

複場インフレーション

伊東利将 @東京女子大学 2025/07/09

2407.12544 [hep-ph](阿部慶彦氏,吉岡興一氏との研究)に基づく

やったこと

- 最大2つの自由度が効く”自然な”インフレーションを”中間領域”を含めてある程度網羅的に調べた
- 2つの自由度が効くインフレーションはある程度許容されることを示した

インフレーションとは？

- 初期宇宙での宇宙の急激な膨張

[Guth 1981, Sato 1980, Starobinsky 1980, Kazanas 1980, Brout, Englert, Gunzig, 1979]

- 解決できる問題

1. モノポール問題

[Kibble 1976]

2. 平坦性問題

[Dicke 1969, Dicke, Peebles 1979]

3. 地平線問題 etc...

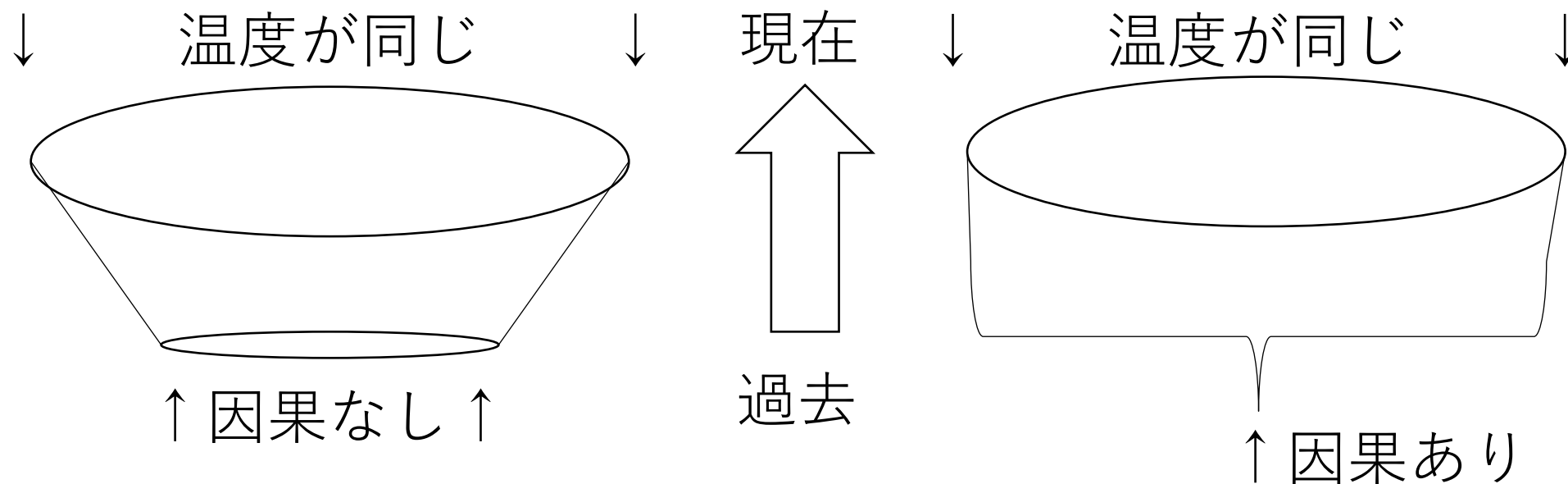
[Misner 1967]

モノポール問題 & 平坦性問題

- モノポール問題 (バリオンと同じ程モノポールが存在?)
宇宙にはモノポールが大量 → 宇宙の急激膨張で薄まった!
- 平坦性問題 (宇宙は超平坦からスタート?)
($|\Omega(t_0)| < 0.005$, $|\Omega(t_{EW})| < 10^{-28}$)
→ 急激な膨張で宇宙が平坦になったからそう見えるだけ!

$e^{50} \sim e^{60}$ 倍くらいの膨張が必要 \iff 膨張指数: $N = 50 \sim 60$

地平線問題



急激膨張がない → 約5000個の別領域の温度が同じ
→ 偶然が過ぎる

宇宙の急激膨張で、因果があった領域が現在から見て広くなる

Friedmann方程式と連続の式

[Friedmann 1922]

- 一様等方宇宙を表す線素： $ds^2 = dt^2 - a(t)^2(dx^2 + dy^2 + dz^2)$
 $a(t) \propto e^{Ht}$ であればインフレーション

これをどう実現するか？

- Friedmann方程式： $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{1}{3}\rho$ [Friedmann 1922]
 ρ : エネルギー密度
 p : 圧力
- 連続の式： $\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0$

インフレーションの実現

- 目標 : $a(t) \propto e^{Ht}$
- Friedmann方程式 : $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{1}{3}\rho$
- 連続の式 : $\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0$

[Linde 1982, Albrecht and Steinhardt 1982]

$\rho = -p$ と仮定すると ρ は定数

Friedmann方程式を解くと $a(t) \propto e^{Ht}$

$$H := \frac{\dot{a}}{a} = \sqrt{\frac{\rho}{3}} = \text{const.}$$

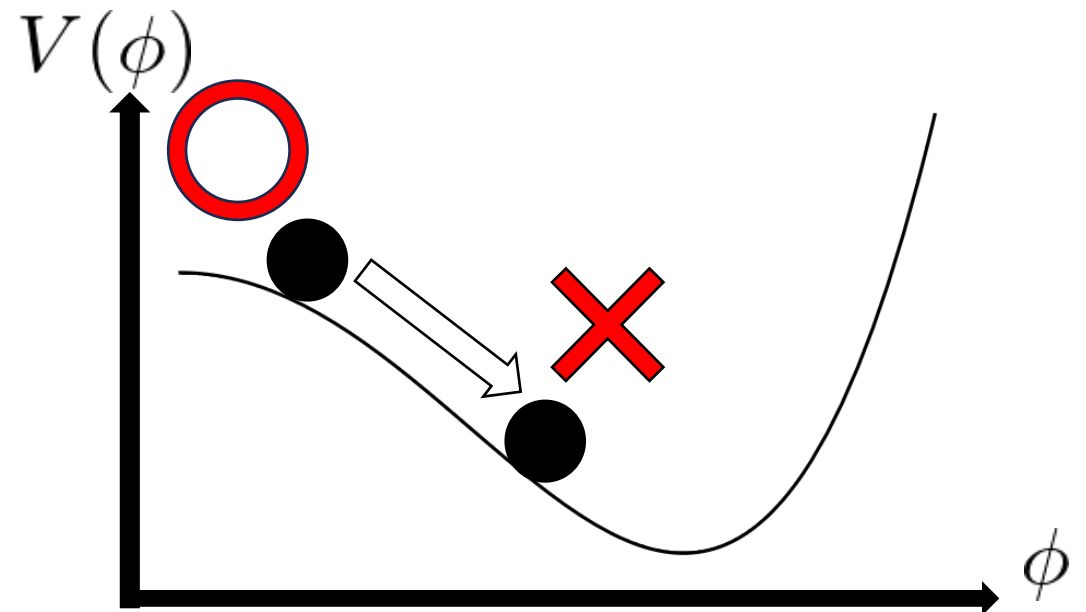
$\rho = -p$ の実現 (インフラトン場)

- 実スカラー場を導入: $\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - V(\phi)$ [Linde 1982, Albrecht and Steinhardt 1982]

$$\rho = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi)$$

$$p = \frac{\dot{\phi}^2}{2} - V(\phi)$$

$$\frac{\dot{\phi}^2}{2} \ll V(\phi) \text{ とすると } \rho = -p$$



スローロールパラメーター ε, η

先程の話を定量的に…

- ポテンシャルが平坦 : $\varepsilon := \frac{1}{2} \left(\frac{V'}{V} \right)^2 \ll 1$
- 加速度が小さい : $|\eta| := \left| \frac{V''}{V} \right| \ll 1$

($\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = 0$ の第一項を無視する条件)

スローロール条件が満たされなくなる → インフレーション終了

※観測量もこれらで書ける

パワースペクトル

[<https://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~yokoyama/inflation.pdf>]

場所時刻によって場の発展には「揺らぎ」がある

$$\phi(t, \mathbf{x}) = \phi_{\text{cl.}}(t) + \delta\phi(t, \mathbf{x}) = \phi_{\text{cl.}}(t + \delta t(t, \mathbf{x}))$$

$$a(t, \mathbf{x}) \propto e^{H(t+\delta t)} \simeq a(t)(1 + H\delta t) =: a(t)(1 + \Phi)$$

揺らぎの相関関数： $\langle \Phi(\mathbf{k})\Phi(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta^{(3)}(\mathbf{k} + \mathbf{k}') \frac{2\pi^2}{k^3} \mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) = (2.1 \pm 0.1) \times 10^{-9} \quad (\text{パワースペクトルの観測値})$$

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) = \frac{V}{24\pi^2 \varepsilon} \quad (k = aH \text{ で評価})$$

[Planck Collaboration 2018]

他の観測量

- $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}$ の波数依存性 (スペクトル指数)

$$n_s = \frac{d \ln \mathcal{P}_{\mathcal{R}}}{d \ln k} = 1 - 6\varepsilon + 2\eta$$

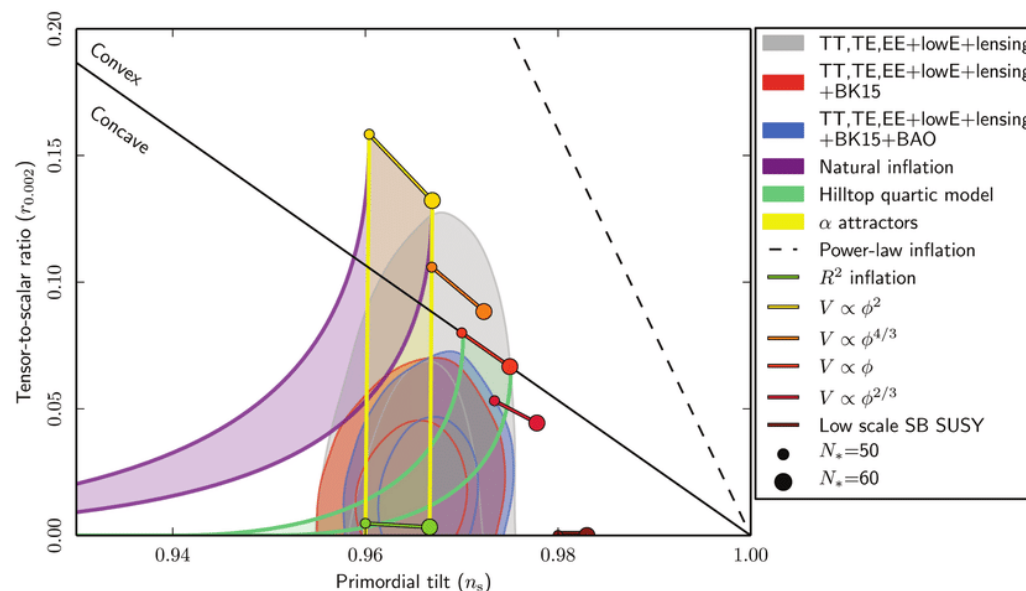
- テンソル揺らぎとスカラー揺らぎの比 (テンソルスカラー比)

$$r = 16\varepsilon$$

全て $k = aH$ で評価

ϕ^4 は死亡 →
相当平坦なポテンシャルを要求

[Planck Collaboration 2018]



複場インフレーションの注意点

[Peterson, Tegmark 2010]

- 揺らぎが2方向ある

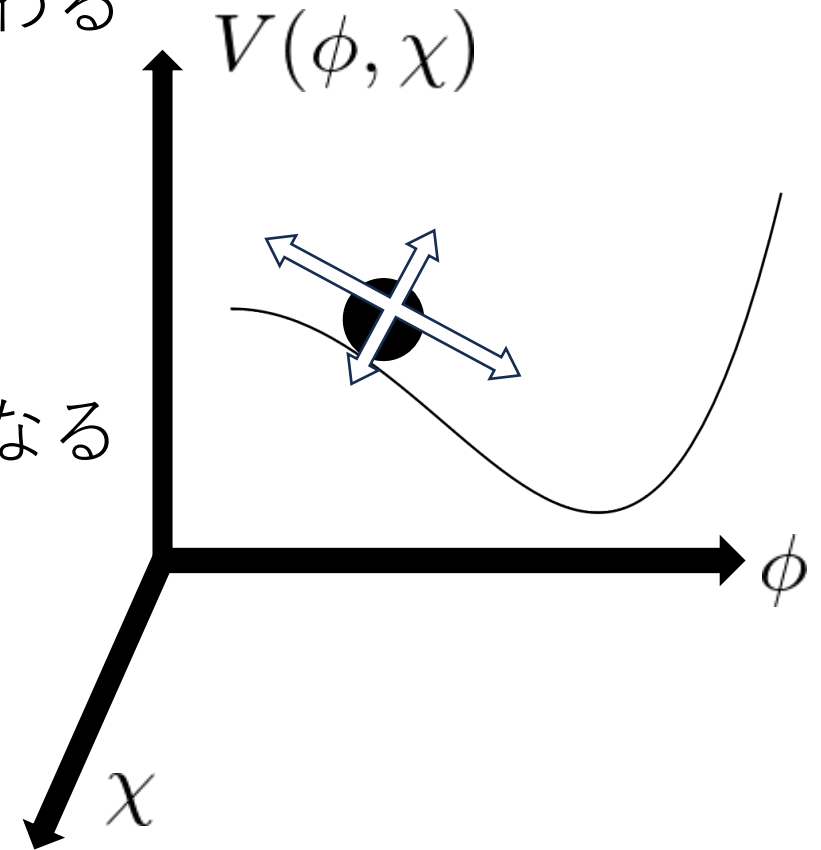
観測量 $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}$ に垂直方向の揺らぎの影響が加わる

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}} = \mathcal{P}_{\mathcal{R}}^{(\text{single field})} (1 + T_{\mathcal{R}S}^2)$$

他の観測量も変更される

- 両方向のパワースペクトルの比も観測量となる

$$\beta = \frac{\mathcal{P}_S}{\mathcal{P}_{\mathcal{R}} + \mathcal{P}_S}$$



複素インフラトン

Φ : 複素スカラー

[Abe, TI, Yoshioka 2024]

$$S = \int d^4x \sqrt{-g_J} \left[-\frac{1}{2} (1 + 2\xi |\Phi|^2) R_J + \partial_\mu \Phi \partial^\mu \Phi^* - V(\Phi) \right]$$

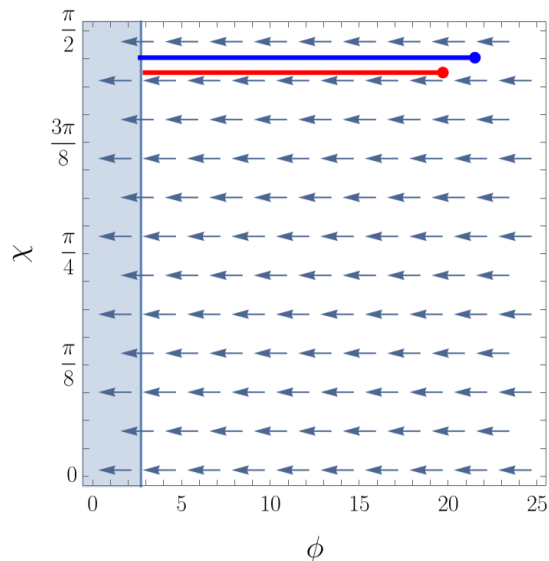
Einstein枠に移ったポテンシャル : $\frac{V(\phi, \chi)}{(1 + \xi \phi^2)^2}$ $\Phi = \frac{\phi}{\sqrt{2}} e^{i\chi}$

ϕ が大きいとき、 ϕ^4 ポテンシャルはほぼ定数 → **平坦!**

$$V(\phi, \chi) = \frac{\lambda}{8} (\phi^2 - v_\phi^2)^2 + \frac{m_\chi^2}{4} (1 - \cos(2\chi))$$

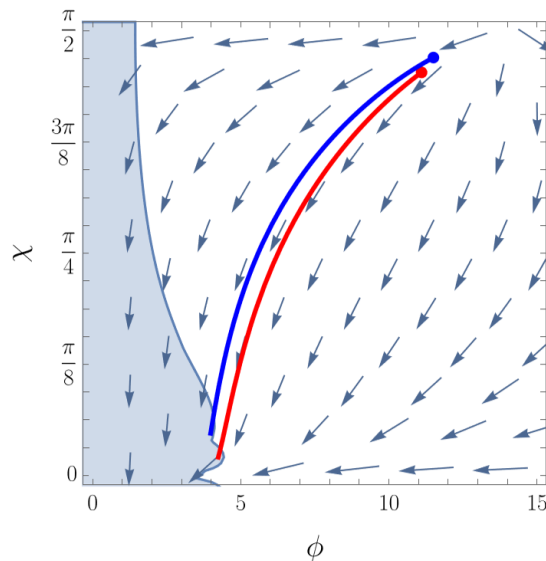
↑ pNGB質量項

pNGB質量項とインフレーション経路



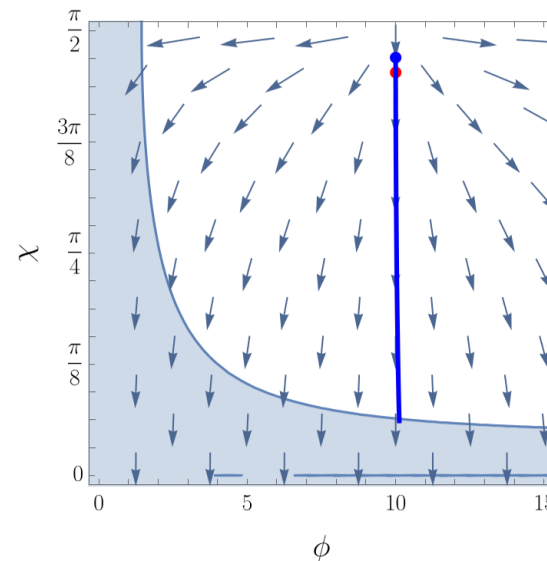
$$m_\chi = 0$$

H経路



$$m_\chi = 10^{-4}$$

M経路



$$m_\chi = 10^{-2}$$

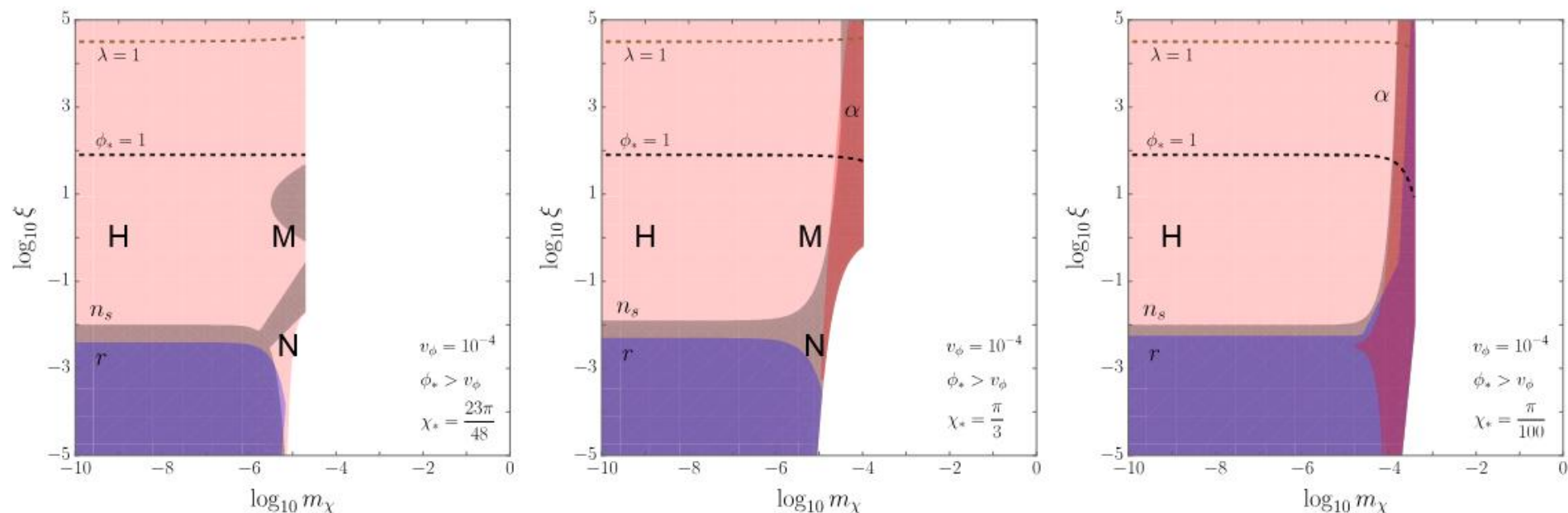
N経路

pNGB質量項が大きいく χ 方向への動き

赤 : $N = 50$ 青 : $N = 60$
 $\xi = 10^{-2}$ $v_\phi = 10^{-4}$
領域 : 非スローロール

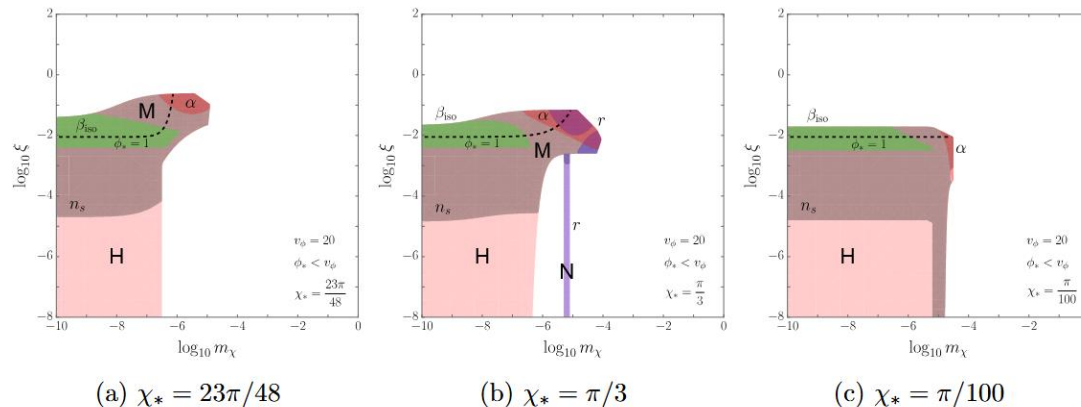
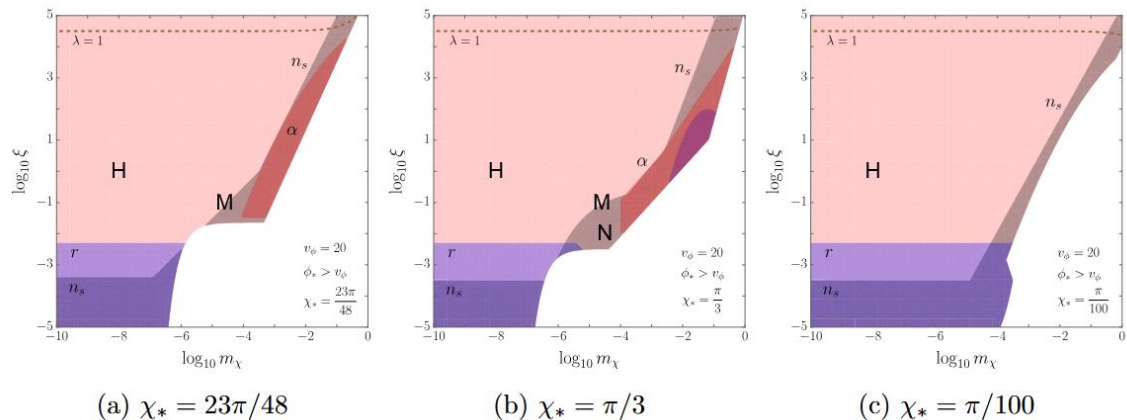
観測との対応

VEVがPlanckスケールより小さく初期値がVEVより大きい場合



NGモードが効きすぎると観測に反しやすい
 $\xi \gtrsim \mathcal{O}(10^{-2})$ が要求される (ポテンシャルの平坦性)
一部MやNが許容される

観測との対応



$$1 < v_\phi < \phi_*$$

$$1 < v_\phi, \phi_* < v_\phi$$

$\xi \gtrsim \mathcal{O}(10^{-2})$ が必要 (平坦性)

$\xi \lesssim \mathcal{O}(10^{-5})$ が必要 (平坦性)

一部Mが許容される

まとめと今後の展望

まとめ

- M経路を含むパラメーター領域を広く調べた
- 両方のモードが効くインフレーションは一部許される

今後の展望

- 経路分類をきちんとやるには？
- どういう場合に観測に反するかを一般的に示せる…？