

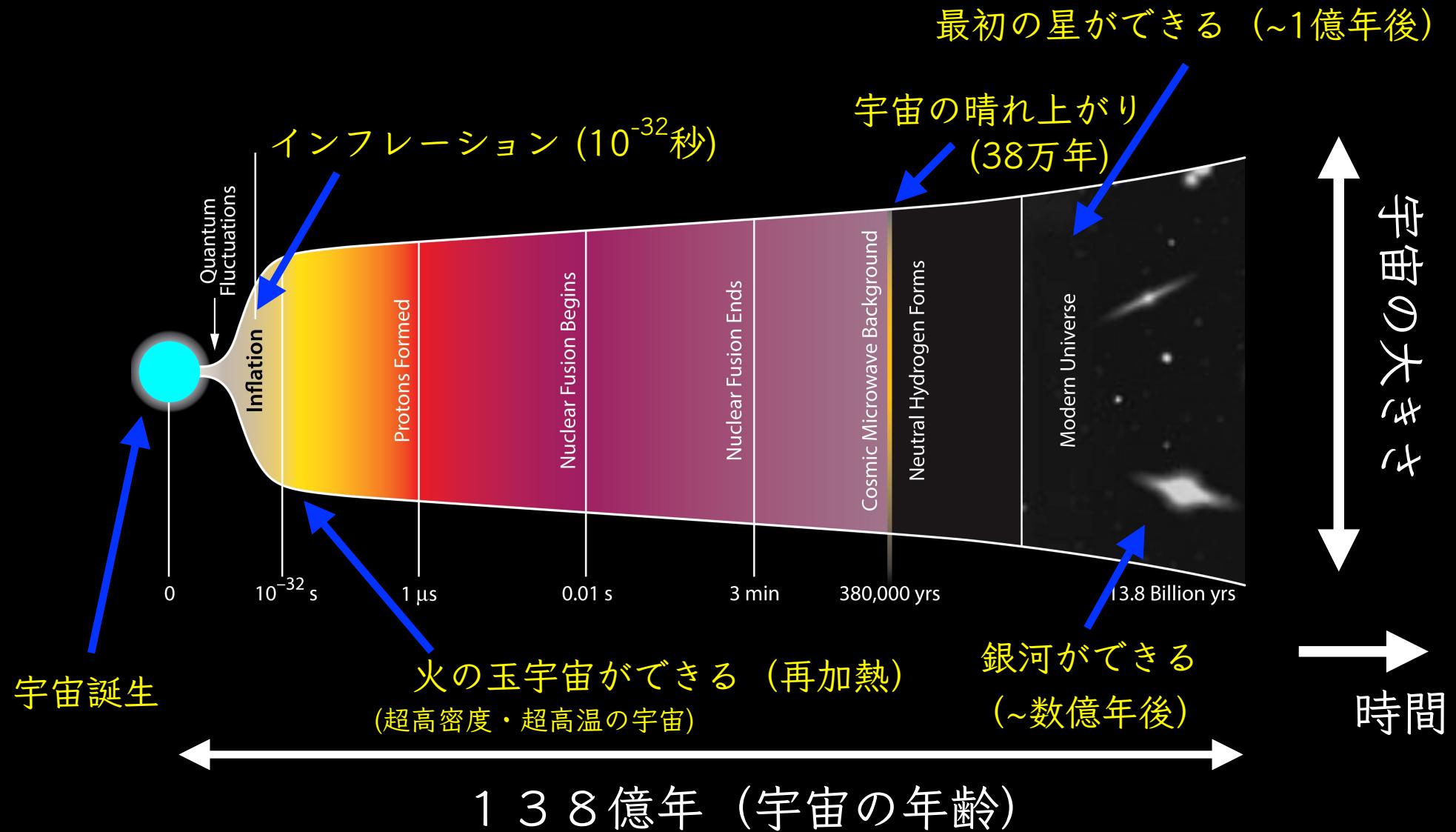
# 遺伝的アルゴリズム/強化学習で探る インフレーション宇宙論

高橋 智(佐賀大学)

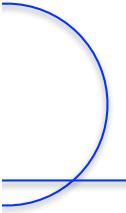
学習物理領域セミナー + DLAPセミナー

2025年1月16日 @ ZOOM

# 宇宙の歴史



[<http://bicepkeck.org/media/History-of-the-Universe-BICEP2.jpg>]



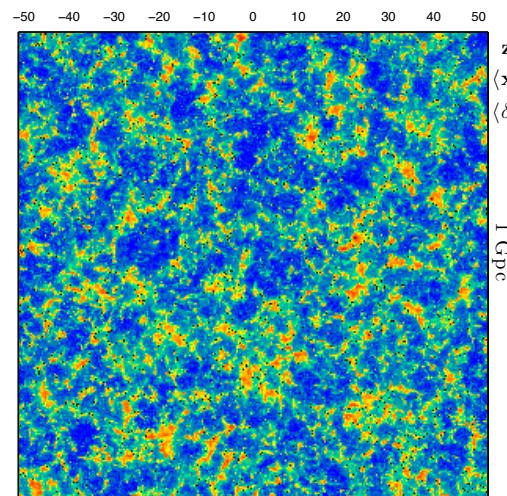
# 研究分野：宇宙論

---

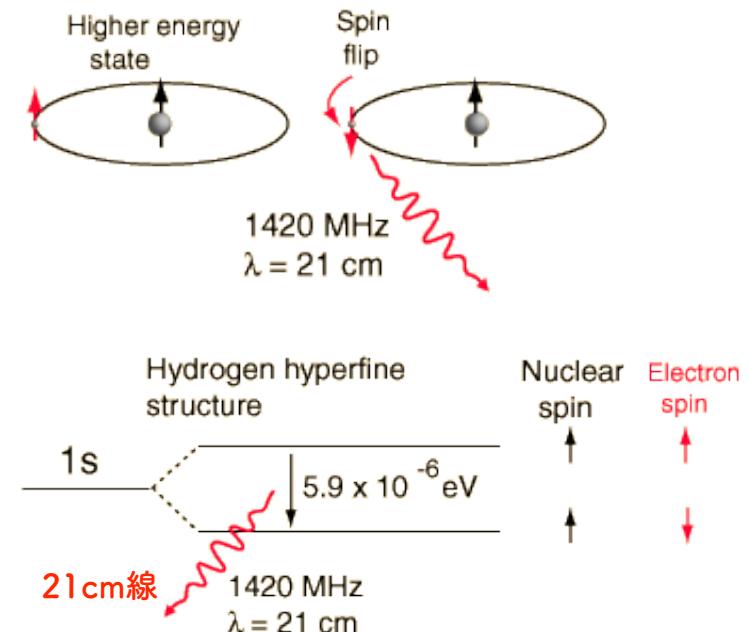
- 初期宇宙論
  - インフレーション, 原始密度揺らぎ
  - 宇宙の再加熱 (初期宇宙の熱史)
  - 初期宇宙で生成される重力波
    - ⋮
- 宇宙観測データを用いた宇宙論の検証
  - 宇宙背景放射, 宇宙の大規模構造のデータを用いた検証  
(インフレーション理論, 暗黒物質等の検証, …)
  - 中性水素21cm線など, 小スケール観測を用いた検証  
⋮  
(機械学習を用いたエミュレータなどに関する研究も)

# 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]

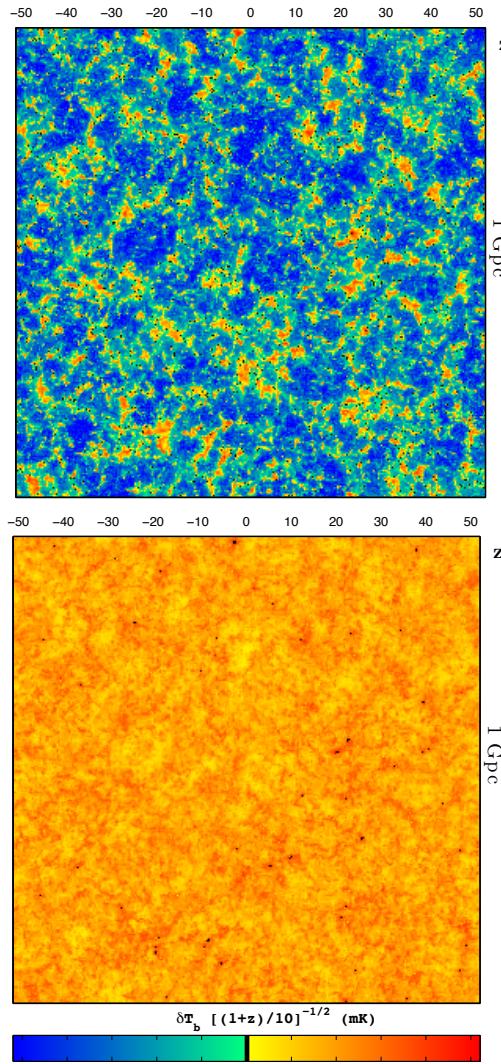


[<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/h21.html>]

- 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

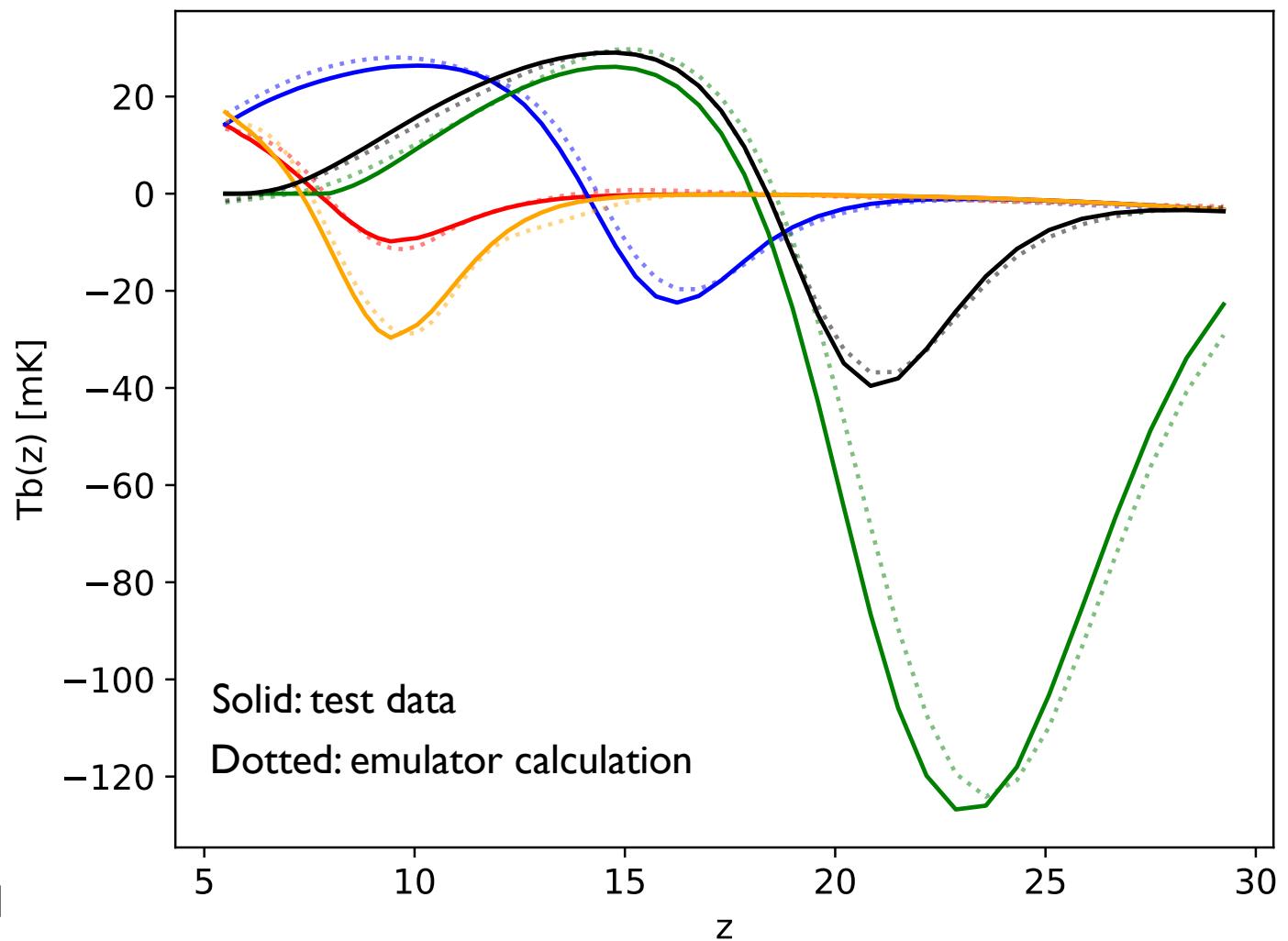
(Semi-numerical simulation from 21cmfast)



[Mesinger, Furlanetto, Cen arXiv:1003.3878]

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

(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  
 $(t \sim 10^{-32} \text{ sec})$
- インフラトン場 (inflaton) = インフレーションを引き起こすスカラー場

"Usual" cosmic expansion

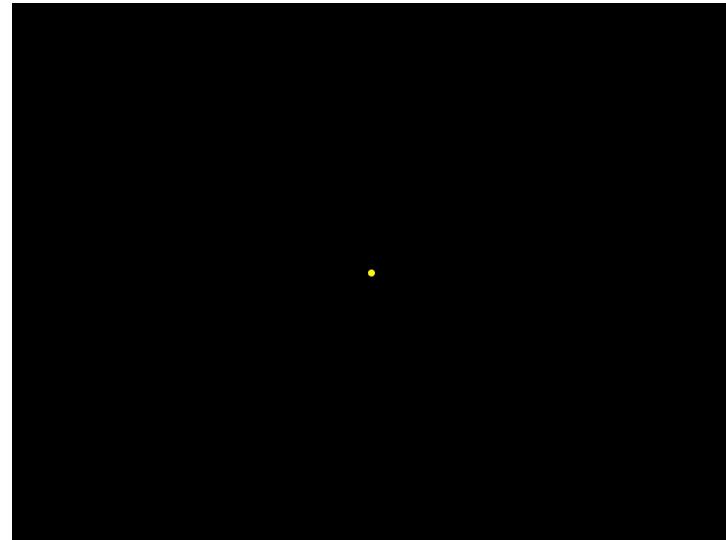
$(a \sim t^{2/3} \text{ in MD})$



<http://chandra.harvard.edu/photo/2004/darkenergy/animations.html>

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）

# インフラトン場

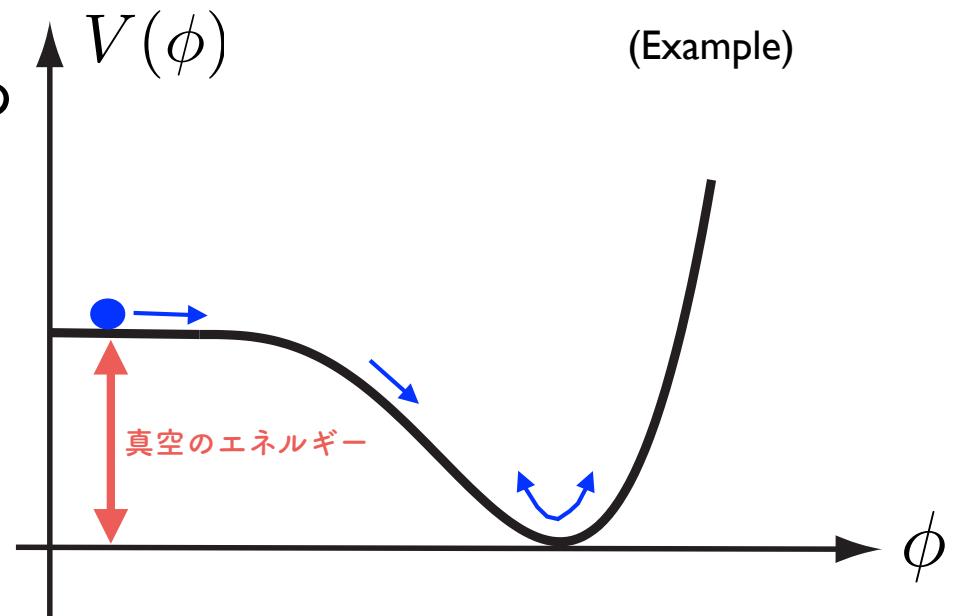
- インフラトン場（スカラー場） $\phi$  はポテンシャル  $V(\phi)$  で特徴づけられる

- 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:  $\rho_\phi = \frac{1}{2} \left( \frac{d\phi}{dt} \right)^2 + V(\phi)$

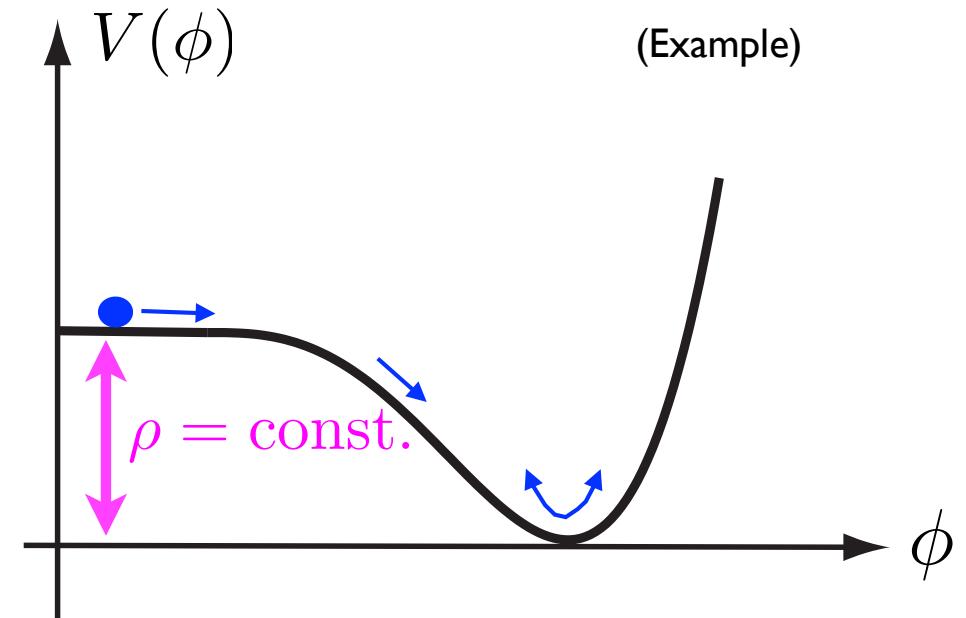
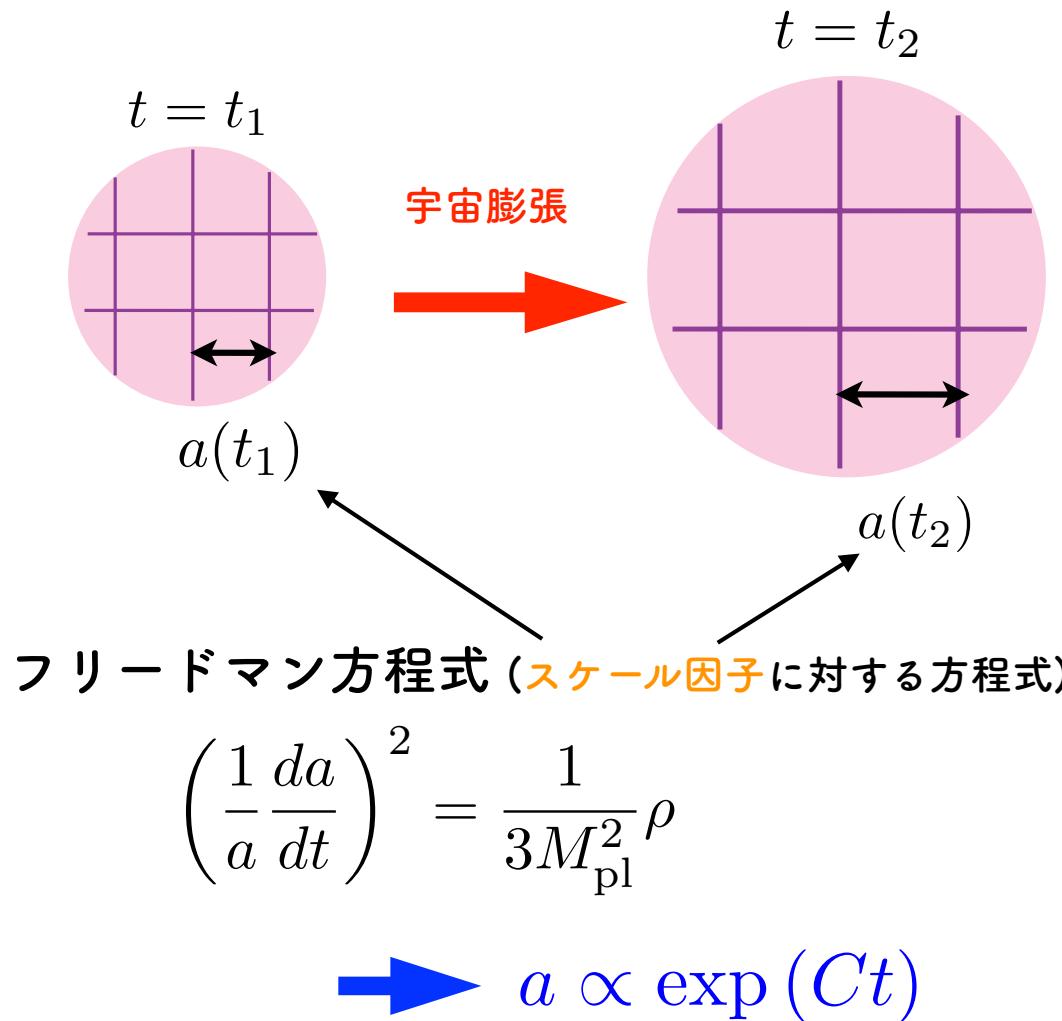
- インフラトン場の正体（インフレーションの詳細なメカニズム）は未だ分かっていない

- インフラトン場の正体は?  
= インフラトンのポテンシャルは?



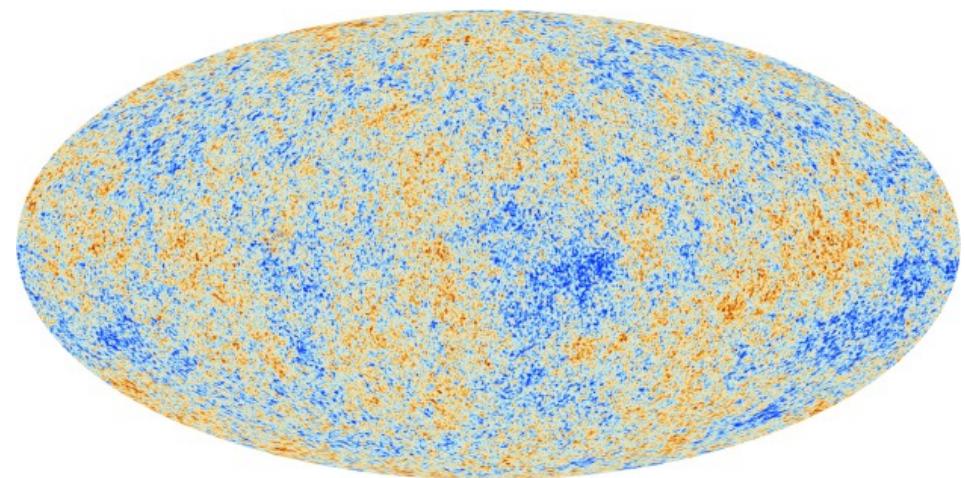
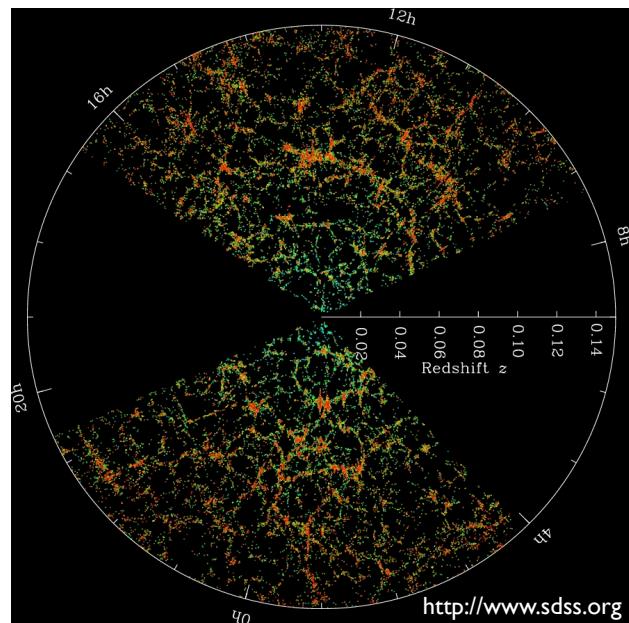
# インフラトンポテンシャルが満たすべき条件

- （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

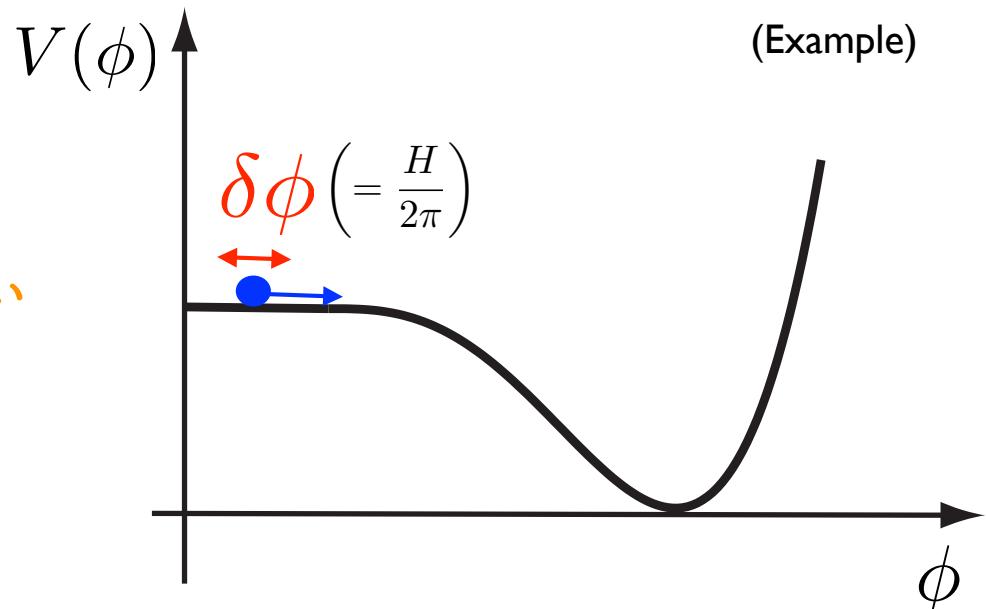
- インフレーション中、インフラトン場の量子揺らぎが生成される
- この量子揺らぎがインフレーションによって引き伸ばされ、宇宙の構造の起源(原始密度揺らぎ)となる
- インフレーションモデル(インフラトンのポテンシャル)によって原始密度揺らぎに対する予言(パワースペクトル)は変わる

- 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ラトン場のポテンシャルで決まる

揺らぎの振幅                                   スペクトル指数（スケール依存性）

$$\mathcal{P}_\zeta(k) = A_s(k_{\text{ref}}) \left( \frac{k}{k_{\text{ref}}} \right)^{n_s - 1} \quad (\text{観測量})$$

- 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 :  $n_s = 1 - 6\epsilon + 2\eta$

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

→ 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)

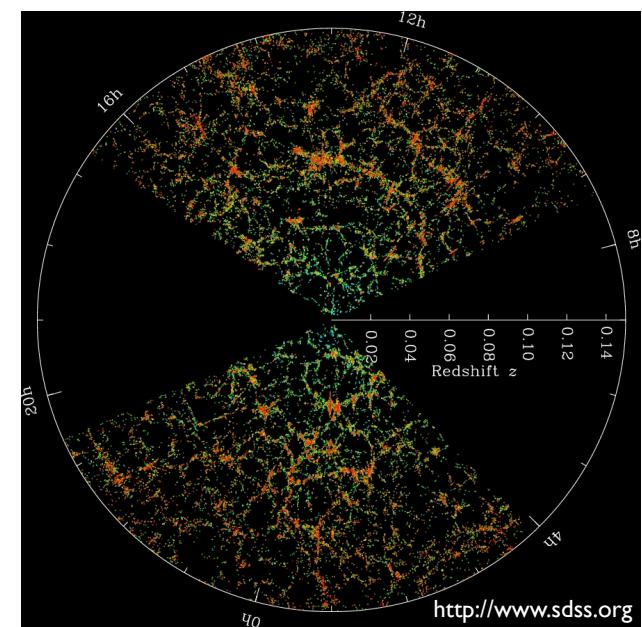
# 宇宙の構造（密度揺らぎ）の起源

- 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]



- 原始重力波のパワースペクトル

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

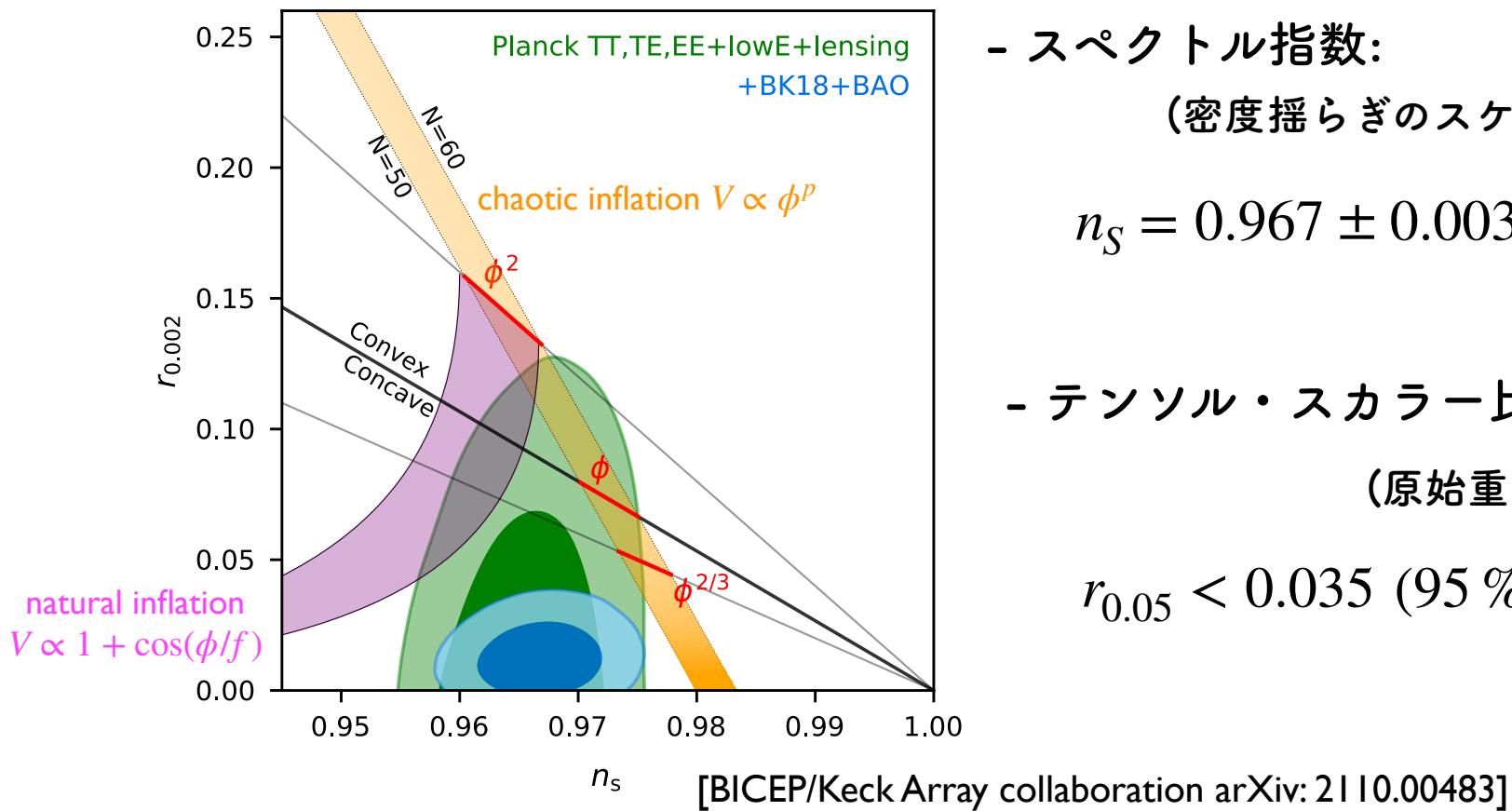
原始重力波の振幅もインフレーションモデル（インフラトンポテンシャル）に依る

# 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 ( $r = P_T/P_\zeta$ ) :

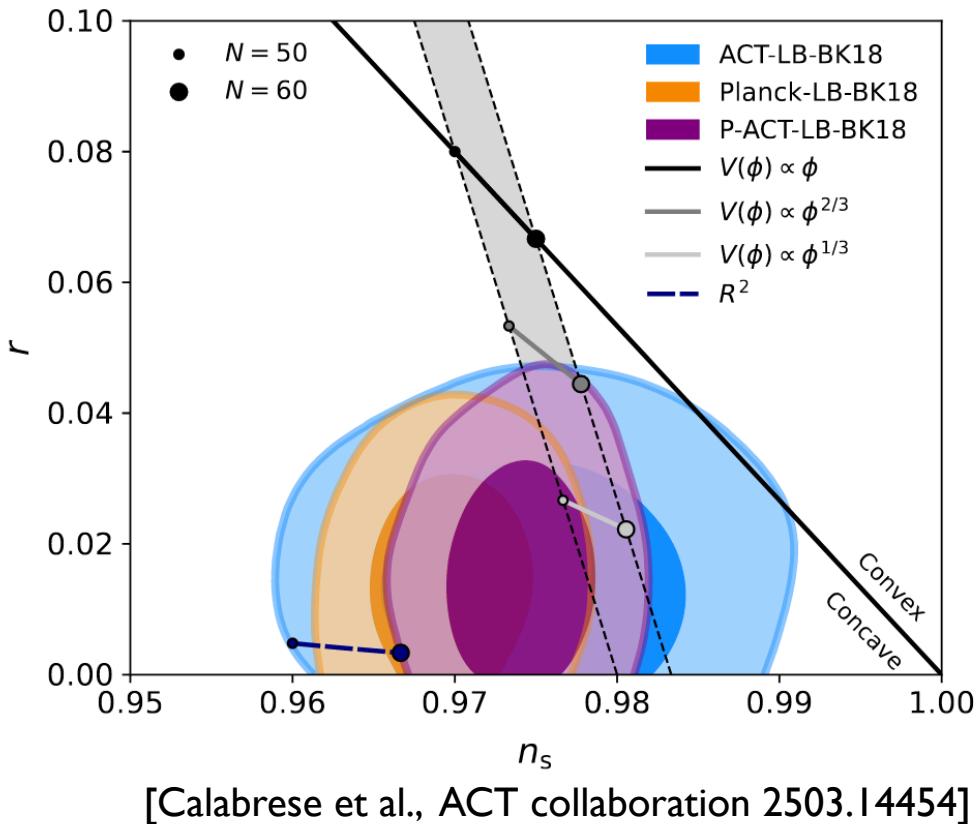
(原始重力波の振幅を表す)

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

(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)



- 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

$$M^4 \left(1 - e^{-\sqrt{2/3}\phi/M_{\text{Pl}}}\right)^2$$

$$M^4 \left(1 - 2e^{-\sqrt{2/3}\phi/M_{\text{Pl}}} + \frac{A_1}{16\pi^2} \frac{\phi}{\sqrt{6}M_{\text{Pl}}}\right)$$

$$M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^p$$

$$M^4 \frac{\phi^2}{M_{\text{Pl}}^2} \left[1 + \alpha \frac{\phi^2}{M_{\text{Pl}}^2}\right]$$

$$M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^2 \left[1 - 2\alpha \frac{\phi^2}{M_{\text{Pl}}^2} \ln\left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right]$$

$$M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^4 \left[1 - \alpha \ln\left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right]$$

$$M^4 \left[1 + \cos\left(\frac{\phi}{f}\right)\right]$$

$$M^4 \left(1 - e^{-q\phi/M_{\text{Pl}}}\right)$$

$$M^4 e^{-\alpha\phi/M_{\text{Pl}}}$$

$$M^4 \left(1 - \alpha \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}} e^{-\phi/M_{\text{Pl}}}\right)$$

$$M^4 \left(1 + A_1 \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^2 \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{A_1}{1+A_1\phi/M_{\text{Pl}}}\right)^2\right]$$

$$M^4 \left[1 + \alpha \left(\frac{\phi}{Q}\right)^4 \ln\left(\frac{\phi}{Q}\right)\right]$$

$$M^4 \left[1 + \alpha \ln\left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right]$$

$$M^4 e^{-2\sqrt{2/3}\phi/M_{\text{Pl}}} \left|e^{\sqrt{2/3}\phi/M_{\text{Pl}}} - 1\right|^{2p/(2p-1)}$$

$$M^4 \left[\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - 1\right]^2$$

$$M^4 \left[1 - \operatorname{sech}\left(\frac{\phi}{\mu}\right)\right]$$

$$\frac{M^4}{\left(1 - \alpha \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^2} \left[1 + \alpha \ln\left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right) + \beta \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^2\right]$$

$$M^4 \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^4 \left[\left(\ln \frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - \alpha\right]$$

$$M^4 \left[(3 + \alpha^2) \coth^2\left(\frac{\alpha}{\sqrt{2}} \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right) - 3\right]$$

$$M^4 \left\{1 + \left[-\alpha + \beta \ln\left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right] \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^4\right\}$$

$$M^4 \left[1 + \alpha \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^2 + \beta \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^4\right]$$

$$M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^{-p}$$

$$M^4 \left[1 - \left(\frac{\phi}{\mu}\right)^{-p}\right]$$

$$M^4 \left[1 - \frac{c}{2} \left(-\frac{1}{2} + \ln \frac{\phi}{\phi_0}\right) \frac{\phi^2}{M_{\text{Pl}}^2}\right]$$

$$M^4 \left[1 + \left(\frac{\phi}{\mu}\right)^p\right]$$

$$M^4 \left[1 + \left(\frac{\phi}{\mu}\right)^{-p}\right]$$

$$M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^p \left[1 + \alpha \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^q\right]$$

$$M^4 \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^p \left(\ln \frac{\phi}{\phi_0}\right)^q$$

$$\frac{M^4}{\left\{1 + \beta \cos\left[\alpha \left(\frac{\phi - \phi_0}{M_{\text{Pl}}}\right)\right]\right\}^2}$$

$$M^4 \left(\frac{\phi - \phi_0}{M_{\text{Pl}}}\right)^{-\beta} - M^4 \frac{\beta^2}{6} \left(\frac{\phi - \phi_0}{M_{\text{Pl}}}\right)^{-\beta-2}$$

$$M^4 \left[1 - \alpha \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}} \exp\left(-\beta \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right]$$

$$M^4 \left(\frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)^\alpha \exp[-\beta (\phi/M_{\text{Pl}})^\gamma]$$

$$M^4 \left[1 - A \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 e^{-\phi/\phi_0}\right]$$

$$M^4 \left[\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - \frac{2}{3} \alpha \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^6 + \frac{\alpha}{5} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^{10}\right]$$

$$M^4 \left[\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - \frac{4}{3} \alpha \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^3 + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^4\right]$$

$$M^4 \left(e^{\sqrt{6} \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}} + e^{\sqrt{6}\gamma \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}}\right)$$

$$M^4 \left(1 + \cos \frac{\phi}{\mu} + \alpha \sin^2 \frac{\phi}{\mu}\right)$$

$$M^4 \exp_{1-\beta} \left(-\lambda \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)$$

$$M^4 \left[1 + \alpha \ln\left(\cos \frac{\phi}{f}\right)\right]$$

$$M^4 \frac{(\phi/M_{\text{Pl}})^2}{\alpha + (\phi/M_{\text{Pl}})^2}$$

$$M^4 \left[\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^6 + \frac{1}{5} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^{10}\right]$$

$$M^4 \left[\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 - \frac{4}{3} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^3 + \frac{1}{2} \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^4\right]$$

$$M^4 \left[1 - \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\phi}{\mu}\right)\right]$$

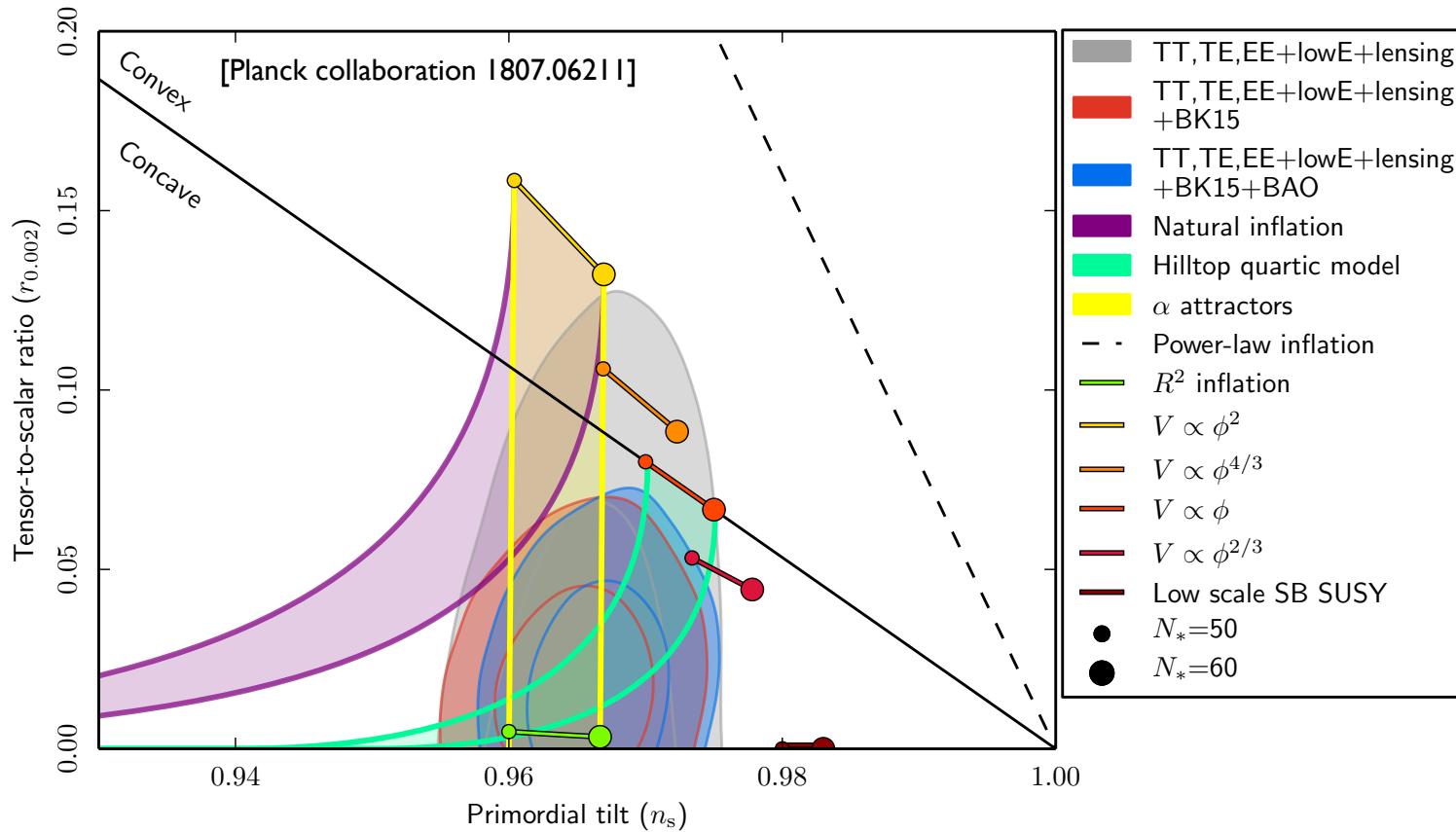
$$M^4 \left[3 - (3 + \alpha^2) \tanh^2\left(\frac{\alpha}{\sqrt{2}} \frac{\phi}{M_{\text{Pl}}}\right)\right]$$

# 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

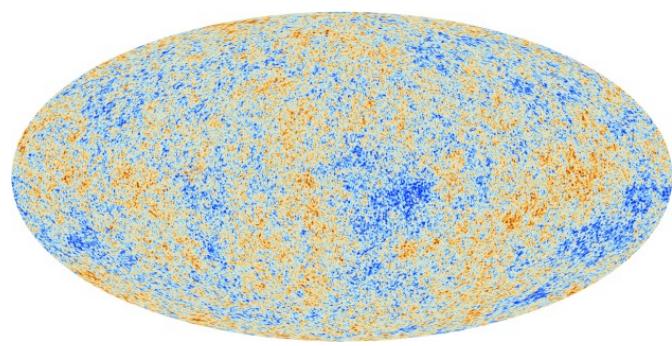
- 宇宙背景放射の揺らぎ+宇宙の大規模構造(銀河分布)からの制限



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

# インフレーションポテンシャルの再構築

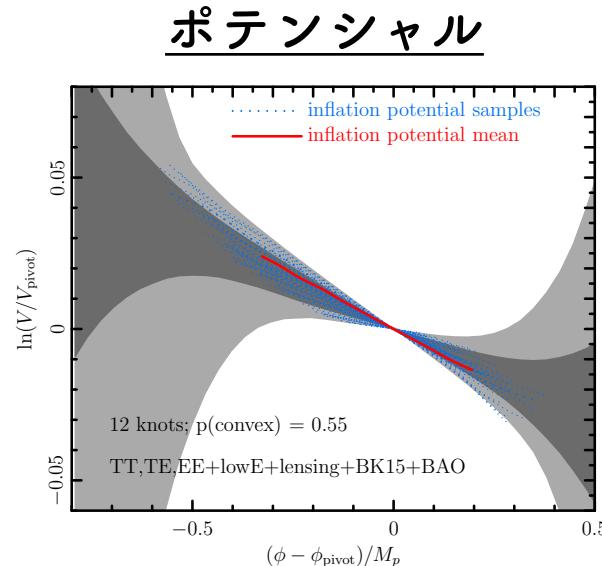
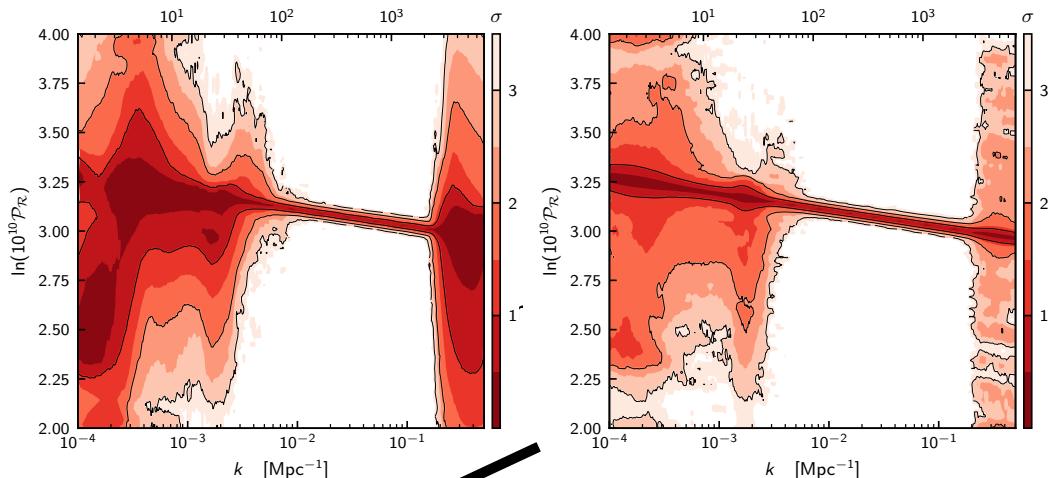
- 宇宙背景放射の揺らぎのデータ (Planck) を用いた再構築



[Planck collaboration]



原始密度揺らぎパワースペクトル

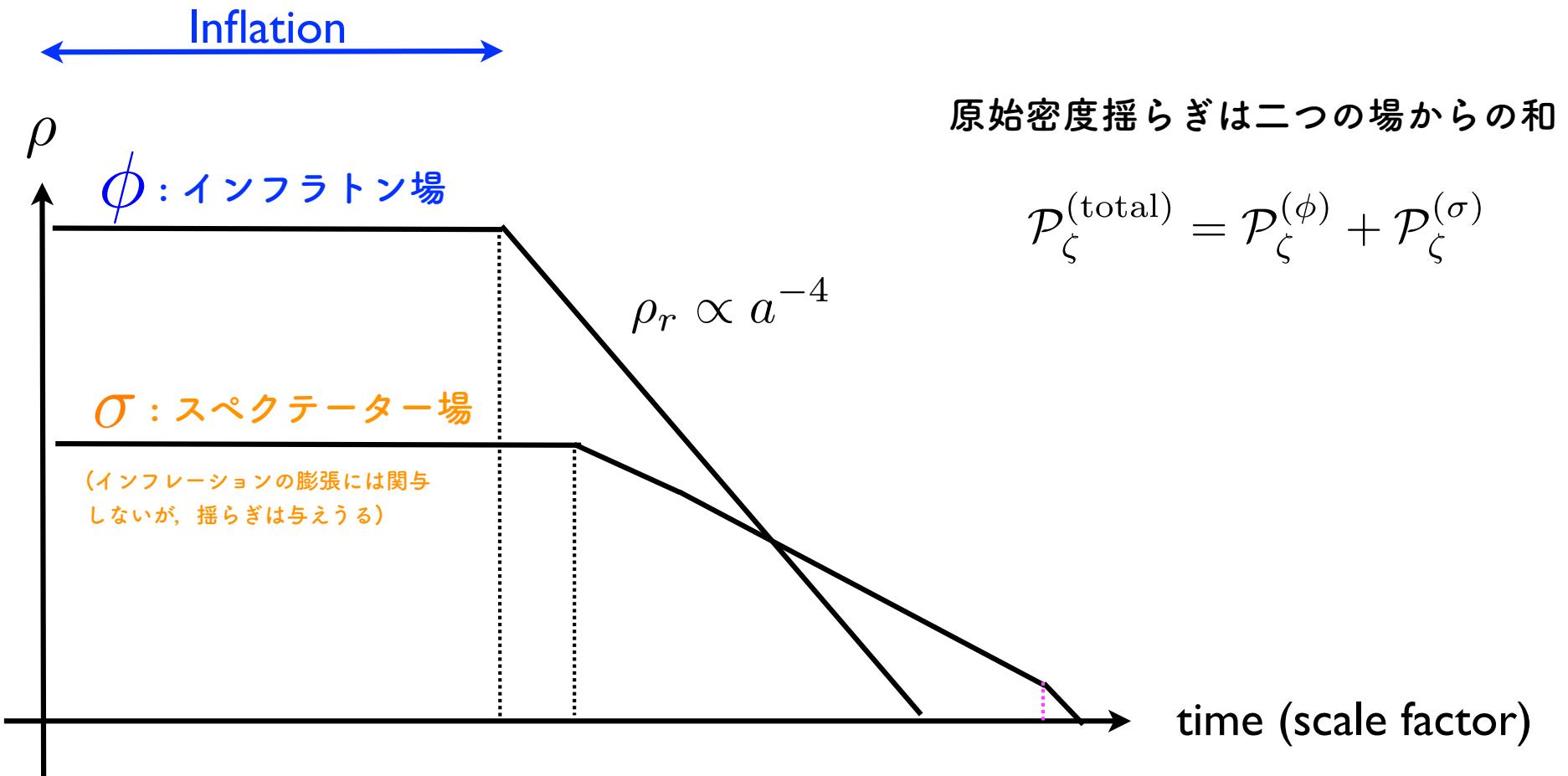


$$\mathcal{P}_\zeta(k) \propto H^2/\epsilon$$

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

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

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

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

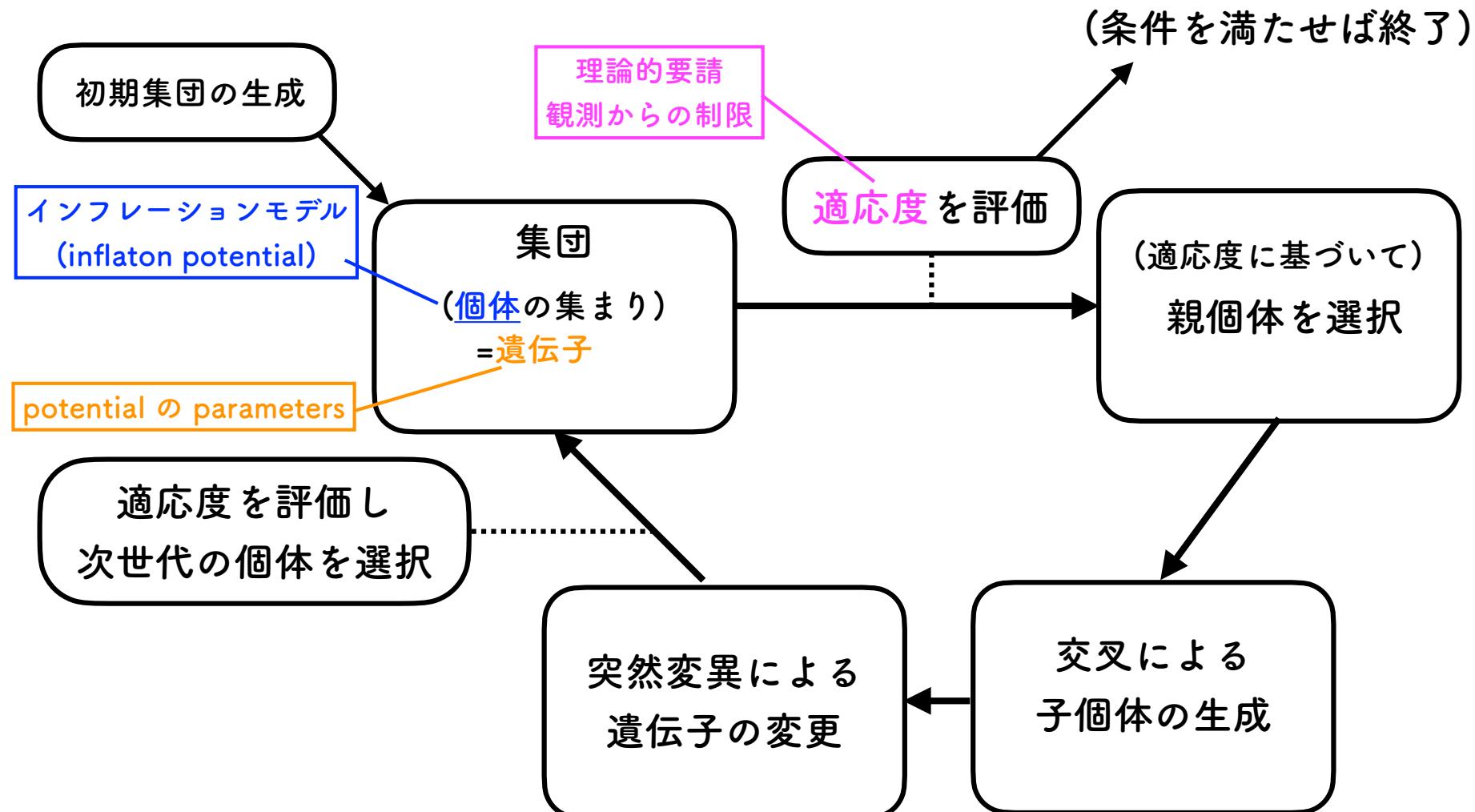
- #### - テンソル・スカラー比(重力波の振幅)

# 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
  - 複数場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次までの幕で表すとすれば

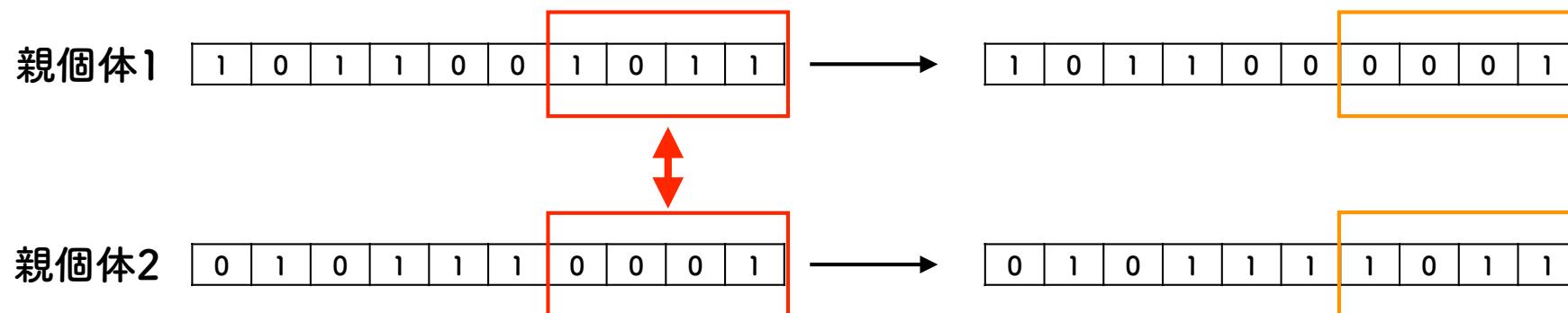
遺伝子 =	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

( $c_i$  は実数だが、2進法でバイナリ表記でもよい)

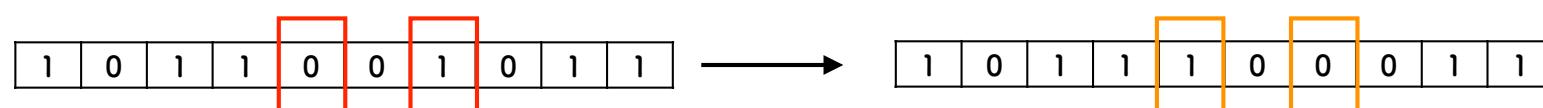
1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	...
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----

# 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



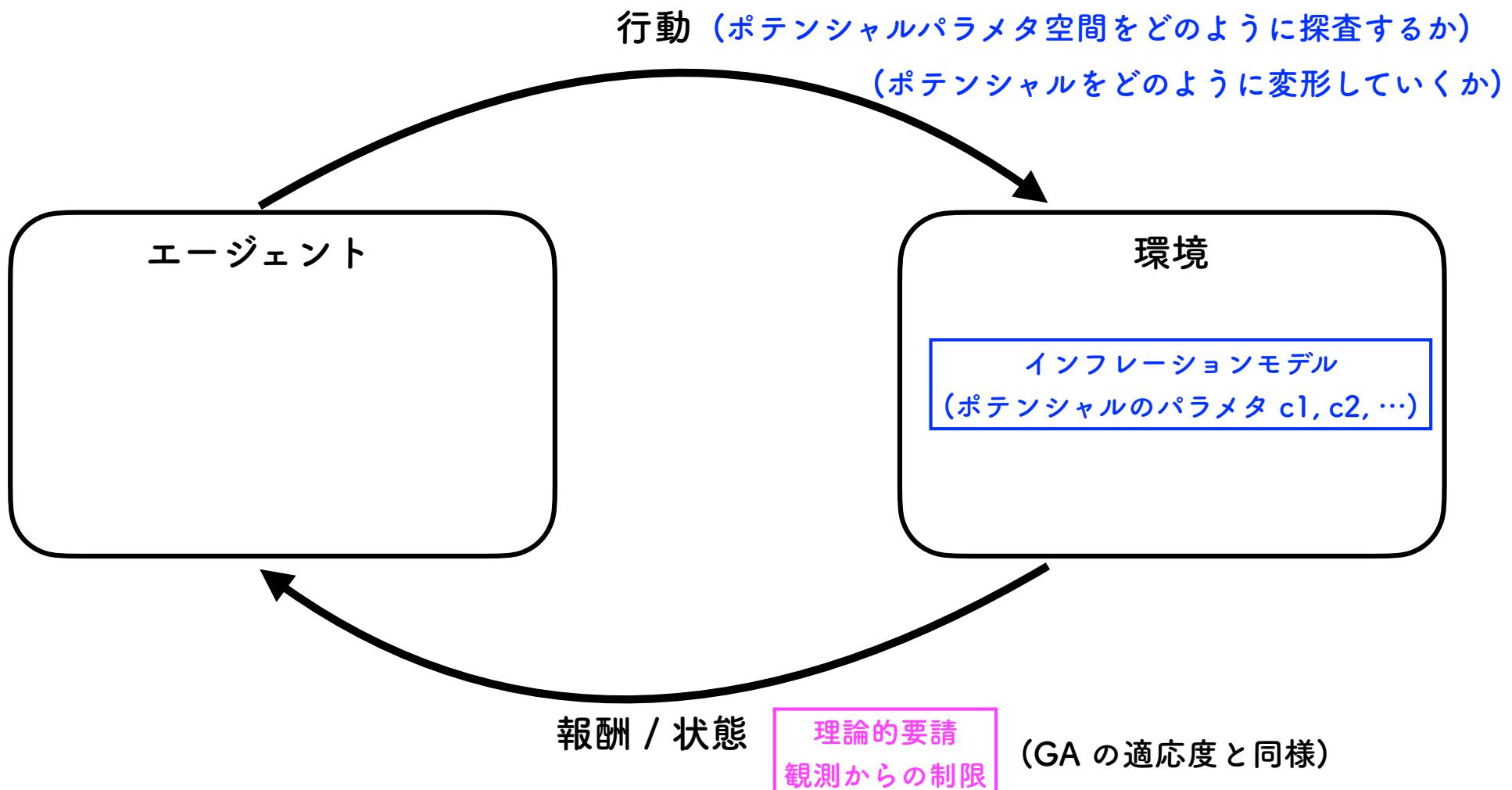
- 突然変異 (mutation): 遺伝子をある確率で変異させる



これらの"遺伝子操作"で多様な"個体"を生成し、様々なモデルを探査する

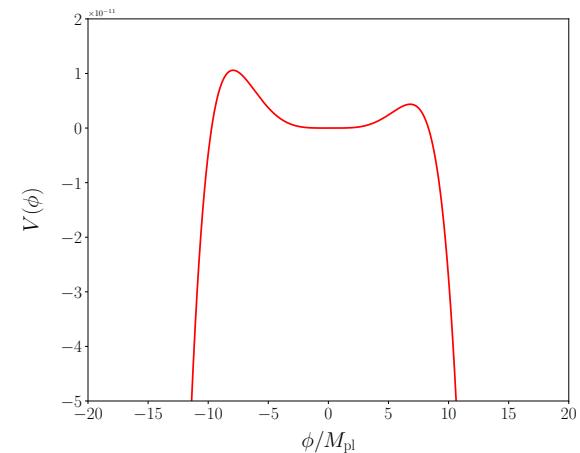
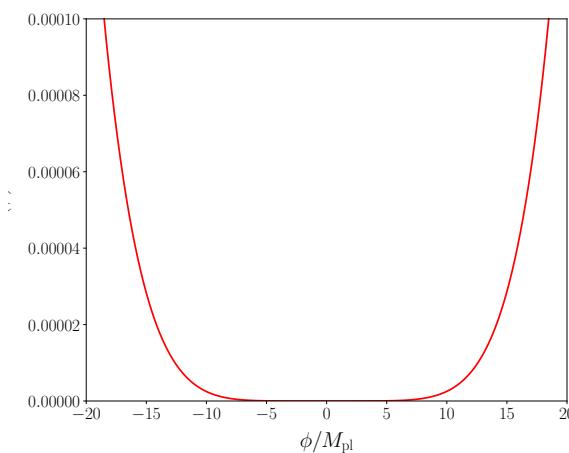
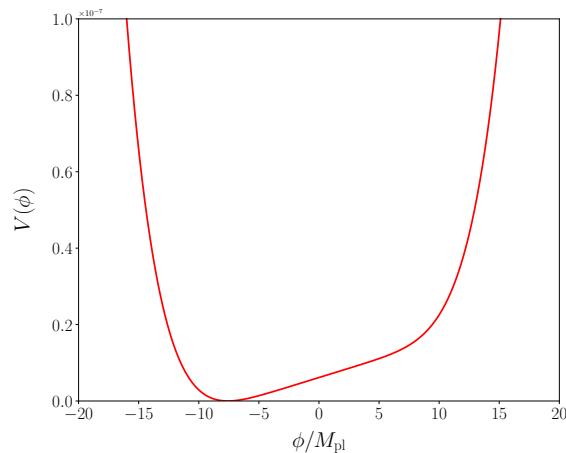
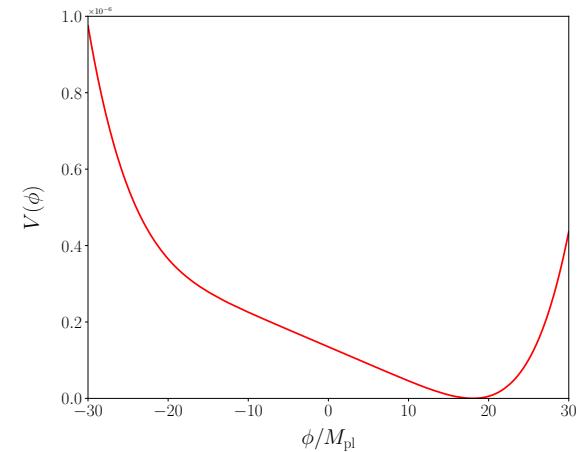
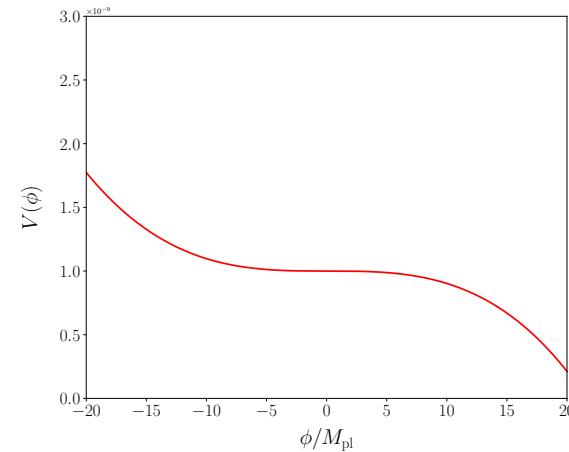
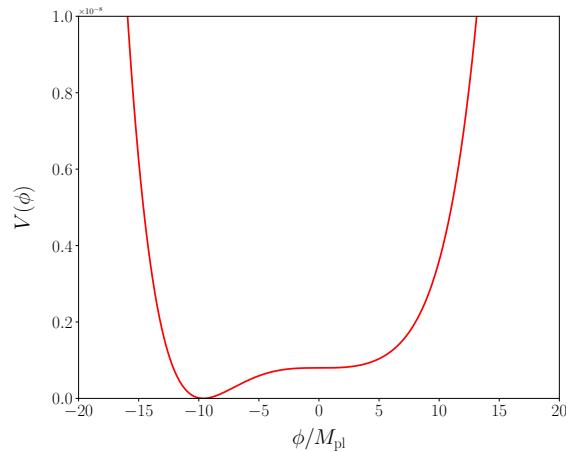
# 強化学習 (Reinforcement learning)

- 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次までの幕乗モデル)



# 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 ?

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

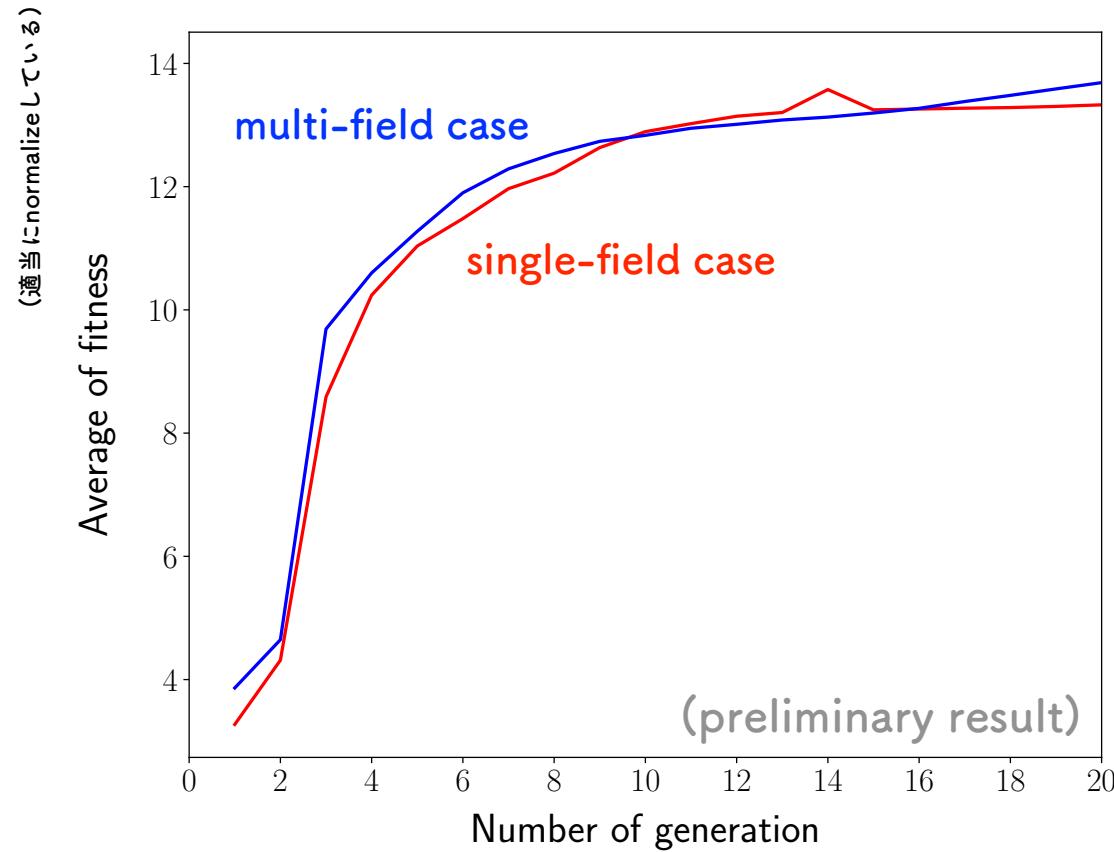
- 原始重力波の振幅 (テンソル・スカラー比  $r$ ) は観測の上限に抵触しないか ?

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

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

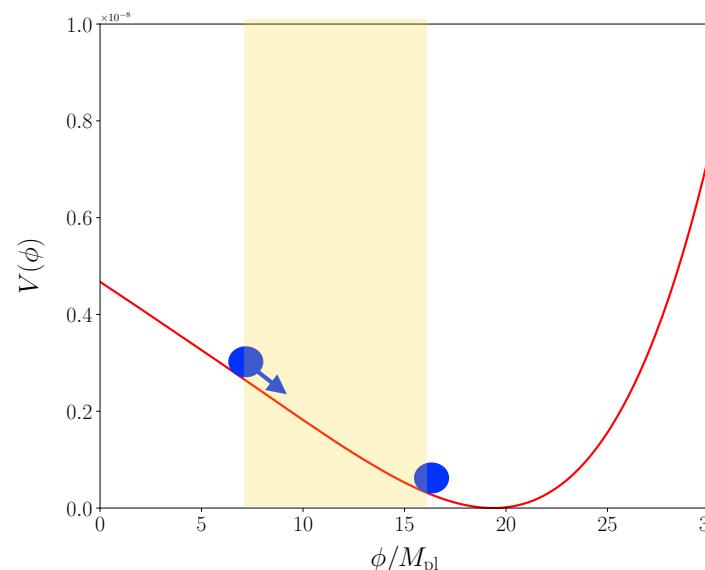
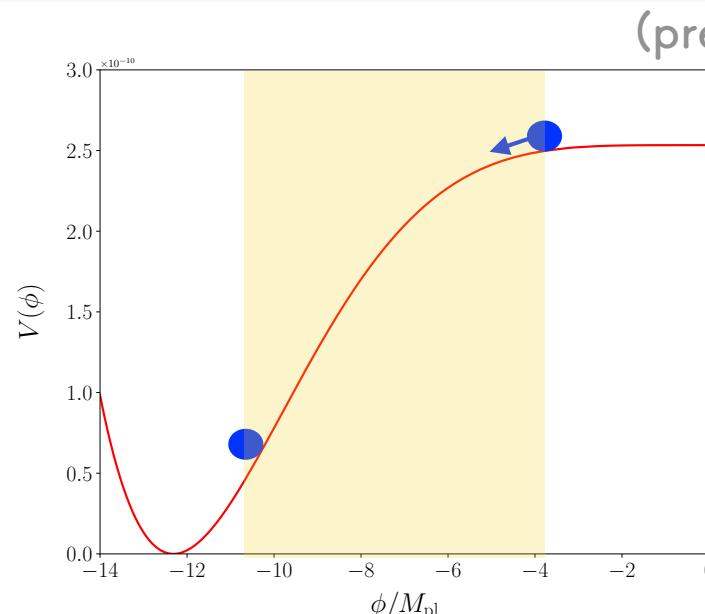
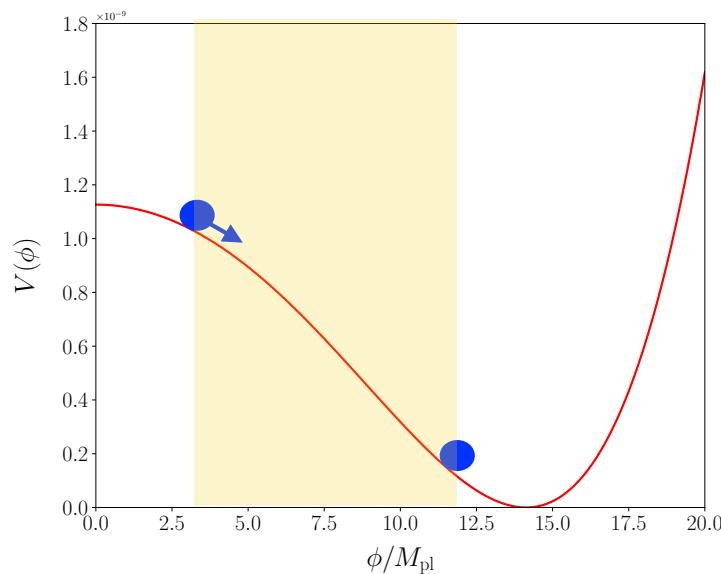
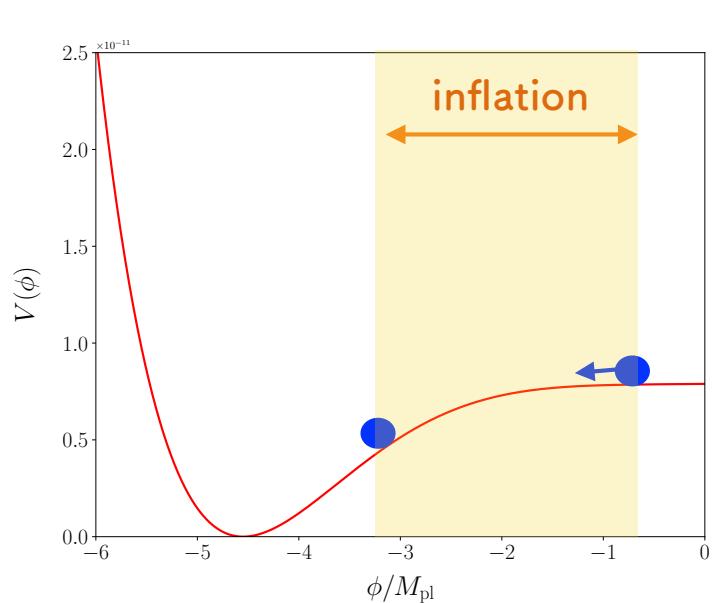
# 遺伝的アルゴリズム (Genetic algorithms)

- 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

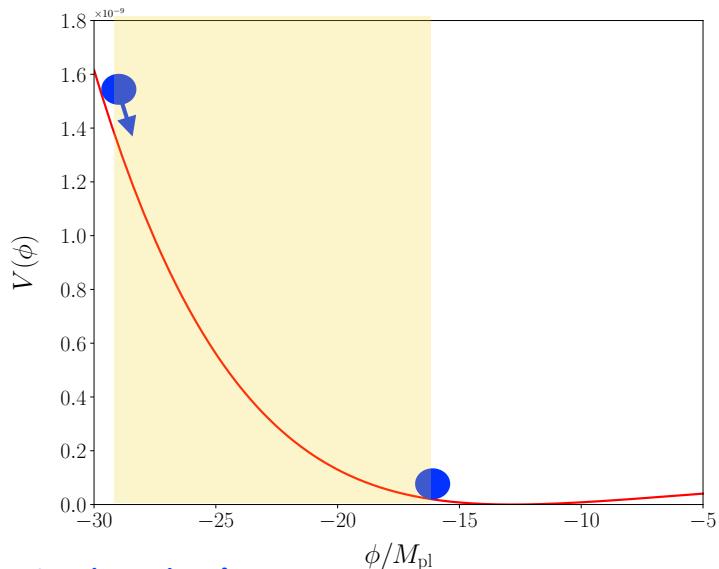
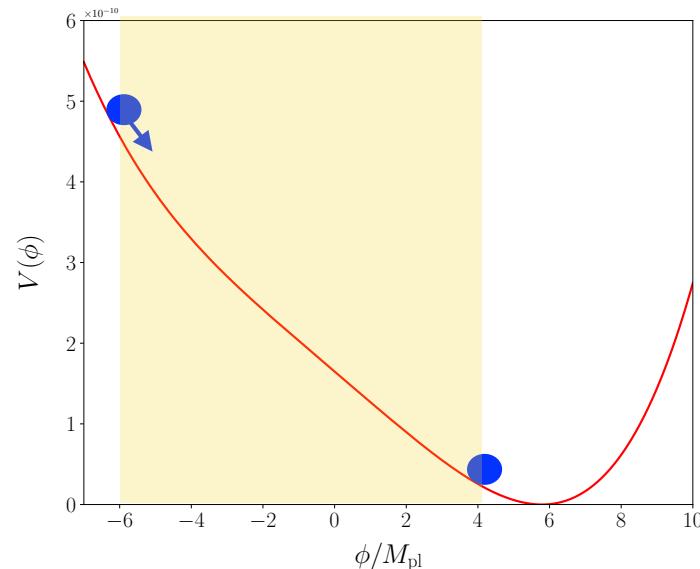
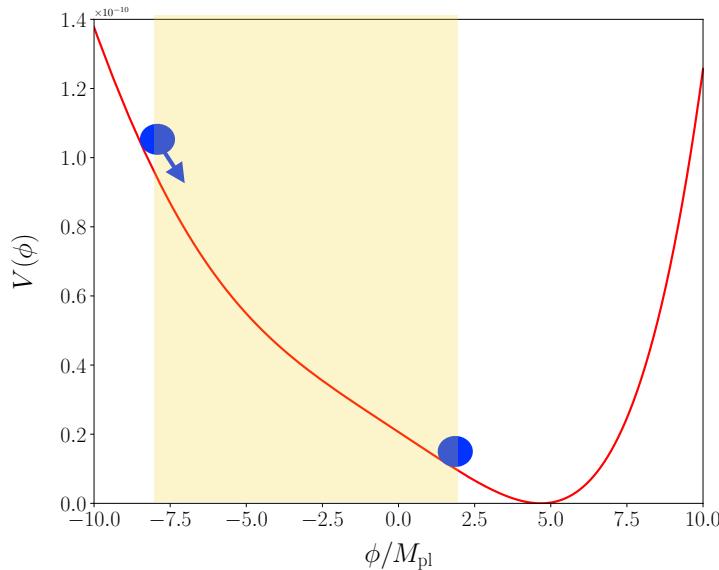
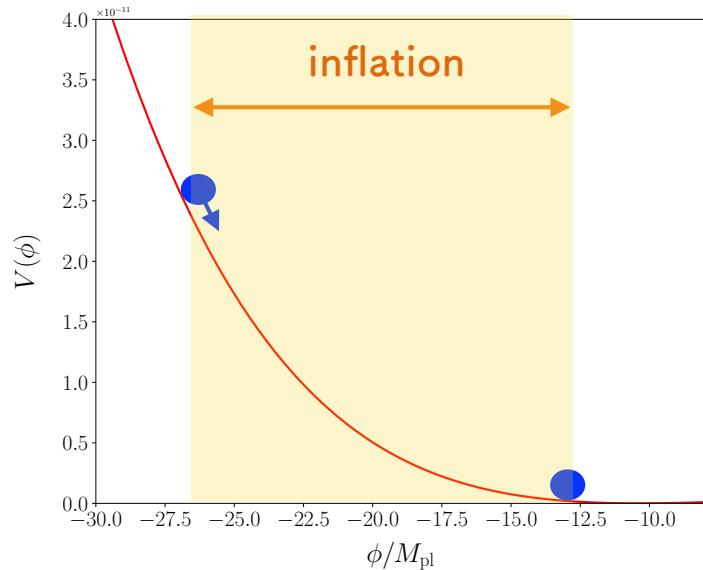
# 遺伝的アルゴリズムで選ばれたモデル (single-field)



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)

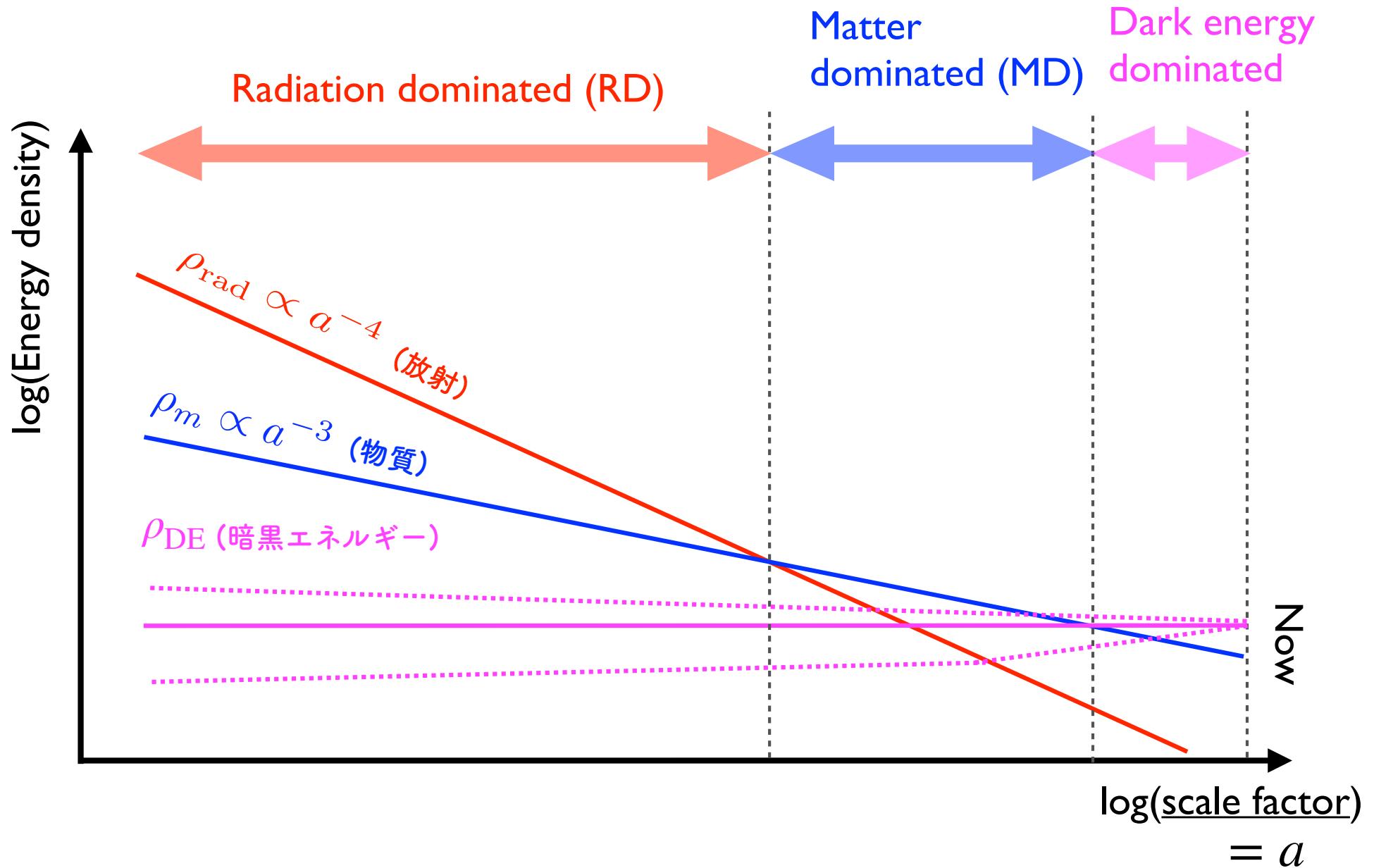


下に凸の関数が生き残る傾向

## 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

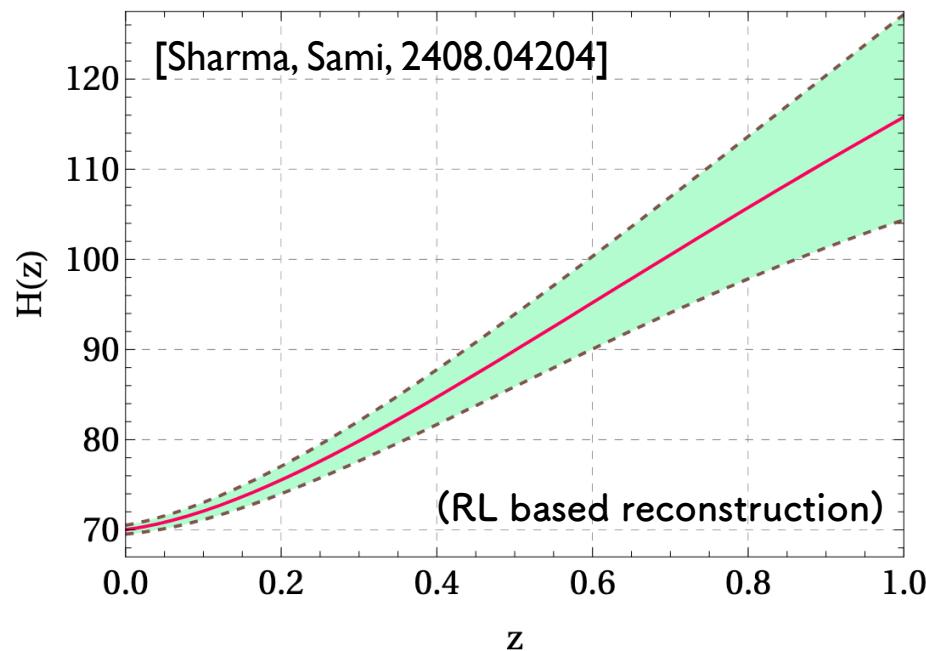
- 暗黒エネルギー モデルはエネルギー密度の進化の仕方で区別される

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

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

(スカラー場のポテンシャル, …)

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

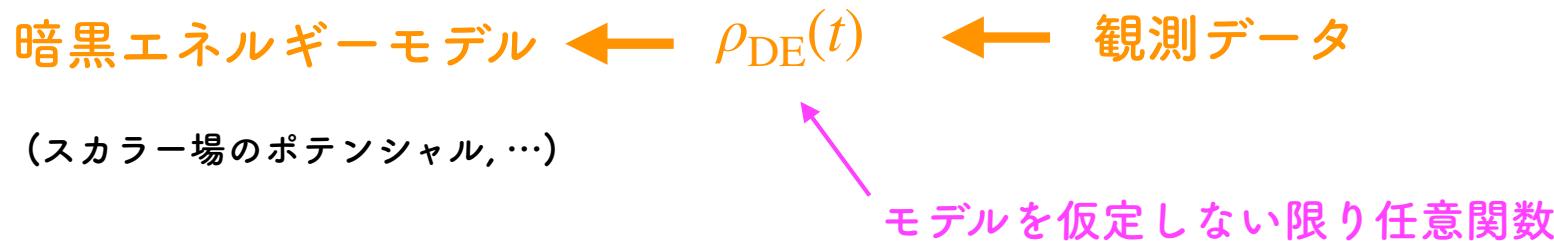


→ 観測データとの比較により  
モデルを検証

# 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тен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тен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、様々なモデルを探査することができる  
(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)