →) 循環 (サイクリック) 宇宙

まとめと結論

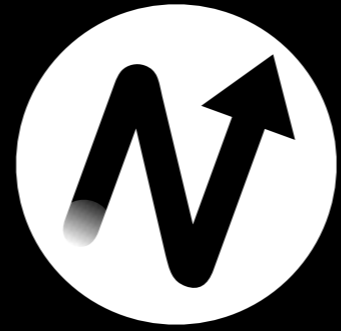
- **新しい非自明な宇宙論的解を発見した。**
 - (無からの創世 →) 膨張 → 収縮 → 再膨張 (インフレーション)
 - (無からの創世 →) 循環 (サイクリック) 宇宙
- **4次元 Einstein 重力, 実スカラー。**
Null Energy Condition を破らない。 特異性も無い。

まとめと結論

- **新しい非自明な宇宙論的解を発見した。**
 - (無からの創世 →) 膨張 → 収縮 → 再膨張 (インフレーション)
 - (無からの創世 →) 循環 (サイクリック) 宇宙
- **4次元 Einstein 重力, 実スカラー。**
Null Energy Condition を破らない。 特異性も無い。
- **一般相対論 や 我々の宇宙 (過去や未来) への新しい示唆。**

まとめと結論

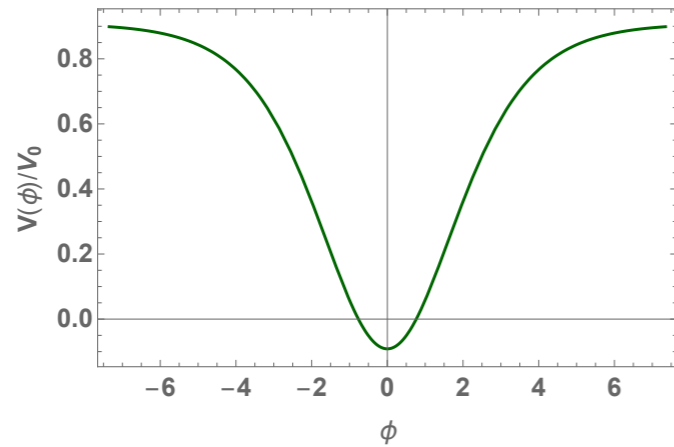
- **新しい非自明な宇宙論的解を発見した。**
 - (無からの創世 →) 膨張 → 収縮 → 再膨張 (インフレーション)
 - (無からの創世 →) 循環 (サイクリック) 宇宙
- **4次元 Einstein 重力, 実スカラー。**
Null Energy Condition を破らない。 特異性も無い。
- **一般相対論 や 我々の宇宙 (過去や未来) への新しい示唆。**
- **まだ調べてない事もたくさん。**



付録

Tuning of the offset

$$\alpha = 1, \quad \beta = 0, \quad \gamma = -0.09143$$

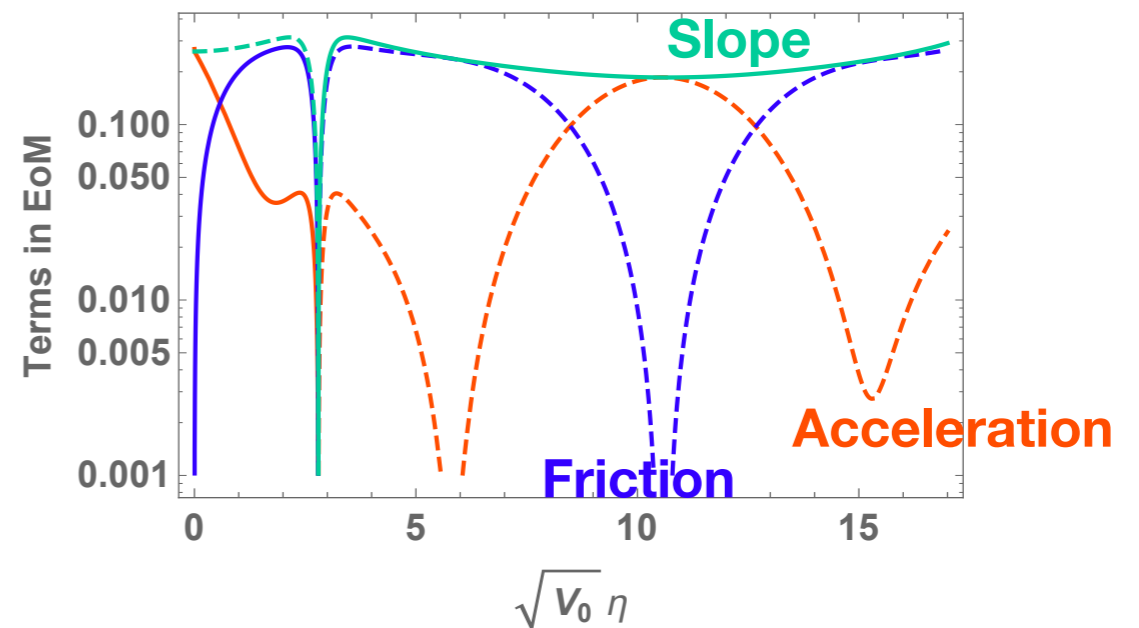
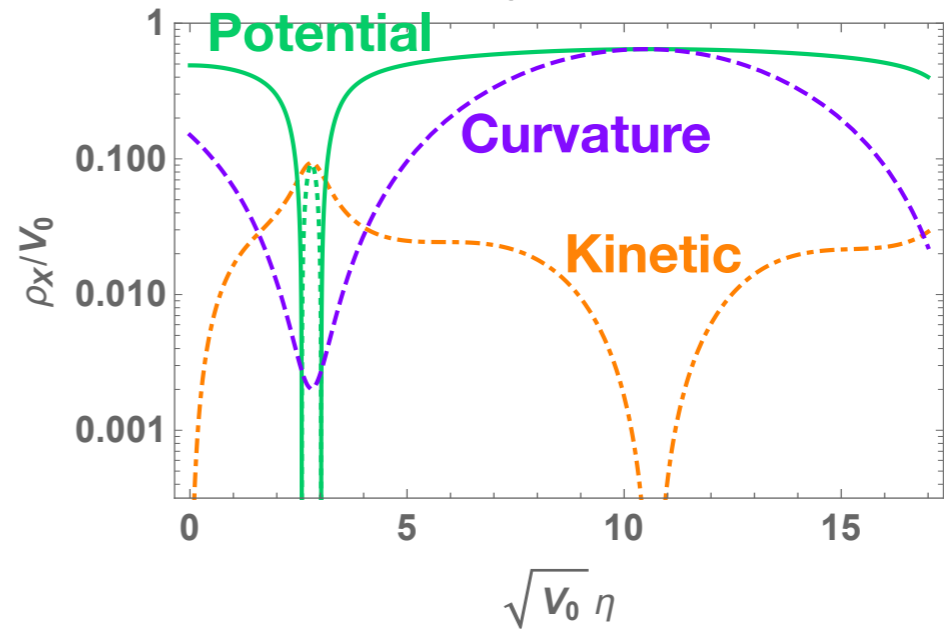
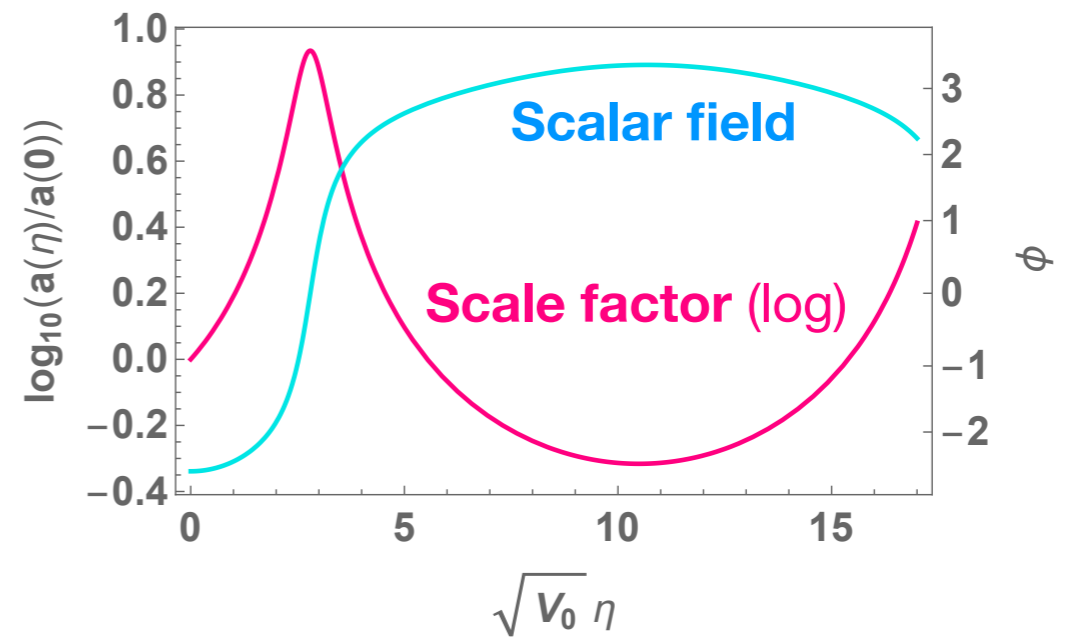


$$3H^2 = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V - \frac{3\mathcal{K}}{a^2}$$

Potential energy "Curvature energy"
Kinetic energy

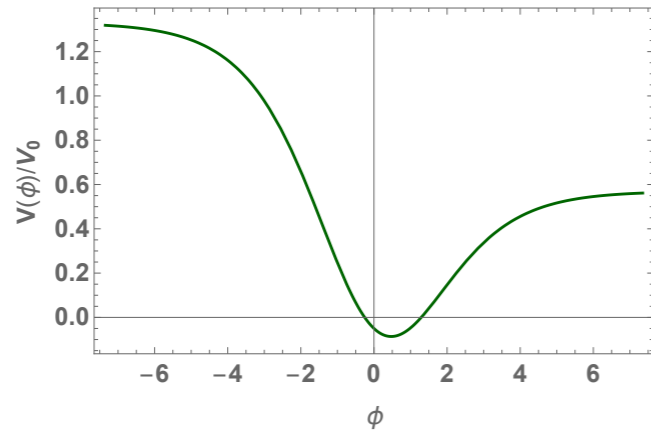
$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V}{\partial \phi} = 0$$

Acceleration Slope
Friction



Tuning of the left-right asymmetry

$$\alpha = 1, \quad \beta = -0.3805885, \quad \gamma = -0.05$$



Potential energy

$$3H^2 = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V - \frac{3\mathcal{K}}{a^2}$$

Kinetic energy

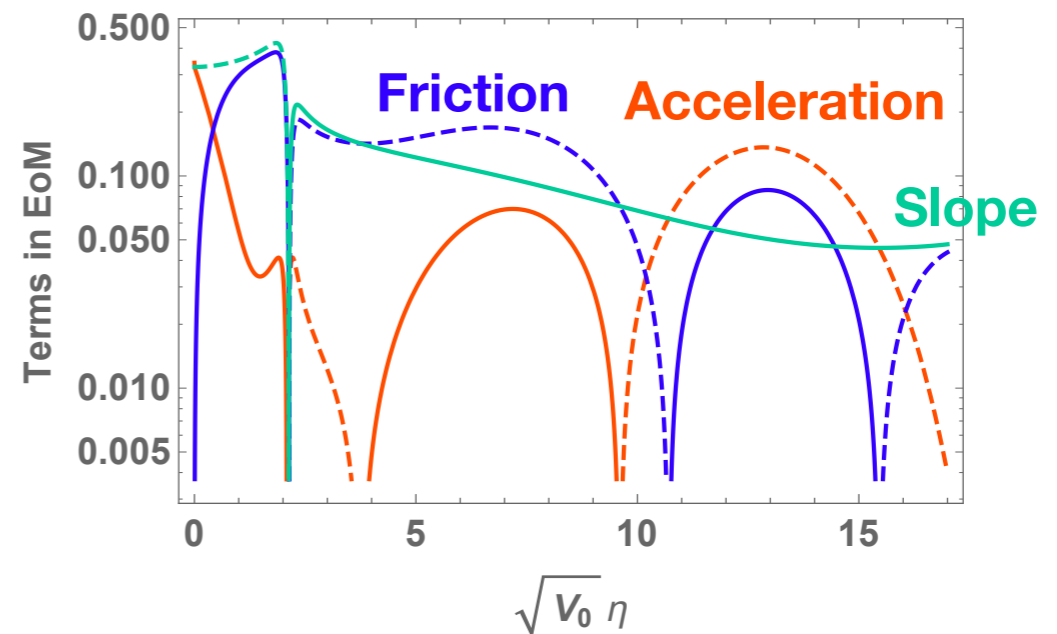
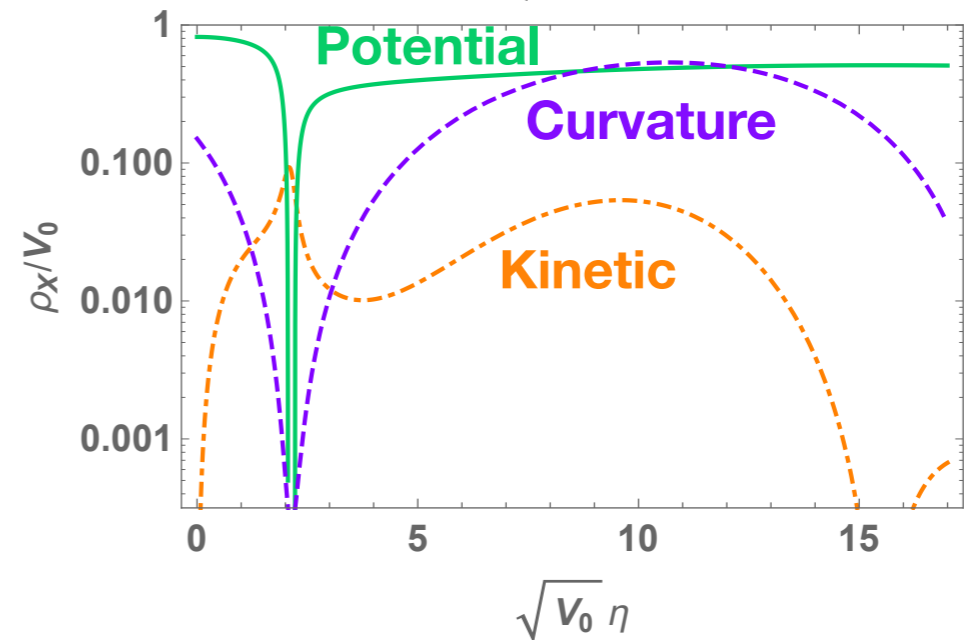
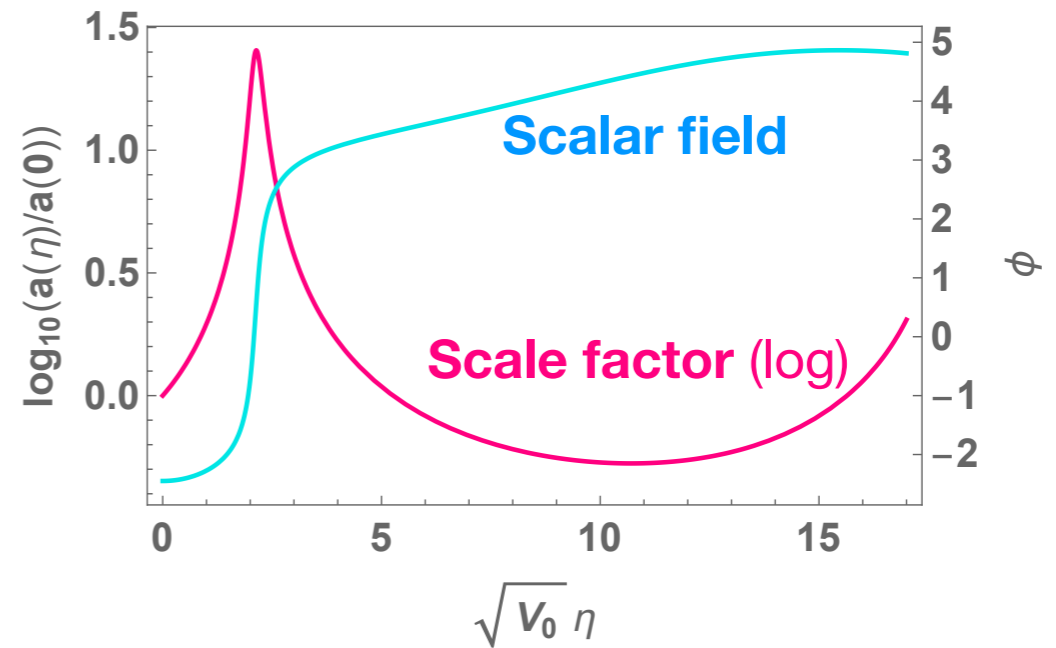
“Curvature energy”

Acceleration

Slope

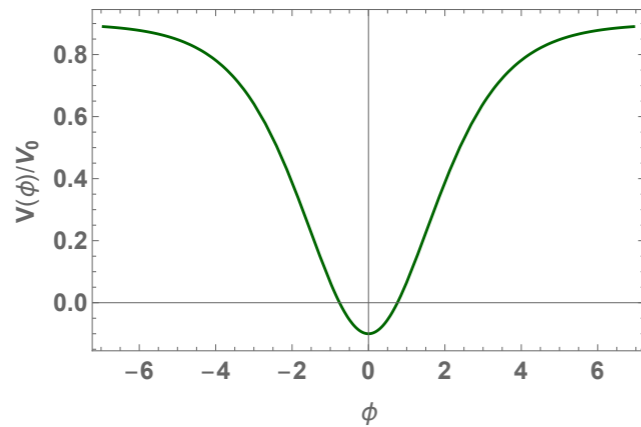
$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V}{\partial \phi} = 0$$

Friction



Tuning of the width

$$\alpha = 0.8924, \quad \beta = 0, \quad \gamma = -0.1$$

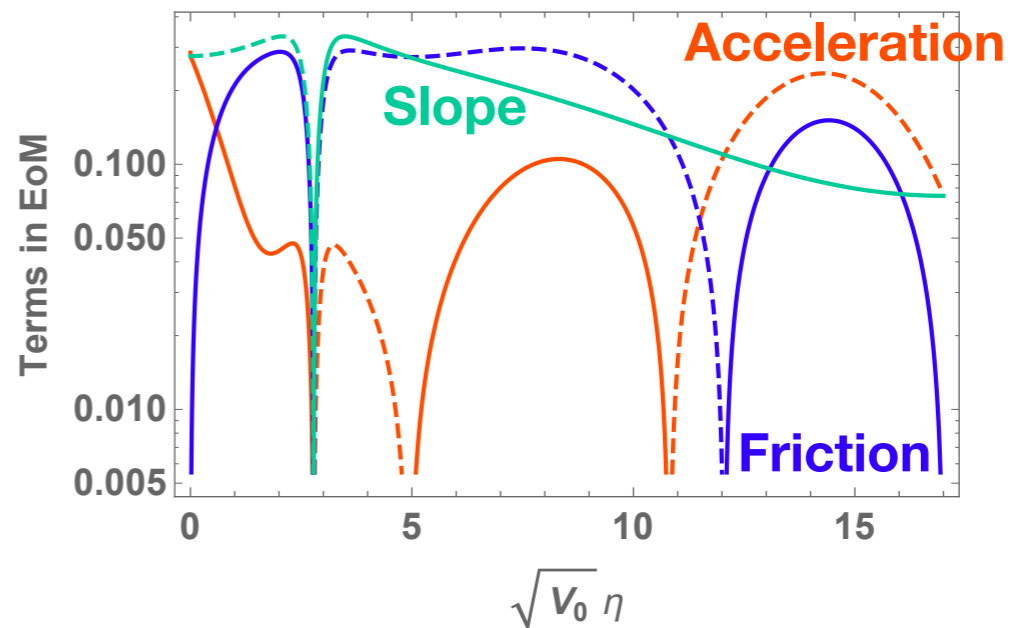
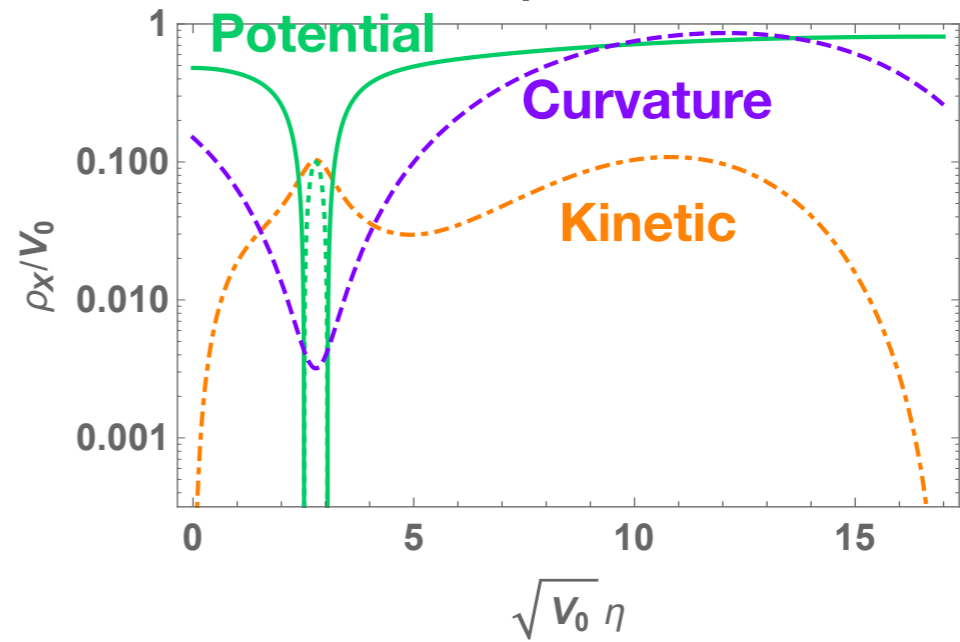
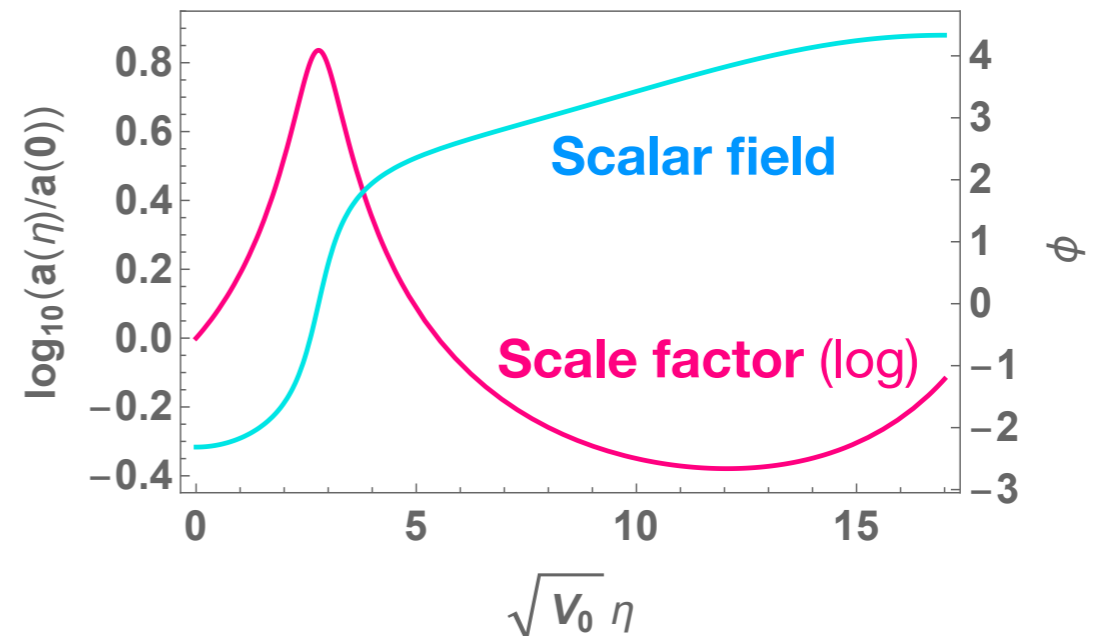


$$3H^2 = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V - \frac{3\mathcal{K}}{a^2}$$

Potential energy "Curvature energy"
Kinetic energy

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V}{\partial \phi} = 0$$

Acceleration Slope
Friction



スカラー場のダイナミクス

approximation	regime	relevance
$\ddot{\phi} + \cancel{3H\dot{\phi}} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0$	“No friction” e.g.) oscillation	relevant around H=0
$\cancel{\ddot{\phi}} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0$	“Slow-Roll regime” Potential energy dominate.	attractor solution during expansion
$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \cancel{\frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi}} = 0$	“Ultra-Slow-Roll regime” Kinetic energy is important.	attractor solution during contraction
$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0$	“Scaling solution” (special situation)	

スカラー場のダイナミクス

approximation	regime	relevance
$\ddot{\phi} + \cancel{3H\dot{\phi}} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0$	“No friction” e.g.) oscillation	relevant around H=0
$\cancel{\ddot{\phi}} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0$	“Slow-Roll regime” Potential energy dominate.	attractor solution during expansion
$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \cancel{\frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi}} = 0$	“Ultra-Slow-Roll regime” Kinetic energy is important.	attractor solution during contraction
$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} = 0$	“Scaling solution” (special situation)	

如何に運動エネルギーを
抑えるかがバウンス成功の鍵



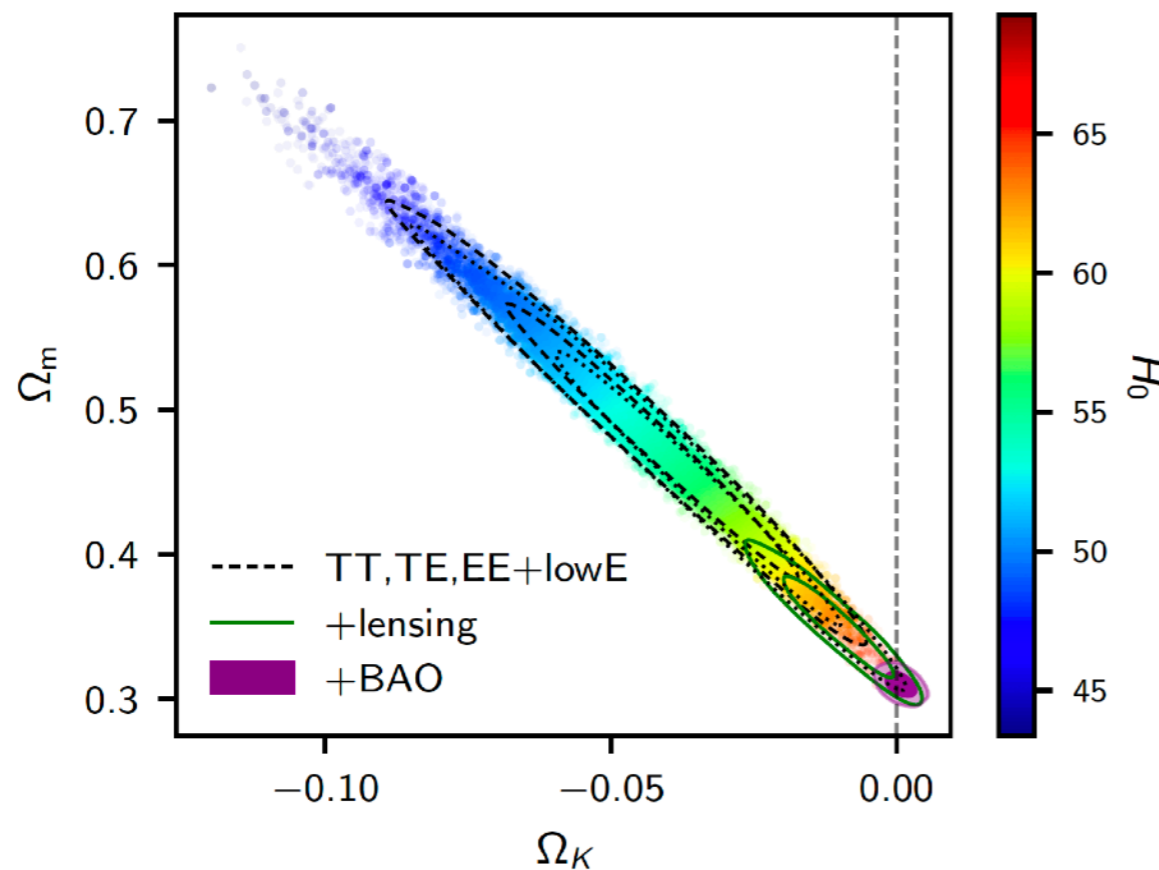
曲率への制限

$$\Omega_{\mathcal{K}} = -0.056^{+0.028}_{-0.018} \quad (68\%, \text{ Planck TT+lowE})$$

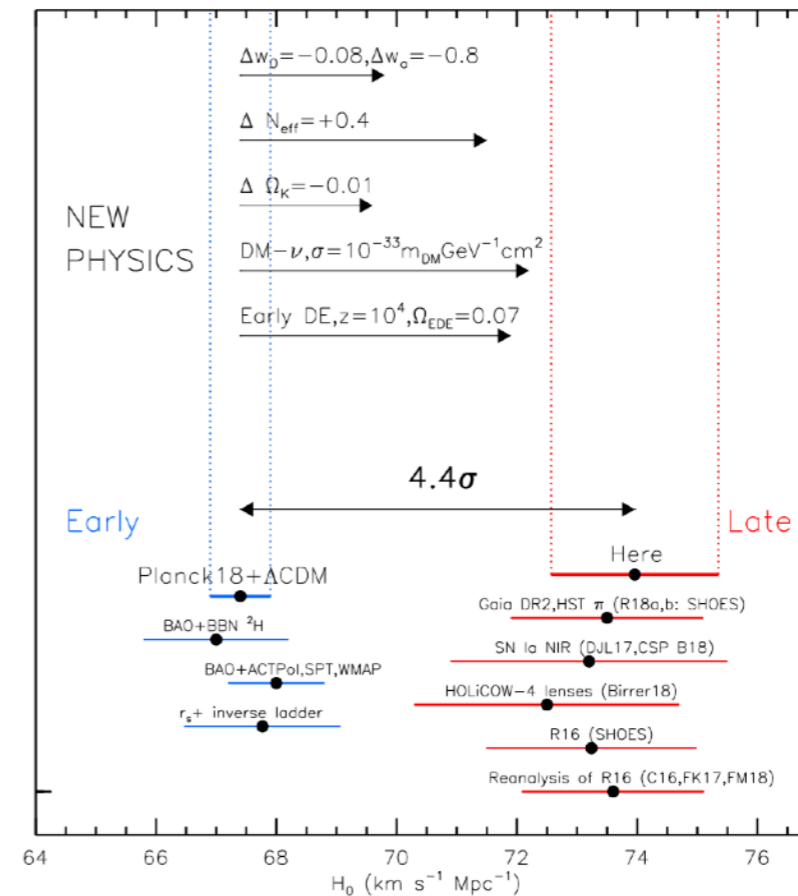
$$\Omega_{\mathcal{K}} = -0.044^{+0.018}_{-0.015} \quad (68\%, \text{ Planck TT,TE,EE+lowE})$$

$$\Omega_{\mathcal{K}} = -0.0106 \pm 0.0065 \quad (68\%, \text{ Planck TT,TE,EE+lowE+lensing})$$

$$\Omega_{\mathcal{K}} = 0.0007 \pm 0.0019 \quad (68\%, \text{ Planck TT,TE,EE+lowE+lensing+BAO})$$

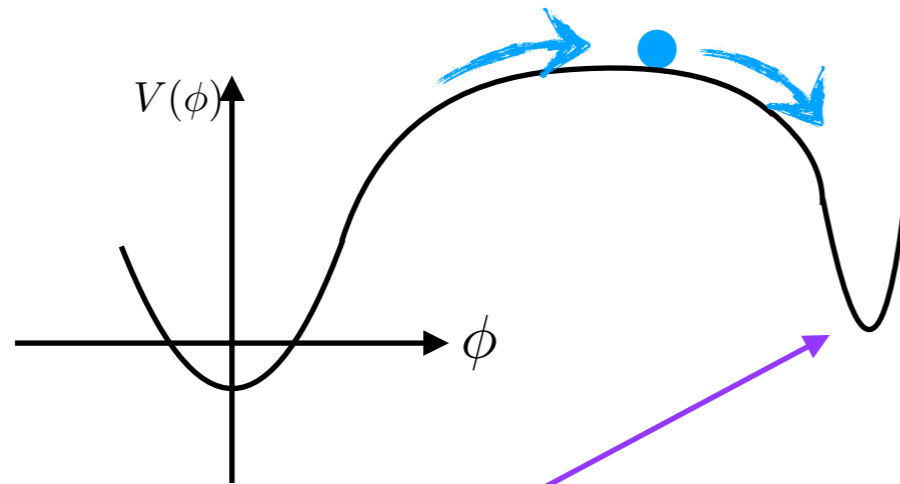


[Planck collaboration 2018: Cosmological parameters]



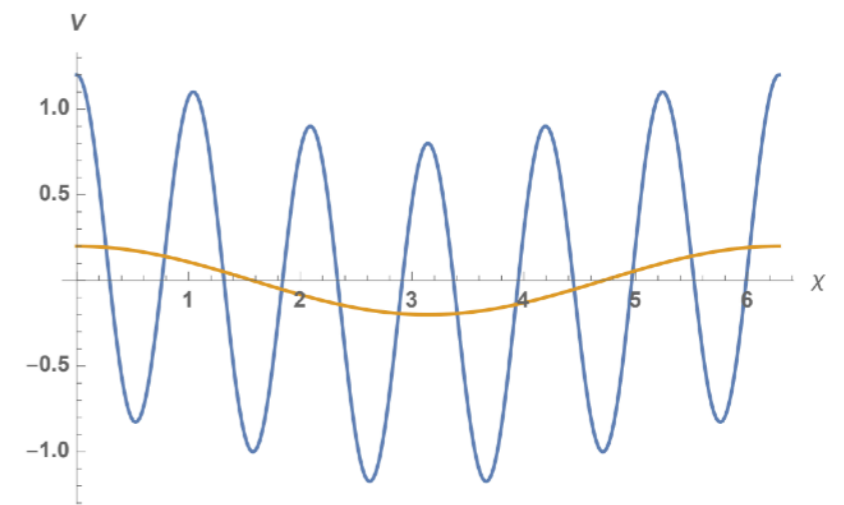
[Riess, Casertano, Yuan, Macri, Scolnic, 1903.07603]

有効真空エネルギーの底上げ



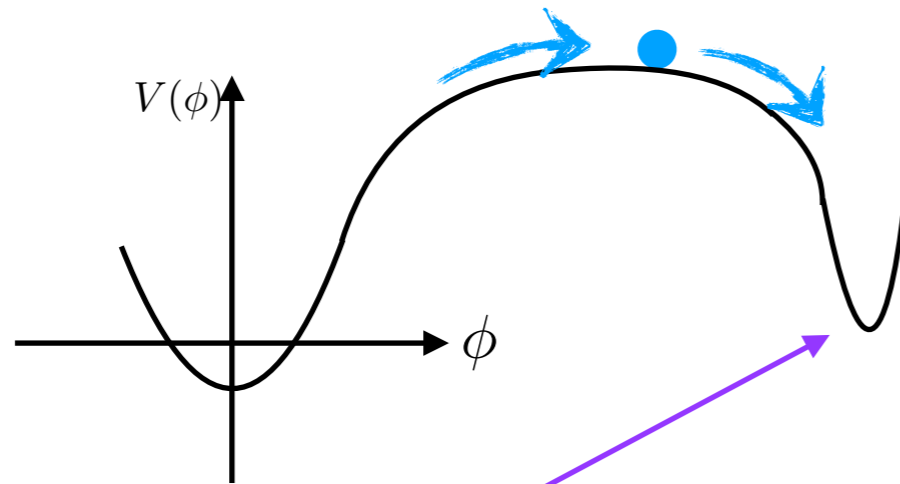
もう一つの最小点は
必ずしも必要でない。

他の軽い（アクシオンの）場のポテンシャル

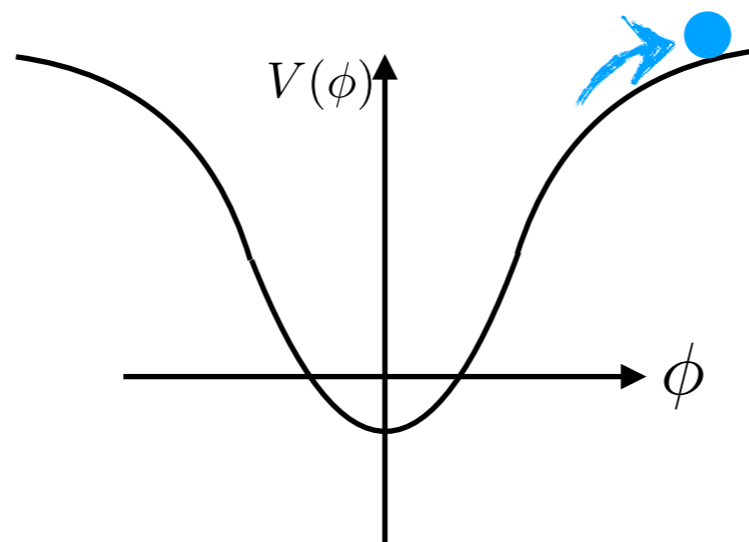


[Graham, Kaplan, Rajendran, 1902.06793]

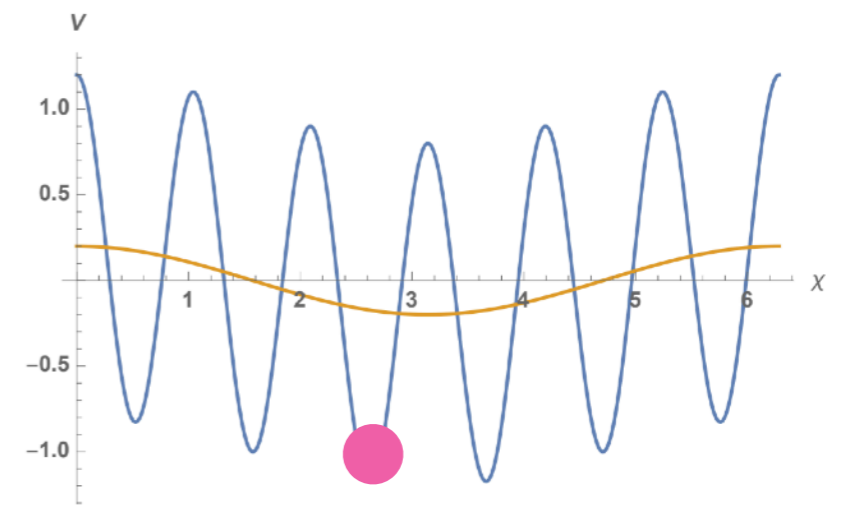
有効真空エネルギーの底上げ



もう一つの最小点は必ずしも必要でない。

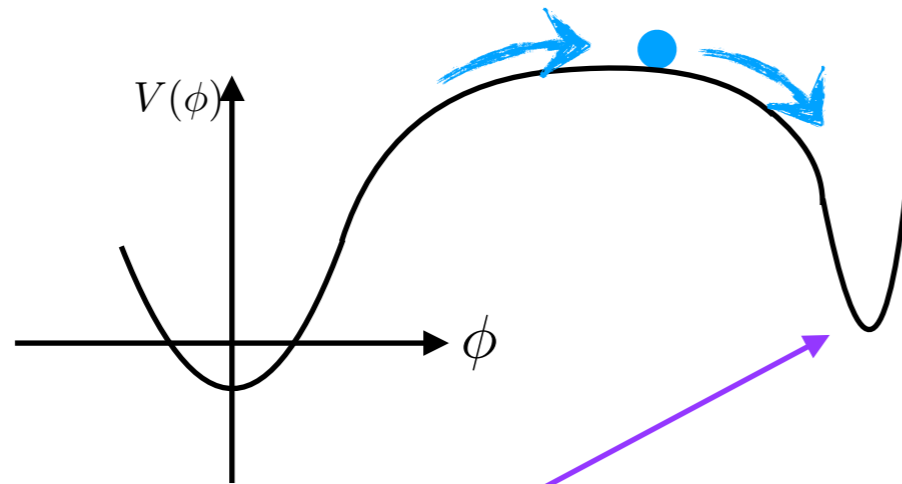


他の軽い（アクシオンの）場のポテンシャル



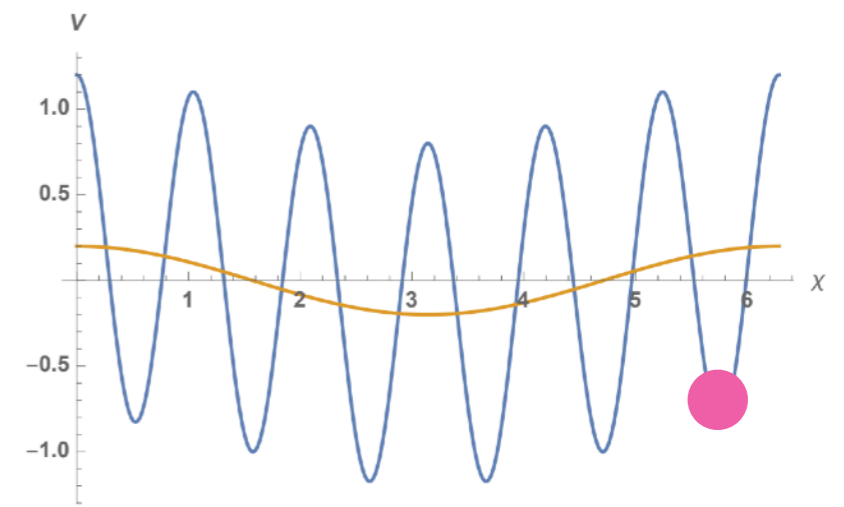
[Graham, Kaplan, Rajendran, 1902.06793]

有効真空エネルギーの底上げ

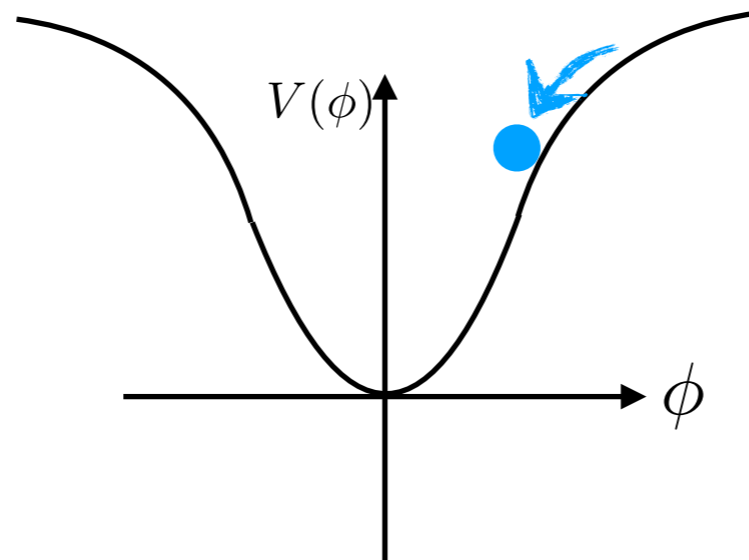


もう一つの最小点は必ずしも必要でない。

他の軽い（アクシオンの）場のポテンシャル



[Graham, Kaplan, Rajendran, 1902.06793]



有効的な宇宙定数の底上げが可能。

バウンス前にエネルギーを上昇

Kinetic-potential scaling solution

$$\frac{1}{2}\dot{\phi}^2(t) \propto V(\phi(t))$$

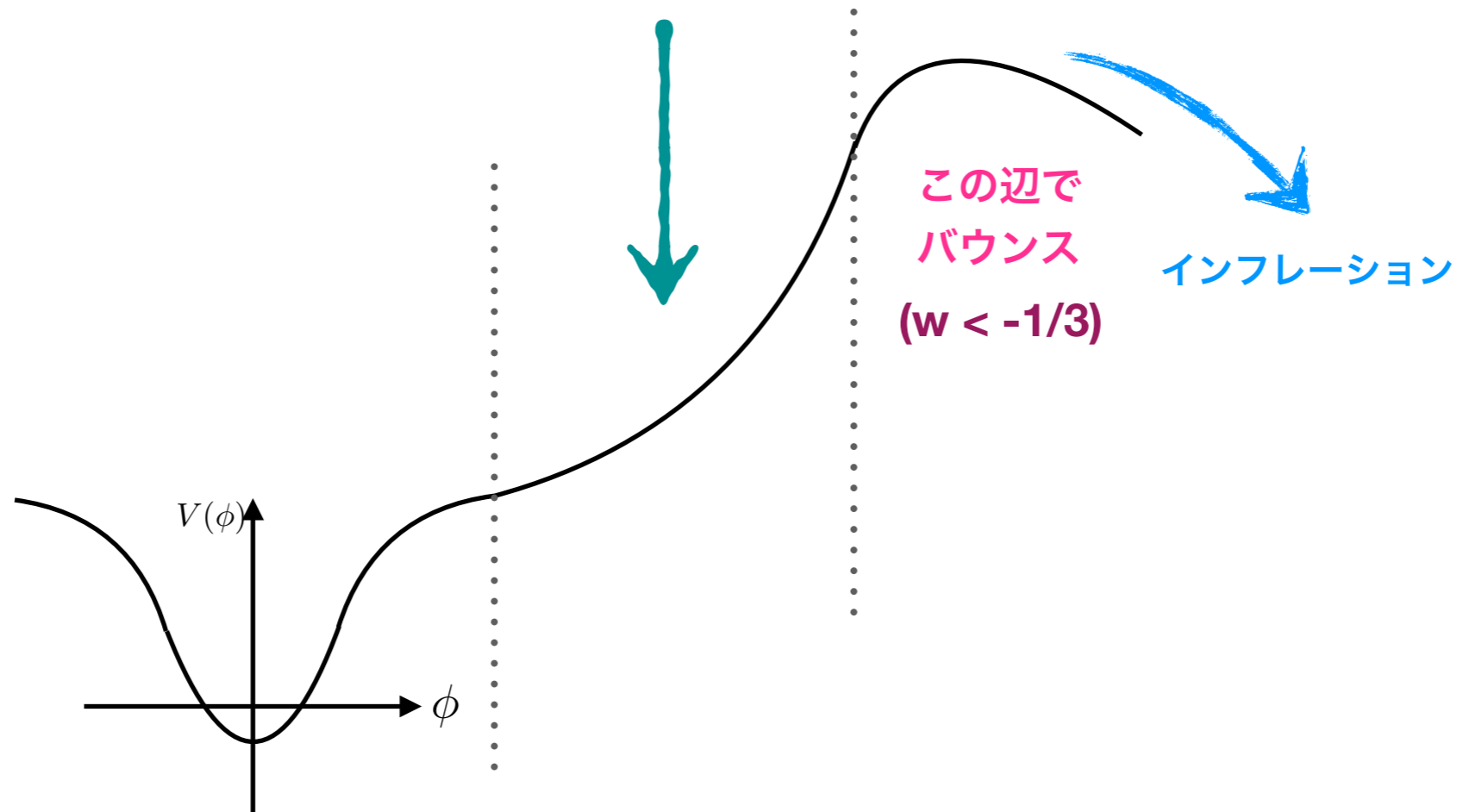
$$V(\phi) \sim \exp\left(-\sqrt{3(1+w)}\phi\right)$$

バウンス前にエネルギーを上昇

Kinetic-potential scaling solution

$$\frac{1}{2}\dot{\phi}^2(t) \propto V(\phi(t))$$

$$V(\phi) \sim \exp\left(-\sqrt{3(1+w)}\phi\right)$$

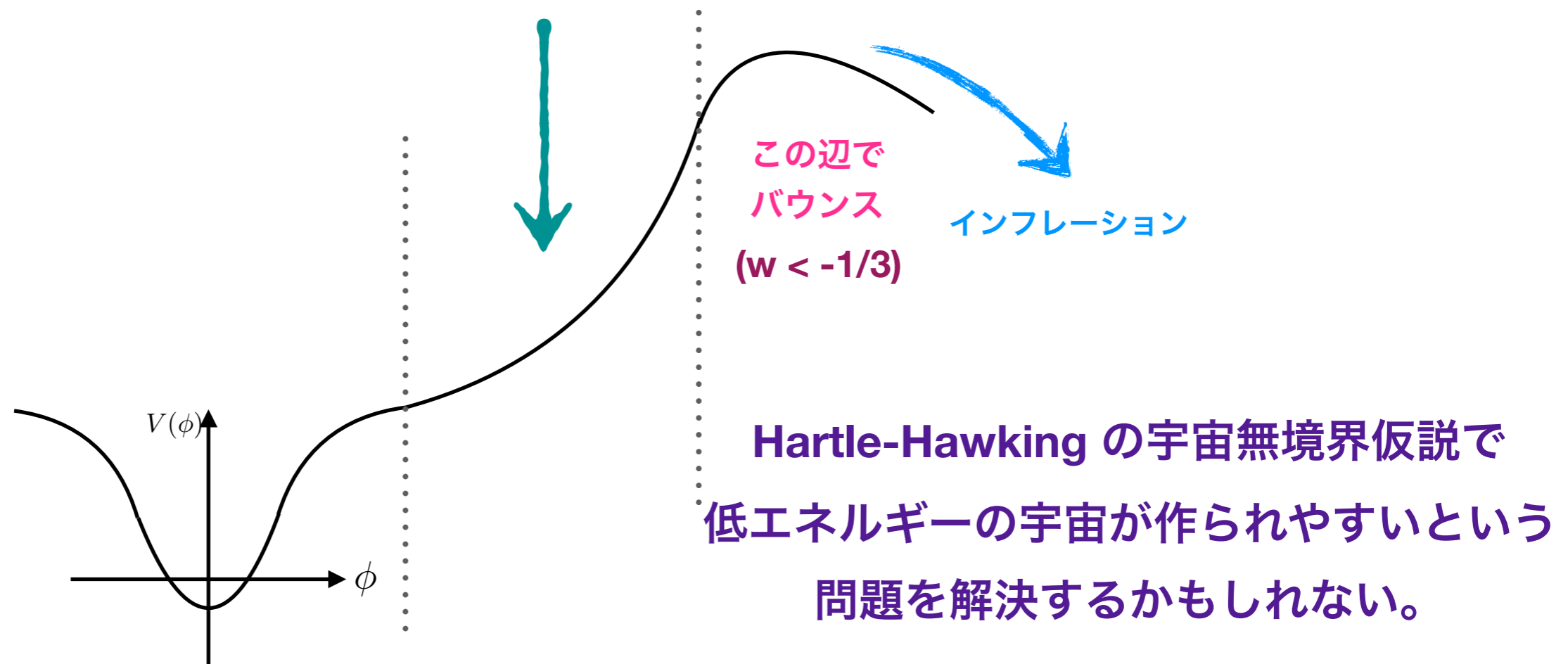


バウンス前にエネルギーを上昇

Kinetic-potential scaling solution

$$\frac{1}{2}\dot{\phi}^2(t) \propto V(\phi(t))$$

$$V(\phi) \sim \exp\left(-\sqrt{3(1+w)}\phi\right)$$



関連する文献

我々のシナリオは全体としては新しく面白い可能性を提唱するが、個々の部分を見ると既に知られている事の組み合わせになっている。

我々のシナリオでは多くの文献と異なり、

Null Energy Condition を破らず、曲率等の特異性も無い。

Contraction by a negative potential

[Linde, hep-th/0110195]

[Felder et al., hep-th/0202017]

Cyclic universe

[Kardashev, MNRAS 243, 252 (1990)]

[Dabrowski, gr-qc/9503017]

[Graham, Horn, Kachru, Rajendran, Torroba, 1109.0282]

[Graham, Horn, Rajendran, Torroba, 1405.0282]

See also

[Biswas, 0801.1315]

[Biswas, Alexander, 0812.3182]

[Barrow, Ganguly, 1703.05969]

[Ganguly, Barrow, 1710.00747]

Bounce with positive curvature

[Martin, Peter, hep-th/0307077]

[Gordon, Turok, hep-th/0206138]

[Falciano, Lilley, Peter, 0802.1196]

[Haro, 1511.05048]

[Parker, Fulling, PRD7, 2357 (1973)]

[Starobinsky, SAL4, 82 (1978)]

[Barrow, Matzner, PRD21, 336 (1980)]

[Hawking, Les Houches 1983]

[Page, CQG 1, 417 (1984)]

[Schmidt, gr-qc/0108087]

[Cornish, Shellard, gr-qc/9708046]

See also the references of our paper.

どこが新しいか

我々の知る限り、我々のシナリオは以下の条件を満たすものとして新しい。

共通の条件

- (A) 4次元 Einstein 重力,
(正の曲率を持つ FLRW 宇宙),
実正準スカラー場 (1つ)
- (B) Null Energy Condition を破らない,
特異性無し

“N字型” バウンスシナリオの条件

- (1) 膨張 → 収縮 → 膨張
- (2) 最後の膨張期は任意の長さで長くなれるインフレーション

サイクリックシナリオの条件

- (i) 負のポテンシャル不要
- (ii) パラメターの微調整不要