

# Awakening the Universe

～無からの創世、第二法則、創発するインフレーション～

寺田隆広 (CTPU, IBS)、共同研究者: A. Papageorgiou, H. Matsui, F. Takahashi

素粒子物理学の進展 2022、9月2日 9:00 — 9:30

宇宙はどのように生まれたのだろうか



# 宇宙はどのように生まれたのだろうか

- ビッグバン宇宙



# 宇宙はどのように生まれたのだろうか

- ビッグバン宇宙
- インフレーション宇宙



# 宇宙はどのように生まれたのだろうか

- ビッグバン宇宙
- インフレーション宇宙
- バウンス宇宙



# 宇宙はどのように生まれたのだろうか

- ビッグバン宇宙
- インフレーション宇宙
- バウンス宇宙
- サイクリック宇宙



# 宇宙はどのように生まれたのだろうか

- ビッグバン宇宙
- インフレーション宇宙
- バウンス宇宙
- サイクリック宇宙
- 無からの宇宙創生（創世）



# インフレーションは起きたのか？

観測 [Planck, 1807.06209; 1807.06211]

(ストリング)理論 cf. [濱田雄太さんのトーク] 等

- ・ CMB脱結合時に superhorizon の温度の一様性
- ・ CMB脱結合時に superhorizon の温度揺らぎの一様性
- ・ 空間曲率は 0 と **整合的**
- ・ 単純なインフレーション模型の予言と **整合的**
  - ・ 大体スケール不変で若干の red tilt
  - ・ Gauss 統計の揺らぎ
  - ・ Adiabatic 揺らぎ
- ・ Bモード偏極が検出されれば積極的な証拠  
上限が更新されつつある  $H_{\text{inf}} < 4.4 \times 10^{13} \text{ GeV}$

$r < 0.032$  [Tristram et al., 2112.07961] から換算。

cf. [BICEP/Keck, 2110.00483], [Paoletti et al., 2208.10482]

- ・ (準) de Sitter 時空を疑問視する数々の議論
  - ・ スワンブランド 沼地 予想: dS 予想、Trans-Planckian 検閲予想 (TCC)
  - ・ Quantum breaking time & S-matrix by Dvali et al.
  - ・ Boltzmann 脳
- ・ Large-field インフレーションへの制限
  - ・ 無数の Planck-(un)suppressed 演算子
  - ・ axionic WGC
  - ・ 沼地距離予想 (SDC)
- ・ Small-field インフレーションへの制限
  - ・ 初期条件の微調整問題
  - ・ インフレーション前の宇宙がすぐに潰れないか

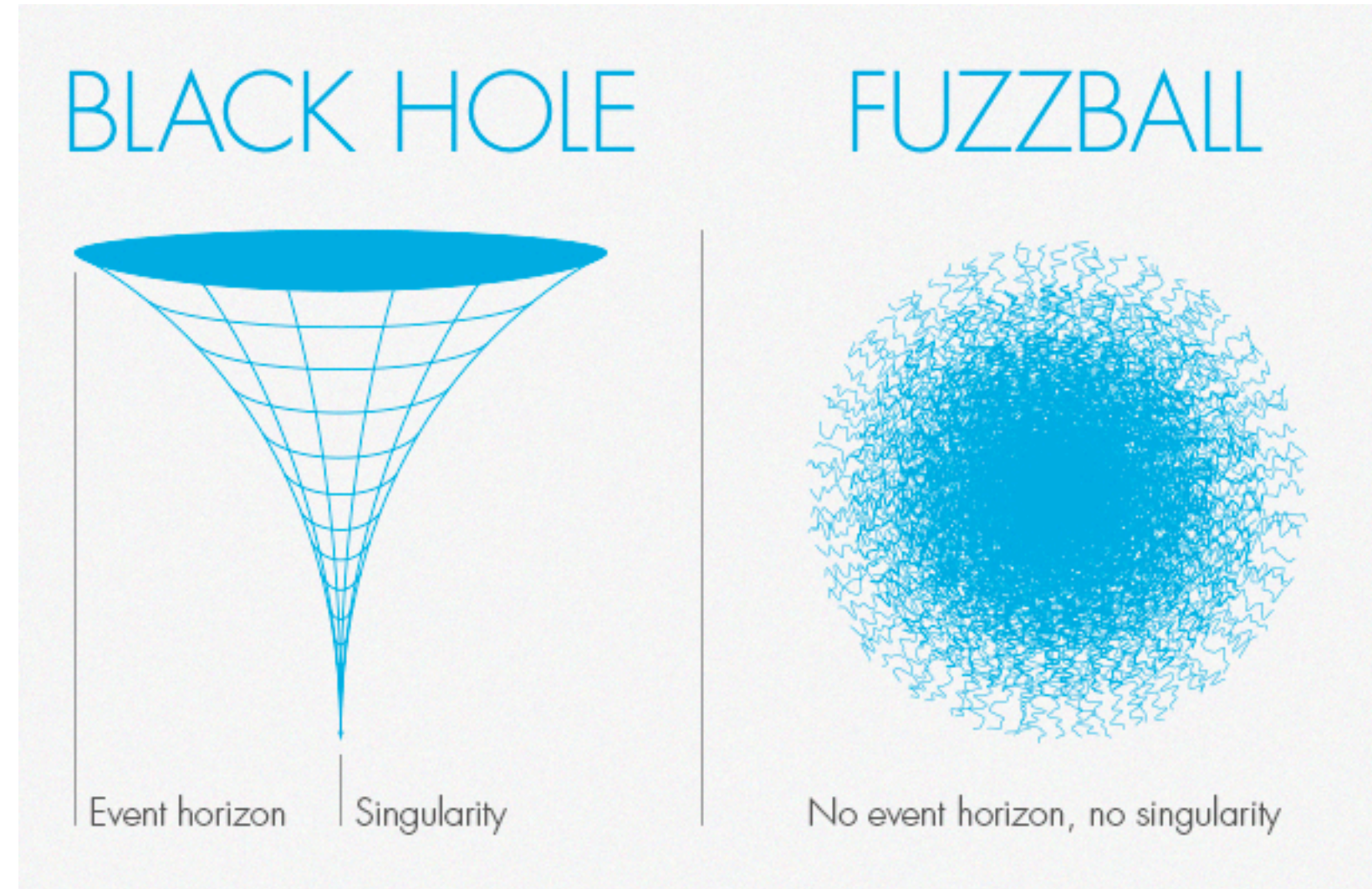
cf. [寺田, “現実的なインフレーション模型は何か”, PPP 2016]



# インフレーションは起きたのか？

## 起きてないとしたら？

“Fuzzbang” シナリオ?? — [Sec. 7 of Brown et al., 1503.04783]



Olena Shmahalo/Quanta Magazine

- ビッグバンの特異点も同様に解消される？  
無境界仮説のように宇宙が生まれるだろう
- 内部空間の幾何が決まった宇宙の微視的状態の <sup>アンサンブル</sup> 集合  
= 宇宙の再加熱の状態
- 低エネルギー有効理論の観測者は  
あたかもインフレーションが起きたように見える

(Fuzzball review [Mathur, hep-th/0502050])

# インフレーションは起きたのか？

起きたと思うなら

スローロールインフレーション ( $\epsilon \ll 1$ ) は、  
de Sitter 時空 ( $\epsilon \rightarrow 0$ ) と全然異なる説

[Akrami, Kallosh, Linde, Vardanyan, 1808.09440]

$$A_s = \frac{V}{24\pi^2\epsilon M_{\text{P}}^4} \approx 2.1 \times 10^{-9}$$

# インフレーションが起きたとしても 初期条件が必要

[Borde, Guth, Vilenkin, gr-qc/0110012]

MIT-CTP-3183

## Inflationary spacetimes are not past-complete

Arvind Borde,<sup>1,2</sup> Alan H. Guth,<sup>1,3</sup> and Alexander Vilenkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Cosmology, Department of Physics and Astronomy  
Tufts University, Medford, MA 02155, USA.*

<sup>2</sup>*Natural Sciences Division, Southampton College, NY 11968, USA.*

<sup>3</sup>*Center for Theoretical Physics, Laboratory for Nuclear Science and Department of Physics,  
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA.*

(Dated: January 11, 2003)

Many inflating spacetimes are likely to violate the weak energy condition, a key assumption of singularity theorems. Here we offer a simple kinematical argument, requiring no energy condition, that a cosmological model which is inflating – or just expanding sufficiently fast – must be incomplete in null and timelike past directions. Specifically, we obtain a bound on the integral of the Hubble parameter over a past-directed timelike or null geodesic. Thus inflationary models require physics other than inflation to describe the past boundary of the inflating region of spacetime.

PACS numbers: 98.80.Cq, 04.20.Dw

# インフレーション前の(再)収縮期の可能性

## 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]

PPP 2019 より

セッティングアップ：4次元 一般相対論 + 実スカラー場1つ

仮定：  
・ 一様等方性(FLRW)、**空間曲率が正**（無からの宇宙創生）  
・ スカラー**ポテンシャルが平ら**な部分を持つ

発見した解：  
(1) (無からの創世 →) 膨張 → 収縮 → 再膨張（インフレーション）  
(2) (無からの創世 →) <sup>サイクリック</sup>循環宇宙

類似模型との差異：Null Energy Condition を古典的に破らない  
バウンス時は  $a > 0$  なので特異点が無い

後発の同様の研究 [Sloan, Dimopoulos, Karamitsos, 1912.00090]

# 無からの宇宙創生

経路積分、無境界仮説

[Hawking, Pontif. Acad. Sci. Scr. Varia 48 (1982) 563]

[Hartle, Hawking, PRD28 (1983) 2960]

[Hawking, NPB239 (1984) 257]

[Linde, Sov. Phys. JETP 60 (1984) 211]

[Linde, Rept. Prog. Phys. 47 (1984) 925]

WDW方程式、トンネル効果

[Vilenkin, PLB117 (1982)]

[Vilenkin, PRD30 (1984) 509]

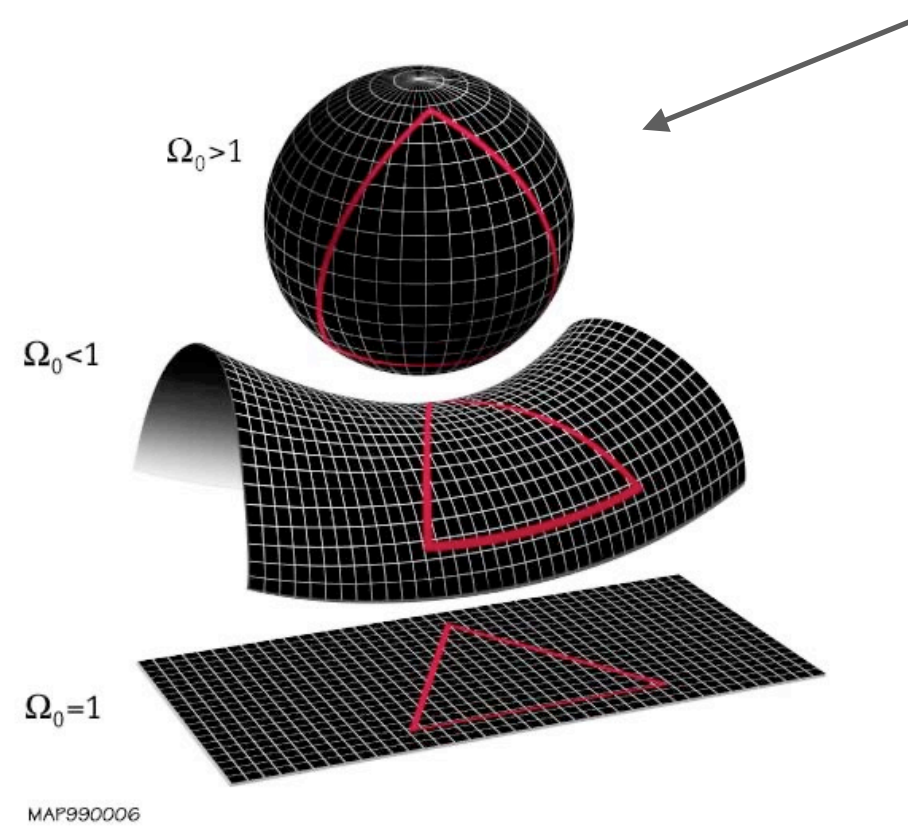
[Vilenkin, PRD33 (1986) 3560]

[Vilenkin, PRD37 (1988) 888]

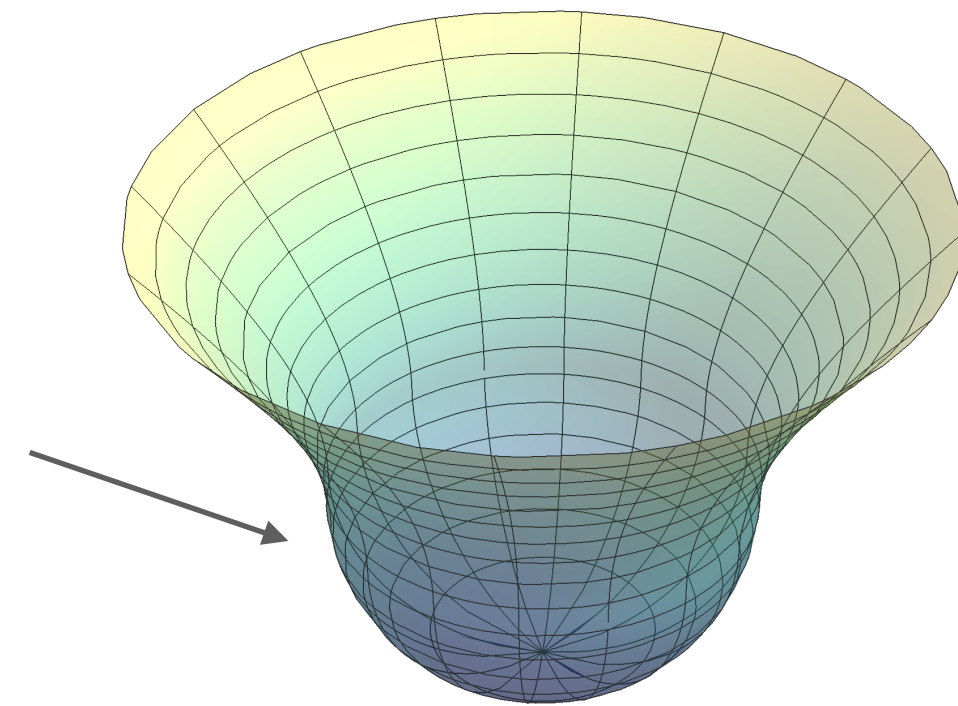
コンパクト Euclid 時空

(正の空間曲率)

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left( \frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right)$$



Lorentz 時空への解析接続



# 無からの宇宙創生

経路積分、無境界仮説

[Hawking, *Pontif. Acad. Sci. Scr. Varia* 48 (1982) 563]

[Hartle, Hawking, *PRD*28 (1983) 2960]

[Hawking, *NPB*239 (1984) 257]

[Linde, *Sov. Phys. JETP* 60 (1984) 211]

[Linde, *Rept. Prog. Phys.* 47 (1984) 925]

WDW方程式、トンネル効果

[Vilenkin, *PLB*117 (1982)]

[Vilenkin, *PRD*30 (1984) 509]

[Vilenkin, *PRD*33 (1986) 3560]

[Vilenkin, *PRD*37 (1988) 888]

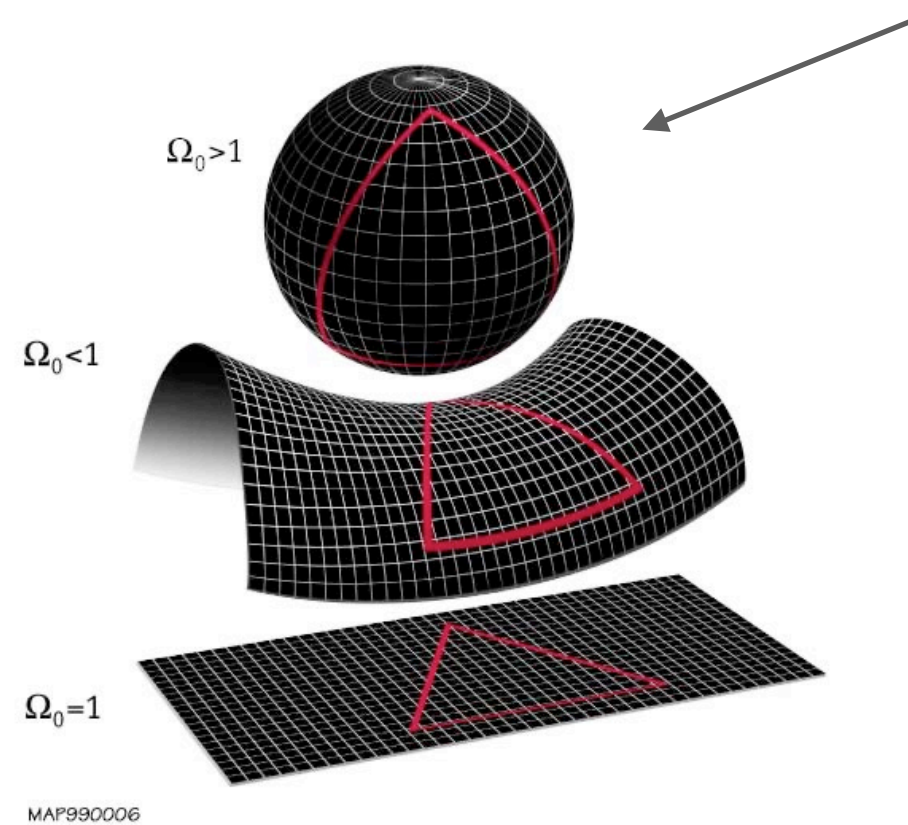
コンパクト Euclid 時空

(正の空間曲率)

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left( \frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right)$$

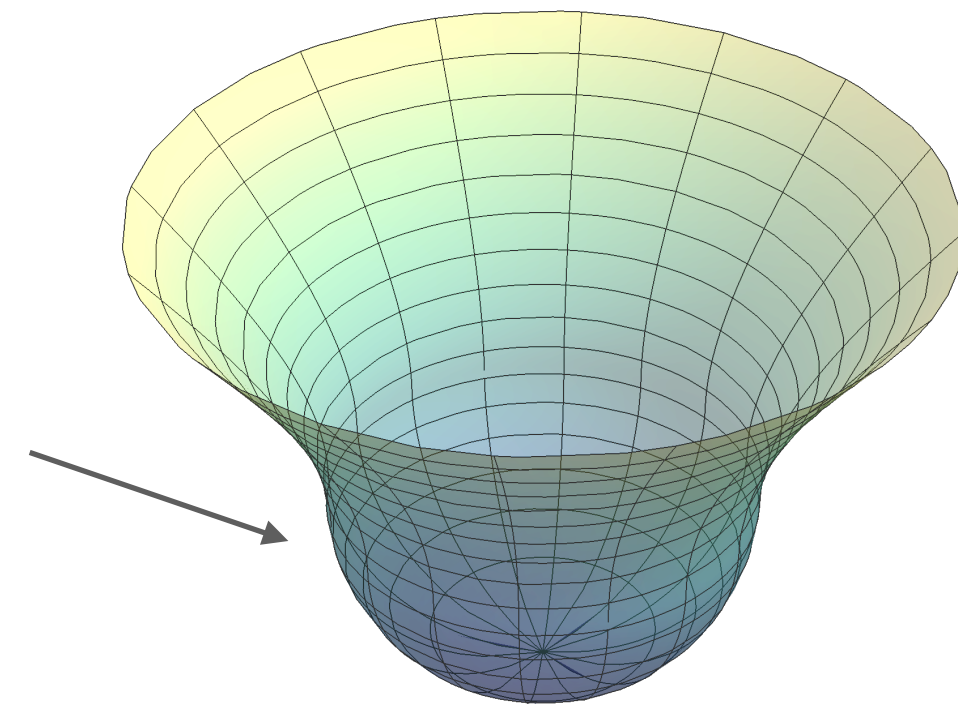
Friedmann 方程式 (空間曲率有り)

$$H^2 = \frac{\rho}{3M_{\text{P}}^2} - \frac{K}{a^2}, \quad H(0) \simeq 0, \quad K > 0$$



MAP990006

Lorentz 時空への解析接続



# 無からの宇宙創生

経路積分、無境界仮説

[Hawking, Pontif. Acad. Sci. Scr. Varia 48 (1982) 563]

[Hartle, Hawking, PRD28 (1983) 2960]

[Hawking, NPB239 (1984) 257]

[Linde, Sov. Phys. JETP 60 (1984) 211]

[Linde, Rept. Prog. Phys. 47 (1984) 925]

WDW方程式、トンネル効果

[Vilenkin, PLB117 (1982)]

[Vilenkin, PRD30 (1984) 509]

[Vilenkin, PRD33 (1986) 3560]

[Vilenkin, PRD37 (1988) 888]

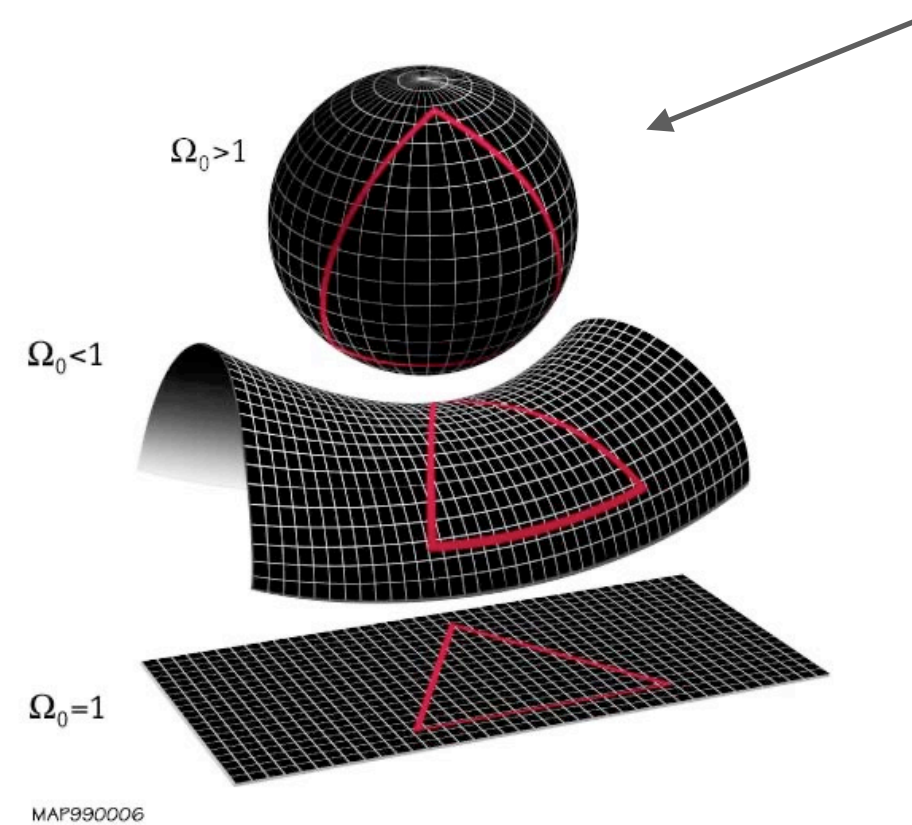
コンパクト Euclid 時空

(正の空間曲率)

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left( \frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right)$$

Friedmann 方程式 (空間曲率有り)

$$H^2 = \frac{\rho}{3M_{\text{P}}^2} - \frac{K}{a^2}, \quad H(0) \simeq 0, \quad K > 0$$



宇宙創生の確率密度

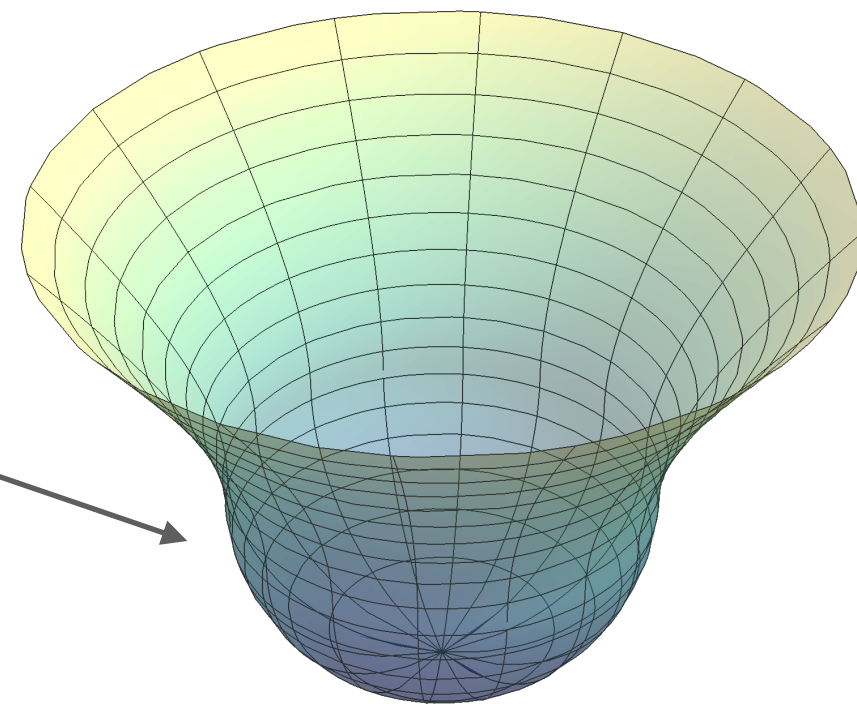
cf. [大下さんのトーク]

$$P \sim \exp(\pm 24\pi^2 / V)$$

+ : Hartle-Hawking → 宇宙がすぐに潰れやすい

- : Vilenkin, Linde → インフレーションが起こりやすい

Lorentz 時空への解析接続



# 膨張 $\overset{\text{turn-around}}{\rightleftarrows}$ 収縮の機構

1.  $H = 0$  になること。つまり、エネルギー密度の正負の寄与が打ち消すこと。
2.  $H = 0$  の瞬間に  $\ddot{a}/a = -(\rho + 3P)/6$  が正 (bounce) あるいは負 (turn-around) であること。



# 膨張 $\overset{\text{turn-around}}{\rightleftarrows}$ 収縮の機構

1.  $H = 0$  になること。つまり、エネルギー密度の正負の寄与が打ち消すこと。
2.  $H = 0$  の瞬間に  $\ddot{a}/a = -(\rho + 3P)/6$  が正 (bounce) あるいは負 (turn-around) であること。

1. 以下の例では全て正のエネルギー密度と**正の空間曲率**によって膨張・収縮が切り替わる

$$H^2 = \frac{\rho}{3M_{\text{p}}^2} - \frac{K}{a^2}$$

# 膨張 $\overset{\text{turn-around}}{\rightleftarrows}$ 収縮の機構

1.  $H = 0$  になること。つまり、エネルギー密度の正負の寄与が打ち消すこと。
2.  $H = 0$  の瞬間に  $\ddot{a}/a = -(\rho + 3P)/6$  が正 (bounce) あるいは負 (turn-around) であること。

1. 以下の例では全て正のエネルギー密度と**正の空間曲率**によって膨張・収縮が切り替わる

$$H^2 = \frac{\rho}{3M_{\text{p}}^2} - \frac{K}{a^2}$$

2. 宇宙の主要成分の**状態方程式**  $w = P/\rho$  が臨界値  $w_{\text{cr}} = -1/3$  より小さい (bounce) か大きい (turn-around) か

スカラー場:  $w = \frac{\dot{\phi}^2/2 - V}{\dot{\phi}^2/2 + V}$

スローロール:  $w \approx -1$

$V \sim \phi^{2n}$  での振動:  $w = \frac{n-1}{n+1}$

運動項優勢:  $w = 1$

宇宙定数:  $w = -1$

非相対論的物質:  $w = 0$

相対論的物質:  $w = 1/3$

# サイクリック宇宙解を現実と結びつける

サイクリック  
循環 宇宙解 [MTT, 2019] では**正の空間曲率**がバウンスを可能にしていた。

⇒ **インフレーションが必須**

# サイクリック宇宙解を現実と結びつける

サイクリック  
循環 宇宙解 [MTT, 2019] では**正の空間曲率**がバウンスを可能にしていた。

⇒ **インフレーションが必須**

インフレーションをするなら終わらせること (**宇宙の再加熱**) も**必須**。

インフラトンは**相互作用**を持つ。この**相互作用**がインフレーションの**引き金**<sup>トリガー</sup>となる？

# サイクリック宇宙解を現実と結びつける

サイクリック  
循環 宇宙解 [MTT, 2019] では**正の空間曲率**がバウンスを可能にしていた。

⇒ **インフレーションが必須**

インフレーションをするなら終わらせること (**宇宙の再加熱**) も**必須**。

インフラトンは**相互作用**を持つ。この**相互作用**がインフレーションの**引き金**となる？  
トリガー

一般に、相互作用があれば熱力学の第二法則により**エントロピーが増加**(非減少)するので、

**純粋な** サイクリック **循環宇宙は不可能**と考えられている。 [Tolman, Phys. Rev. 38 (1931) 1758] ただし非負の圧力が仮定された。

# サイクリック宇宙解を現実と結びつける

<sup>サイクリック</sup>循環宇宙解 [MTT, 2019] では**正の空間曲率**がバウンスを可能にしていた。

⇒ **インフレーションが必須**

インフレーションをするなら終わらせること (**宇宙の再加熱**) も**必須**。

インフラトンは**相互作用**を持つ。この**相互作用**がインフレーションの**引き金**となる？  
トリガー

一般に、相互作用があれば熱力学の第二法則により**エントロピーが増加**(非減少)するので、

<sup>サイクリック</sup>**純粋な循環宇宙は不可能**と考えられている。 [Tolman, Phys. Rev. 38 (1931) 1758] ただし非負の圧力が仮定された。

しかし、エントロピーの増加 ~ <sup>radiation</sup>放射の増加 → 放射優勢の宇宙は**ビッグクランチ**！

<sup>サイクリック</sup>循環状態から**インフレーションに繋がるかは非自明**。

cf. サイクリック宇宙からインフレーションになる他の機構 [T. Biswas, S. Alexander, 0812.3182], [D. Yoshida, J. Soda, 1909.05533]

# Awakening the Cyclic Universe

～無からの創世、第二法則、創発するインフレーション～

# セットアップ

枠組み 4次元一般相対論 一様等方 (FLRW) 宇宙と正の空間曲率を仮定

物質場 最小結合の正準実スカラー場1つ + 放射として記述できる自由度

運動方程式

$$H^2 = \frac{1}{3M_{\text{P}}^2} (\rho_\phi + \rho_r) - \frac{K}{a^2}$$

$$\ddot{\phi} + (3H + \Gamma)\dot{\phi} + V'(\phi) = 0$$

$$\dot{\rho}_r + 4H\rho_r = \Gamma\rho_\phi$$



# セットアップ

枠組み 4次元一般相対論 一様等方 (FLRW) 宇宙と正の空間曲率を仮定

物質場 最小結合の正準実スカラー場1つ + 放射として記述できる自由度

運動方程式

$$H^2 = \frac{1}{3M_{\text{P}}^2} (\rho_\phi + \rho_r) - \frac{K}{a^2}$$

$$\ddot{\phi} + (3H + \Gamma)\dot{\phi} + V'(\phi) = 0$$

$$\dot{\rho}_r + 4H\rho_r = \Gamma\rho_\phi$$

スカラーポテンシャル

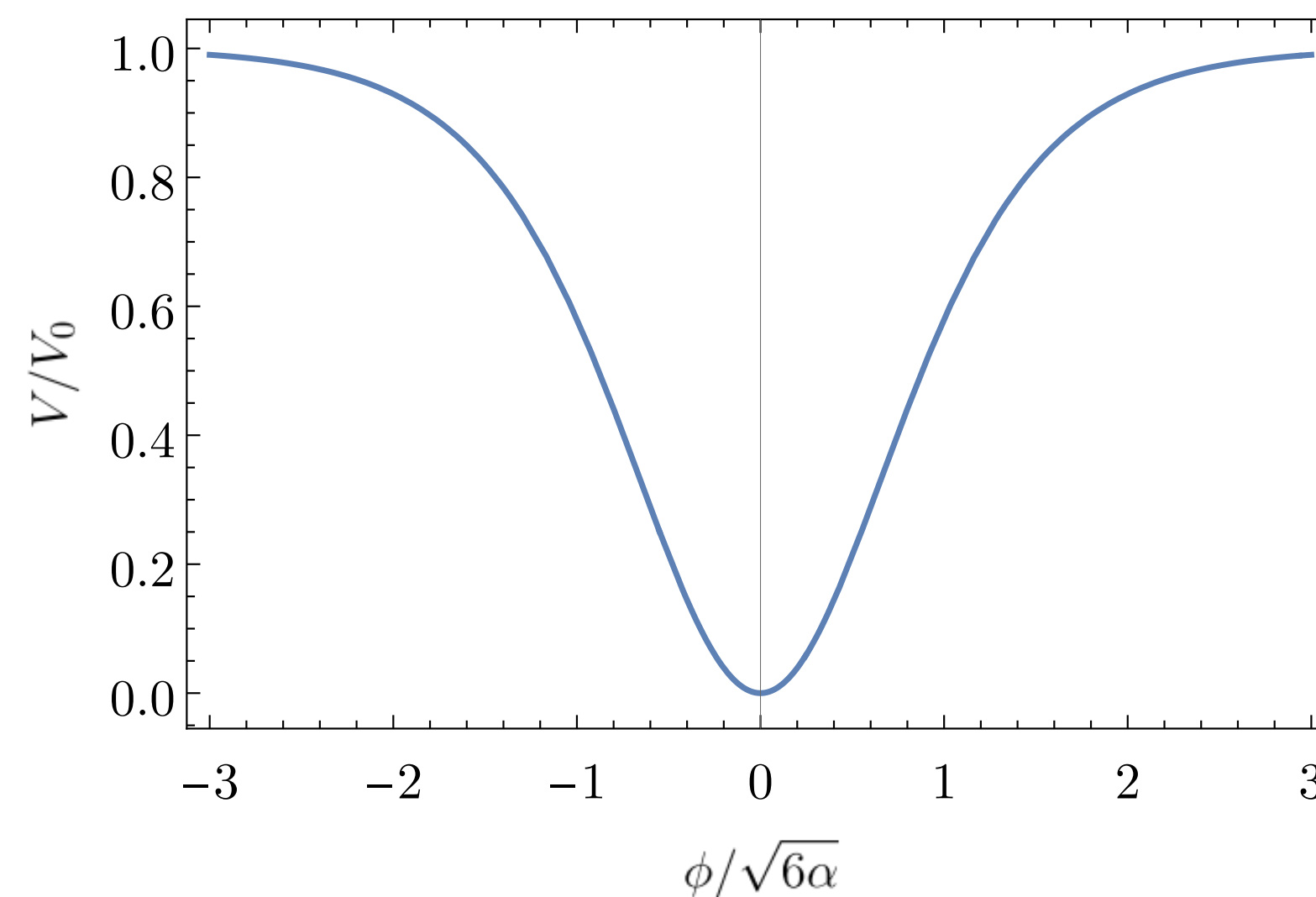
$$V = V_0 \tanh^2 \frac{\phi}{\sqrt{6\alpha}}$$

$\alpha$ -attractor: [Kalosh, Linde, Roest, 1311.0472]

[Galante, Lallosh, Linde, Roest, 1412.3797]

[Carrasco, Kalosh, Linde, 1506.01708]

このポテンシャルでの無からの創世の研究 [Matsui, Terada, 2006.03443]



# セットアップ

枠組み 4次元一般相対論 一様等方 (FLRW) 宇宙と正の空間曲率を仮定

物質場 最小結合の正準実スカラー場1つ + 放射として記述できる自由度

運動方程式

$$H^2 = \frac{1}{3M_{\text{P}}^2} (\rho_\phi + \rho_r) - \frac{K}{a^2}$$

$$\ddot{\phi} + (3H + \Gamma)\dot{\phi} + V'(\phi) = 0$$

$$\dot{\rho}_r + 4H\rho_r = \Gamma\rho_\phi$$

スカラーポテンシャル

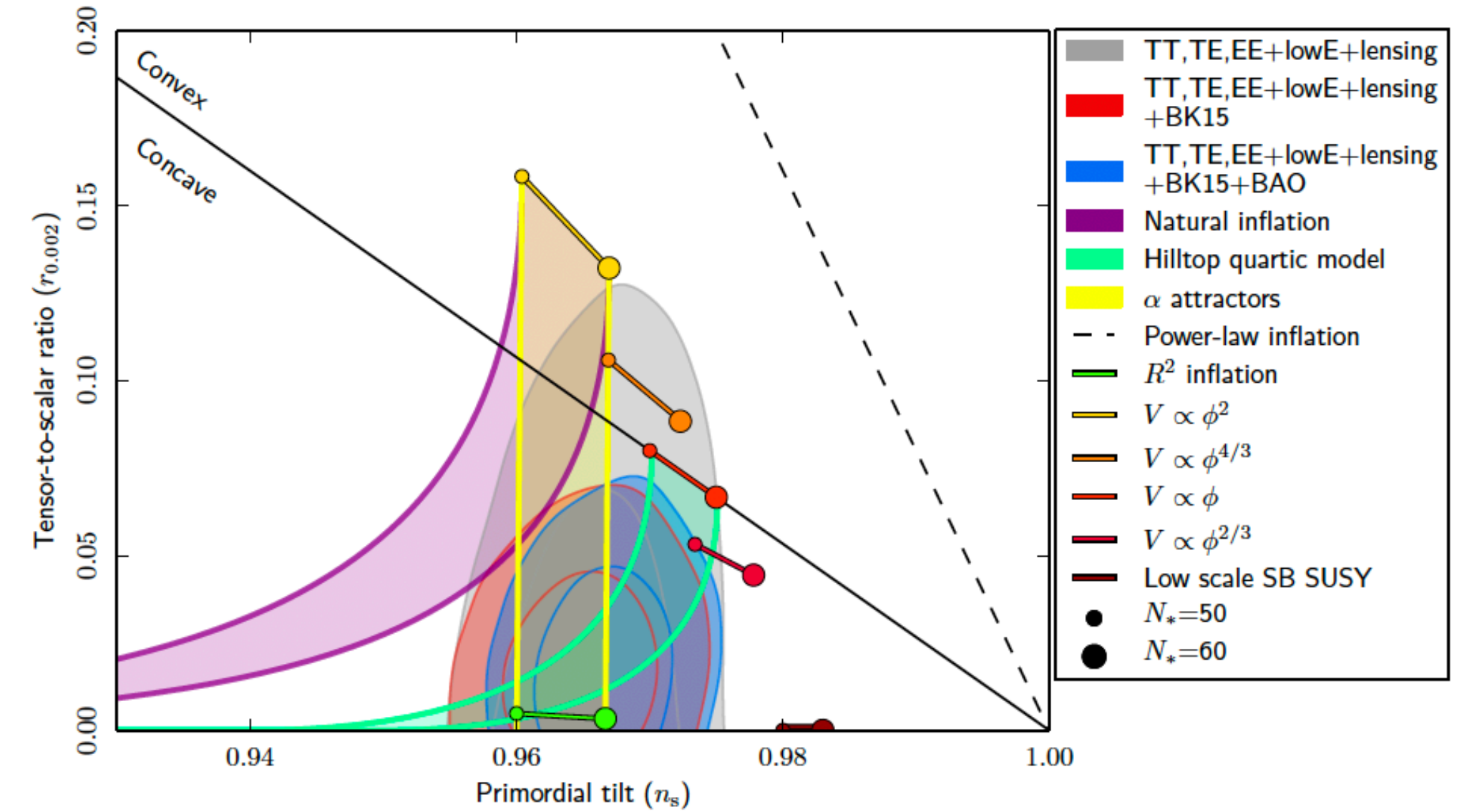
$$V = V_0 \tanh^2 \frac{\phi}{\sqrt{6\alpha}}$$

$\alpha$ -attractor: [Kalosh, Linde, Roest, 1311.0472]

[Galante, Lallosh, Linde, Roest, 1412.3797]

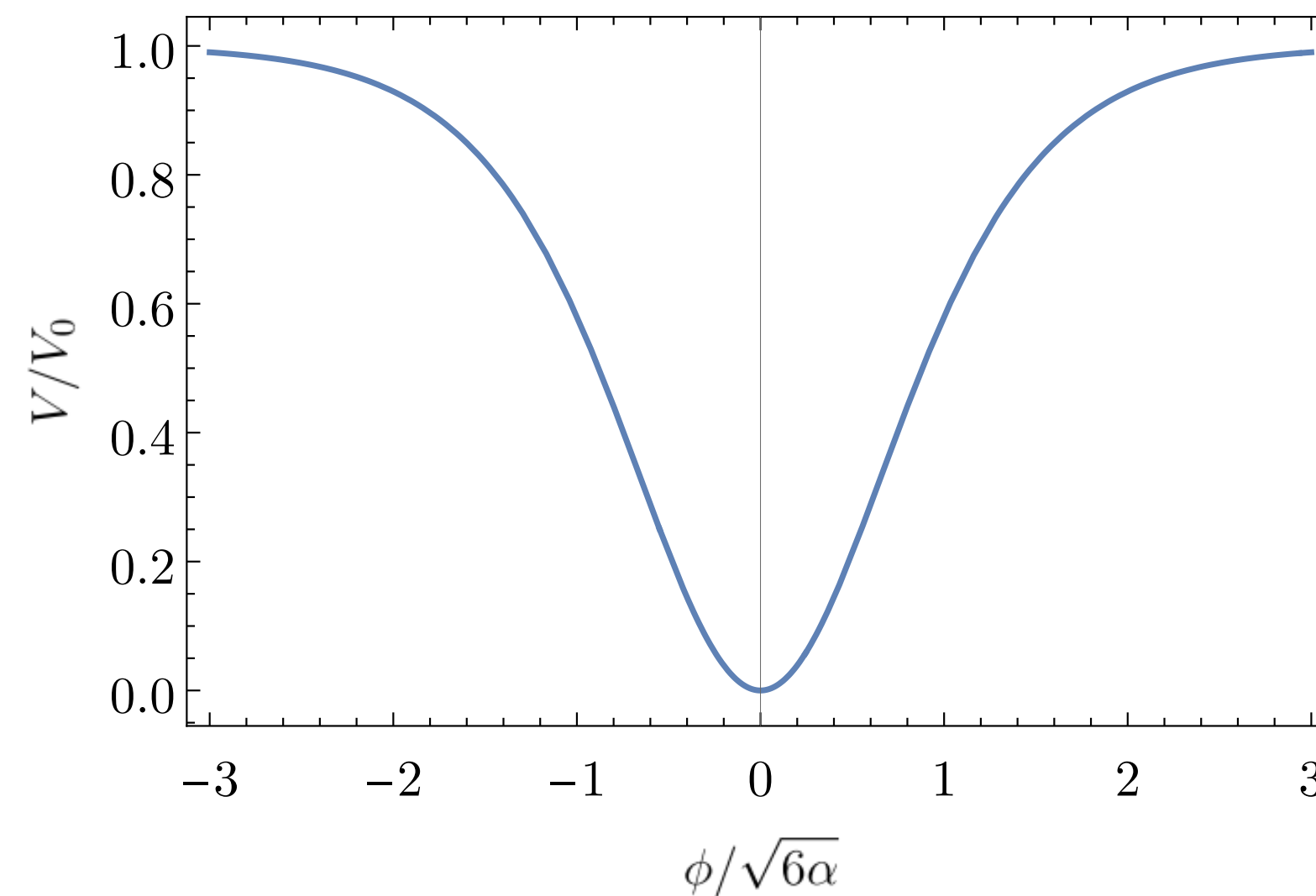
[Carrasco, Kalosh, Linde, 1506.01708]

このポテンシャルでの無からの創世の研究 [Matsui, Terada, 2006.03443]



参考:  $\alpha$ -attractor の予言と CMB 観測は整合的

[Planck 2018 results. X. Constraints on inflation]



# セットアップ

枠組み 4次元一般相対論 一様等方 (FLRW) 宇宙と正の空間曲率を仮定

物質場 最小結合の正準実スカラー場1つ + 放射として記述できる自由度

運動方程式

$$H^2 = \frac{1}{3M_{\text{P}}^2} (\rho_\phi + \rho_r) - \frac{K}{a^2}$$

$$\ddot{\phi} + (3H + \Gamma)\dot{\phi} + V'(\phi) = 0$$

$$\dot{\rho}_r + 4H\rho_r = \Gamma\rho_\phi$$

スカラーポテンシャル

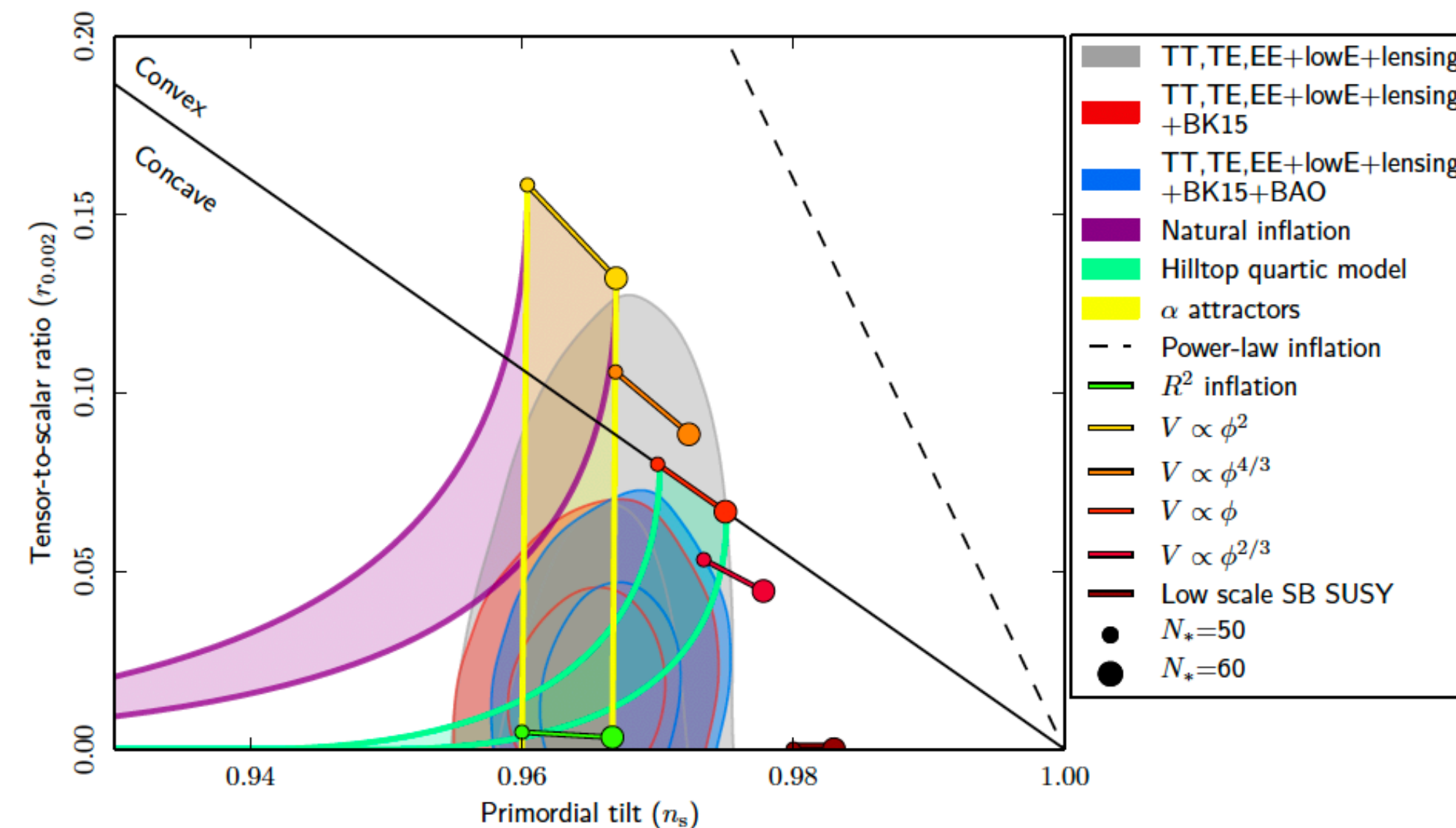
$$V = V_0 \tanh^2 \frac{\phi}{\sqrt{6\alpha}}$$

$\alpha$ -attractor: [Kalosh, Linde, Roest, 1311.0472]

[Galante, Lallosh, Linde, Roest, 1412.3797]

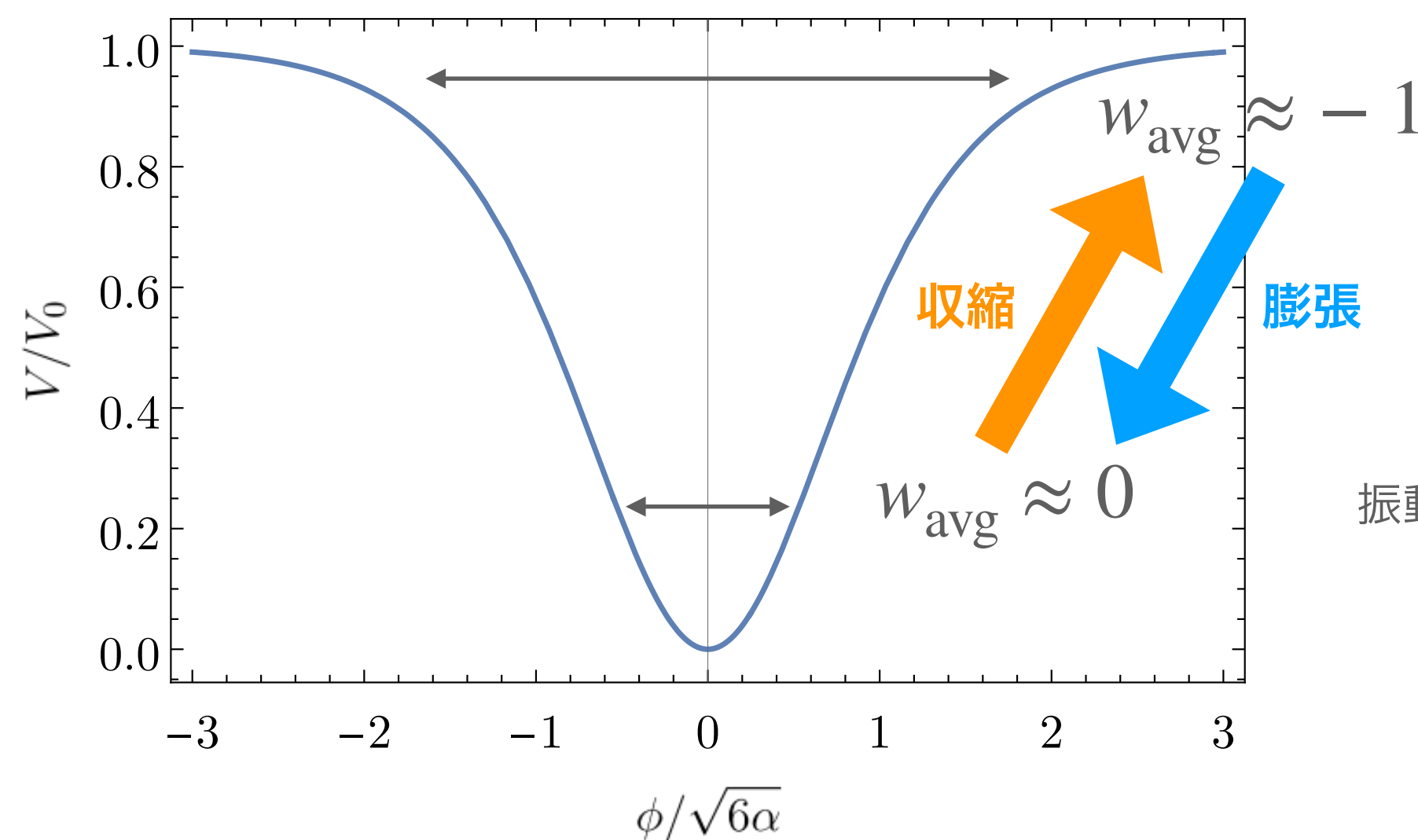
[Carrasco, Kalosh, Linde, 1506.01708]

このポテンシャルでの無からの創世の研究 [Matsui, Terada, 2006.03443]



参考:  $\alpha$ -attractor の予言と CMB 観測は整合的

[Planck 2018 results. X. Constraints on inflation]



振動平均した状態方程式パラメーター

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

# サイクリック → インフレーション解

枠組み 4次元一般相対論 一様等方 (FLRW) 宇宙と正の空間曲率を仮定

物質場 最小結合の正準実スカラー場1つ + 放射として記述できる自由度

運動方程式

$$H^2 = \frac{1}{3M_{\text{P}}^2} (\rho_\phi + \rho_r) - \frac{K}{a^2}$$

$$\ddot{\phi} + (3H + \Gamma)\dot{\phi} + V'(\phi) = 0$$

$$\dot{\rho}_r + 4H\rho_r = \Gamma\rho_\phi$$

初期条件  $\phi(0) = -2\sqrt{6\alpha}$ ,  $\rho_r(0) = 0$ ,  $H = 0$  (無からの創世)

崩壊率

トイ模型  $\Gamma = \Gamma_0 \sqrt{1 - |\phi|/\sqrt{6\alpha}}$

パラメター値

$$\alpha = 10^{-3}, \Gamma_0 = 6 \times 10^{-4}$$

# サイクリック → インフレーション解

枠組み 4次元一般相対論 一様等方 (FLRW) 宇宙と正の空間曲率を仮定

物質場 最小結合の正準実スカラー場1つ + 放射として記述できる自由度

運動方程式

$$H^2 = \frac{1}{3M_{\text{P}}^2} (\rho_\phi + \rho_r) - \frac{K}{a^2}$$

$$\ddot{\phi} + (3H + \Gamma)\dot{\phi} + V'(\phi) = 0$$

$$\dot{\rho}_r + 4H\rho_r = \Gamma\rho_\phi$$

初期条件  $\phi(0) = -2\sqrt{6\alpha}$ ,  $\rho_r(0) = 0$ ,  $H = 0$  (無からの創世)

崩壊率

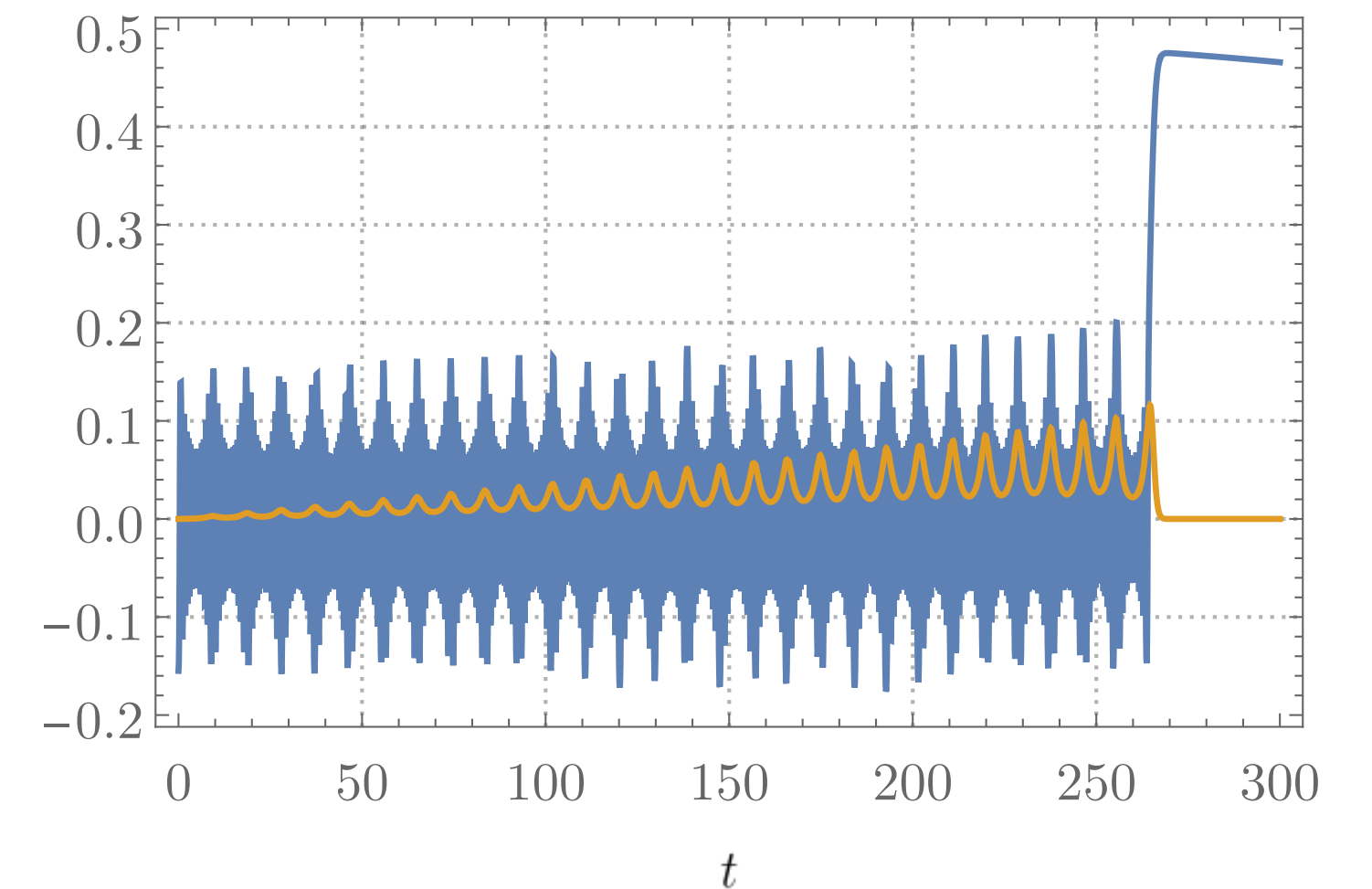
トイ模型  $\Gamma = \Gamma_0 \sqrt{1 - |\phi|/\sqrt{6\alpha}}$

パラメター値

$$\alpha = 10^{-3}, \Gamma_0 = 6 \times 10^{-4}$$

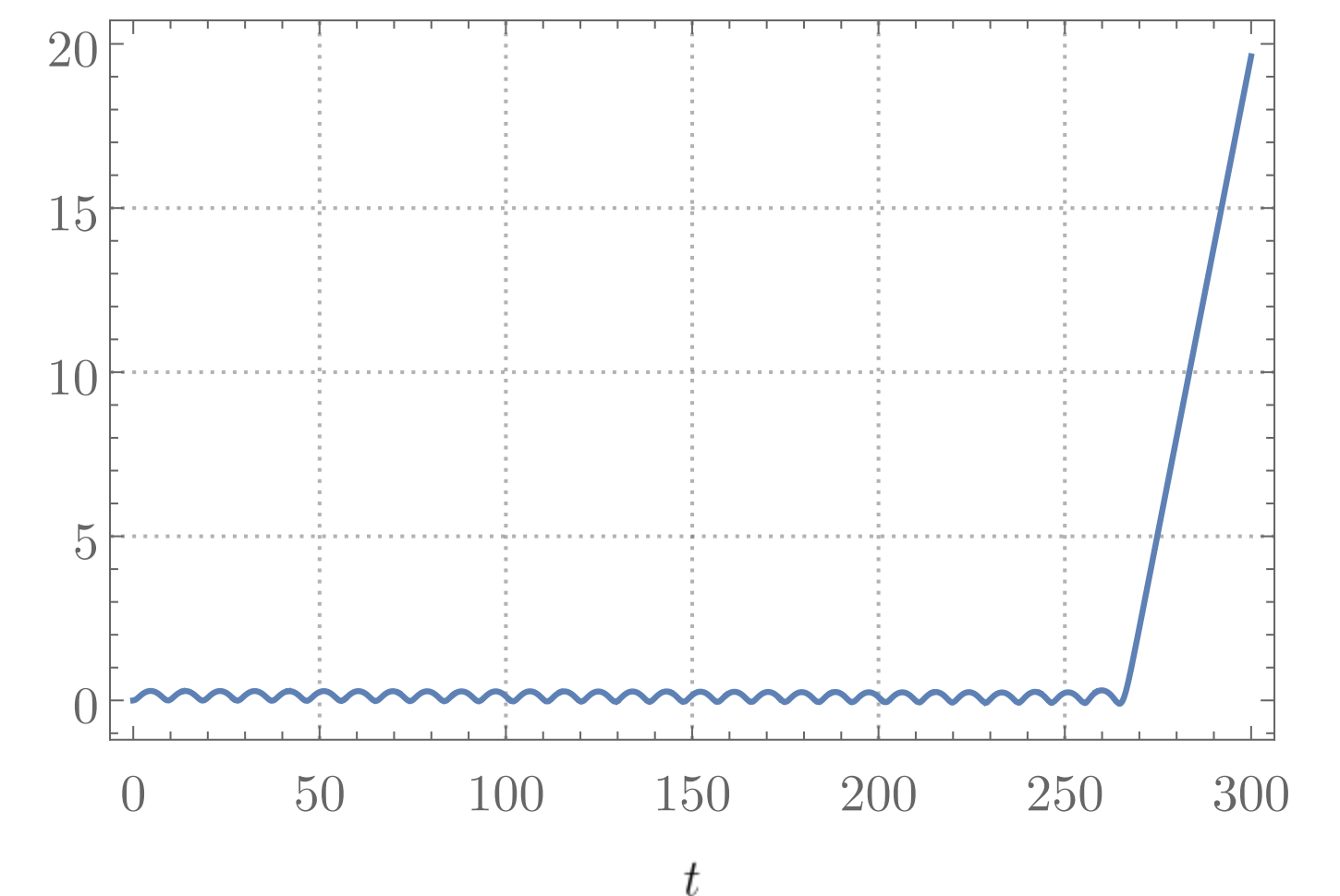
スカラー場  $\phi(t)$

放射密度  $\rho_r(t)$

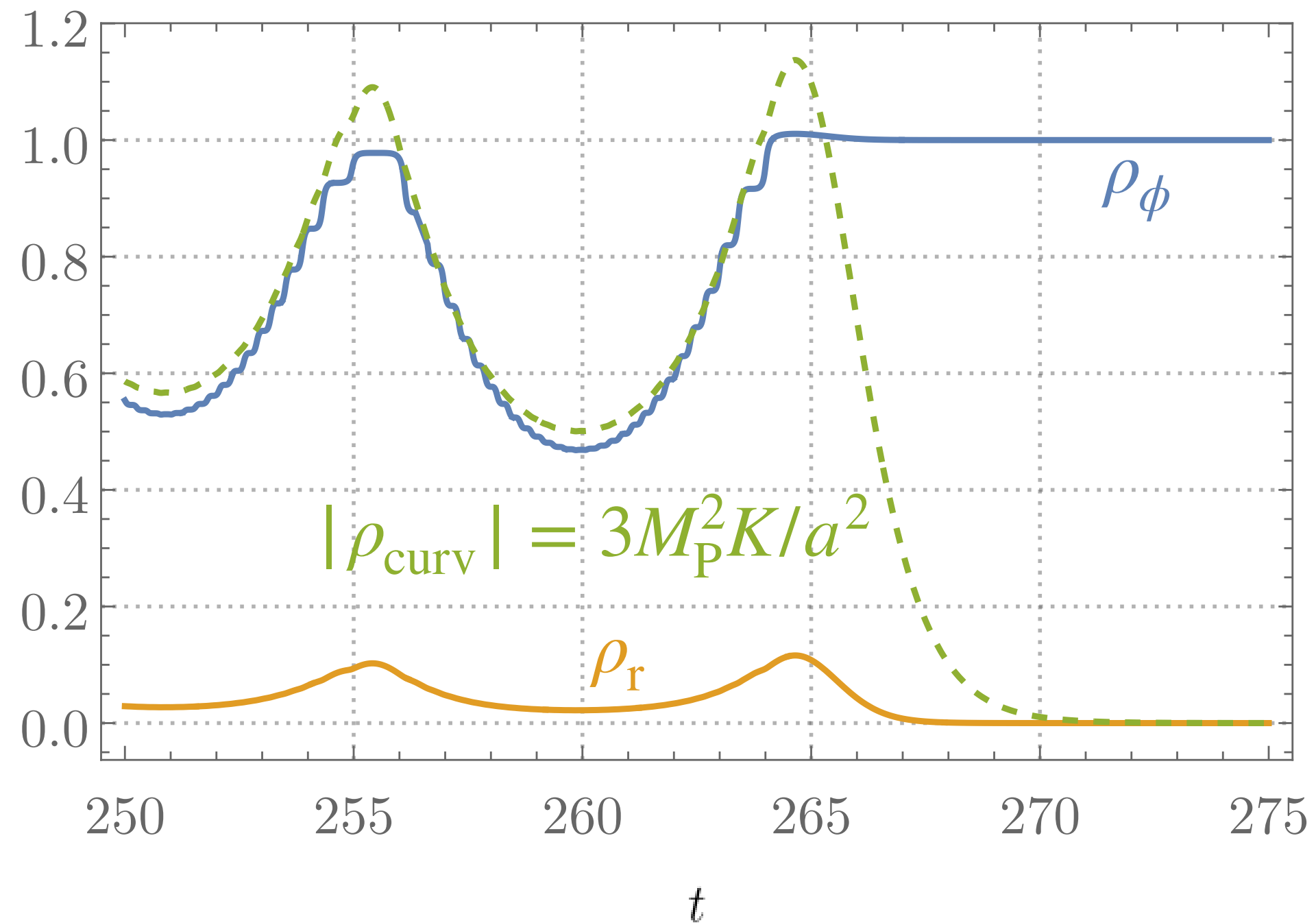


対数スケール因子

$\log(a(t)/a(0))$

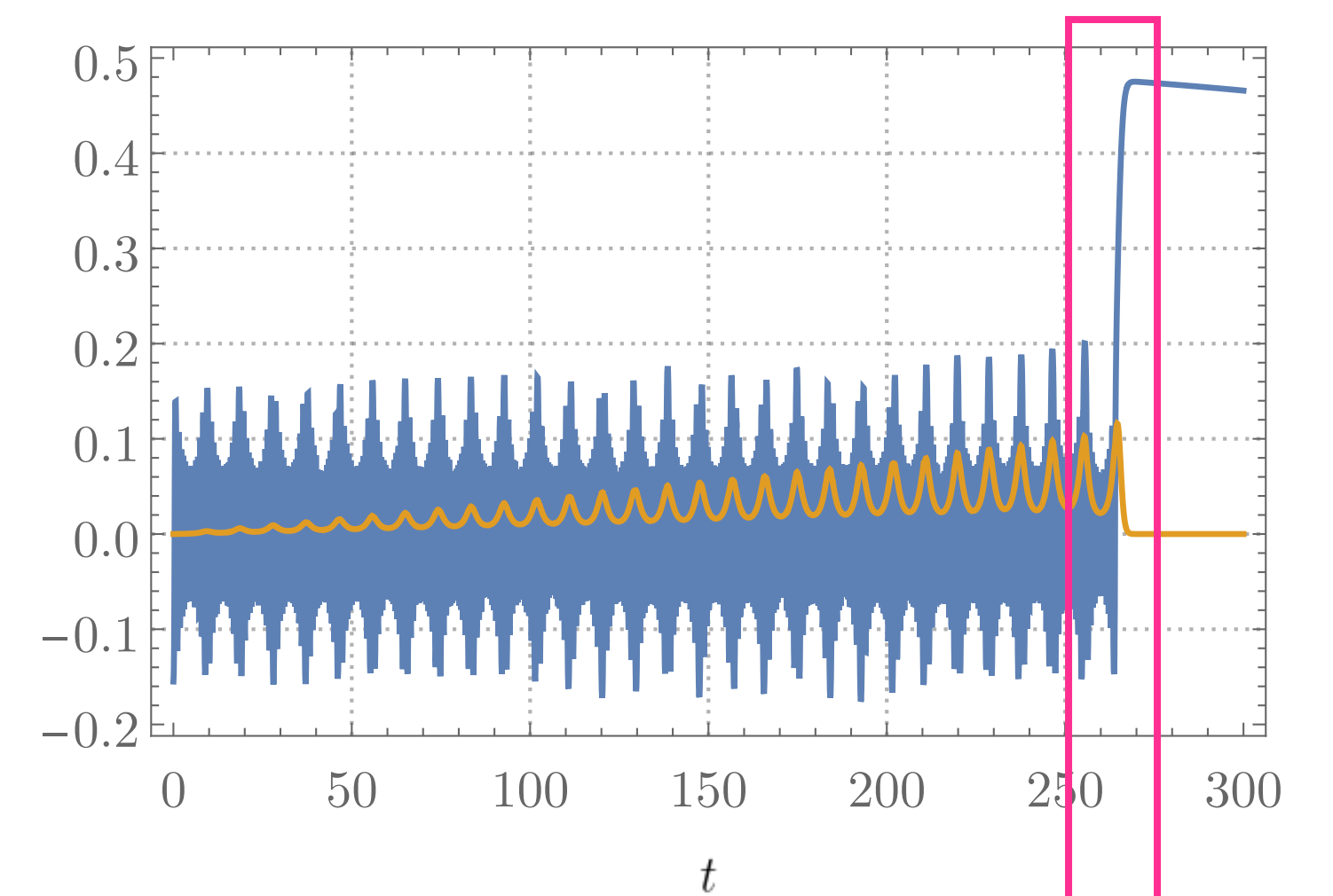


# なぜインフレーションが始まるか

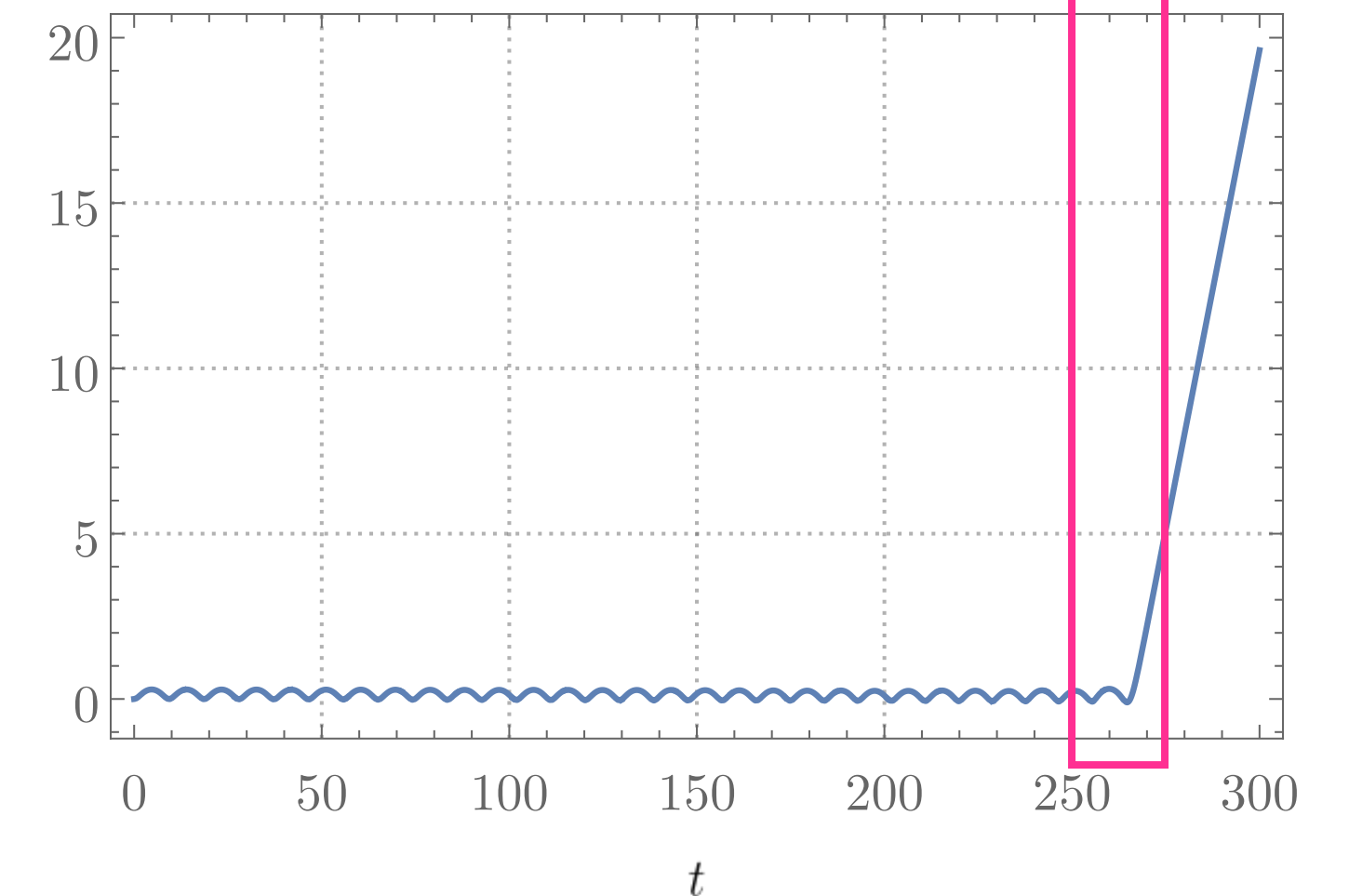


エネルギー密度の比較

スカラー場  $\phi(t)$   
放射密度  $\rho_r(t)$



対数スケール因子  
 $\log(a(t)/a(0))$



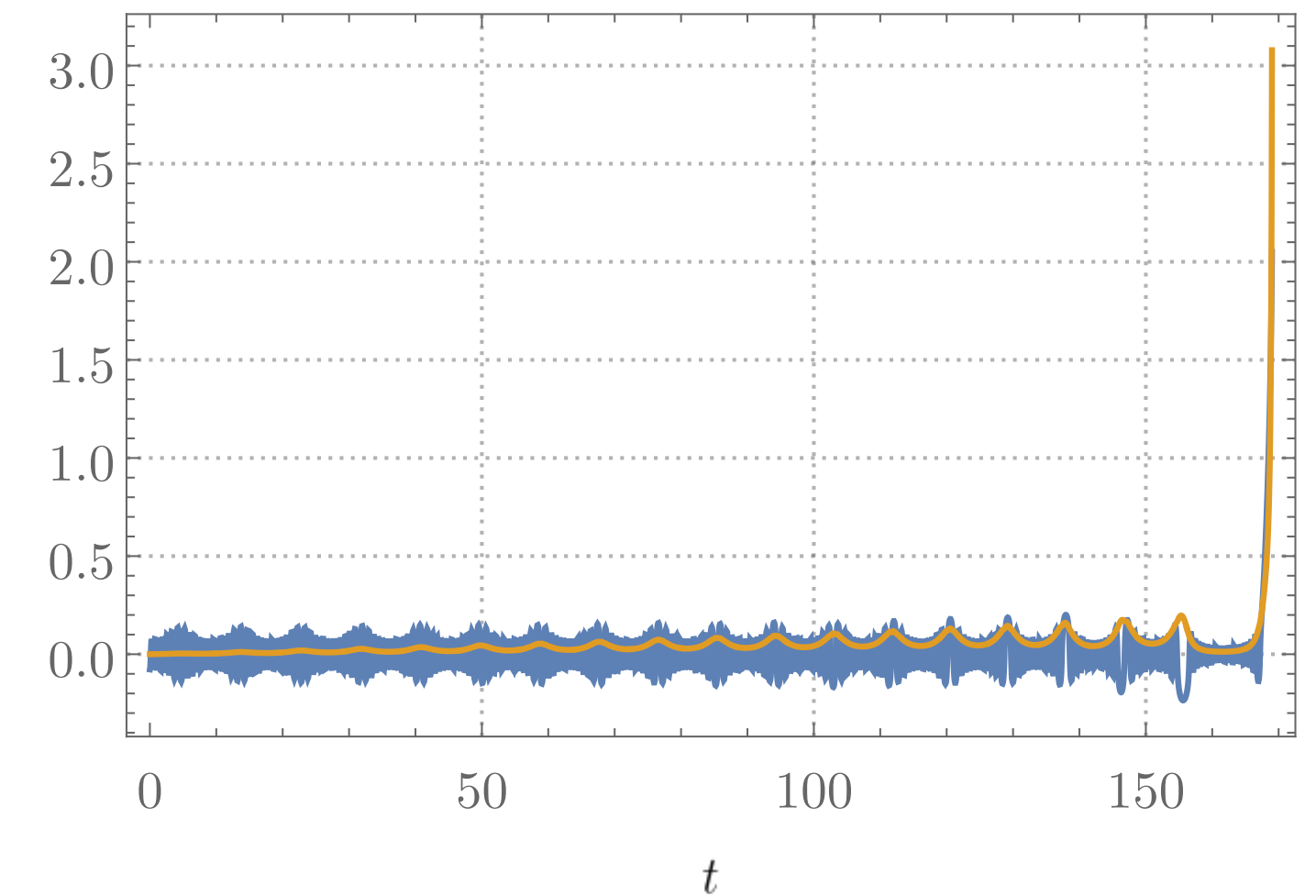
放射成分 ( $w = 1/3$ ) が少しあるので最後のバウンスが遅れる。  
バウンスが遅れると  $\phi$  が十分平らな領域へ到達する。

# インフレーションが起きない例もある

$$\phi(0) = -\sqrt{6\alpha}, \quad \Gamma_0 = 2 \times 10^{-3}$$

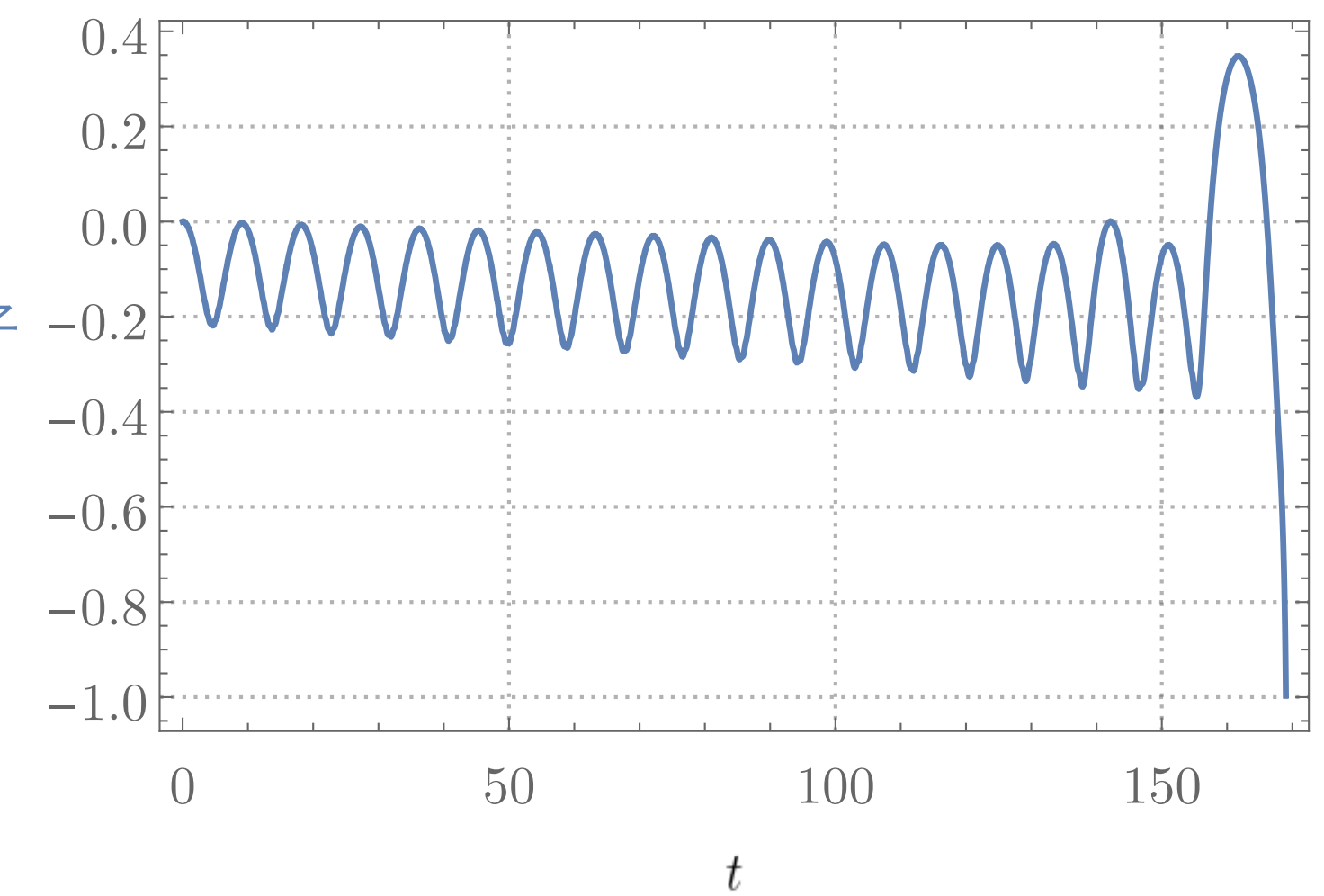
スカラー場  $\phi(t)$

放射密度  $\rho_r(t)$

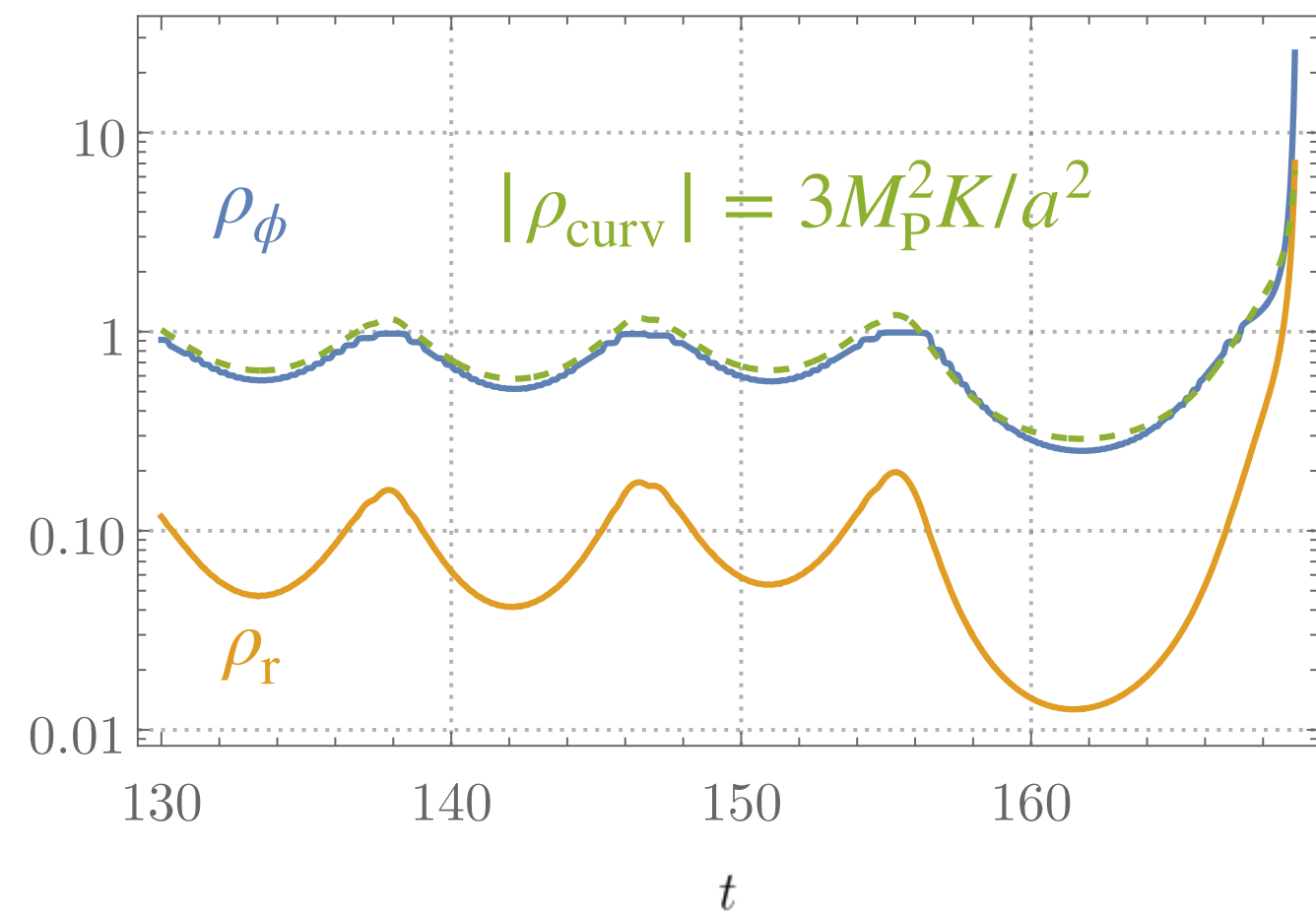


対数スケール因子

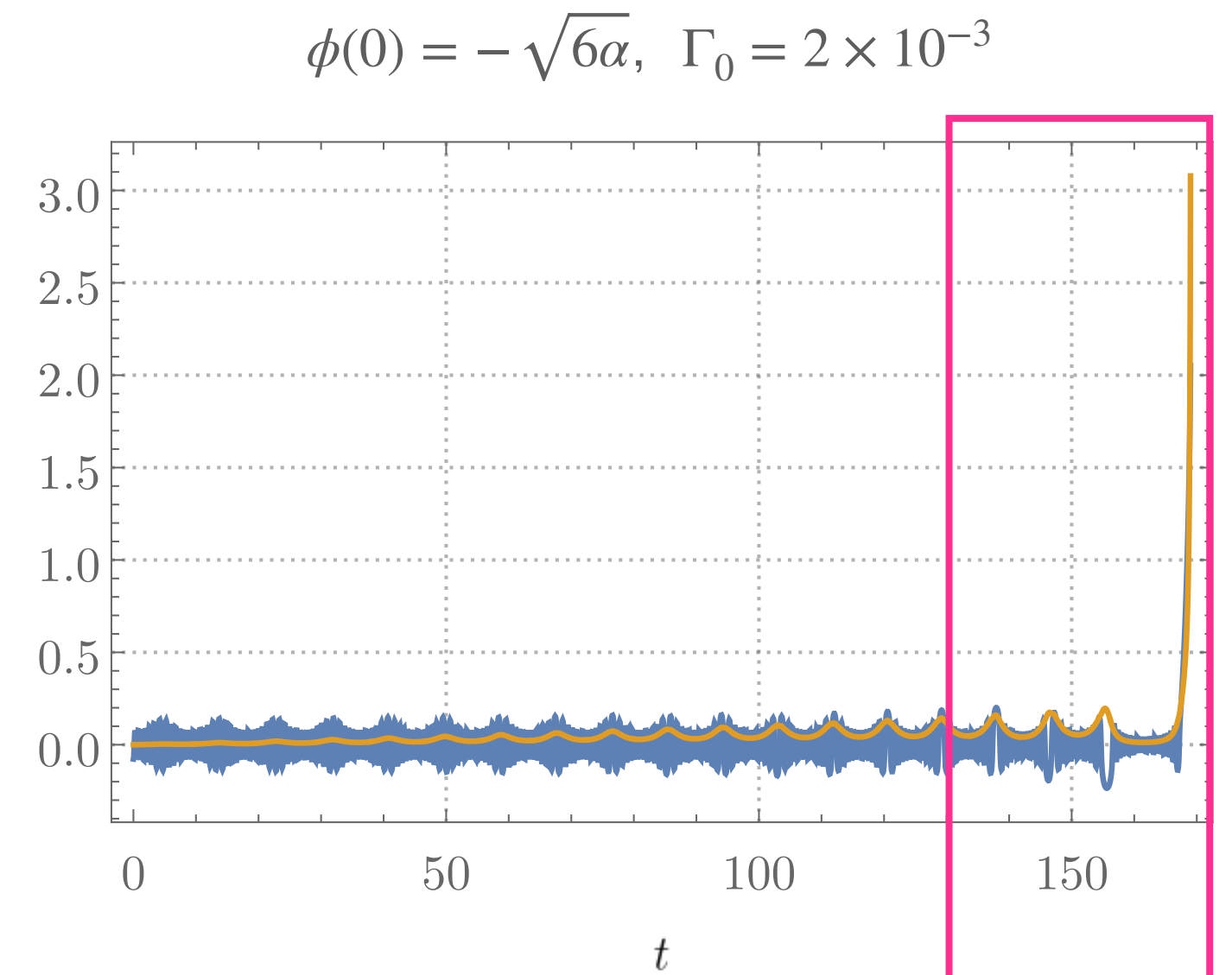
$\log(a(t)/a(0))$



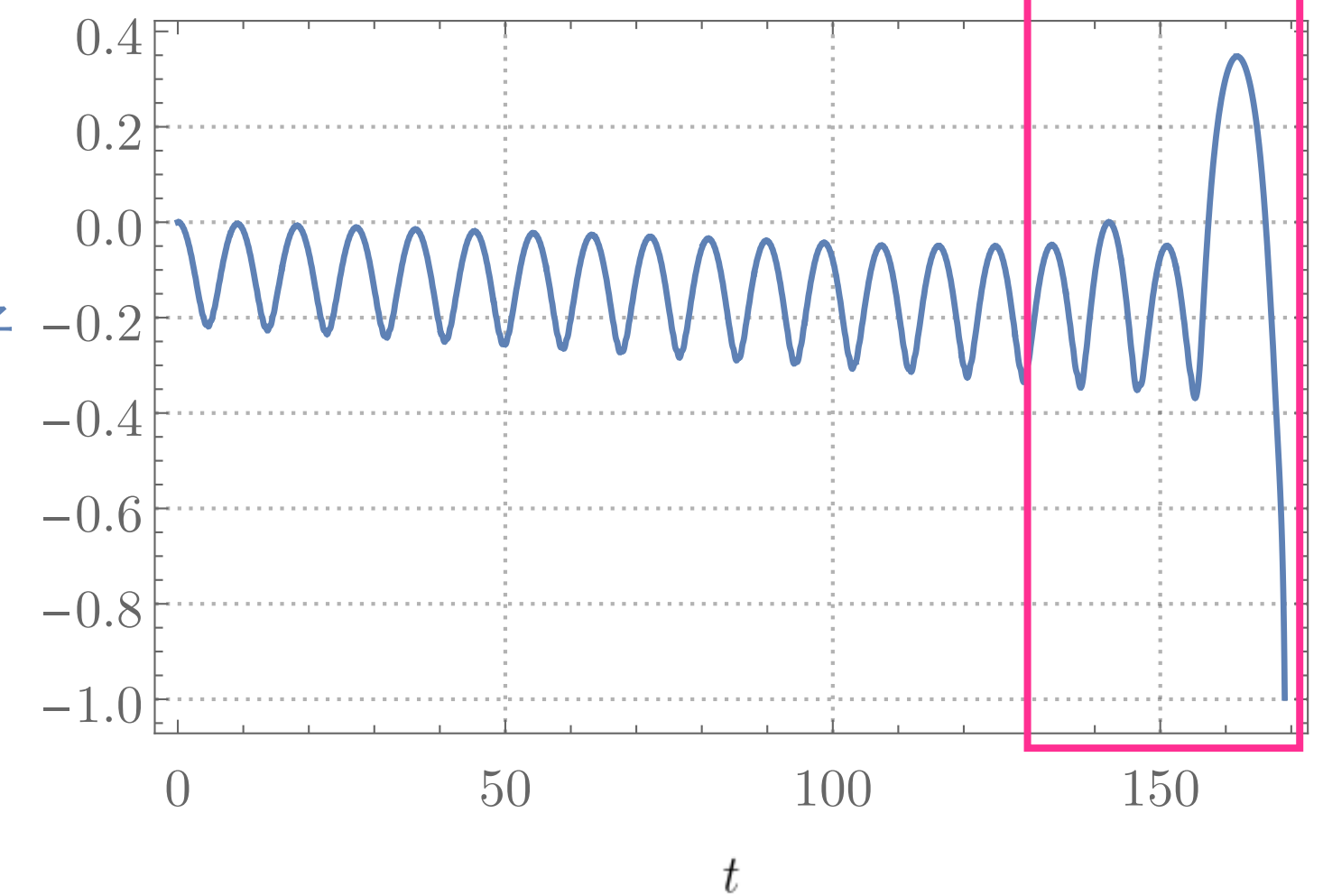
# インフレーションが起きない例もある



スカラー場  $\phi(t)$   
放射密度  $\rho_r(t)$

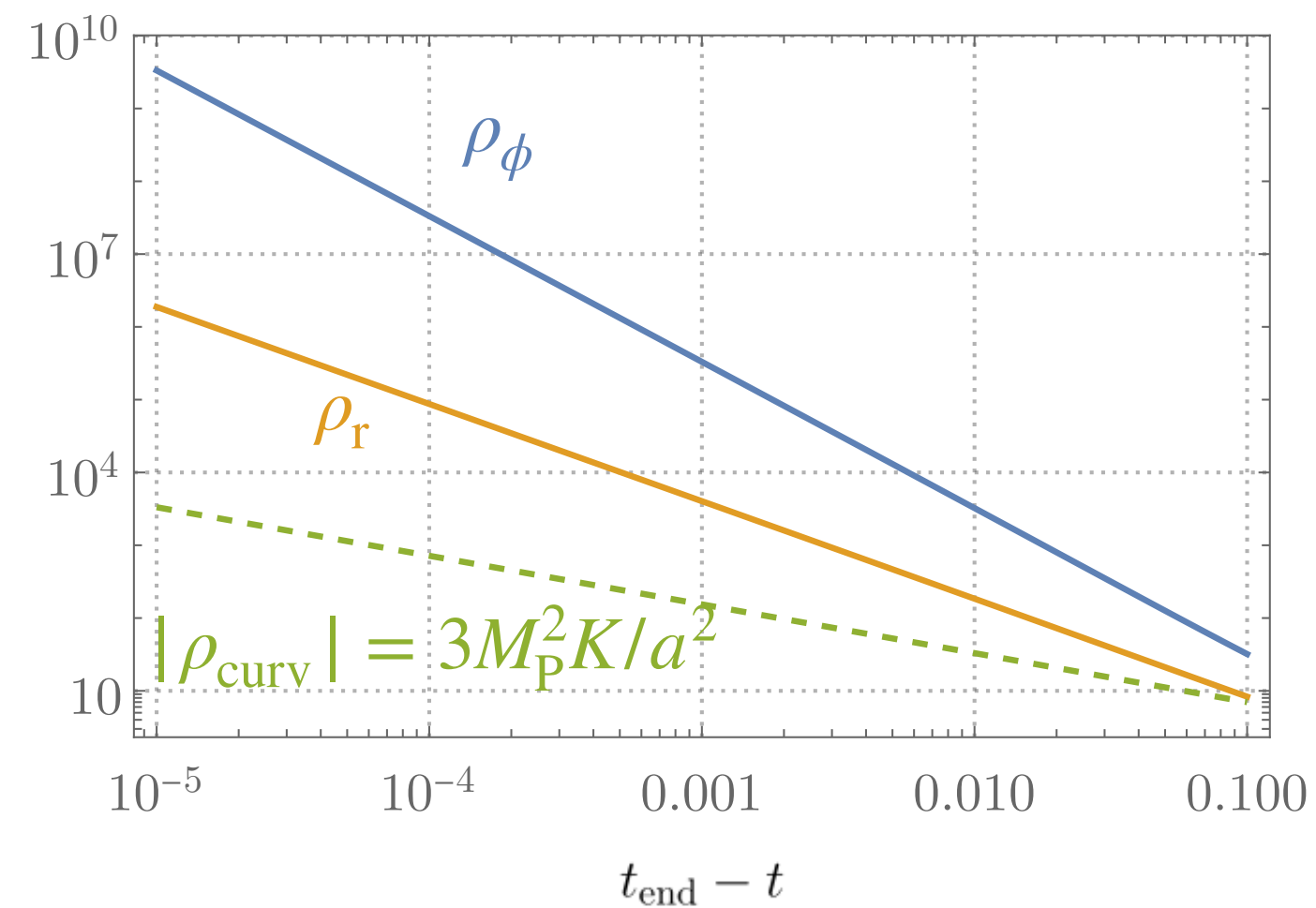
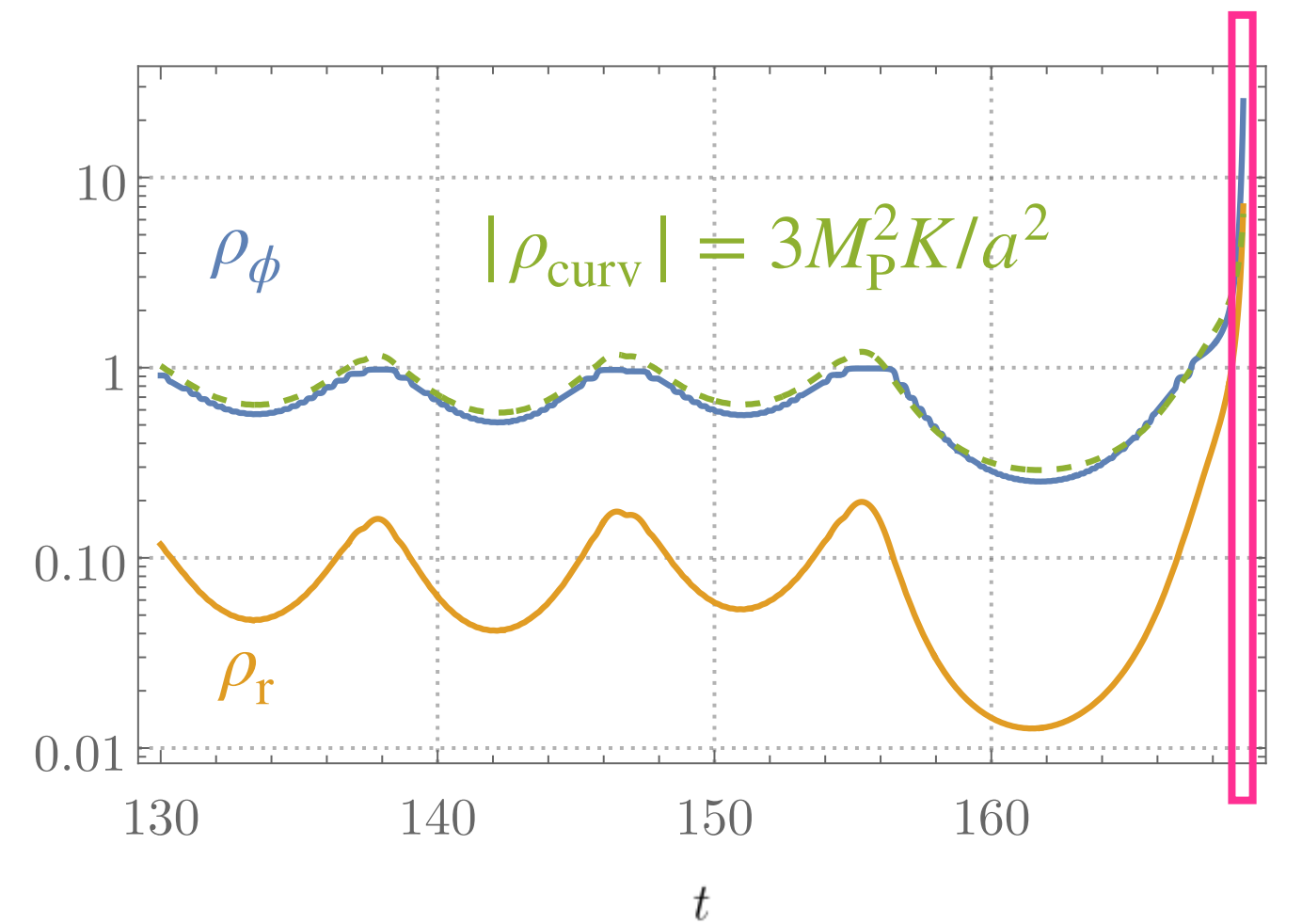


対数スケール因子  
 $\log(a(t)/a(0))$

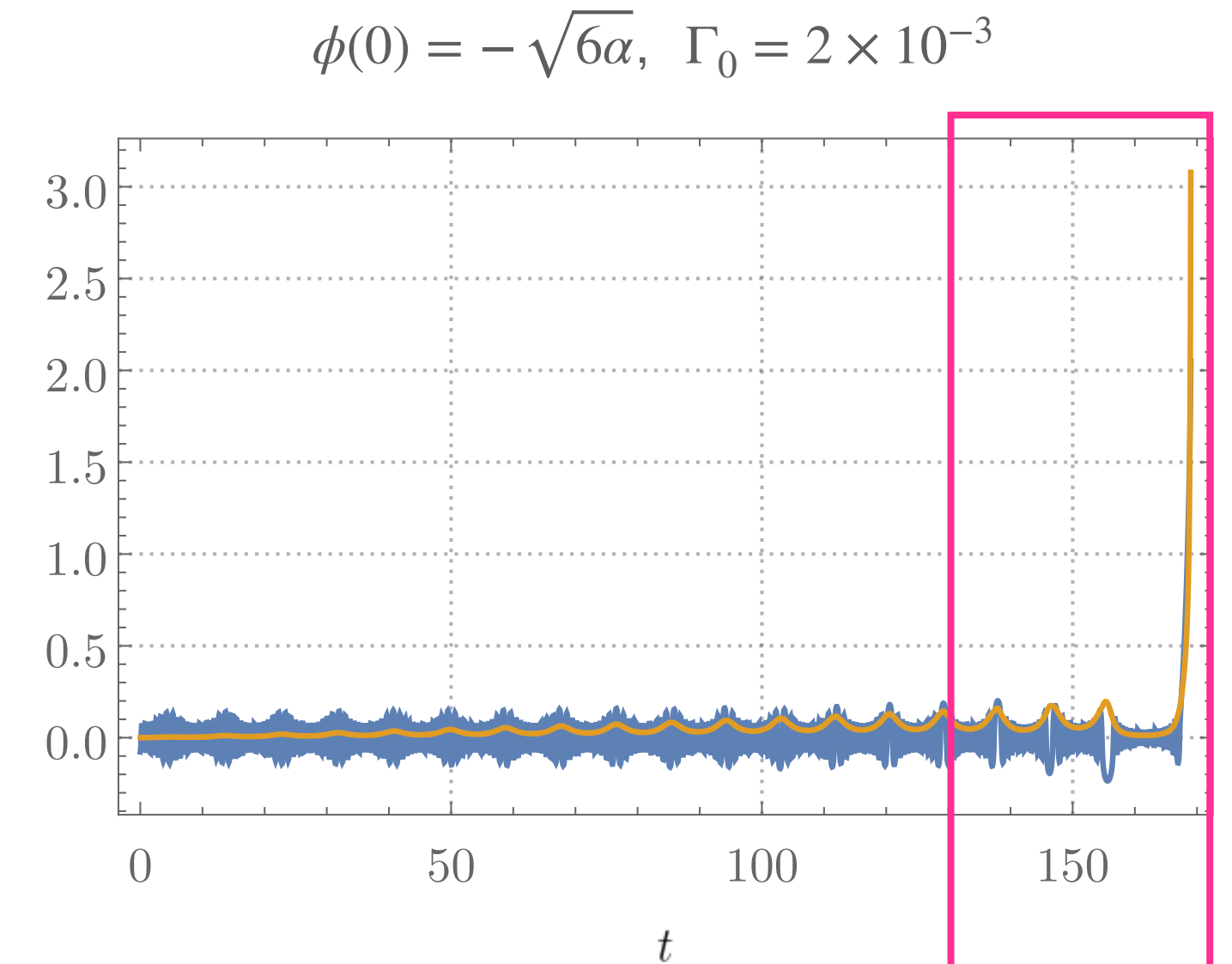




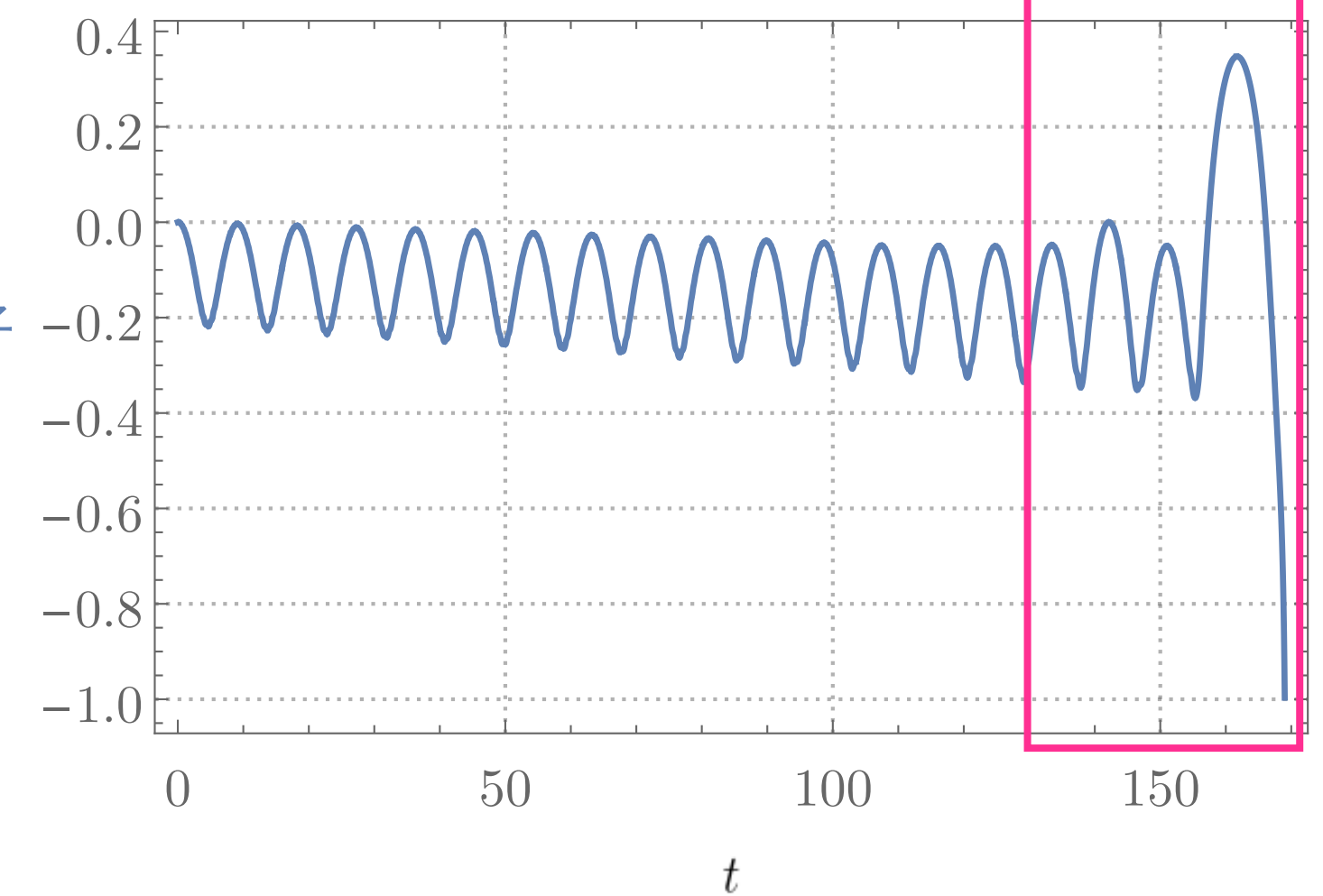
# インフレーションが起きない例もある



スカラー場  $\phi(t)$   
 放射密度  $\rho_{\text{r}}(t)$

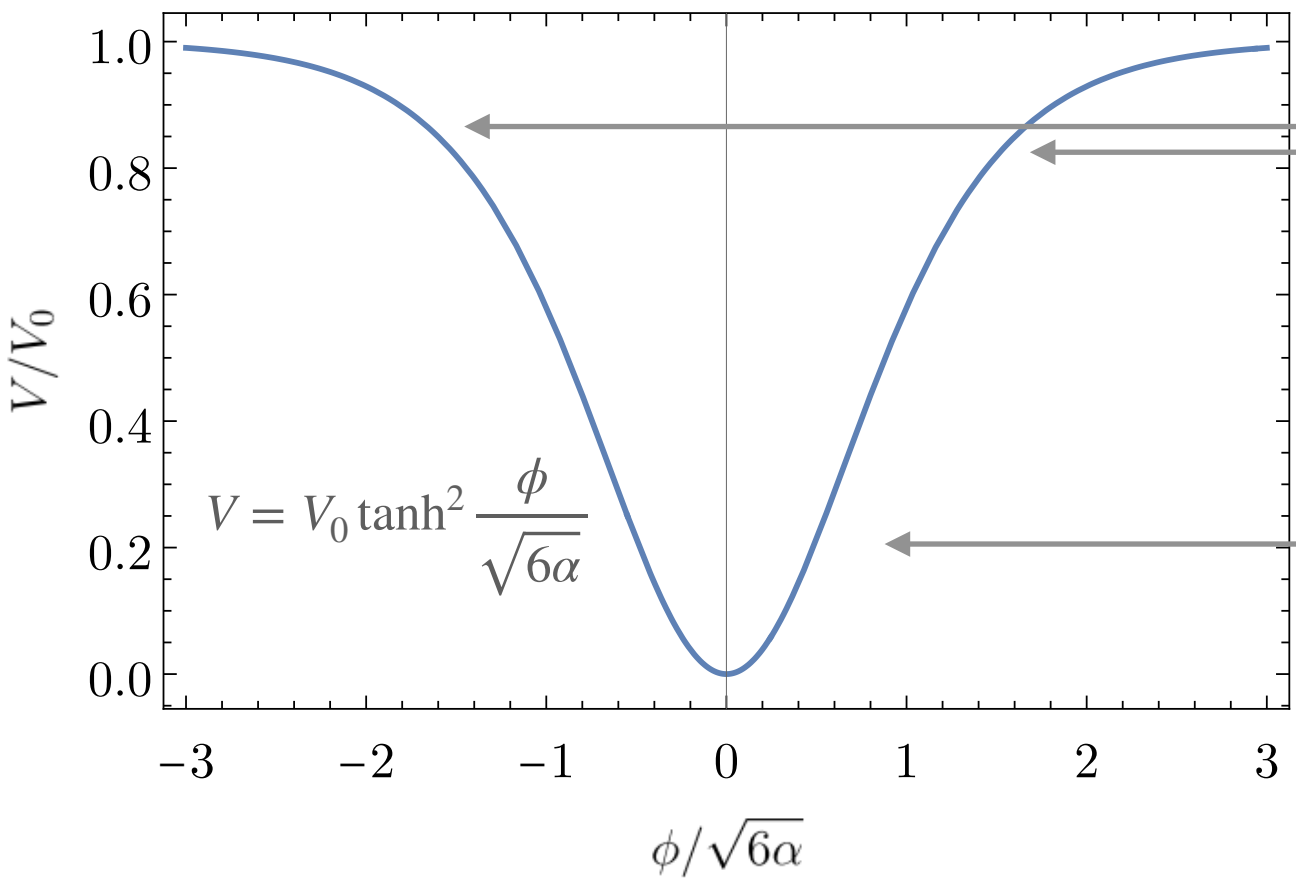


対数スケール因子  
 $\log(a(t)/a(0))$



$\rho_{\text{r}}$  の影響で、 $\rho_\phi$  と  $\rho_{\text{curv}}$  のキャンセレーションのバランスが崩れて**運動項優勢**収縮宇宙になる。

# 自己相互作用による不安定性

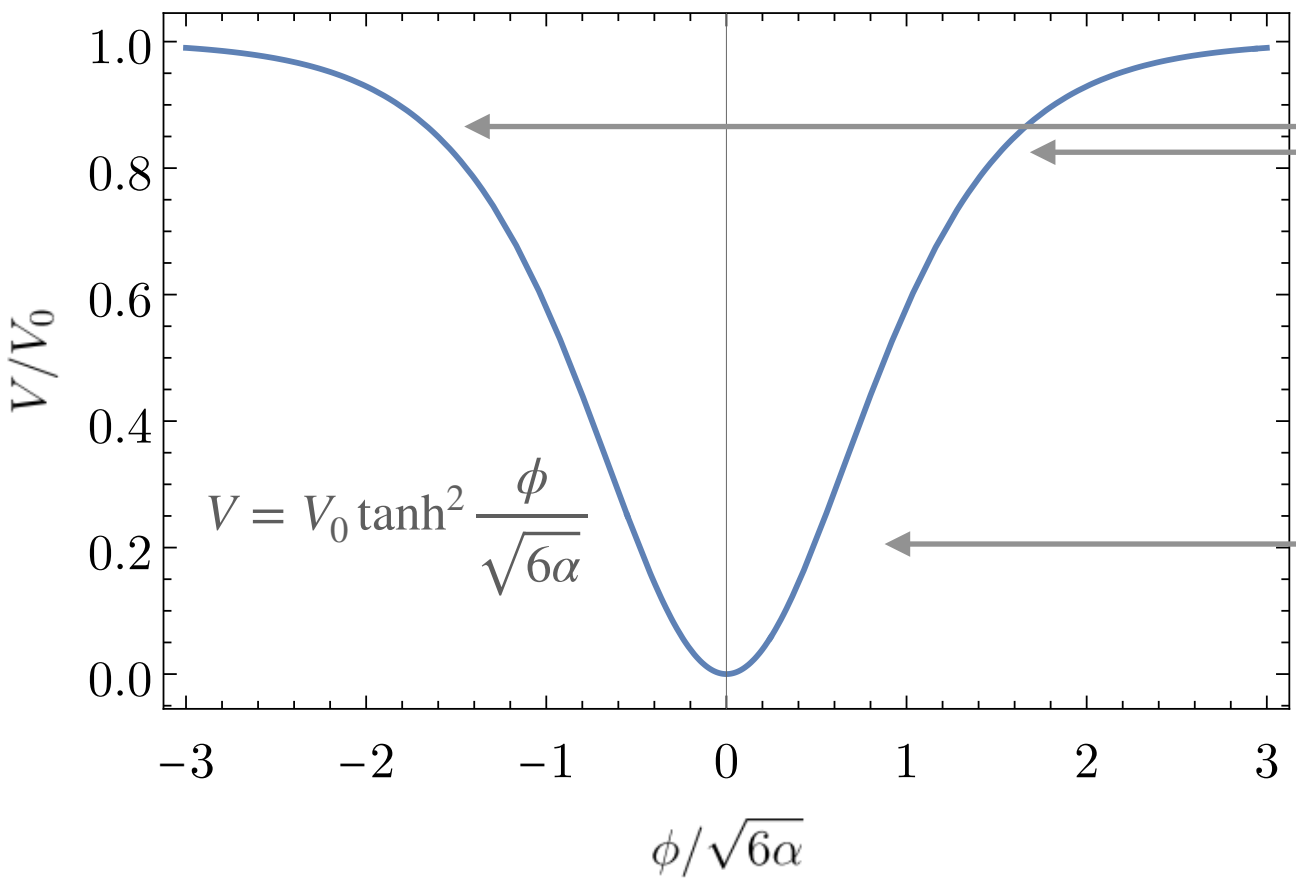


自己相互作用による preheating 効果

タキオン不安定性

パラメーター共鳴

# 自己相互作用による不安定性



自己相互作用による preheating 効果

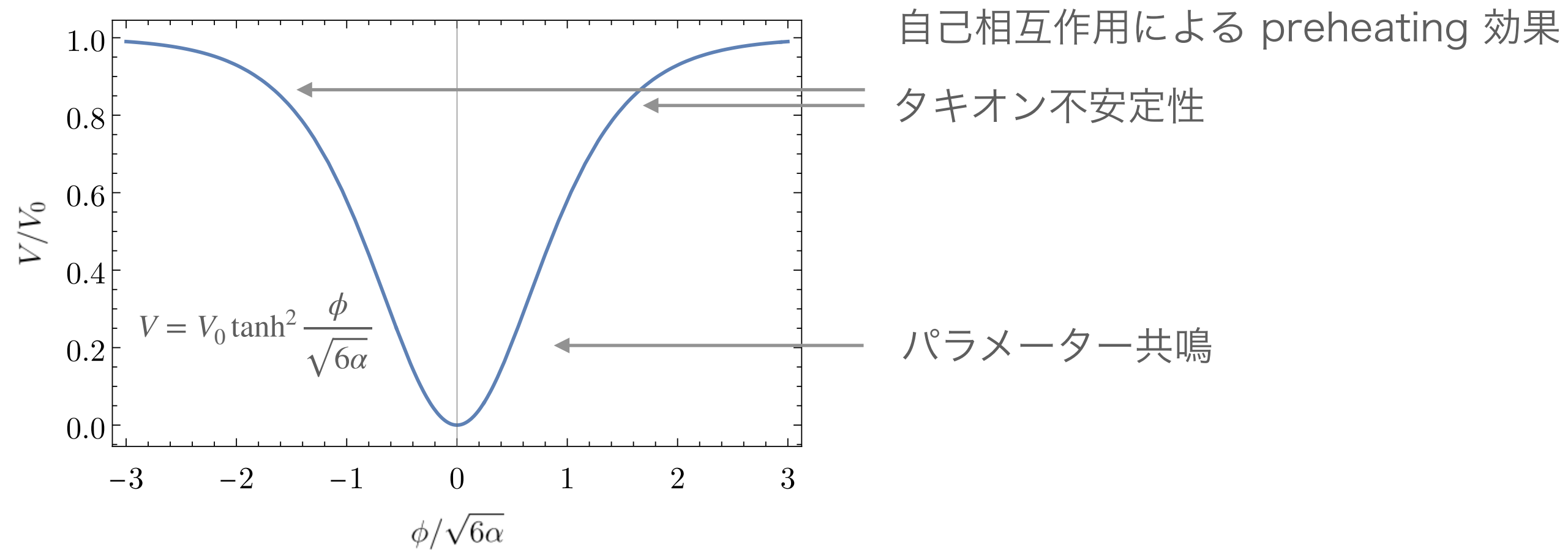
タキオン不安定性

パラメーター共鳴

通常と異なる点

- Hubble parameter  $H$  が 0 周りで振動。  
→ 不安定帯にモードが居続ける
- インフレーション後ではない  
→  $\phi$  初期条件が異なる

# 自己相互作用による不安定性



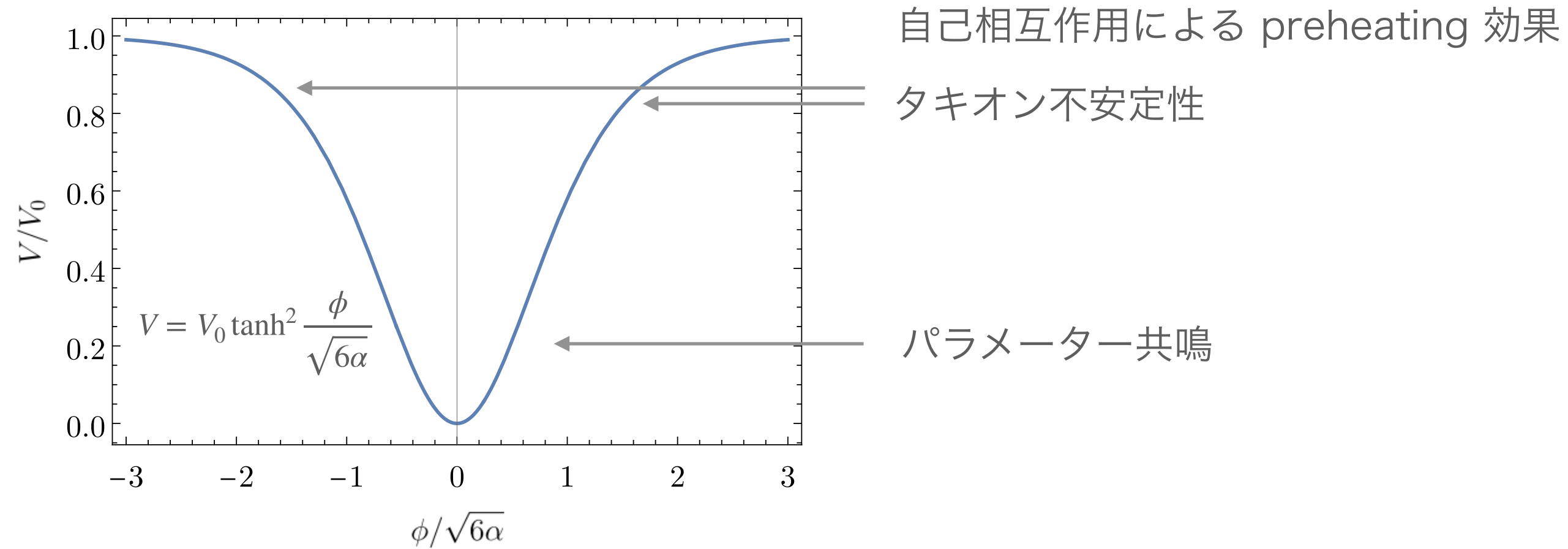
## 通常と異なる点

- Hubble parameter  $H$  が 0 周りで振動。  
→ 不安定帯にモードが居続ける
- インフレーション後ではない  
→  $\phi$  初期条件が異なる

- 典型的にタキオン不安定性の方が強い。(\*)
  - $\alpha$  が小さいほど強い。
  - $\alpha \gtrsim 0.01$  ではサイクリック解を見つけづらい。
- $\mathcal{O}(10)$  回の  $\phi$  の振動で背景場へ反作用。(\*)
  - $\phi$  の振幅が大きい方が不安定になりやすい。
  - $w_{\text{avg}} = -1/3$  周りなら  $a$  の振動に対して  $\phi$  の振動が少ない。

[\*: Tomberg, Veermäe, 2108.10767]

# 自己相互作用による不安定性



## 通常と異なる点

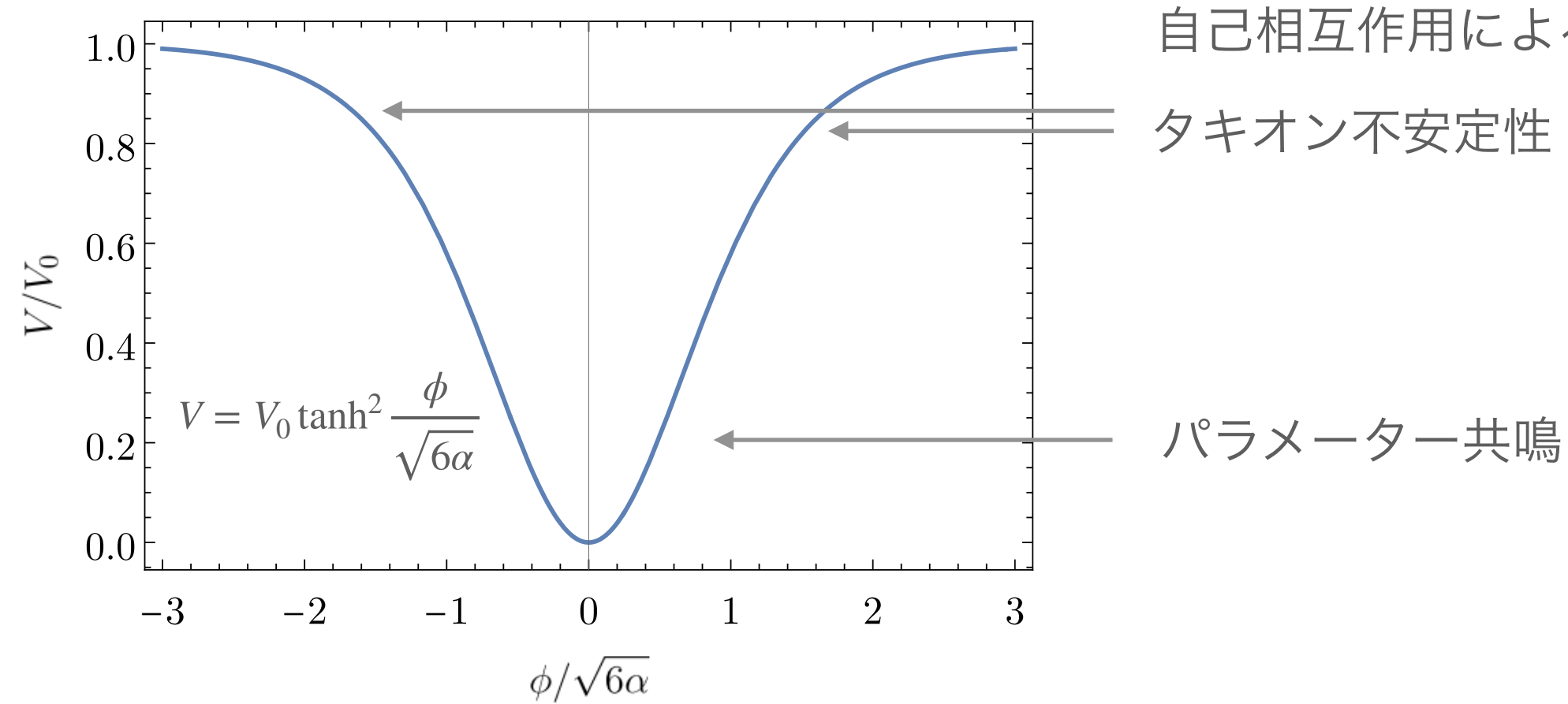
- Hubble parameter  $H$  が 0 周りで振動。  
→ 不安定帯にモードが居続ける
- インフレーション後ではない  
→  $\phi$  初期条件が異なる

- 典型的にタキオン不安定性の方が強い。(\*)
  - $\alpha$  が小さいほど強い。
  - $\alpha \gtrsim 0.01$  ではサイクリック解を見つけづらい。
- $\mathcal{O}(10)$  回の  $\phi$  の振動で背景場へ反作用。(\*)
  - $\phi$  の振幅が大きい方が不安定になりやすい。
  - $w_{\text{avg}} = -1/3$  周りなら  $a$  の振動に対して  $\phi$  の振動が少ない。

[\*: Tomberg, Veermäe, 2108.10767]

→  $\alpha \gtrsim 0.01$  で初期値は中腹辺り、 $\mathcal{O}(10)$  振動以内にインフレーションするような解に興味  
この場合、perturbative decay の代わりに自己 preheating でインフレーションが始まる可能性

# 自己相互作用による不安定性

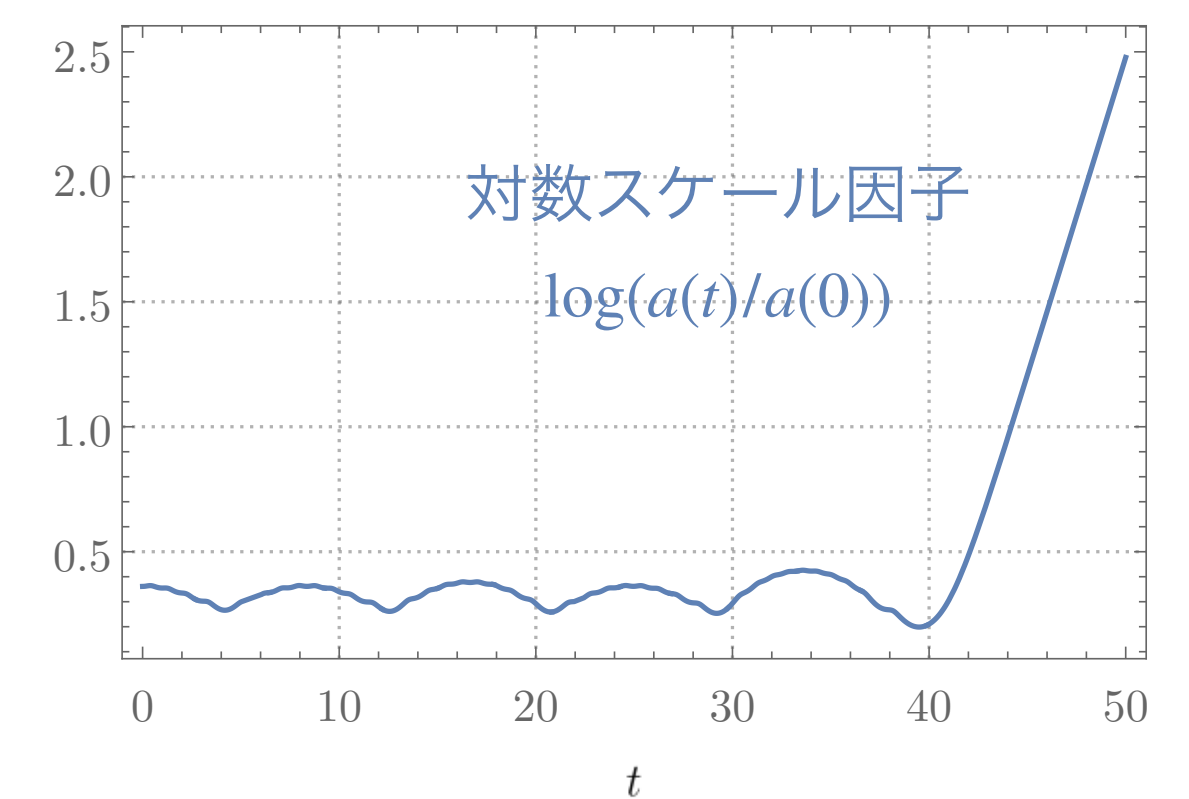
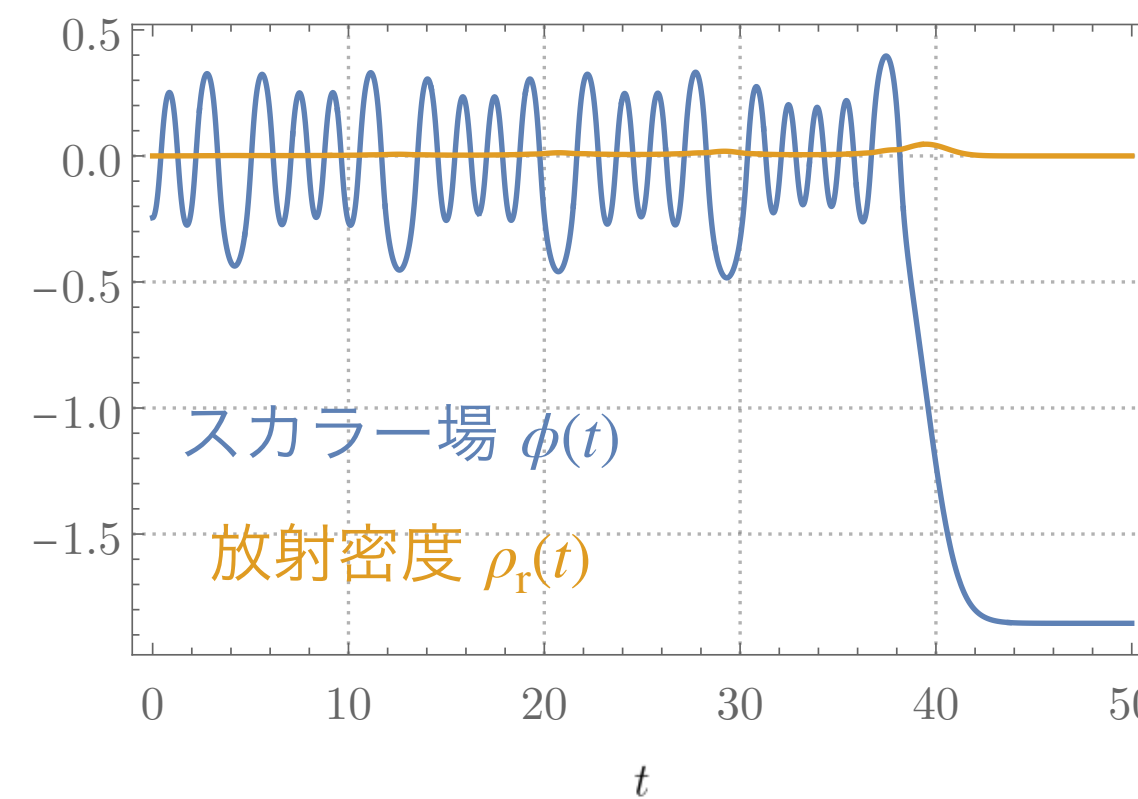


- 典型的にタキオン不安定性の方が強い。(\*)
  - $\alpha$  が小さいほど強い。
  - $\alpha \gtrsim 0.01$  ではサイクリック解を見つけづらい。
- $\mathcal{O}(10)$  回の  $\phi$  の振動で背景場へ反作用。(\*)
  - $\phi$  の振幅が大きい方が不安定になりやすい。
  - $w_{\text{avg}} = -1/3$  周りなら  $a$  の振動に対して  $\phi$  の振動が少ない。

[\*: Tomberg, Veermäe, 2108.10767]

## 通常と異なる点

- Hubble parameter  $H$  が 0 周りで振動。
  - 不安定帯にモードが居続ける
- インフレーション後ではない
  - $\phi$  初期条件が異なる



$\alpha = 0.01, \Gamma_0 = 0.0013, \phi(0) = -\sqrt{6\alpha}$ , 合計 150 e-folding 以上

→  $\alpha \gtrsim 0.01$  で初期値は中腹辺り、 $\mathcal{O}(10)$  振動以内にインフレーションするような解に興味  
 この場合、perturbative decay の代わりに**自己 preheating でインフレーションが始まる**可能性

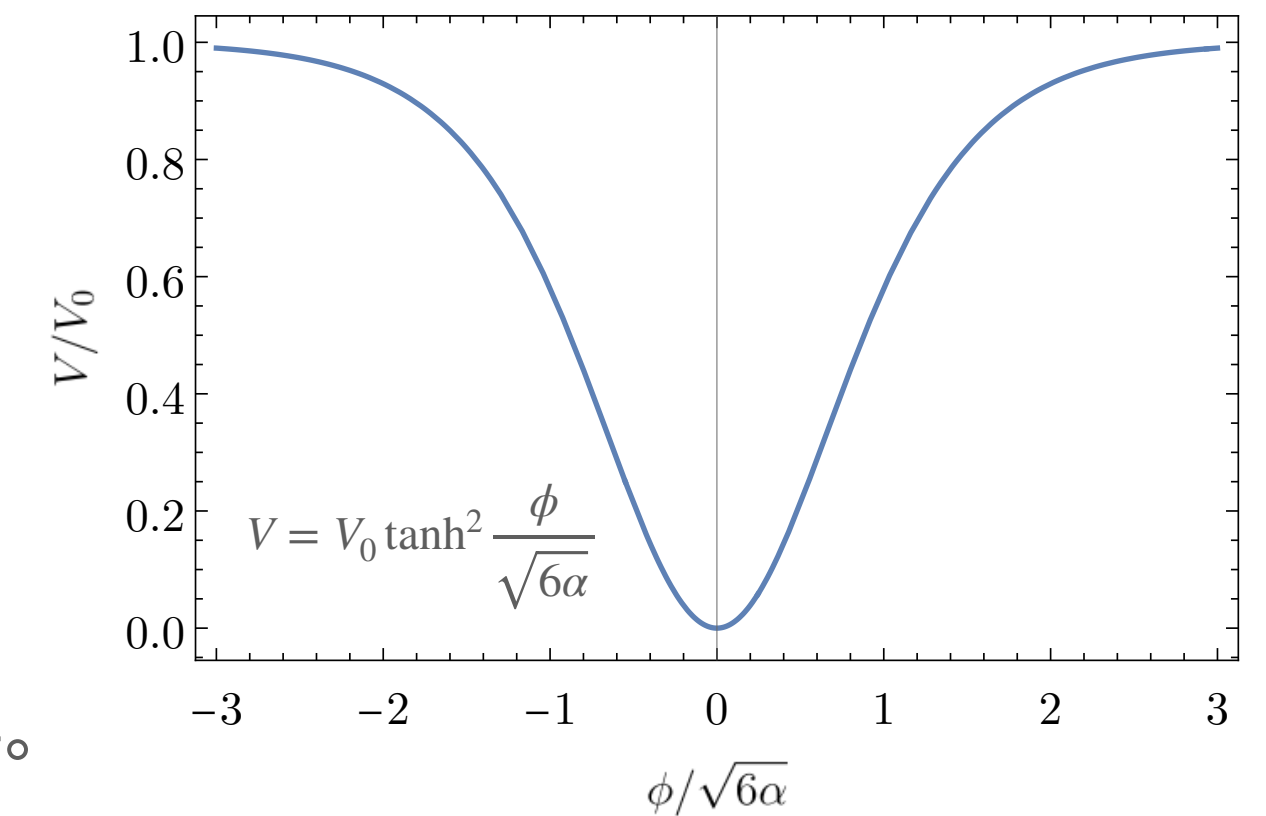
# スカラー場の初期値に関する考察

宇宙創生の確率密度

$$P \sim \exp(\pm 24\pi^2/V)$$

-: Vilenkin, Linde → インフレーションが起きやすく、問題無いので以下考慮しない。

+: Hartle-Hawking → ポテンシャルの底で創世してもインフレーションが不可能なら、中腹が主要な寄与。



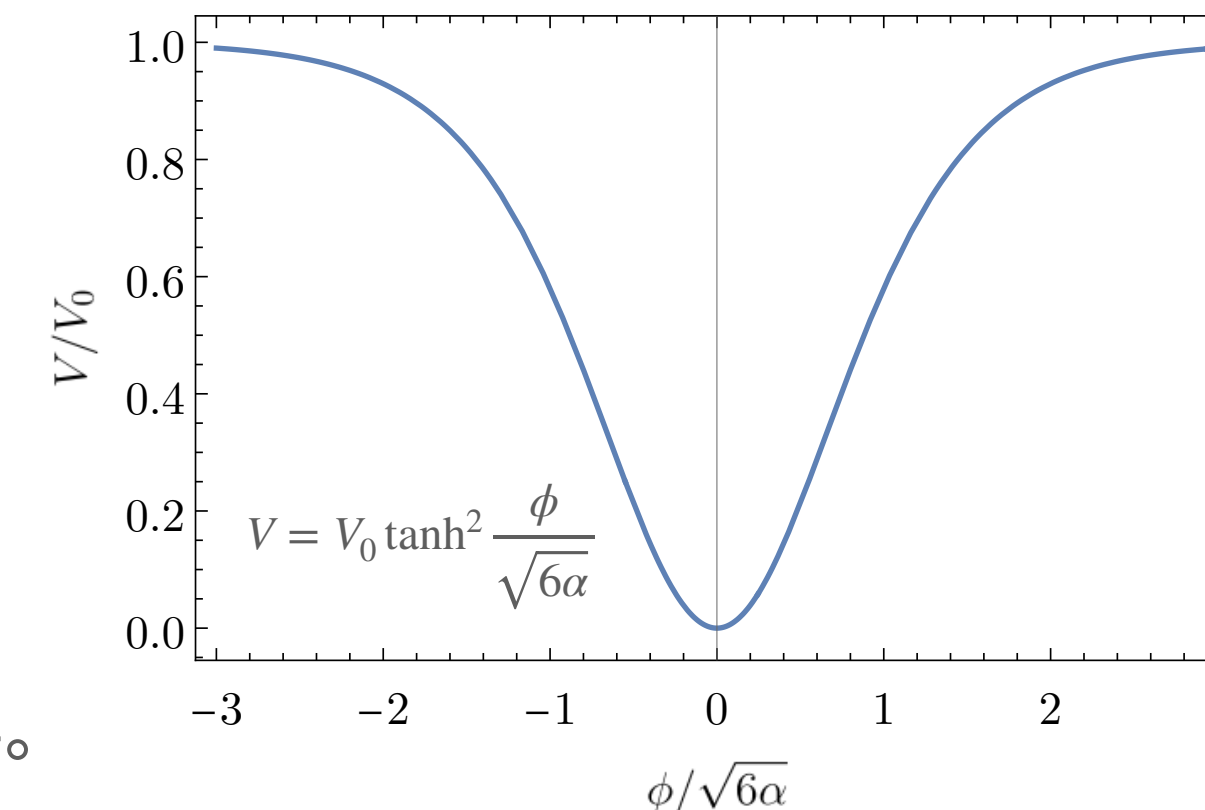
# スカラー場の初期値に関する考察

宇宙創生の確率密度

$$P \sim \exp(\pm 24\pi^2/V)$$

-: Vilenkin, Linde → インフレーションが起きやすく、問題無いので以下考慮しない。

+: Hartle-Hawking → ポテンシャルの底で創世してもインフレーションが不可能なら、中腹が主要な寄与。



非タキオニックな領域での創世

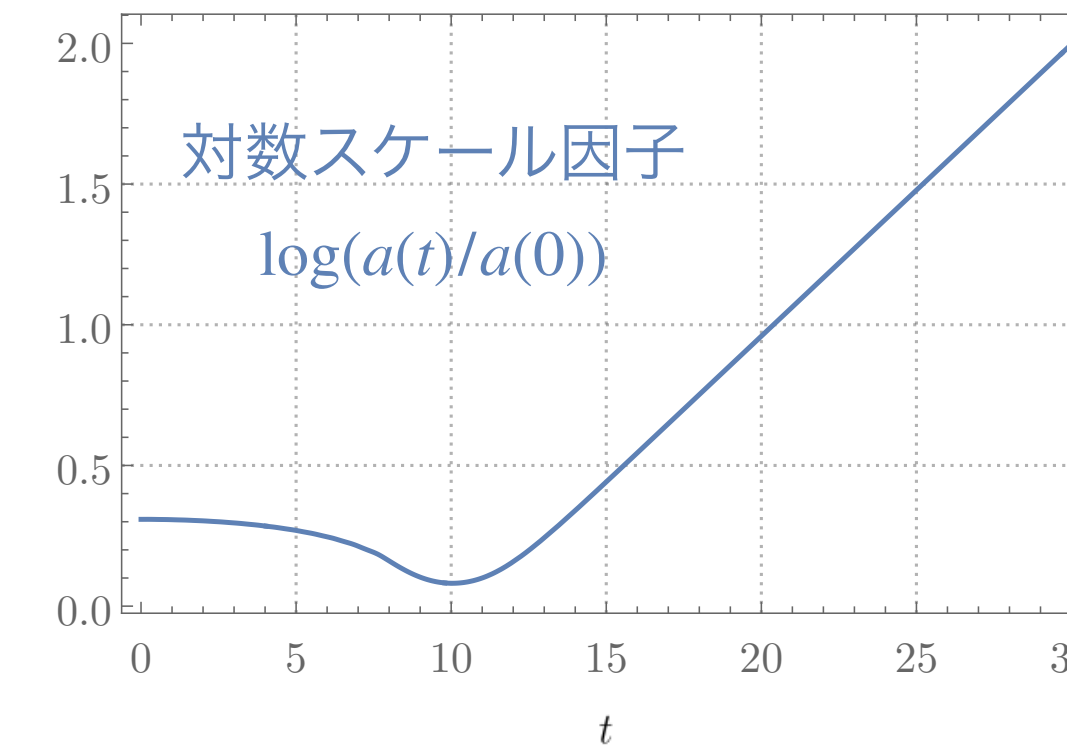
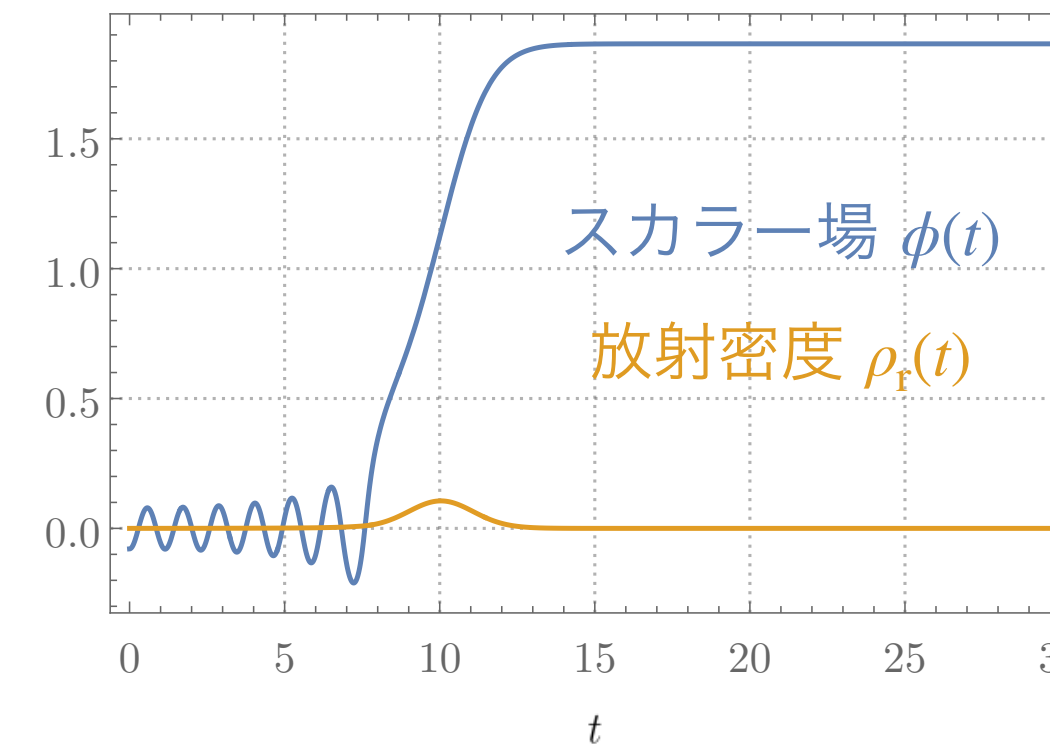
$|\phi(0)/\sqrt{6\alpha}| \approx 0.3$  の解は存在する。(右図; バウンスは一回のみ)

無限個の微調整されたインフレーション解が存在する?

微調整無しなら一般的に運動項優勢のビッグクランチ。

$\phi(0)$  を変えると  $\phi(t_{\text{end}})$  の発散の符号が反転するポイントが複数ある。

このポイント周辺で微調整すればインフレーション解が必ず存在する?



$\alpha = 0.01, \Gamma_0 = 0.0013, \phi(0) = -0.322\sqrt{6\alpha}$ , 合計 60 e-folding 以上



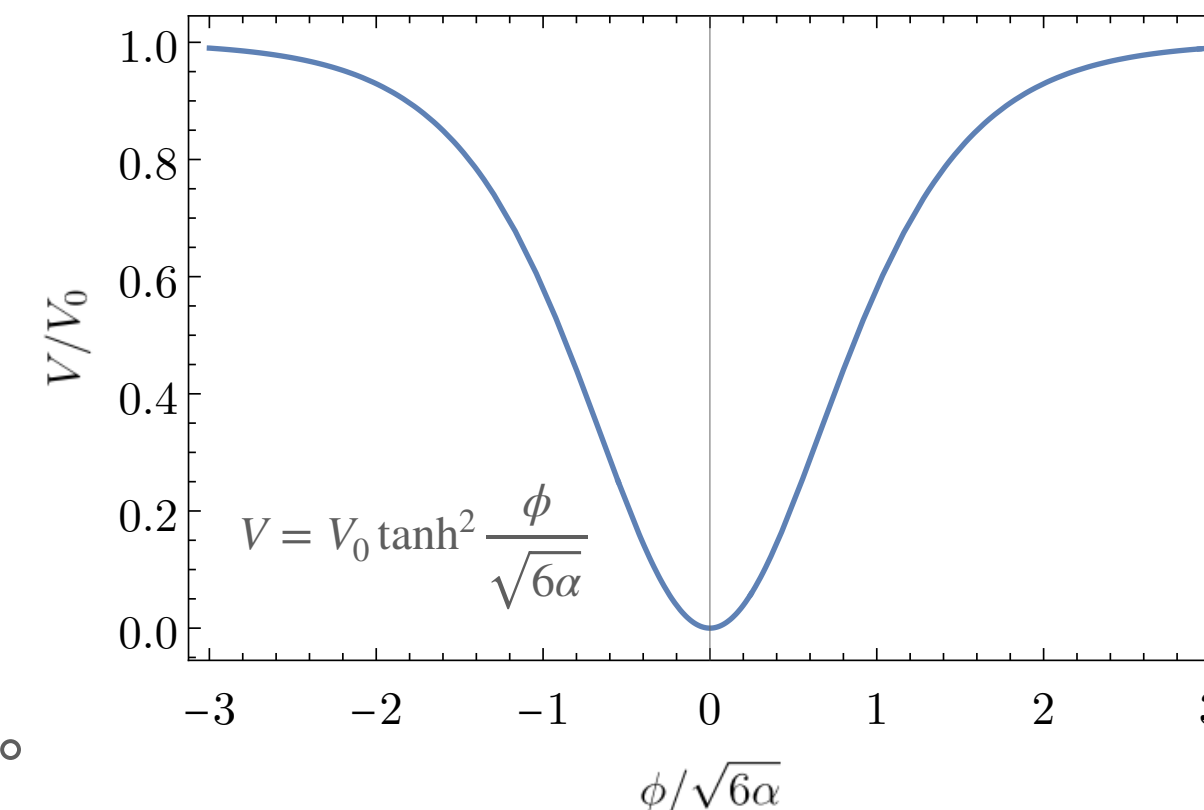
# スカラー場の初期値に関する考察

宇宙創生の確率密度

$$P \sim \exp(\pm 24\pi^2/V)$$

-: Vilenkin, Linde → インフレーションが起きやすく、問題無いので以下考慮しない。

+: Hartle-Hawking → ポテンシャルの底で創世してもインフレーションが不可能なら、中腹が主要な寄与。



非タキオニックな領域での創世

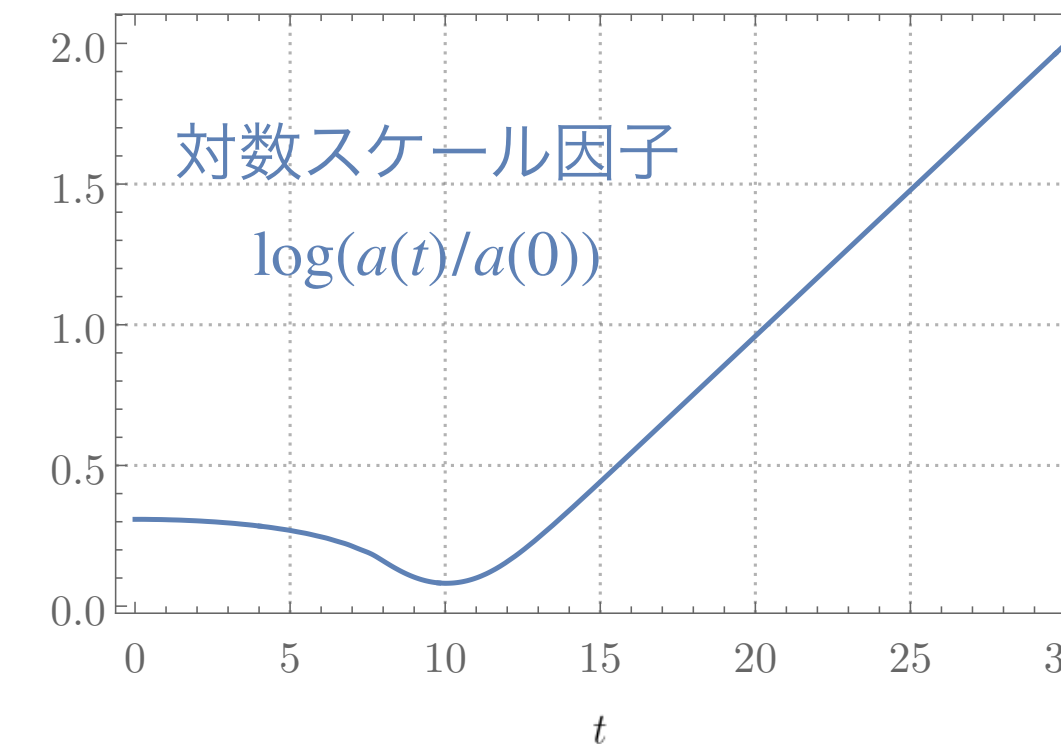
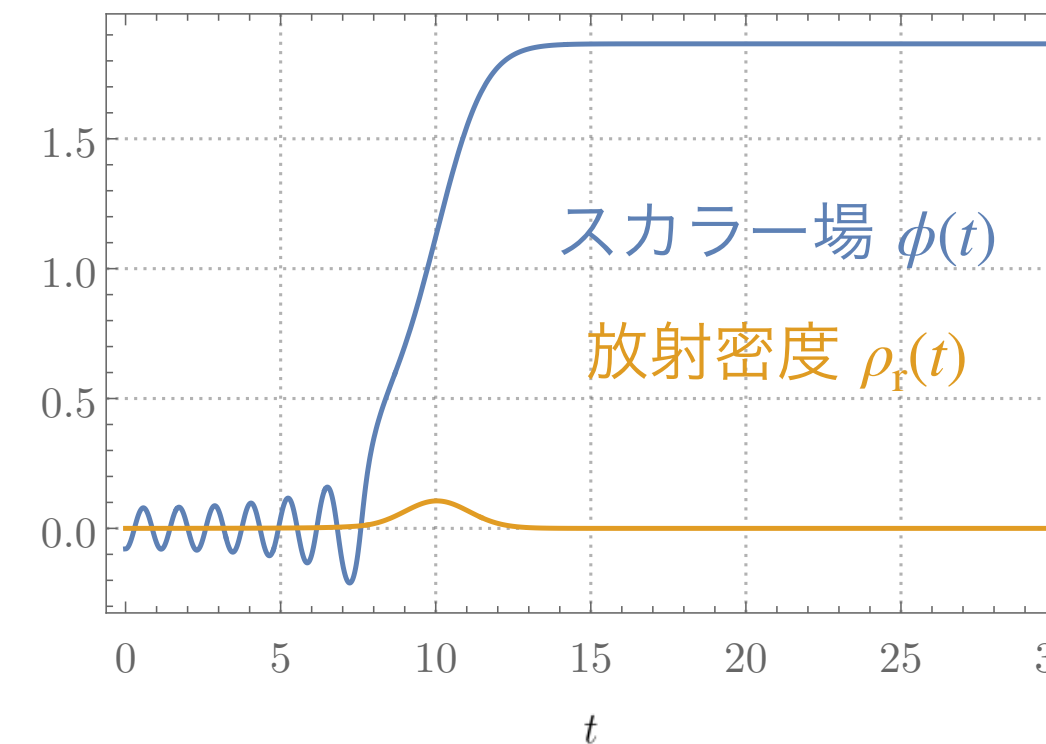
$|\phi(0)/\sqrt{6\alpha}| \approx 0.3$  の解は存在する。(右図; バウンスは一回のみ)

無限個の微調整されたインフレーション解が存在する?

微調整無しなら一般的に運動項優勢のビッグクランチ。

$\phi(0)$  を変えると  $\phi(t_{\text{end}})$  の発散の符号が反転するポイントが複数ある。

このポイント周辺で微調整すればインフレーション解が必ず存在する?



$\alpha = 0.01, \Gamma_0 = 0.0013, \phi(0) = -0.322\sqrt{6\alpha}$ , 合計 60 e-folding 以上

無から創世して即座の**インフレーションに失敗**しても**宇宙が生き残れる**。主要なプロセスの可能性さえある!

# Awakening the Cyclic Universe

～無からの創世、第二法則、創発するインフレーション～

(無からの宇宙創生 →) 準サイクリック期 → インフレーション → 宇宙の再加熱

という興味深い一般相対論+物質場の解を発見した。

- ・ 運動項優勢でビッグクランチせず、インフレーションする可能性があるのが非自明。
- ・ ポテンシャルの形から、インフレーションの始まりと終わりは勝手に起こる。
- ・ 散逸効果でサイクルが終わるなら、始まりもあるはず。無からの創世と親和的。
- ・ 無境界仮説でインフレーション宇宙が生成される主要プロセスかもしれない！