

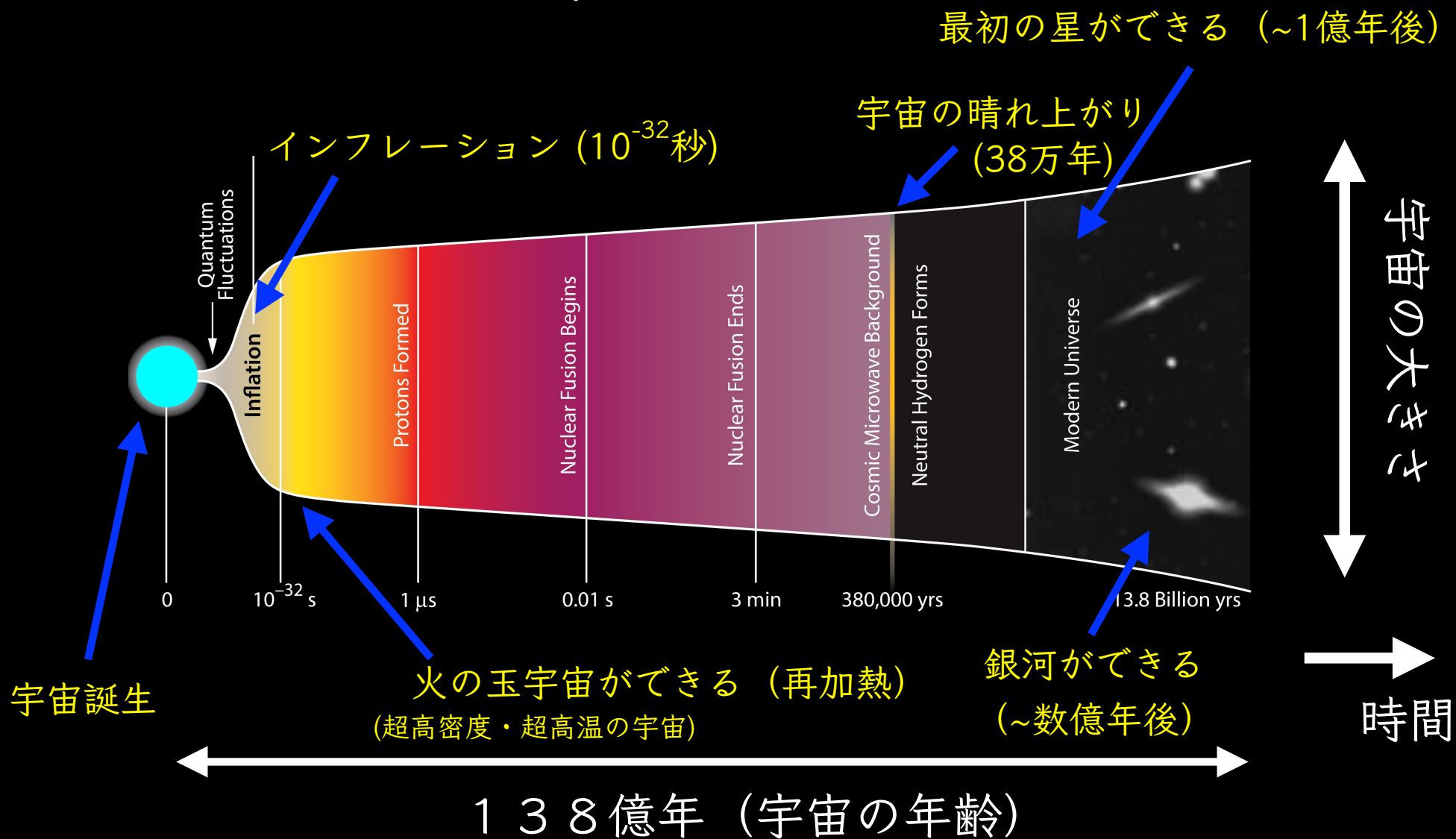
遺伝的アルゴリズム/強化学習で探る インフレーション宇宙論

高橋 智 (佐賀大学)

学習物理領域セミナー + DLAPセミナー

2025年1月16日 @ ZOOM

宇宙の歴史



研究分野：宇宙論

- 初期宇宙論

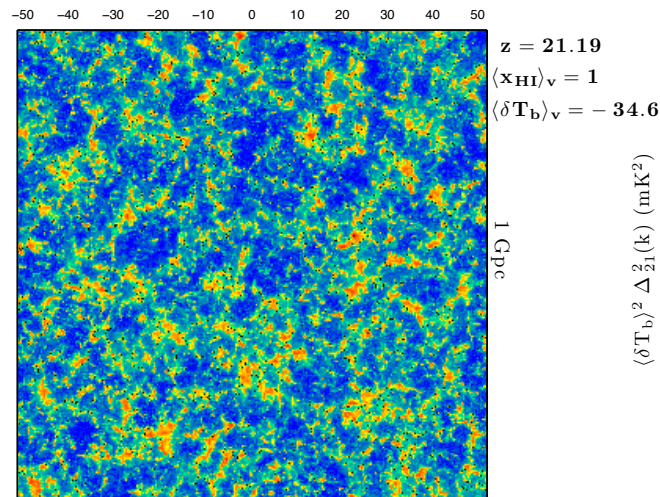
- インフレーション, 原始密度揺らぎ
- 宇宙の再加熱 (初期宇宙の熱史)
- 初期宇宙で生成される重力波
- ⋮

- 宇宙観測データを用いた宇宙論の検証

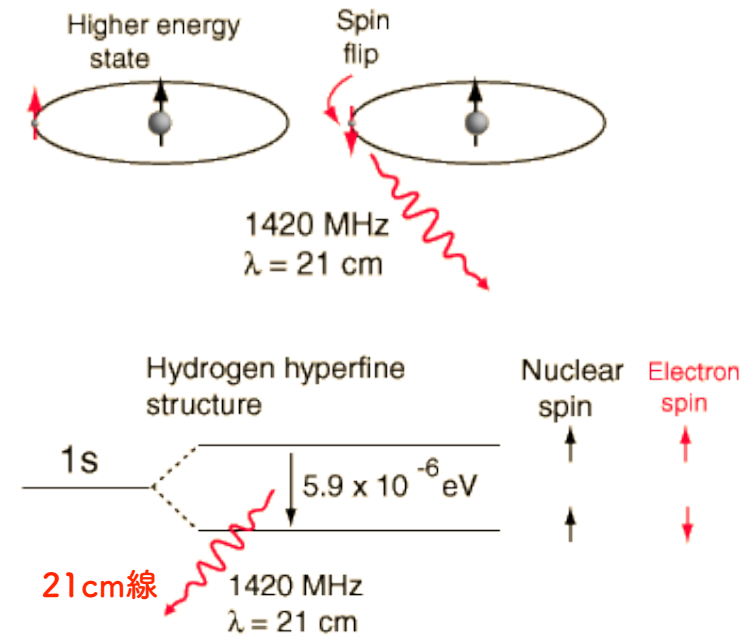
- 宇宙背景放射, 宇宙の大規模構造のデータを用いた検証
(インフレーション理論, 暗黒物質等の検証, ...)
- 中性水素21cm線など, 小スケール観測を用いた検証
⋮ (機械学習を用いたエミュレータなどに関する研究も)

例：21cm線グローバル（空間平均）シグナルのエミュレータ

- 中性水素21cm線のシグナルは宇宙論、宇宙物理学の様々な情報を含む



[Mesinger, Furlanetto, Cen arXiv:1003.3878]



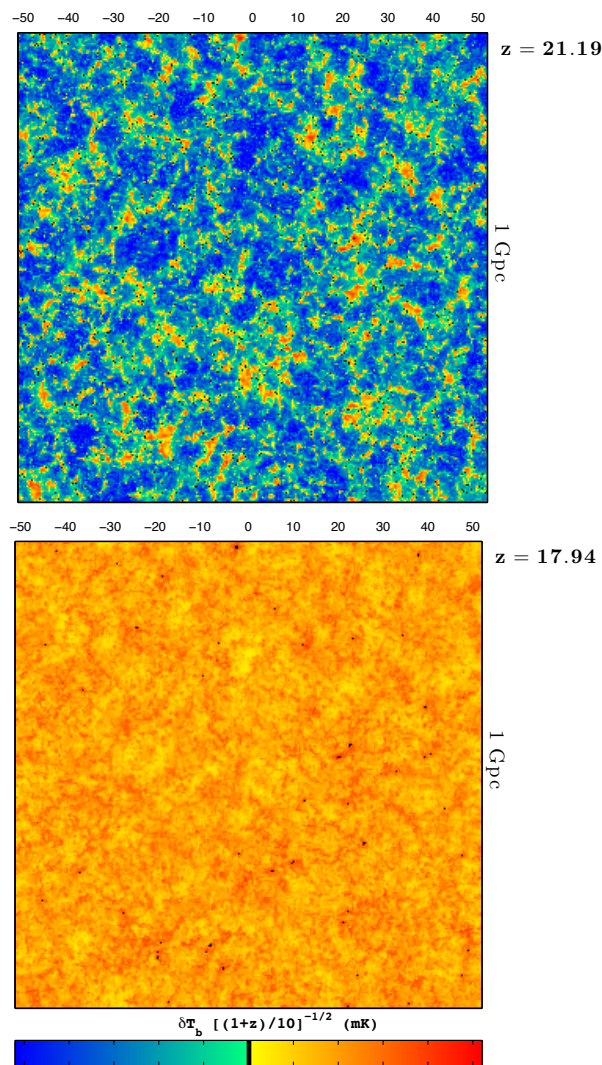
[<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/h21.html>]

- シグナルはモデルのパラメタに依るが（なのでモデルを検証できる）、（それぞれのパラメタあたりの）シミュレーションは時間がかかる
 - ➡ シミュレーションデータを学習させて、様々なパラメタに対するシグナルの予言を高速化して (emulator), モデルを観測データと比較して検証する

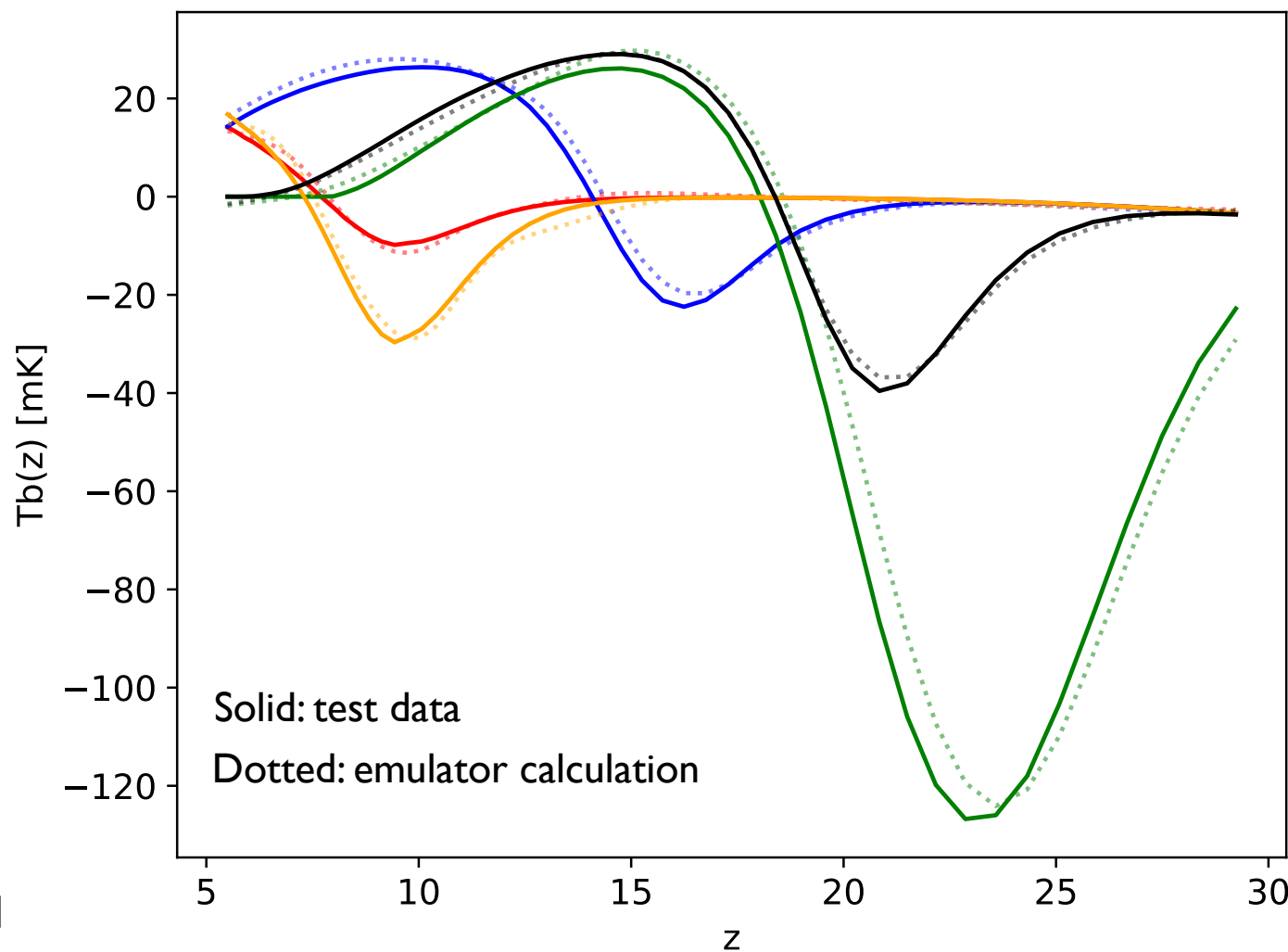
例：21cm線グローバル（空間平均）シグナルのエミュレータ

21cm global (spatially averaged) signals from semi-simulation (21cmfast) and our emulator

(Semi-numerical simulation from 21cmfast)



(ANN-based emulator developed in [Yoshiura, Minoda, TT arXiv:2305.11441])



遺伝的アルゴリズム/強化学習で探る インフレーション

インフレーション (inflation)

- インフレーション (Inflation) = 宇宙誕生直後の超急激な膨張
($t \sim 10^{-32}$ sec)
- インフロン場 (inflaton) = インフレーションを引き起こすスカラー場

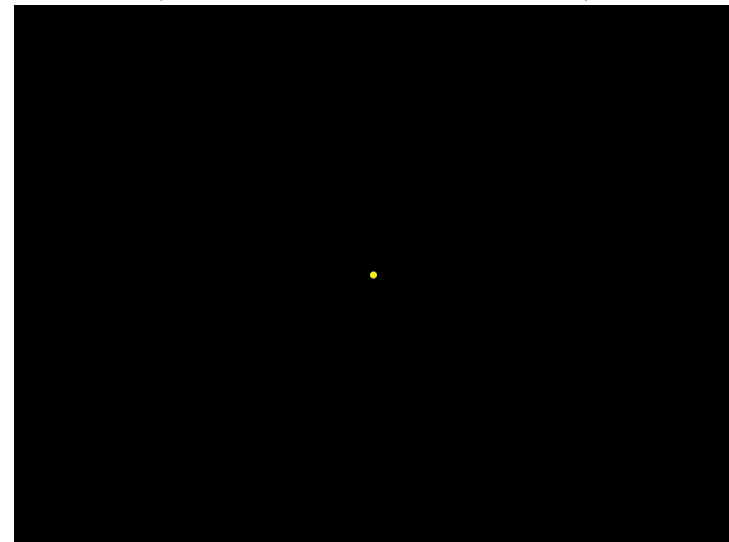
"Usual" cosmic expansion

$$(a \sim t^{2/3} \text{ in MD})$$



Inflationary expansion

$$(a \sim e^{Ct} \text{ during inflation})$$



- インフレーションは標準ビッグバン理論の諸問題 (地平線問題, 平坦性問題) を解決する (インフレーションがないと, 宇宙誕生以降の宇宙の進化を矛盾なく記述できない)

インフレーション場

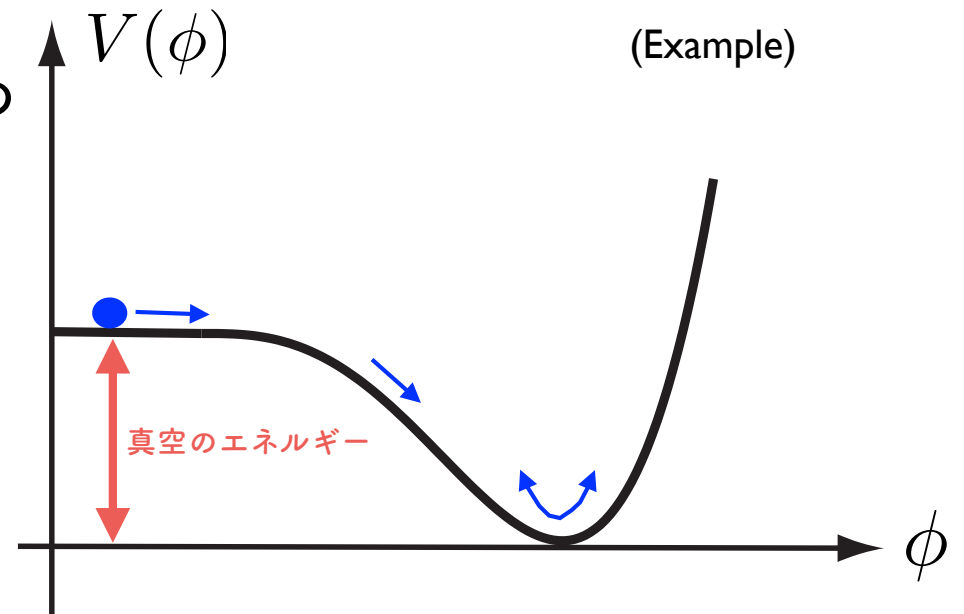
- インフレーション場 (スカラー場) ϕ はポテンシャル $V(\phi)$ で特徴づけられる

- Lagrangian: $\mathcal{L}_\phi = \frac{1}{2} g^{\mu\nu} (\partial_\mu \phi) (\partial_\nu \phi) - V(\phi)$

- エネルギー密度: $\rho_\phi = \frac{1}{2} \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 + V(\phi)$

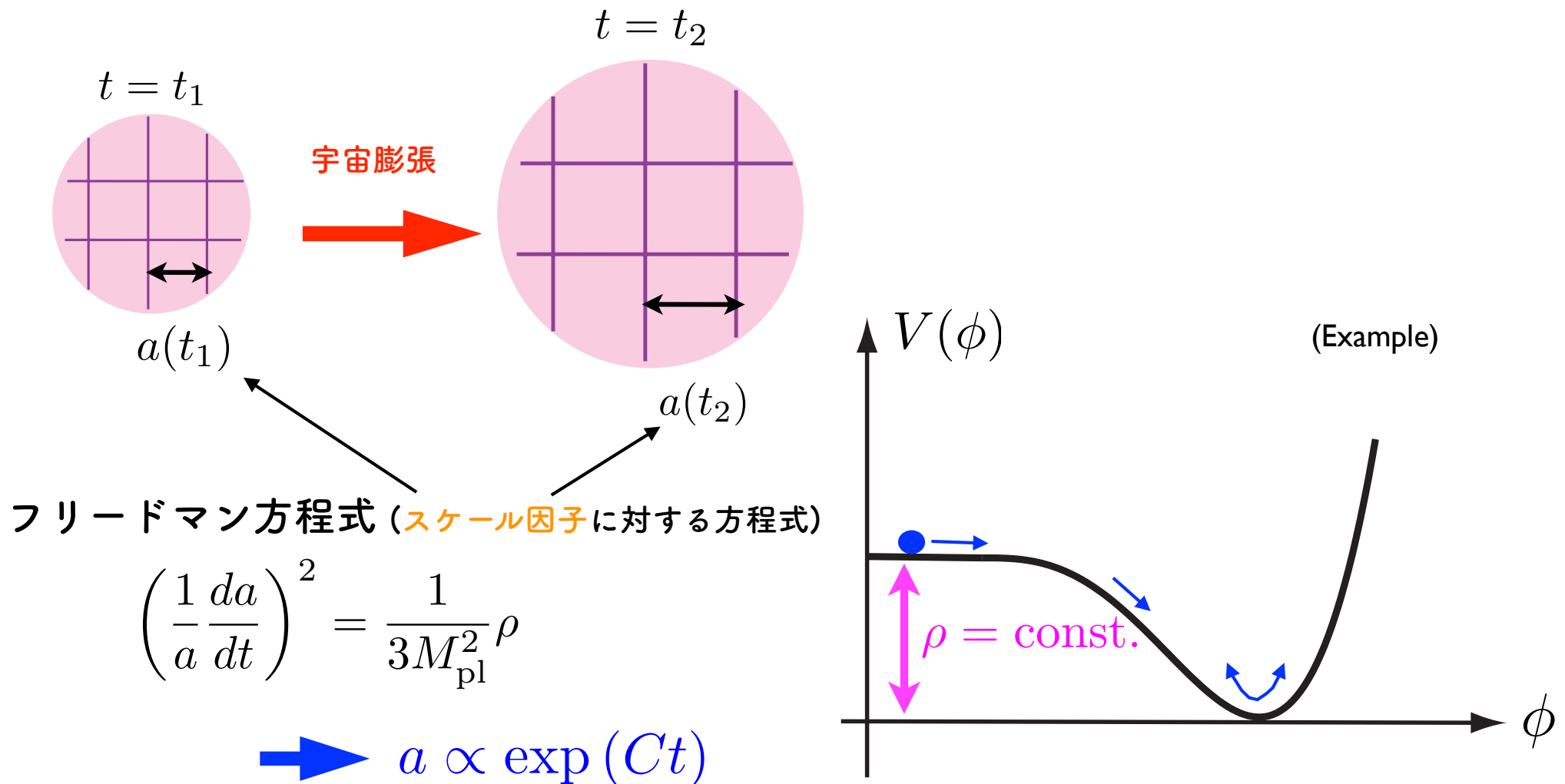
- インフレーション場の正体 (インフレーションの詳細なメカニズム) は未だ分かっていない

- インフレーション場の正体は？
＝インフレーションのポテンシャルは？



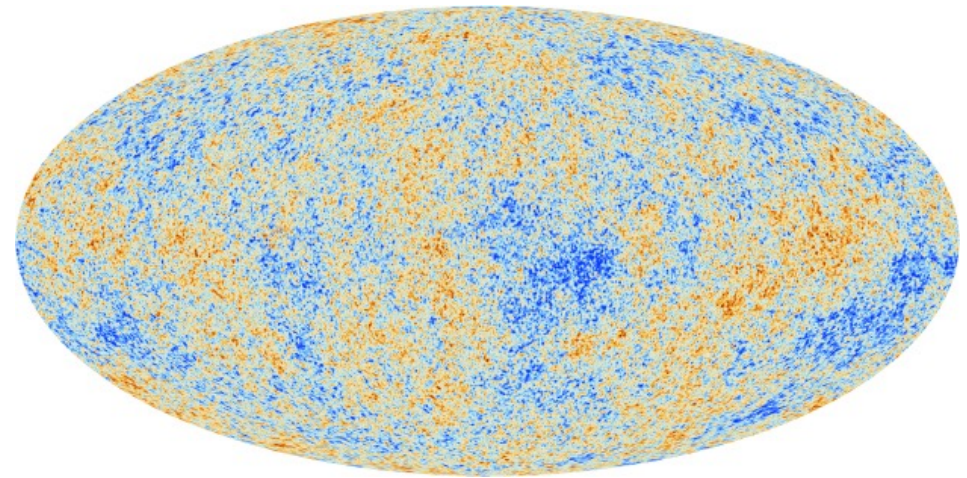
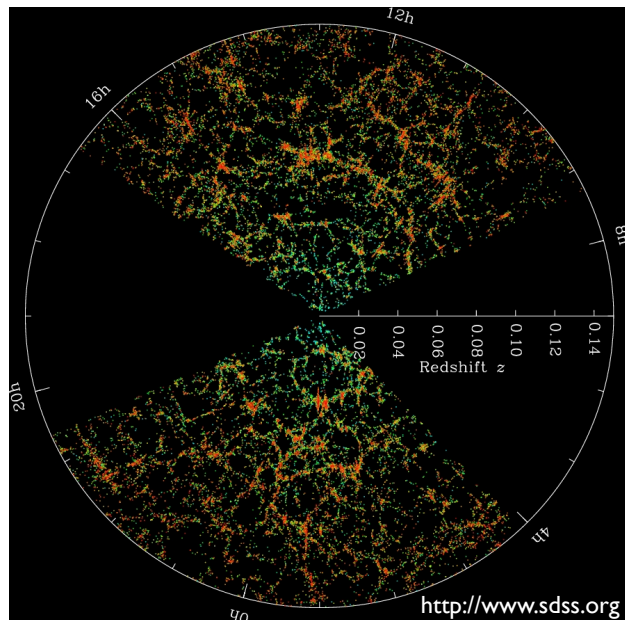
インフラトンポテンシャルが満たすべき条件

- (ある程度) 十分長くインフレーションを起こすためには、ポテンシャルのある領域は "平ら" でないといけない



インフラトンポテンシャルが満たすべき条件

- (ある程度) 十分長くインフレーションを起こすためには、ポテンシャルのある領域は "平ら" でないといけない
- インフレーションは観測されている**"宇宙の構造"**を説明するべき
(銀河分布, 宇宙背景放射の揺らぎなど)



[Planck collaboration]

宇宙の構造（密度揺らぎ）の起源

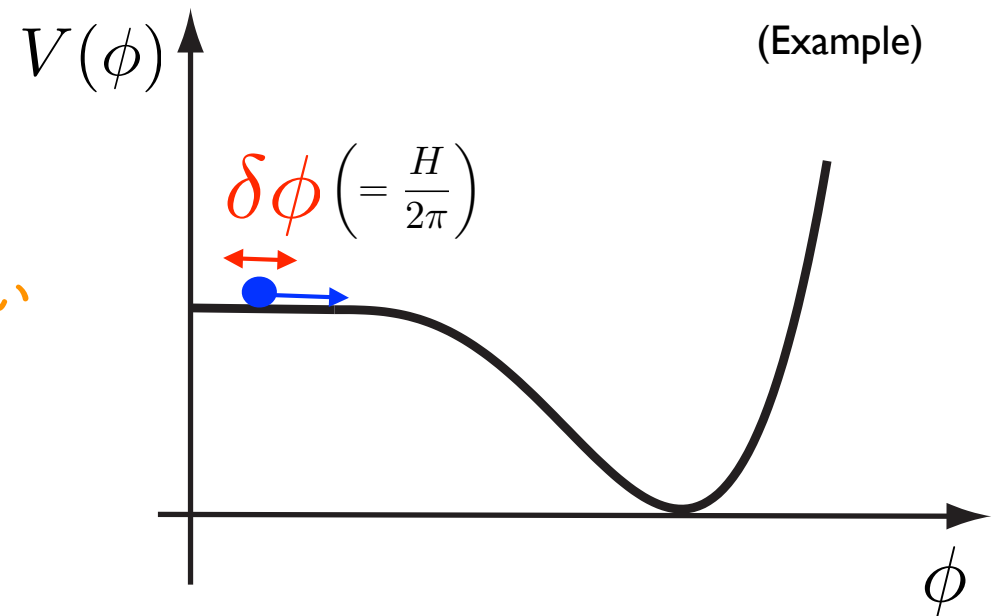
- インフレーション中，インフラトン場の量子揺らぎが生成される
- この量子揺らぎがインフレーションによって引き伸ばされ，宇宙の構造の起源（原始密度揺らぎ）となる
- インフレーションモデル（インフラトンのポテンシャル）によって原始密度揺らぎに対する予言（パワースペクトル）は変わる

- 揺らぎの大きさ

- 揺らぎのスケール依存性

これらは観測データと矛盾してはならない

➡ インフラトンポテンシャル
に対する制限（要請）



原始密度揺らぎパワースペクトル

- 原始密度揺らぎの性質はインフレーション場のポテンシャルで決まる

$$\mathcal{P}_\zeta(k) = \overset{\text{揺らぎの振幅}}{A_s(k_{\text{ref}})} \left(\frac{k}{k_{\text{ref}}} \right)^{\overset{\text{スペクトル指数 (スケール依存性)}}{n_s}-1} \quad \text{(観測量)}$$

- 揺らぎの大きさ : $A_s(k_{\text{ref}}) \sim \frac{1}{M_{\text{pl}}^6} \frac{V^3}{(V_\phi)^2} \Big|_{k_{\text{ref}}}$

- 揺らぎのスケール依存性 : $n_s = 1 - 6\epsilon + 2\eta$

$$\epsilon = \frac{1}{2} M_{\text{pl}}^2 \left(\frac{V_\phi}{V} \right)^2, \quad \eta = M_{\text{pl}}^2 \frac{V_{\phi\phi}}{V} \quad \left(\text{ここで } V_\phi \equiv \frac{dV}{d\phi}, \quad V_{\phi\phi} \equiv \frac{d^2V}{d\phi^2} \right)$$

➡ 観測データからポテンシャルに対する情報が得られる
(ただし、観測量は限られている)

宇宙の構造（密度揺らぎ）の起源

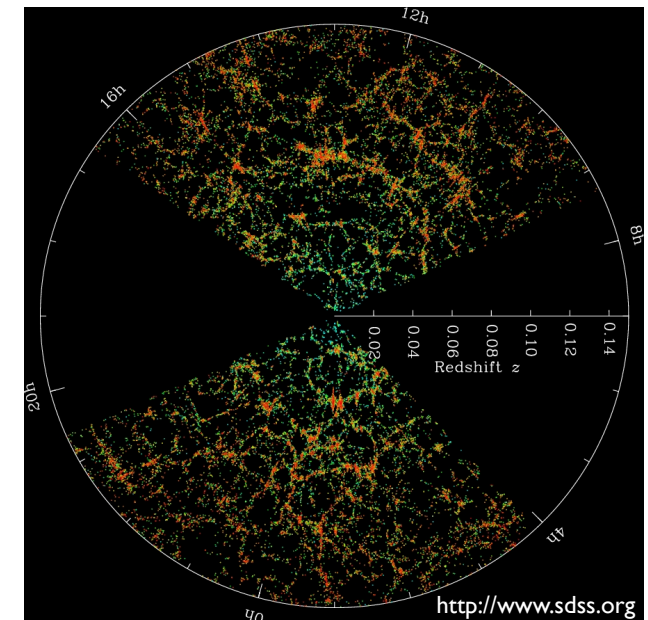
- インフレーション中，インフラトン場の量子揺らぎが生成される
- この量子揺らぎがインフレーションによって引き伸ばされ，宇宙の構造の起源（原始密度揺らぎ）となる
- インフレーションモデル（インフラトンのポテンシャル）によって
原始密度揺らぎの性質は変わる

- 揺らぎの大きさ

- 揺らぎのスケール依存性

これらは観測データと矛盾してはならない

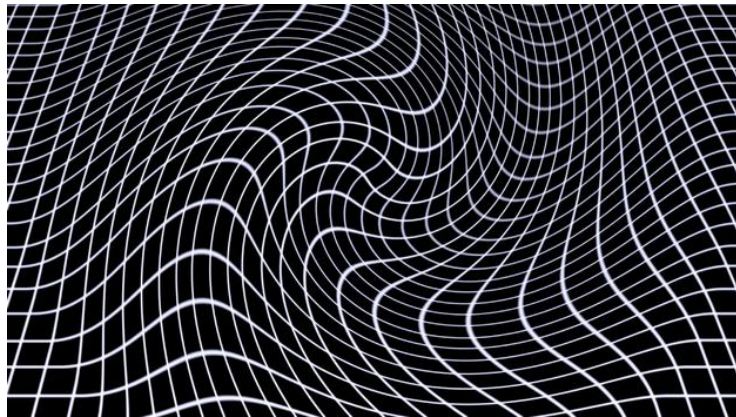
➡ インフラトンポテンシャル
に対する制限（要請）



原始重力波もインフレーション中に生成される

- インフレーション中に**原始重力波**も生成される

(重力波 = 時空の歪みの波)



[<http://www.bbc.com/future/story/20130321-will-we-catch-gravitys-waves>,
Copyright: Science Photo Library]



[<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v9>]

- 原始重力波のパワースペクトル

$$\mathcal{P}_T(k) = A_T(k_{\text{ref}}) \left(\frac{k}{k_{\text{ref}}} \right)^{n_T} \left(\sim \frac{H_{\text{inf}}^2}{M_{\text{pl}}^2} \sim \frac{V}{M_{\text{pl}}^2} \right)$$

原始重力波の振幅もインフレーションモデル(インフラトンポテンシャル)に依る

インフラトンポテンシャルが満たすべき条件

- (ある程度) 十分長くインフレーションを起こすためには、ポテンシャルのある領域は "平ら" でないといけない
- インフレーションは観測されている "宇宙の構造" を説明するべき
- インフレーション中に **原始重力波** も生成される

原始重力波の振幅はインフレーションモデル (インフラトンポテンシャル) に依る

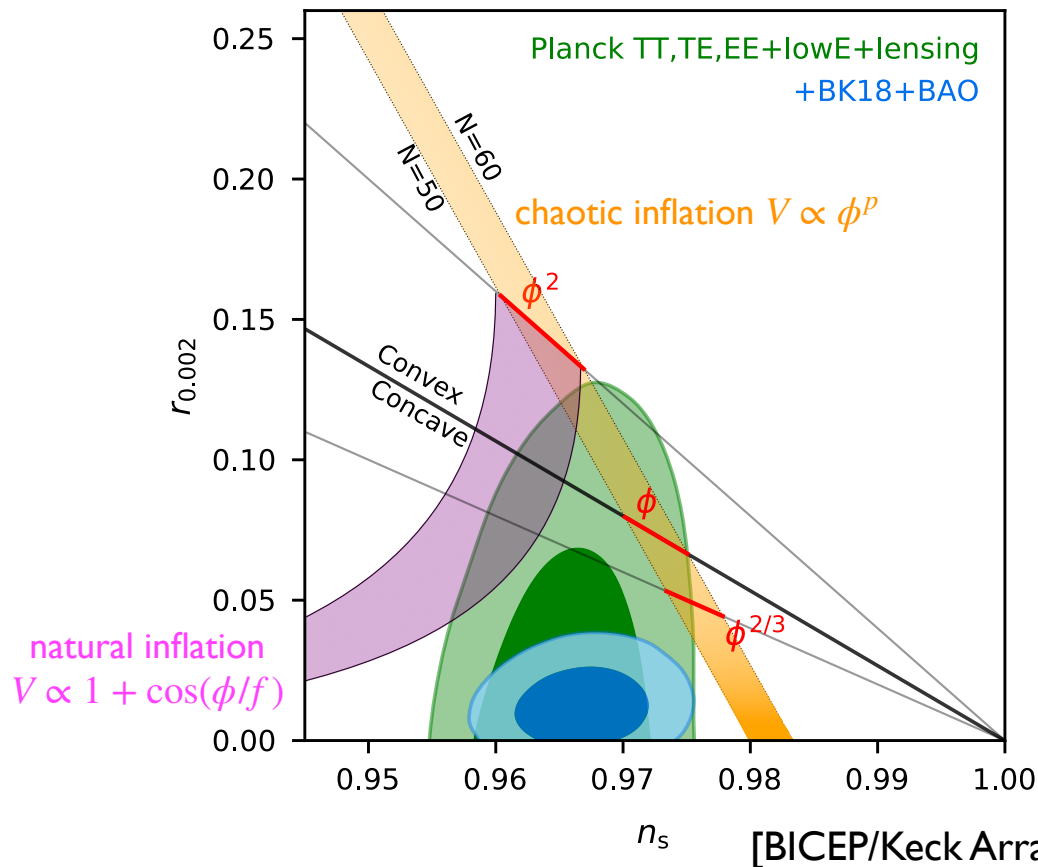
観測から原始重力波の振幅に対する上限が得られている

(**原始**重力波自体はまだ観測されていない)

→ インフラトンポテンシャルに対する条件

インフレーションモデルに対する制限

- 宇宙背景放射の揺らぎ+宇宙の大規模構造（銀河分布）からの制限（2021年）



- スペクトル指数:

(密度揺らぎのスケール依存性を表す)

$$n_s = 0.967 \pm 0.0037 \text{ (68 \% CL)}$$

- テンソル・スカラー比 ($r = P_T/P_\zeta$):

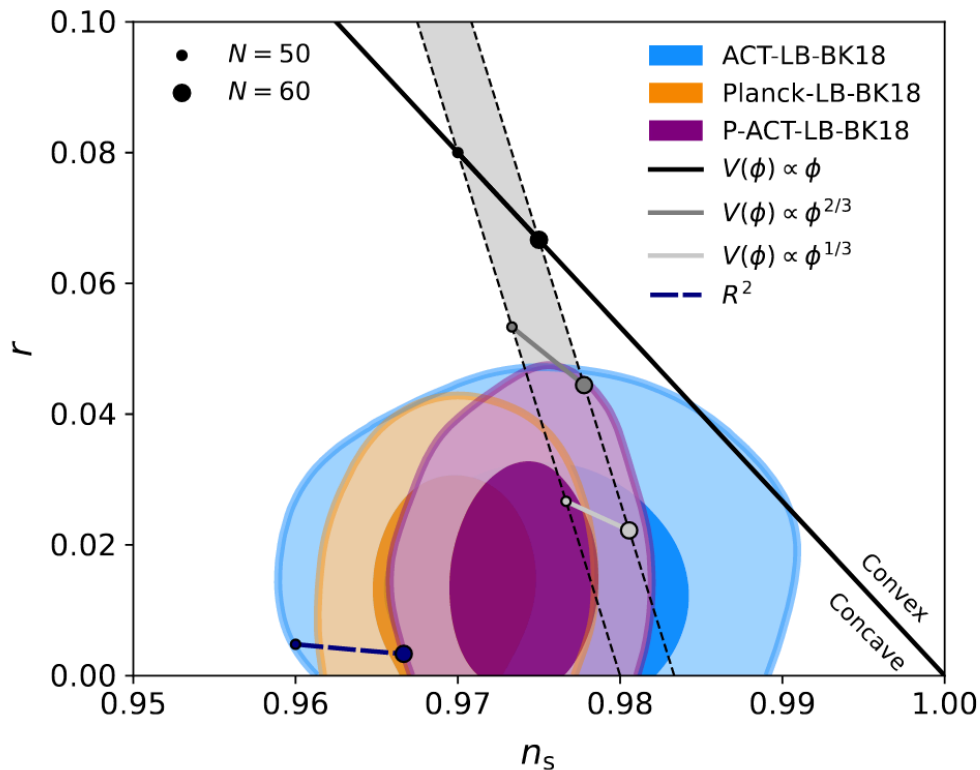
(原始重力波の振幅を表す)

$$r_{0.05} < 0.035 \text{ (95 \% CL)}$$

(Planck+BK18+BAO)

インフレーションモデルに対する制限

- 宇宙背景放射の揺らぎ+宇宙の大規模構造（銀河分布）からの制限（2025年）



[Calabrese et al., ACT collaboration 2503.14454]

- スペクトル指数:

(密度揺らぎのスケール依存性を表す)

$$n_s = 0.9743 \pm 0.0034 \text{ (68 \% CL)}$$

(Planck+ACT+BAO)

- テンソル・スカラー比 ($r = P_T/P_\zeta$):

(原始重力波の振幅を表す)

$$r_{0.05} < 0.038 \text{ (95 \% CL)}$$

(Planck+ACT+BK18+BAO)

(許されるモデルが多少変わった?)

インフラトンポテンシャルが満たすべき条件

- (ある程度) 十分長くインフレーションを起こすためには、ポテンシャルのある領域は "平ら" でないといけない
- インフレーションは観測されている "宇宙の構造" を説明するべき
- インフレーション中に原始重力波も生成される
 - 観測による原始重力波の振幅に対する上限
 - インフラトンポテンシャルに対する条件
- インフレーションはある時点で終了しなければならない (graceful exit)

これらを満たすインフラトンポテンシャルどうやって構築するか？

(ポテンシャル探索＝関数最適化)

インフラトンポテンシャルの例

$$\begin{aligned}
 & M^4 \left(1 - e^{-\sqrt{2/3}\phi/M_{\text{Pl}}}\right)^2 \\
 & M^4 \left(1 - 2e^{-\sqrt{2/3}\phi/M_{\text{Pl}}} + \frac{A_1}{16\pi^2} \frac{\phi}{\sqrt{6}M_{\text{Pl}}}\right) \\
 & M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^p \\
 & M^4 \frac{\phi^2}{M_{\text{Pl}}^2} \left[1 + \alpha \frac{\phi^2}{M_{\text{Pl}}^2}\right] \\
 & M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^2 \left[1 - 2\alpha \frac{\phi^2}{M_{\text{Pl}}^2} \ln\left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right] \\
 & M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^4 \left[1 - \alpha \ln\left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right] \\
 & M^4 \left[1 + \cos\left(\frac{\phi}{f}\right)\right] \\
 & M^4 (1 - e^{-q\phi/M_{\text{Pl}}}) \\
 & M^4 e^{-\alpha\phi/M_{\text{Pl}}} \\
 & M^4 \left(1 - \alpha \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}} e^{-\phi/M_{\text{Pl}}}\right) \\
 & M^4 \left(1 + A_1 \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^2 \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{A_1}{1+A_1\phi/M_{\text{Pl}}}\right)^2\right] \\
 & M^4 \left[1 + \alpha \left(\frac{\phi}{Q}\right)^4 \ln\left(\frac{\phi}{Q}\right)\right] \\
 & M^4 \left[1 + \alpha \ln\left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right] \\
 & M^4 e^{-2\sqrt{2/3}\phi/M_{\text{Pl}}} \left| e^{\sqrt{2/3}\phi/M_{\text{Pl}}} - 1 \right|^{2p/(2p-1)} \\
 & M^4 \left[\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - 1\right]^2 \\
 & M^4 \left[1 - \text{sech}\left(\frac{\phi}{\mu}\right)\right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & M^4 \left[1 + \alpha \ln\left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right) + \beta \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^2\right] \\
 & \frac{M^4}{\left(1 - \alpha \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^2} \\
 & M^4 \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^4 \left[\left(\ln \frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - \alpha\right] \\
 & M^4 \left[(3 + \alpha^2) \coth^2\left(\frac{\alpha}{\sqrt{2}} \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right) - 3\right] \\
 & M^4 \left\{1 + \left[-\alpha + \beta \ln\left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right] \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^4\right\} \\
 & M^4 \left[1 + \alpha \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^2 + \beta \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^4\right] \\
 & M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^{-p} \\
 & M^4 \left[1 - \left(\frac{\phi}{\mu}\right)^{-p}\right] \\
 & M^4 \left[1 - \frac{c}{2} \left(-\frac{1}{2} + \ln \frac{\phi}{\phi_0}\right) \frac{\phi^2}{M_{\text{Pl}}^2}\right] \\
 & M^4 \left[1 + \left(\frac{\phi}{\mu}\right)^p\right] \\
 & M^4 \left[1 + \left(\frac{\phi}{\mu}\right)^{-p}\right] \\
 & M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^p \left[1 + \alpha \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^q\right] \\
 & M^4 \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^p \left(\ln \frac{\phi}{\phi_0}\right)^q \\
 & \frac{M^4}{\left\{1 + \beta \cos\left[\alpha \left(\frac{\phi - \phi_0}{M_{\text{Pl}}}\right)\right]\right\}^2}
 \end{aligned}$$

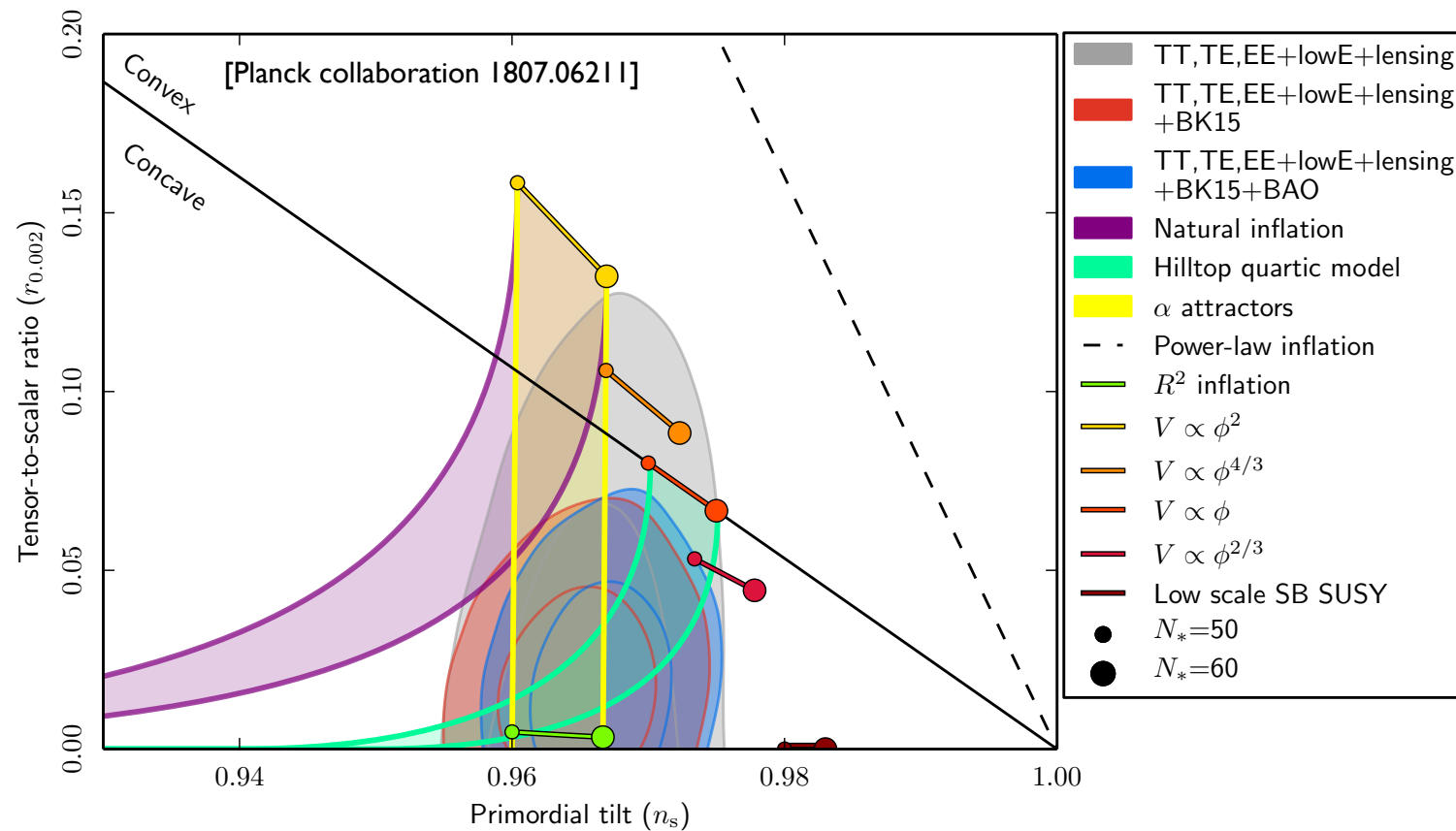
$$\begin{aligned}
 & M^4 \left(\frac{\phi - \phi_0}{M_{\text{Pl}}}\right)^{-\beta} - M^4 \frac{\beta^2}{6} \left(\frac{\phi - \phi_0}{M_{\text{Pl}}}\right)^{-\beta-2} \\
 & M^4 \left[1 - \alpha \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}} \exp\left(-\beta \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right] \\
 & M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^\alpha \exp[-\beta(\phi/M_{\text{Pl}})^\gamma] \\
 & M^4 \left[1 - A \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 e^{-\phi/\phi_0}\right] \\
 & M^4 \left[\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - \frac{2}{3} \alpha \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^6 + \frac{\alpha}{5} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^{10}\right] \\
 & M^4 \left[\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - \frac{4}{3} \alpha \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^3 + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^4\right] \\
 & M^4 \left(e^{\sqrt{6} \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}} + e^{\sqrt{6}\gamma \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}}\right) \\
 & M^4 \left(1 + \cos \frac{\phi}{\mu} + \alpha \sin^2 \frac{\phi}{\mu}\right) \\
 & M^4 \exp_{1-\beta} \left(-\lambda \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right) \\
 & M^4 \left[1 + \alpha \ln\left(\cos \frac{\phi}{f}\right)\right] \\
 & M^4 \frac{(\phi/M_{\text{Pl}})^2}{\alpha + (\phi/M_{\text{Pl}})^2} \\
 & M^4 \left[\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^6 + \frac{1}{5} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^{10}\right] \\
 & M^4 \left[\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - \frac{4}{3} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^3 + \frac{1}{2} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^4\right] \\
 & M^4 \left[1 - \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\phi}{\mu}\right)\right] \\
 & M^4 \left[3 - (3 + \alpha^2) \tanh^2\left(\frac{\alpha}{\sqrt{2}} \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right]
 \end{aligned}$$

インフレーションモデルの探査（これまでのアプローチ）

- インフラトン場の候補を高エネルギーの理論/拡張重力理論の中で見つけて、
それらが観測と矛盾せずにインフレーション理論を作れるか調べる
(これまでよく研究されているアプローチ)
- ポテンシャル（モデル）を仮定すれば、観測量（揺らぎの振幅、スケール依存性）
が予言できる
→ 観測量データと比較して検証
- 原始密度揺らぎのパワースペクトルを観測データから再構築
→ インフラトンポテンシャルを（モデルの枠組みを決めて）再構築
- インフレーション中に複数場が存在する可能性を考える場合、その枠組みで
解析する（single-field model の場合とは異なる予言）
(高エネルギーの理論では、複数の場がインフレーション中に存在し得る)

インフレーションモデルに対する制限

- 宇宙背景放射の揺らぎ+宇宙の大規模構造（銀河分布）からの制限

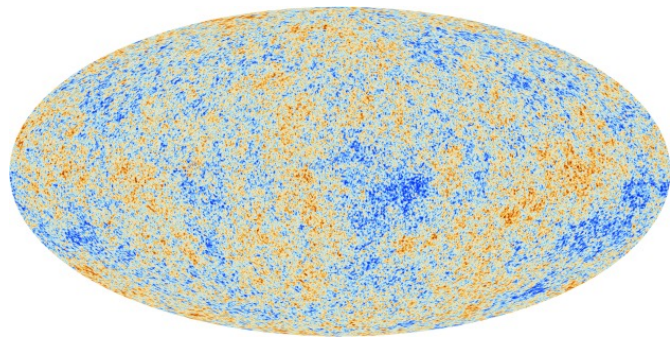


モデルの予言が観測に基づく許容領域と整合的か否かを判定する

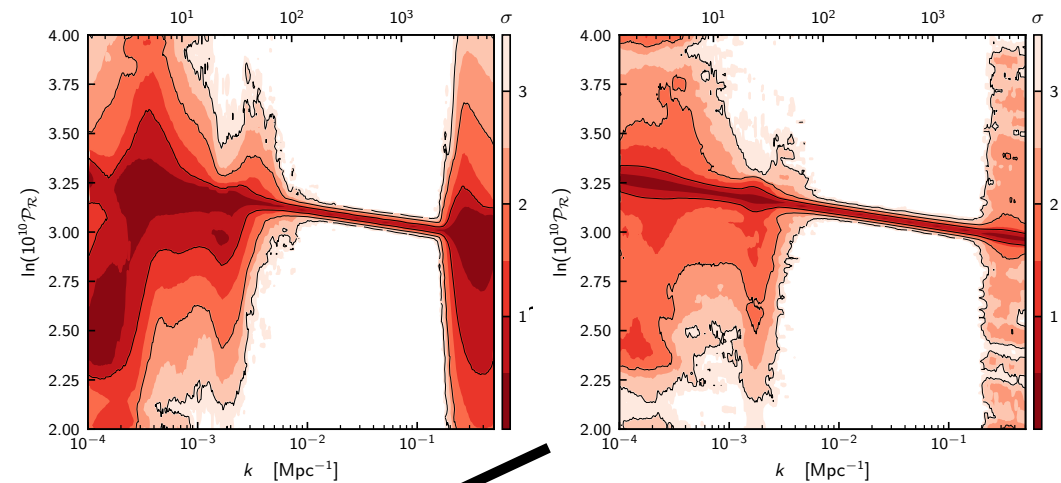
インフラトンポテンシャルの再構築

- 宇宙背景放射の揺らぎのデータ (Planck) を用いた再構築

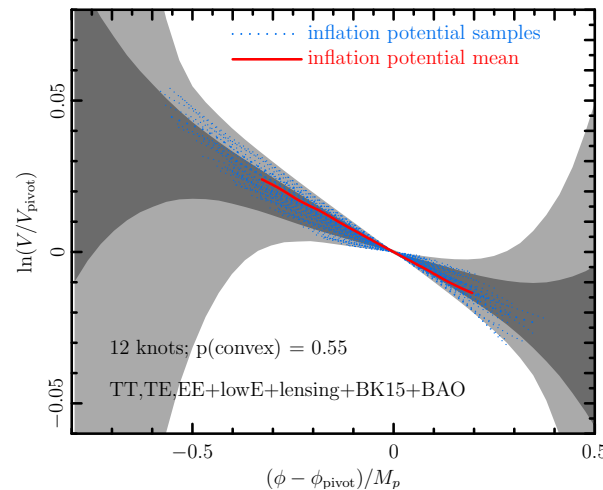
原始密度揺らぎパワースペクトル



[Planck collaboration]



ポテンシャル



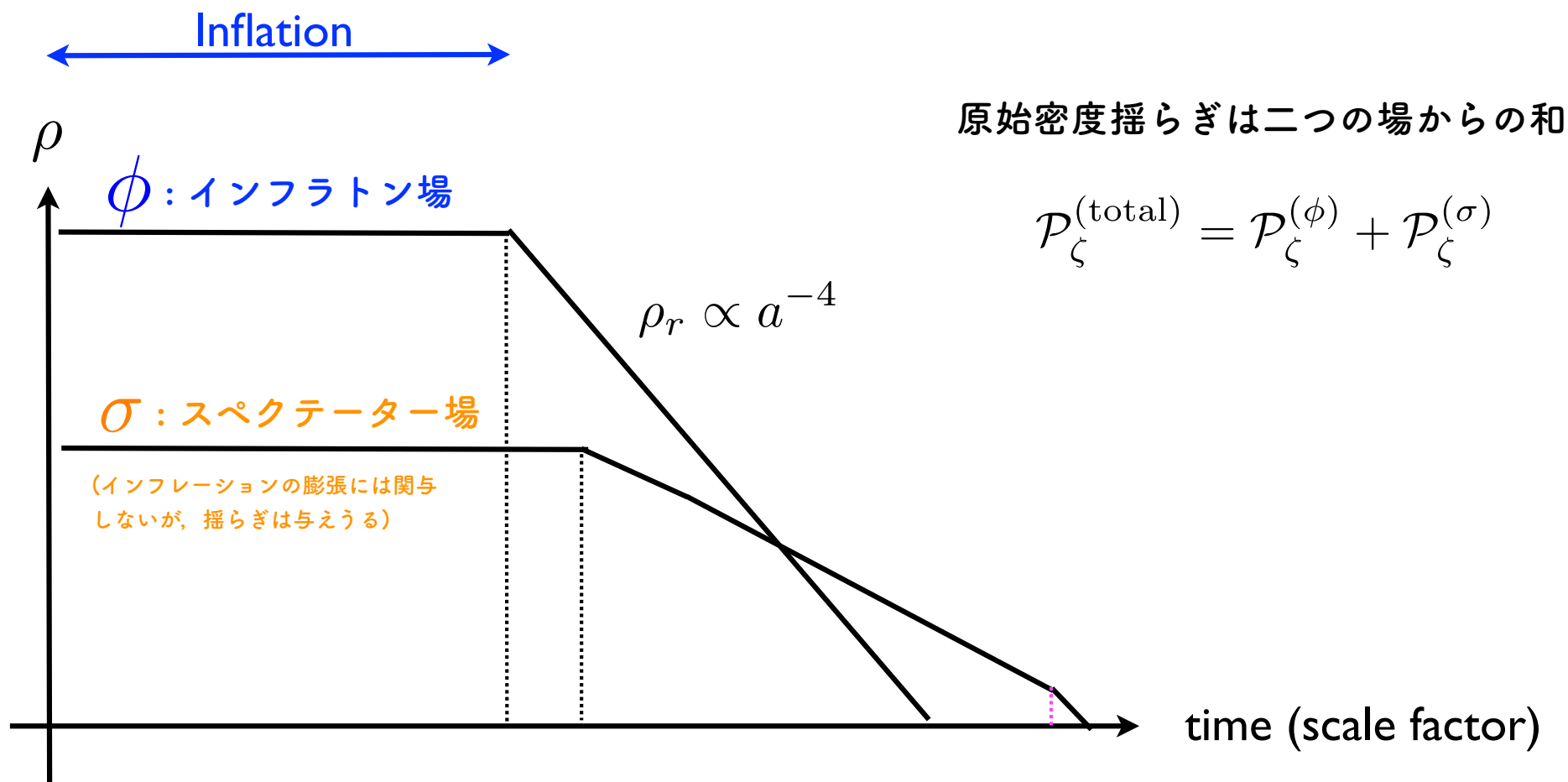
[Planck collaboration 1807.06211]

$$\mathcal{P}_\zeta(k) \propto H^2/\epsilon$$

$$V = 3M_{\text{pl}}^2 H^2 (1 - \epsilon/3)$$

などを用いて再構築

複数場モデル (spectator model の場合)



複数場モデル (spectator model の場合)

[see, e.g., Enqvist, TT 1306.5958; Vennin et al. 1507.07575; Jinno, Kohri, Moroi, TT, Hazumi 2310.08158]

- 複数の場から揺らぎが生成されるため、パワースペクトルの性質が変わる：

- パワースペクトル

$$\overset{\text{inflaton}}{\mathcal{P}_{\zeta}^{(\text{total})}} = \overset{\text{spectator}}{\mathcal{P}_{\zeta}^{(\phi)}} + \mathcal{P}_{\zeta}^{(\sigma)} = A_s^{(\phi)}(k_{\text{ref}}) \left(\frac{k}{k_{\text{ref}}} \right)^{n_s^{(\phi)}-1} + A_s^{(\sigma)}(k_{\text{ref}}) \left(\frac{k}{k_{\text{ref}}} \right)^{n_s^{(\sigma)}-1}$$

- スペクトル指数 (スケール依存性)

inflaton part: $n_s^{(\phi)} - 1 = -6\epsilon + 2\eta_{\phi} \quad \left(\epsilon = -\frac{\dot{H}}{H^2}, \quad \eta_{\phi} = \frac{V_{\phi\phi}}{3H^2} \right)$

spectator field part: $n_s^{(\sigma)} - 1 = -2\epsilon + 2\eta_{\sigma} \quad \left(\eta_{\sigma} = \frac{V_{\sigma\sigma}}{3H^2} \right)$

- テンソル・スカラー比 (重力波の振幅)

$$r \equiv \frac{\mathcal{P}_T}{\mathcal{P}_{\zeta}^{(\text{total})}} = \frac{\mathcal{P}_T}{\mathcal{P}_{\zeta}^{(\phi)} + \mathcal{P}_{\zeta}^{(\sigma)}} = \frac{16\epsilon}{1 + R} \quad \left(R \equiv \frac{\mathcal{P}_{\zeta}^{(\sigma)}}{\mathcal{P}_{\zeta}^{(\phi)}} \right)$$

inflaton spectator field

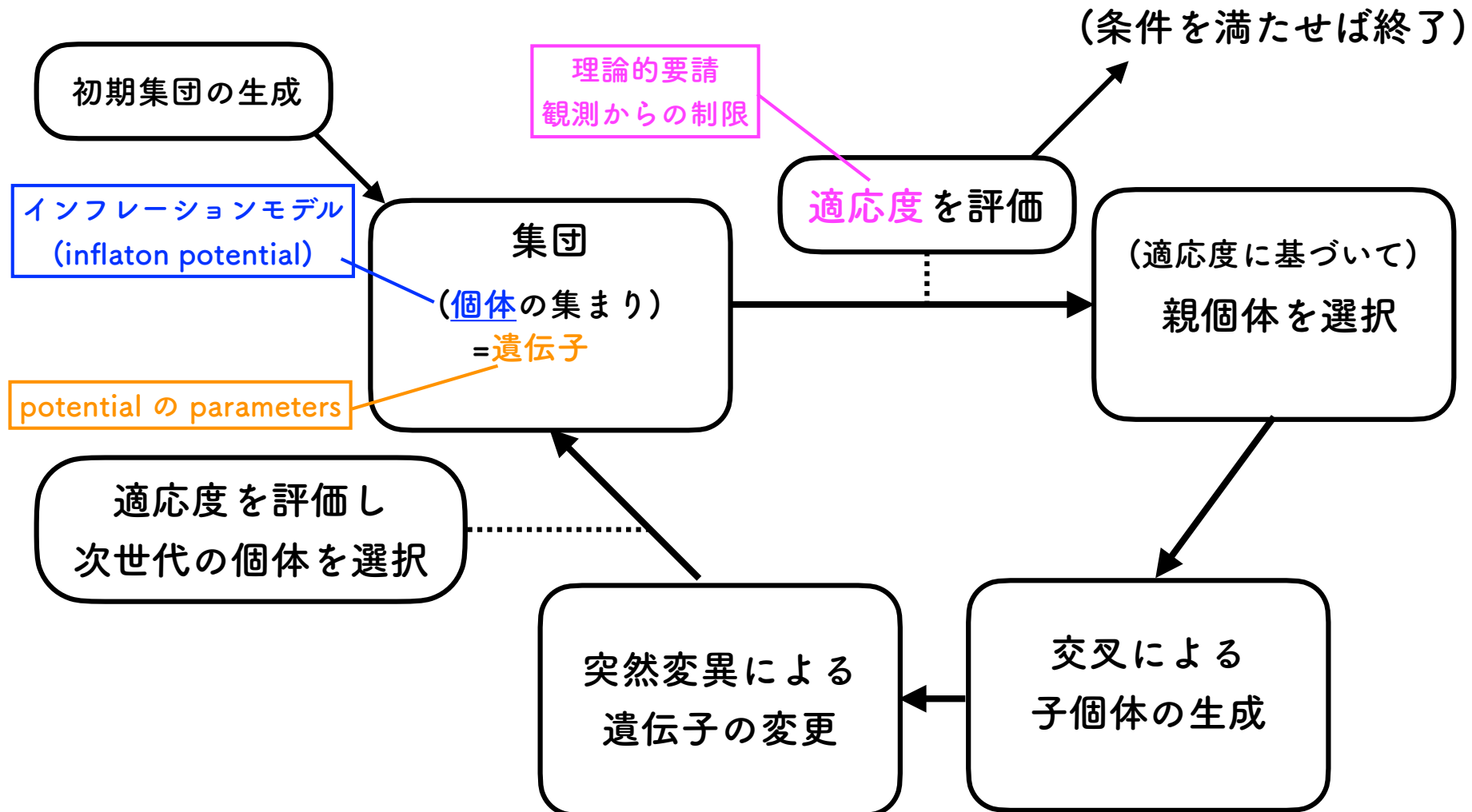
真のインフラトンポテンシャルをどうやって見つけるか？

- インフレーション理論, 観測からの要請を満たすポテンシャルを(出来るだけ偏見なしで)一般的な見地から構成できないか？
- その場合, インフラトンポテンシャルは(基本的に)任意関数
- $\phi, \phi^2, \phi^3, \dots, \phi^n, e^{a\phi}, \log(b\phi), \sin(c\phi), \cos(d\phi), \dots$ などの組み合わせで表しても一般に多くの可能性
- 複数量モデルまで含めると, さらに多くの可能性

遺伝的アルゴリズム, 強化学習などを使って, 一般的にインフレーションモデルを構築できないか？

遺伝的アルゴリズム (Genetic algorithms)

- 生物の進化に倣い，最適解を見つけていく方法



遺伝的アルゴリズムで探るインフレーションモデル

- 個体 = インフレーションモデル (インフラトンポテンシャル)

(集団 = 様々なインフラトンポテンシャルの集合)

- 遺伝子 = インフラトンポテンシャルを表すパラメタ

例) Polynomial potential

$$V(\phi) = M_{\text{pl}}^4 \left[c_0 + c_1 \tilde{\phi} + c_2 \tilde{\phi}^2 + c_3 \tilde{\phi}^3 + \dots \right] = M_{\text{pl}}^4 \sum_n c_n \tilde{\phi}^n \quad \left(\tilde{\phi} \equiv \frac{\phi}{M_{\text{pl}}} \right)$$

6次までの冪で表すとするれば

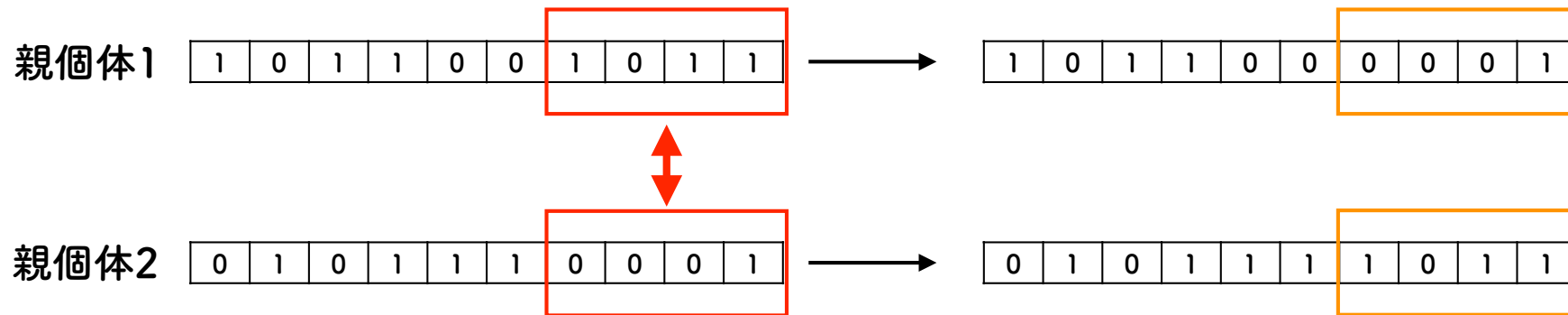
$$\text{遺伝子} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 \\ \hline \end{array}$$

(c_i は実数だが, 2進法でバイナリ表記でもよい)

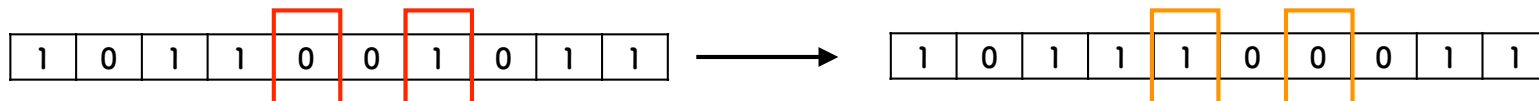
1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

遺伝的アルゴリズム (Genetic algorithms)

- 交叉 (crossover): 2つの親個体から遺伝子組み合わせて新しい子個体を生成



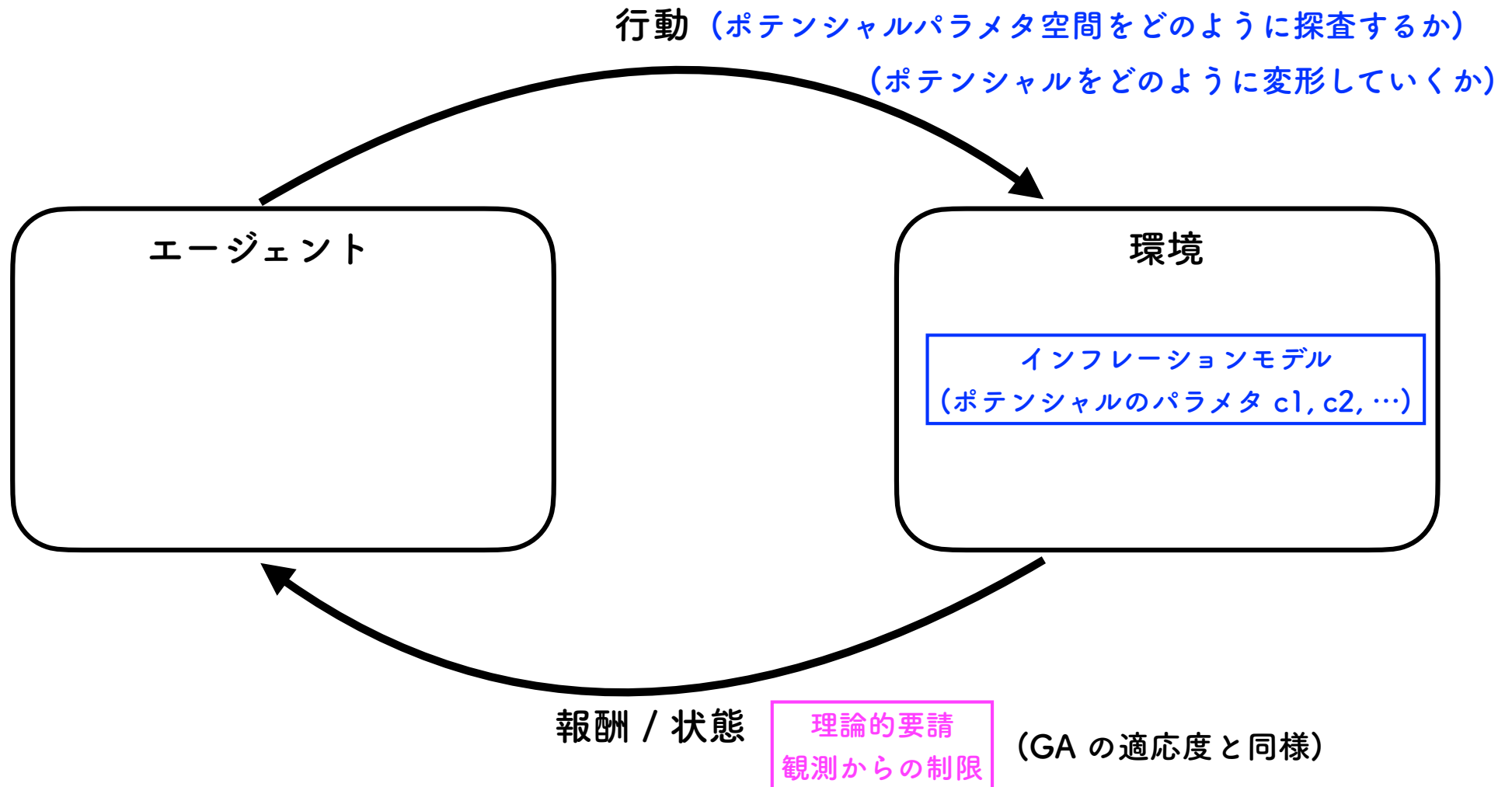
- 突然変異 (mutation): 遺伝子をおある確率で変異させる



これらの"遺伝子操作"で多様な"個体"を生成し, 様々なモデルを探索する

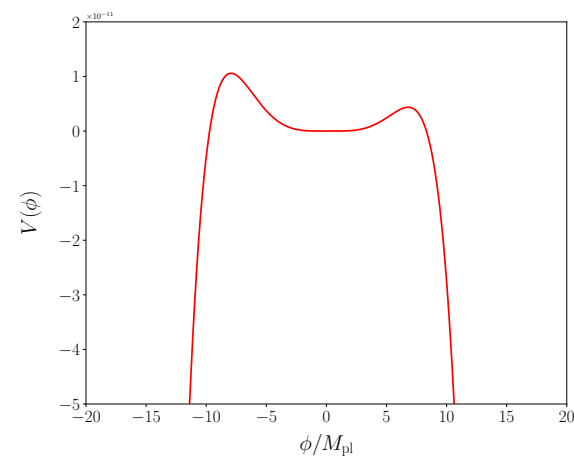
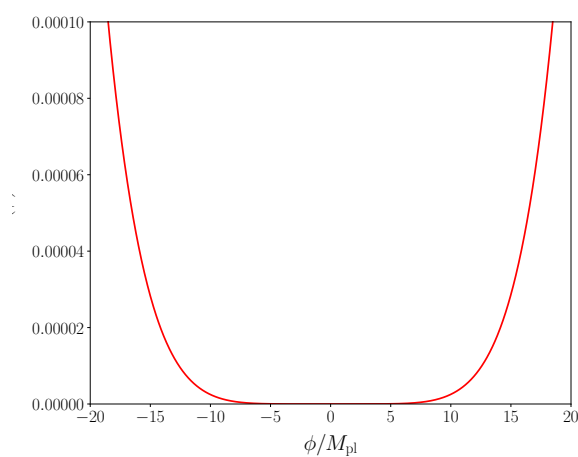
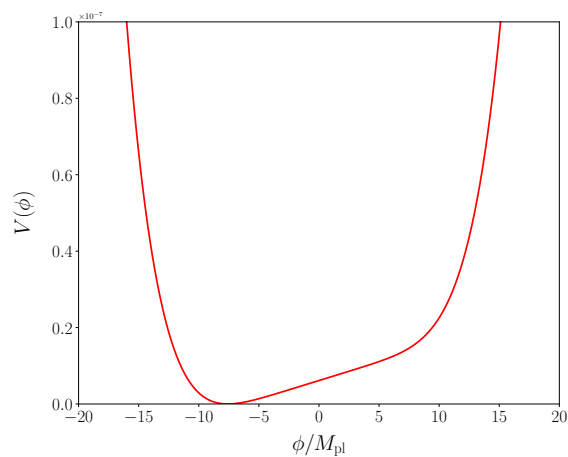
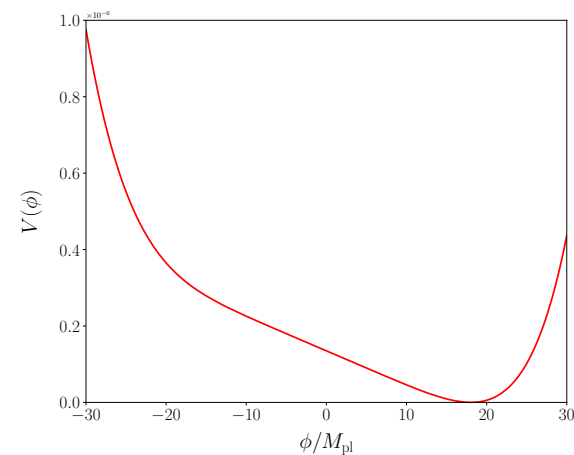
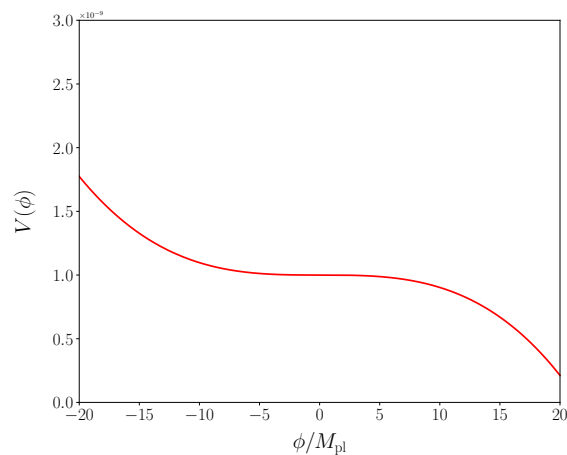
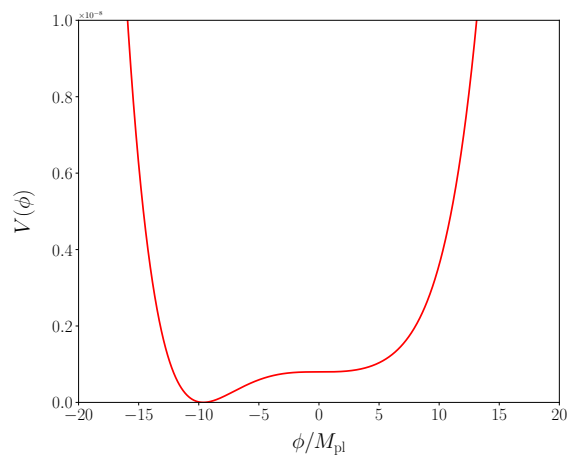
強化学習 (Reinforcement learning)

- 強化学習でも同様に一般的なポテンシャル探索ができる



ランダムにパラメタを振った場合のポテンシャル例

(6次までの冪乗モデル)



遺伝的アルゴリズム (Genetic algorithms)

- 適応度 (fitness) f (See also [Abel et al., 2208.13804])

- 十分なインフレーションが起こるか? $f_N = -(N - N_{\text{ref}})$

- ポテンシャルに minimum があるか? $f_M = -M$ if no minimum ($M > 0$)

- 密度揺らぎの大きさは観測値 ($\delta \sim 10^{-5}$) と整合するか? $f_\delta = -\log_{10} \left(1 + \frac{|P_\zeta - P_\zeta|_{\text{obs}}|}{\Delta P_\zeta} \right)$

- 密度揺らぎのスケール依存性 (スペクトル指数 n_s) は観測と整合するか?

$$f_{n_s} = -\log_{10} \left(1 + \frac{|n_s - n_s|_{\text{obs}}|}{\Delta n_s} \right)$$

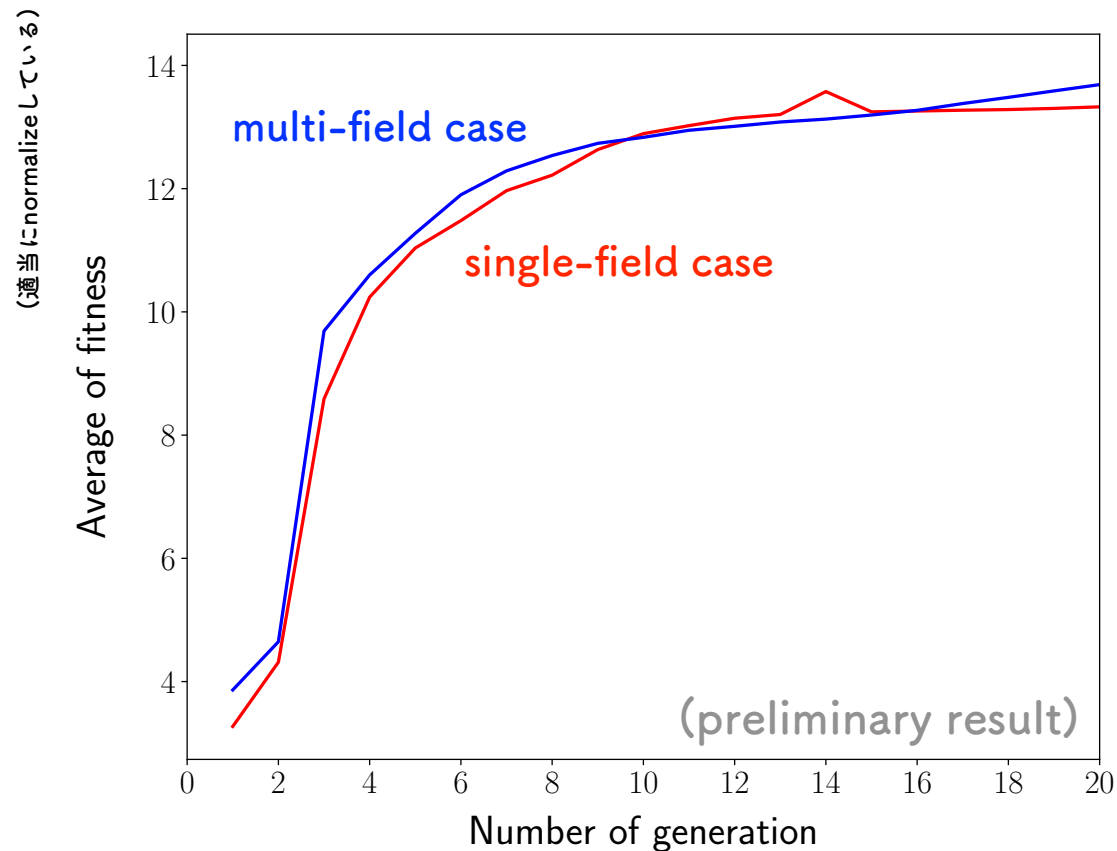
- 原始重力波の振幅 (テンソル・スカラー比 r) は観測の上限に抵触しないか?

$$f_r = -\log_{10} \left(\frac{r}{r_{\text{obs upper}}} \right) \theta(r - r_{\text{obs upper}})$$

これらを適応度に反映させて, "個体 (モデル)" の優劣を評価する

遺伝的アルゴリズム (Genetic algorithms)

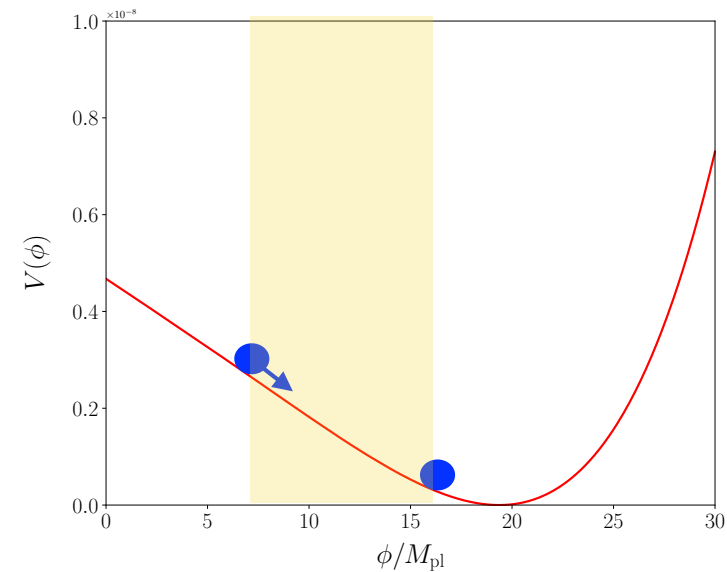
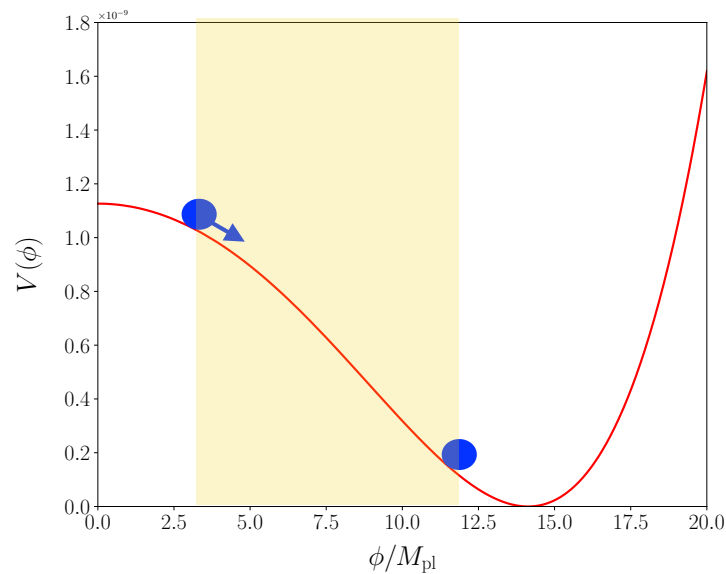
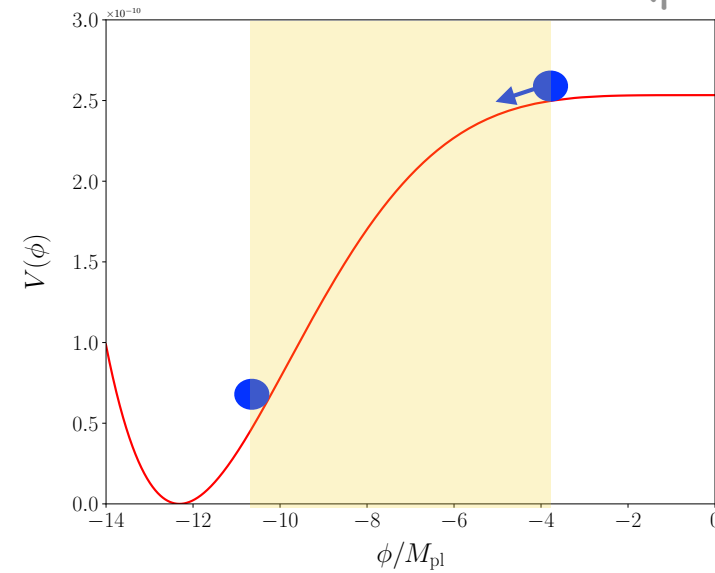
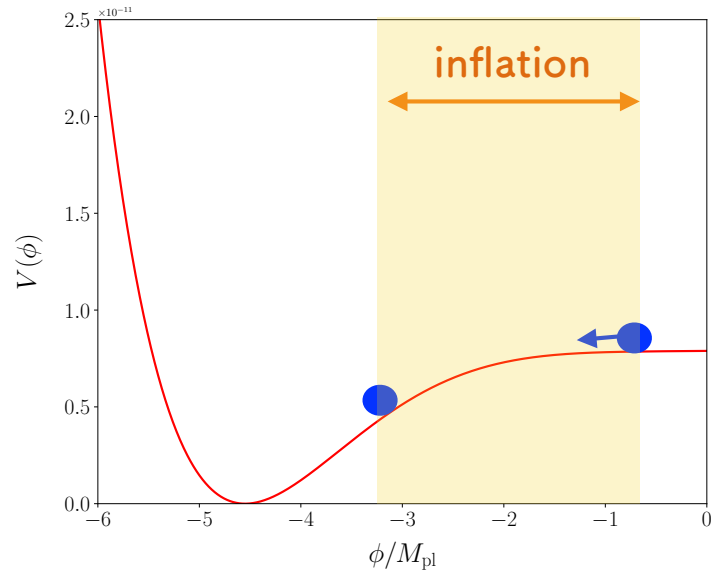
- 適応度の集団平均



- 何世代で平均の適応度が上がるかどうかなどは、アルゴリズムのパラメタによる。
- single-field と multi-field で、生き残るポテンシャルの種類が異なる

遺伝的アルゴリズムで選ばれたモデル (single-field)

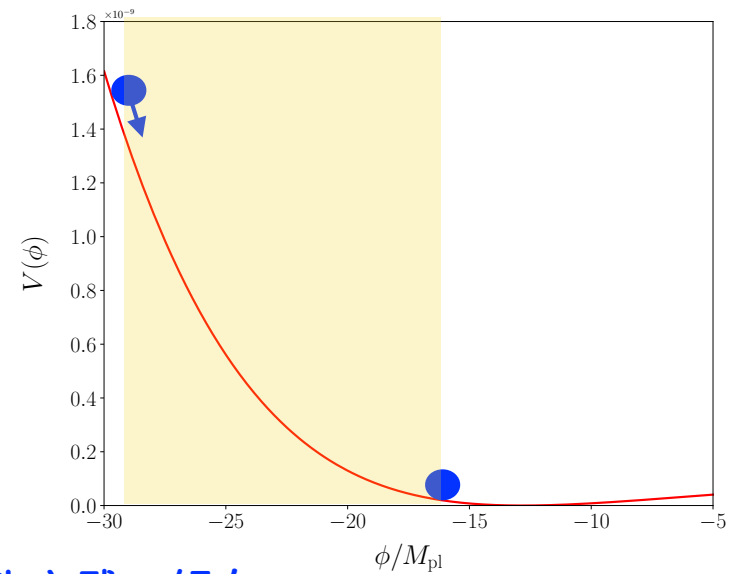
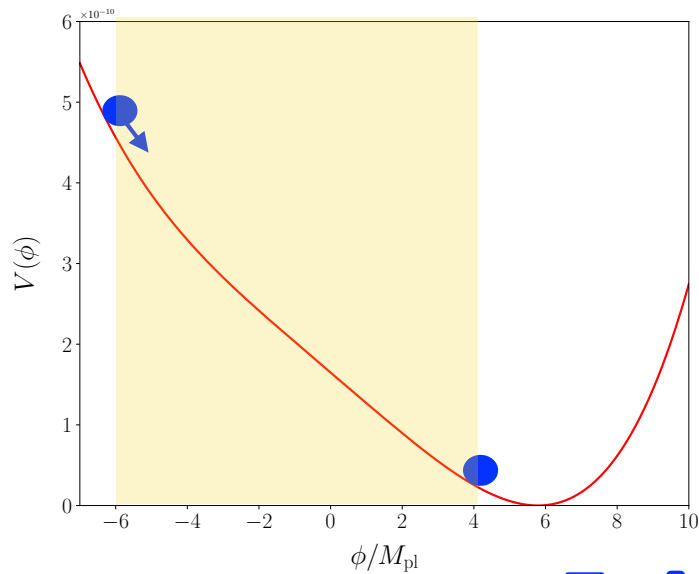
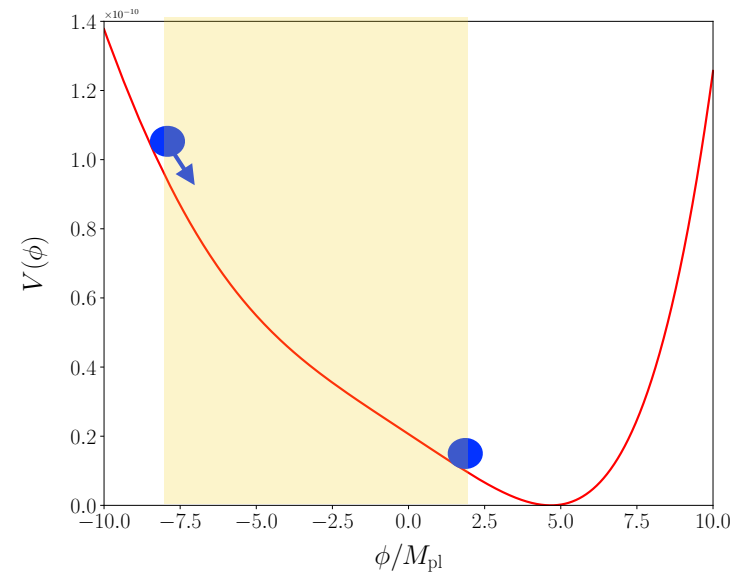
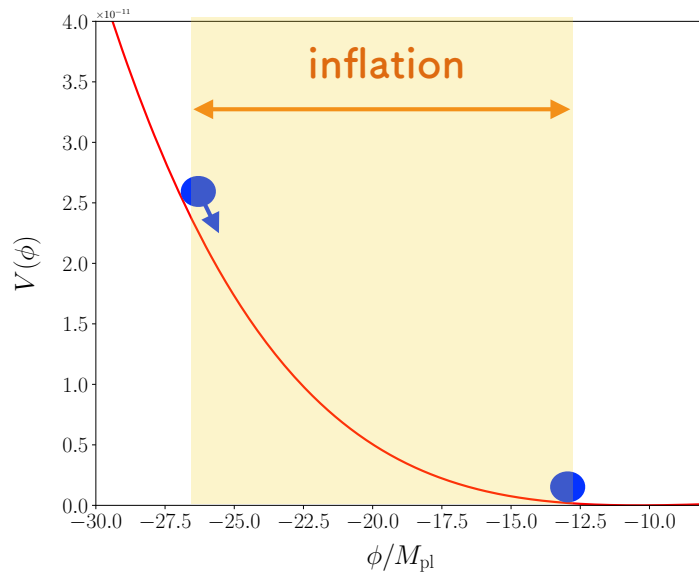
(preliminary result)



上に凸の関数が生き残る傾向

遺伝的アルゴリズムで選ばれたモデル (multi-field)

(preliminary result)

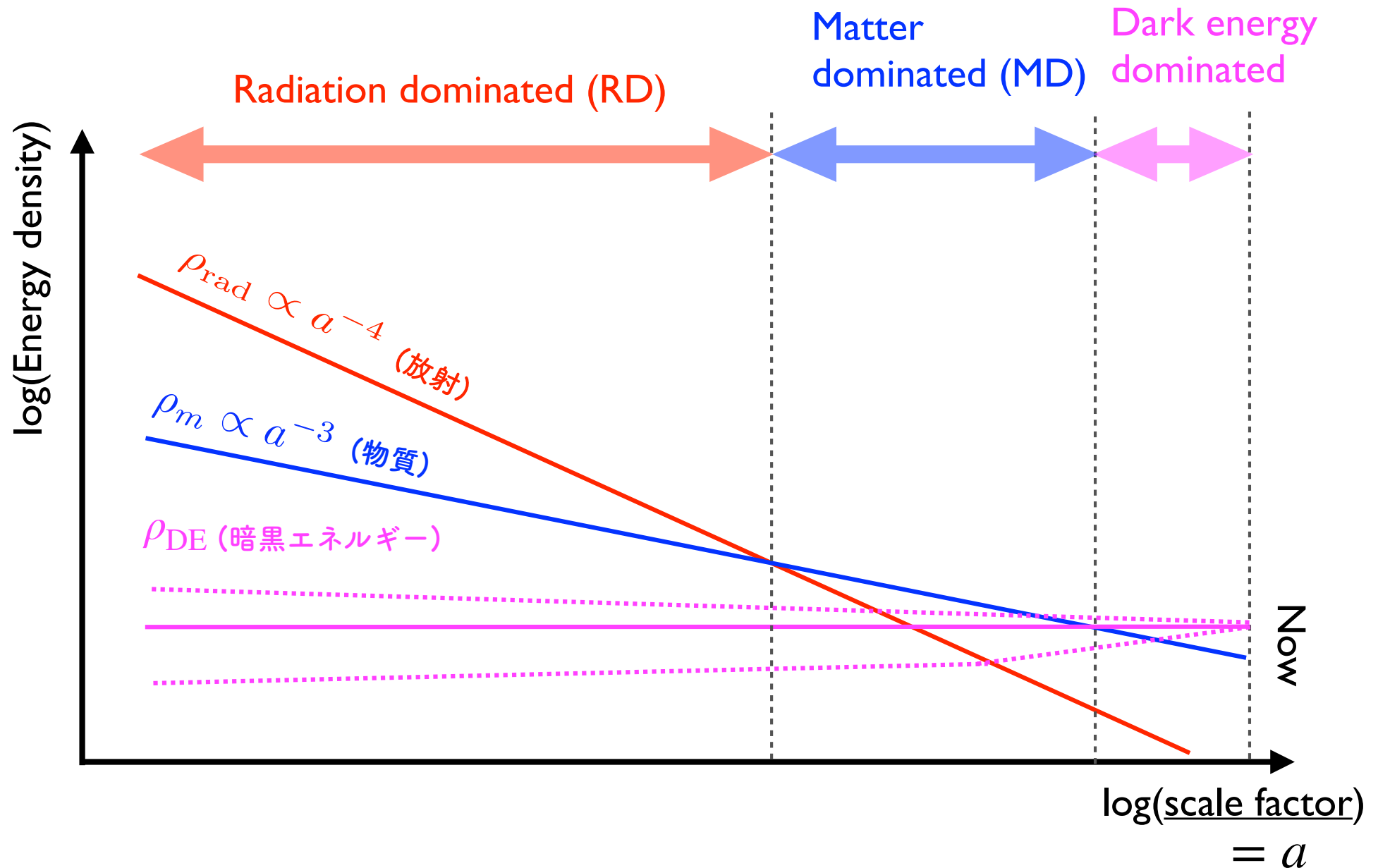


下に凸の関数が生き残る傾向

他の例：暗黒エネルギー

- 現在の宇宙の加速膨張フェーズにある（観測事実）
- 宇宙の中に通常の「物質」（もしくは放射）しかない場合、宇宙の膨張は減速する
- 宇宙の膨張を加速するためには（観測データを説明するには）「暗黒エネルギー」と呼ばれるエネルギー成分が現在の宇宙の約70%を占めているべき
- この「暗黒エネルギー」の正体は未だ不明
（だが、観測データを説明するために必要な「性質」がある）
- 暗黒エネルギーの候補：
 - 宇宙定数
 - クインテッセンス (quintessence) (=スカラー場)
 - ・
 - ・
 - ・

宇宙膨張の中のエネルギー密度の変化



同様の例：暗黒エネルギー

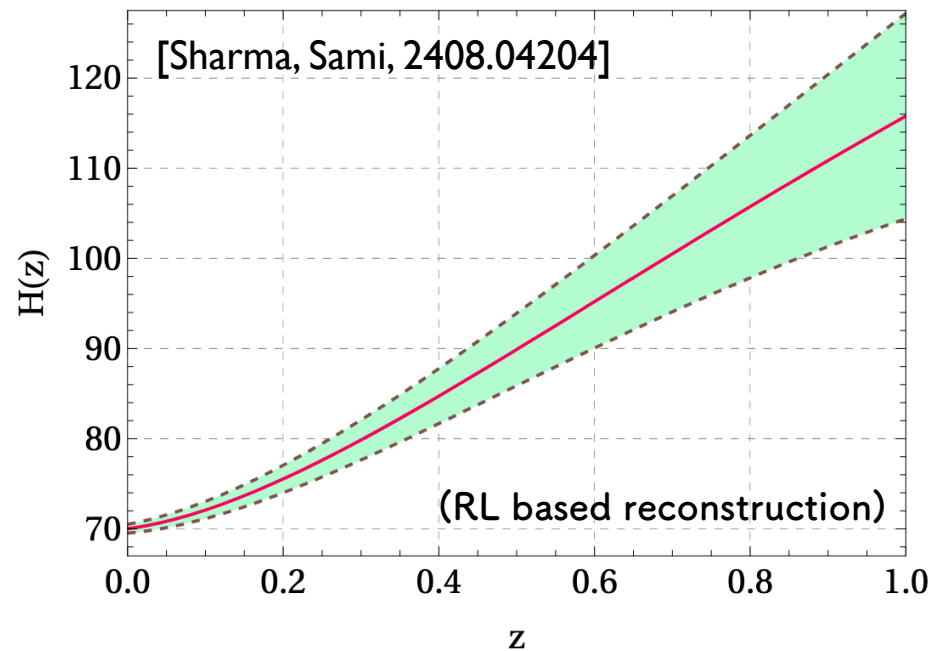
- 暗黒エネルギーモデルはエネルギー密度の進化の仕方で区別される

$$\rho_{\text{DE}} = \rho_{\text{DE}}(t)$$

暗黒エネルギーモデル $\longrightarrow \rho_{\text{DE}}(t) \longrightarrow$ 宇宙の膨張率

(スカラー場のポテンシャル, ...)

$$H = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{1}{3M_{\text{pl}}^2} \rho = \frac{1}{3M_{\text{pl}}^2} (\dots + \rho_{\text{DE}}(t))$$



$\longrightarrow$ 観測データとの比較により
モデルを検証

同様の例：暗黒エネルギー

- 暗黒エネルギーモデルはエネルギー密度の進化の仕方で区別される

$$\rho_{\text{DE}} = \rho_{\text{DE}}(t)$$

暗黒エネルギーモデル ← $\rho_{\text{DE}}(t)$ ← 観測データ

(スカラー場のポテンシャル, ...)

モデルを仮定しない限り任意関数

* 暗黒エネルギーのエネルギー密度の時間変化が分かったとしても、その情報から真のモデルを特定するのは自明ではない

* 暗黒エネルギーとして自由度の高い枠組みで観測データ/理論的要請からその正体を探る

まとめ

- インフレーションはインフラトン場によって引き起こされるが、その正体（インフラトンのポテンシャル）は未だ特定されていない
- インフラトン場のポテンシャルを特定することは、高エネルギーの物理／重力理論にとって非常に重要
- インフラトン場のポテンシャルは自由度が高く、理論的な要請を満たし、観測データと整合するものを導くこと一般には非常にdemanding
- 遺伝的アルゴリズム / 強化学習により、様々なモデルを探索することができる
(将来観測の情報を含めるとどうなるか?)
- 宇宙進化を探る上で他の側面でも役立つと期待
(暗黒エネルギーなど)