

宇宙の起源とその行方

アンドレイ リンデ

目次

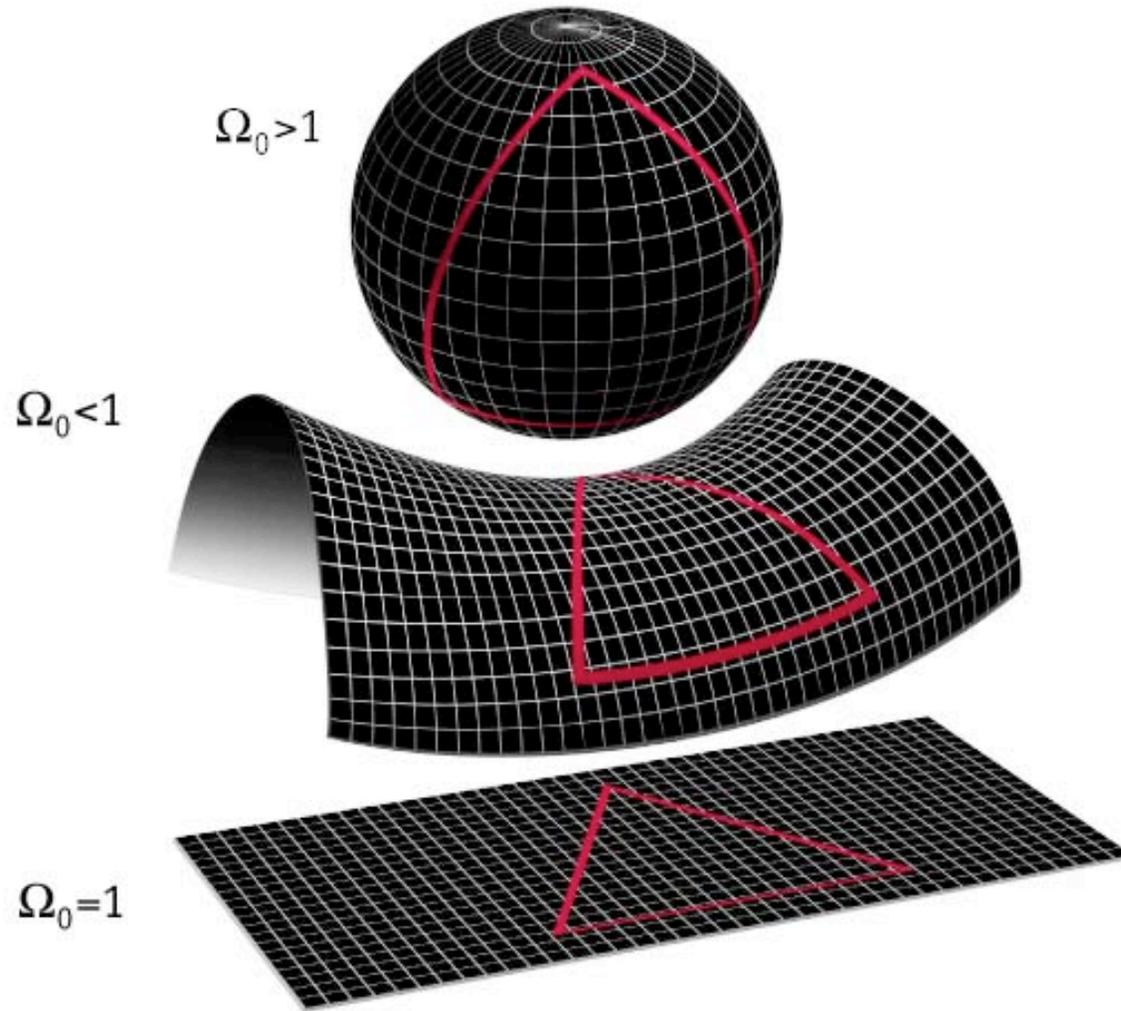
- ビッグバン宇宙からインフレーション宇宙まで
- 調和振動子としてのインフレーション
- 永久インフレーションとひも理論ランドスケープ

宇宙論における2つの重要な発見

- 急激な加速膨張 を経て創成される宇宙
(インフレーション)
- 50億年前に始まり現在まで続く、新たな加速膨張 (ダークエネルギー)

宇宙はどのように誕生し、どのような終焉を迎えるのか？

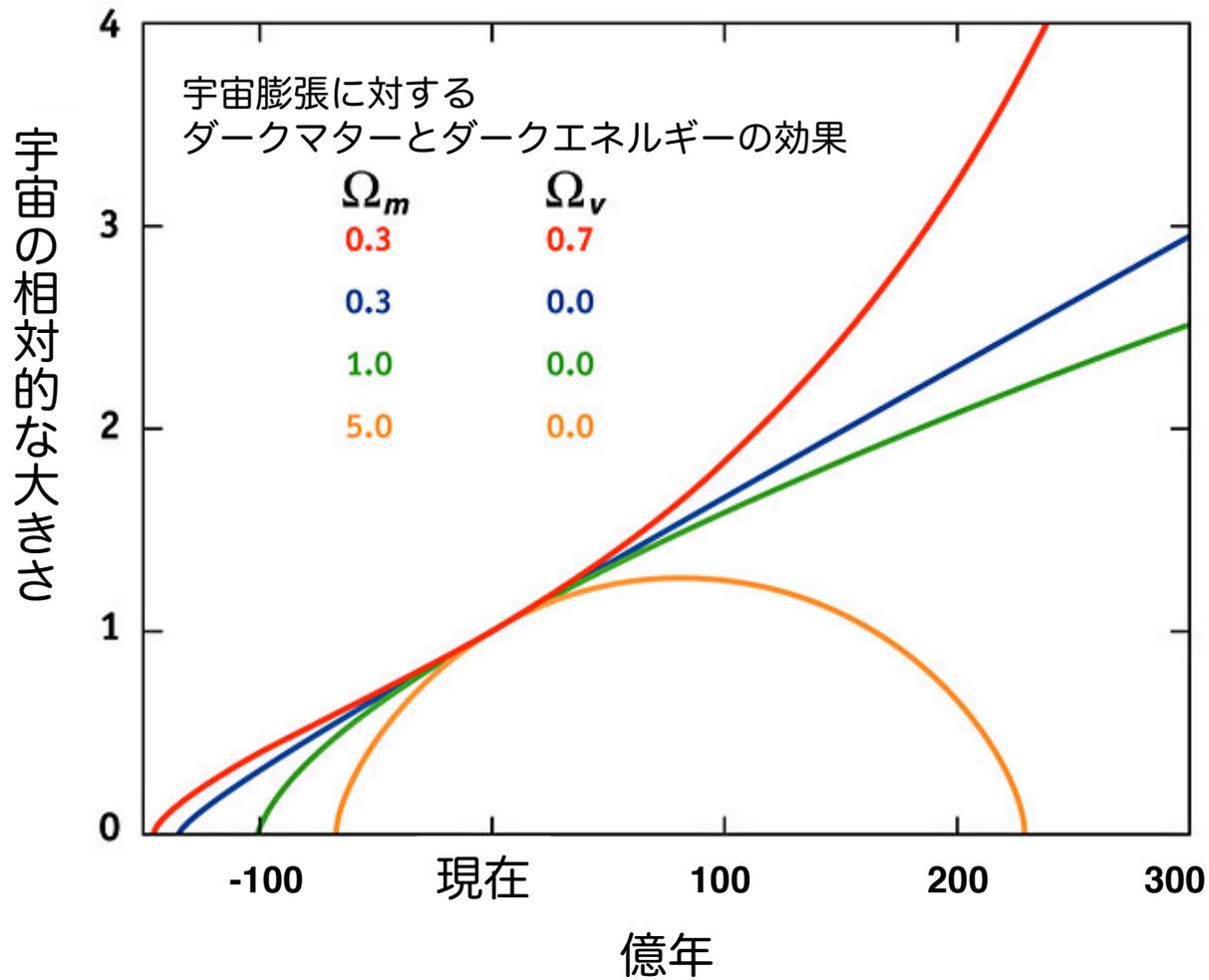
閉じた、開いた、平坦な宇宙



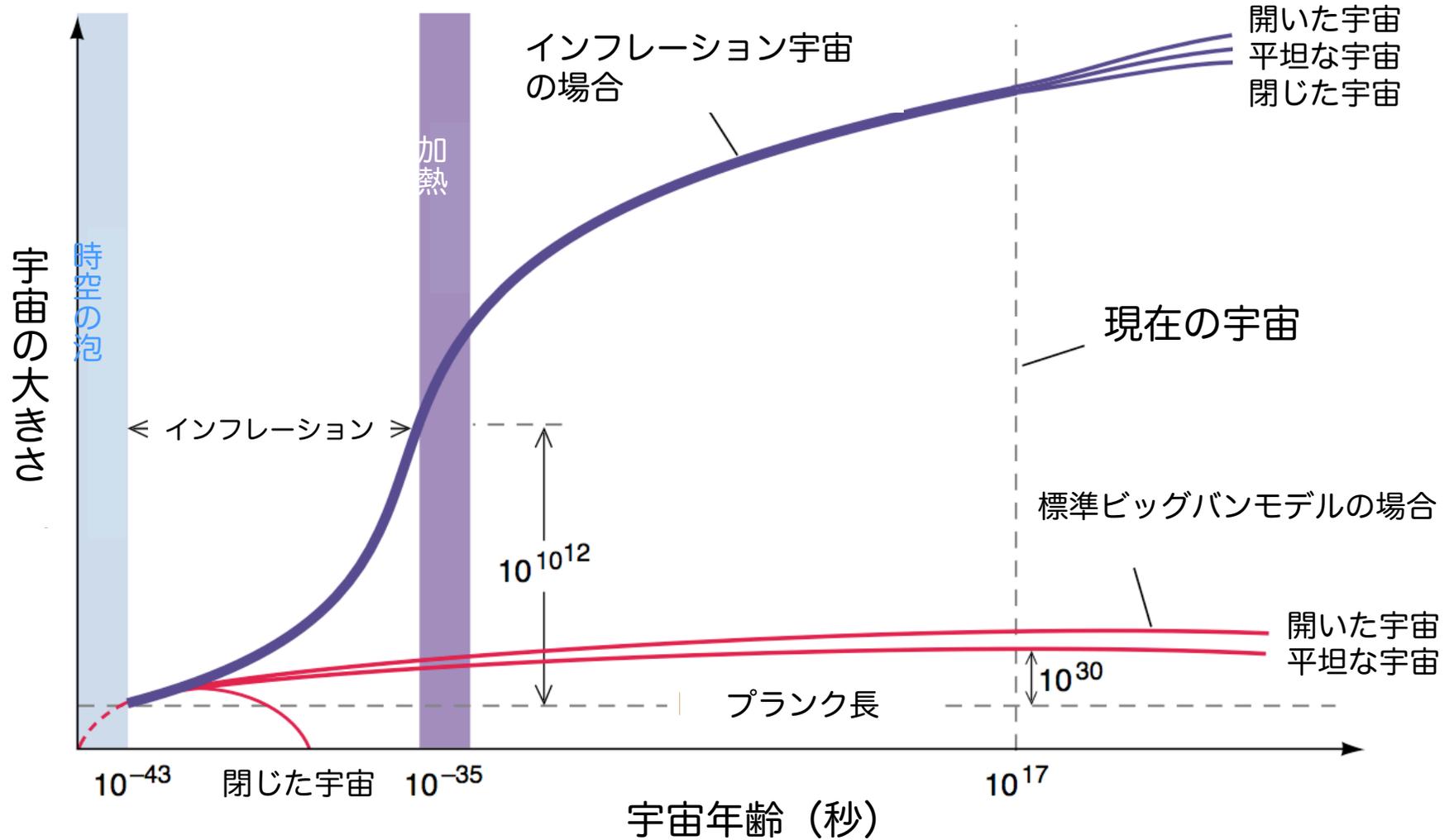
MAP990006

ビッグバン理論

宇宙膨張



インフレーション宇宙



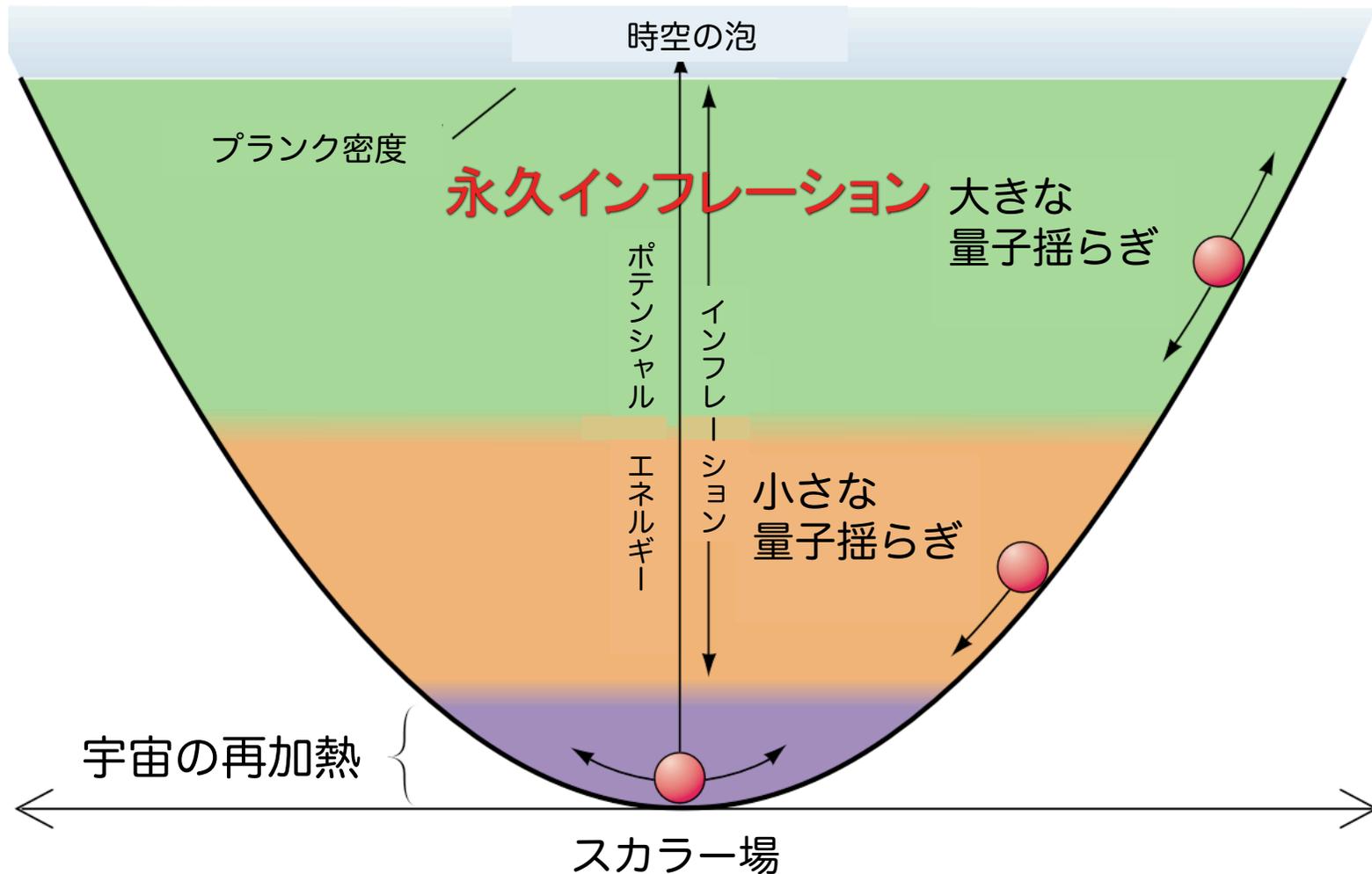
インフレーションはなぜ必要か？

標準ビッグバン理論の問題点

- ビッグバン以前の宇宙は何だったのか？
- 我々の宇宙はなぜ **一様** なのか(1万分の1のずれもない)？
- なぜ **等方** なのか(どの方向を見ても同じ)？
- なぜ宇宙のすべての部分が同時に膨張を始めたのか？
- なぜ **平坦**？ なぜ平行線は交わらない？ なぜこんなにも多くの素粒子を含んでいるのか？ **なんでこんなにたくさんの人々がこの会場にいるのか？**

調和振動子の理論としてのインフレーション

$$V(\phi) = \frac{m^2}{2}\phi^2$$



運動方程式:

- アインシュタイン方程式:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{m^2}{6} \phi^2$$

- クライン・ゴールドン方程式:

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -m^2\phi$$

調和振動子の方程式（摩擦がある場合）との比較

$$\ddot{x} + \alpha\dot{x} = -kx$$

インフレーションの仕組み

大きな ϕ \longrightarrow 大きな H \longrightarrow 大きな摩擦

場 ϕ が非常にゆっくり動くので、ポテンシャルエネルギーが長い時間ほとんど一定にとどまる。

$$H = \frac{\dot{a}}{a} = \frac{m\phi}{\sqrt{6}} \approx \text{const}$$

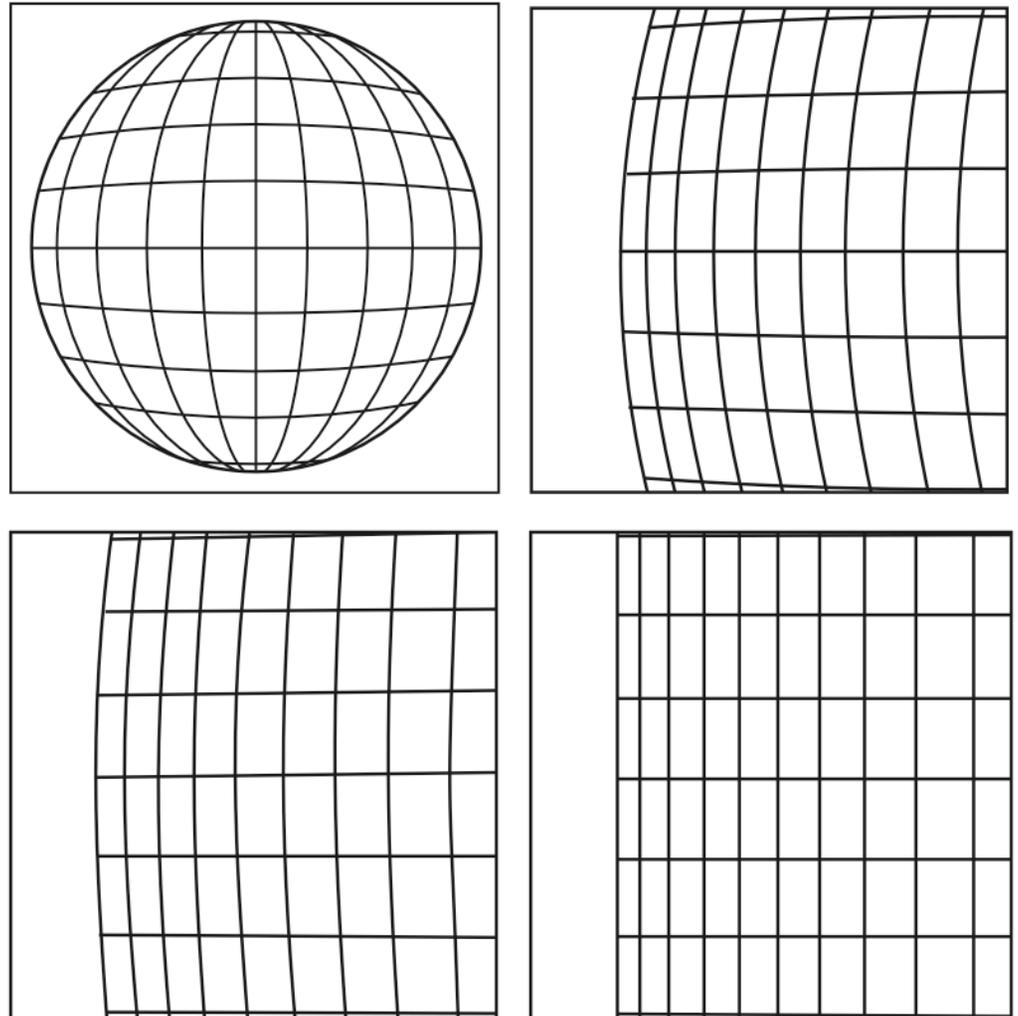
$$a \sim e^{Ht}$$

偽真空, 過冷却, 相転移などを必要としない。

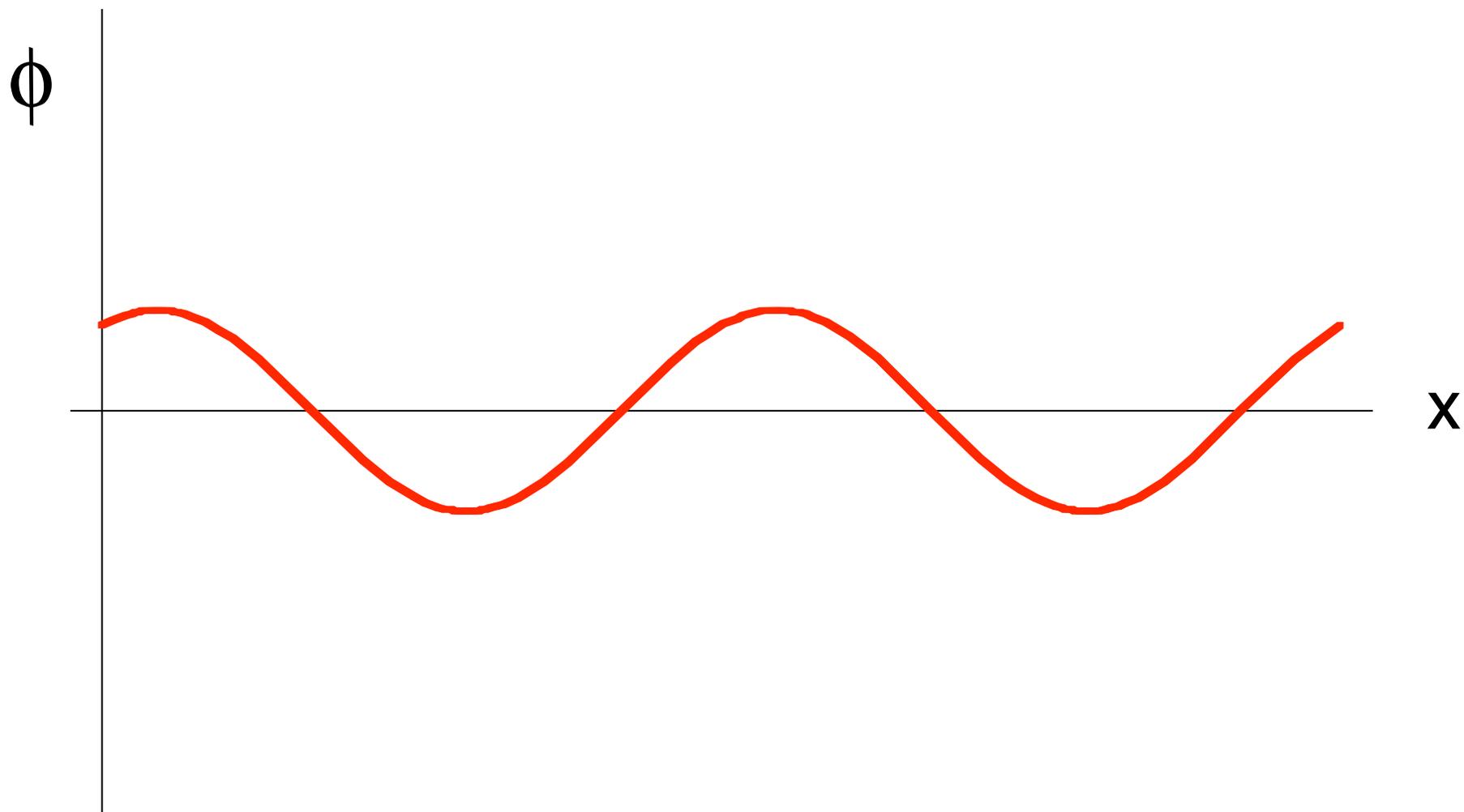
インフレーションは平坦な 一様等方宇宙を生み出す

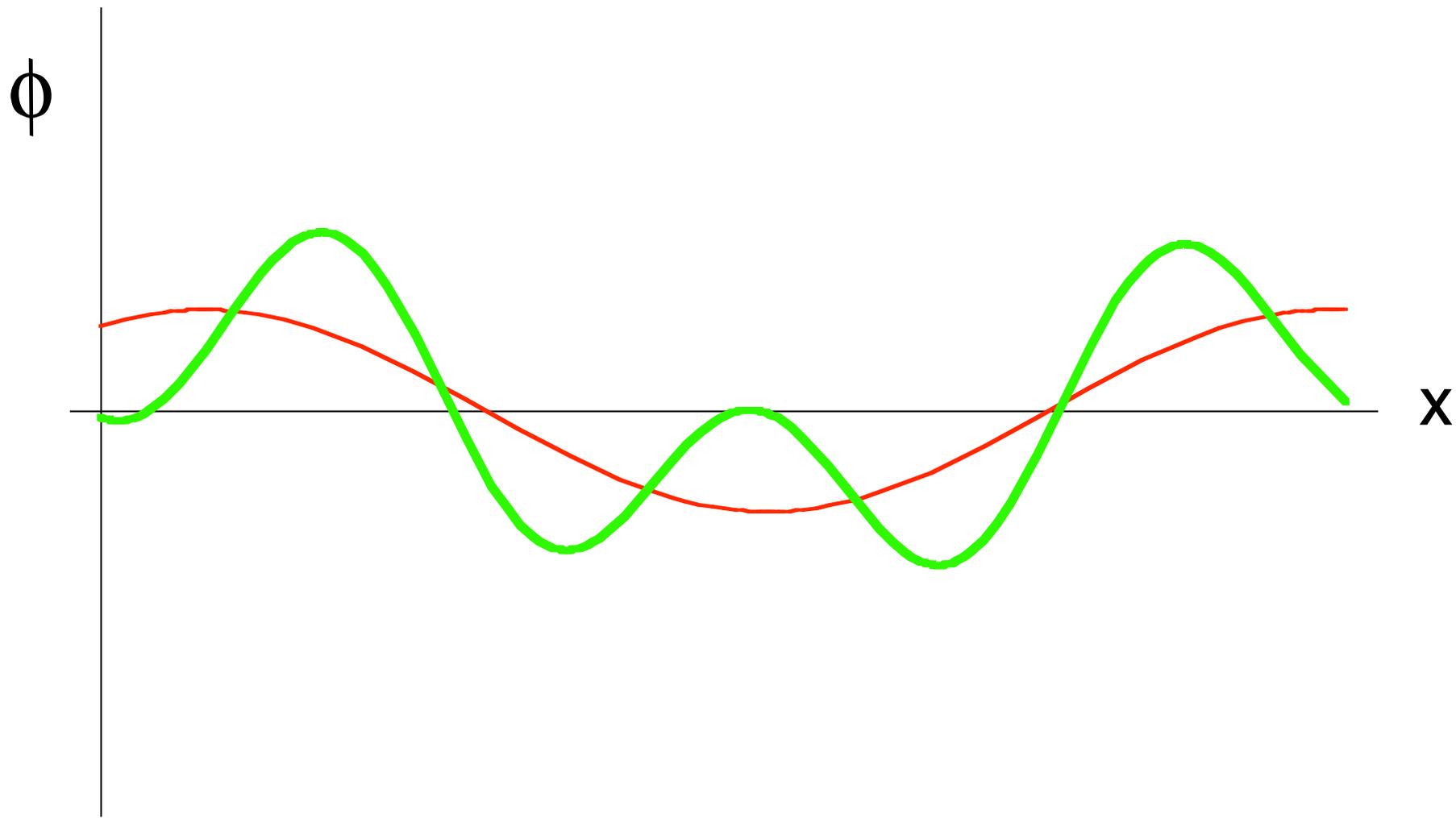
この単純なモデルで、宇宙はインフレーションによって大体 $10^{1000000000000000}$ 倍成長する。

ここで宇宙の非常に小さい部分（大きさ $ct = 10^{10}$ 光年）に注目すると、なぜ平坦な一様等方宇宙に見えるのかが分かる。

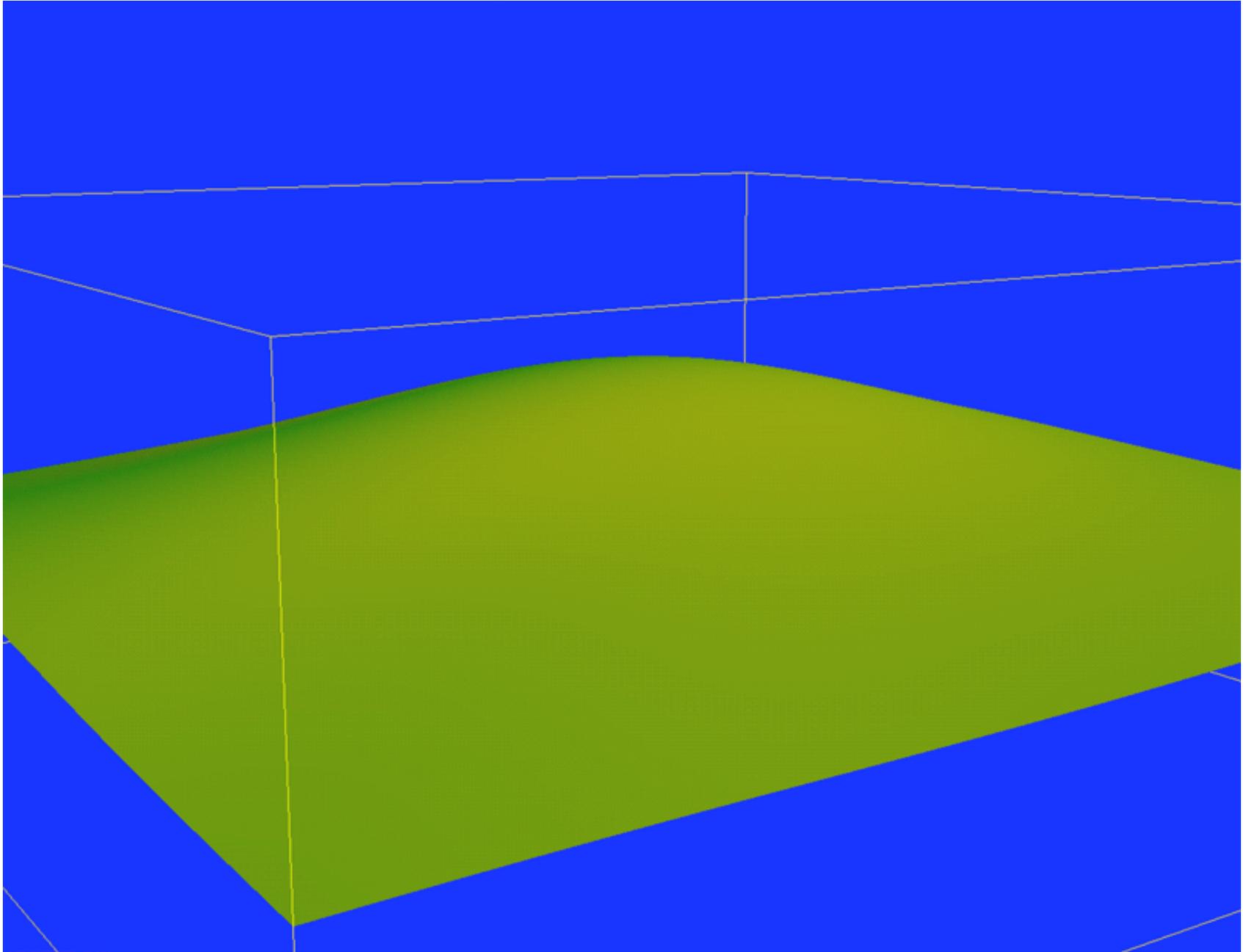


インフレーション中に生成される量子揺らぎ

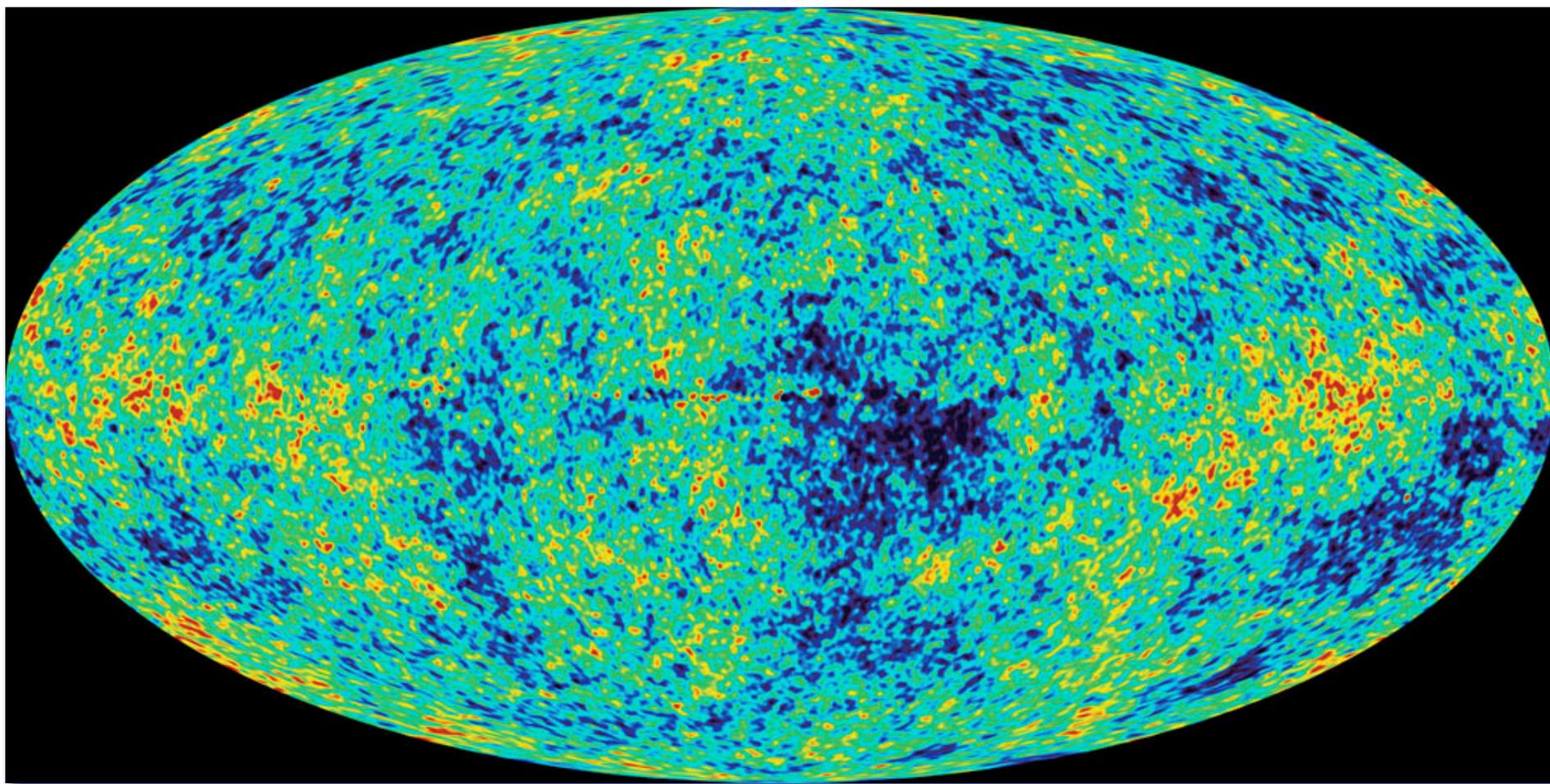




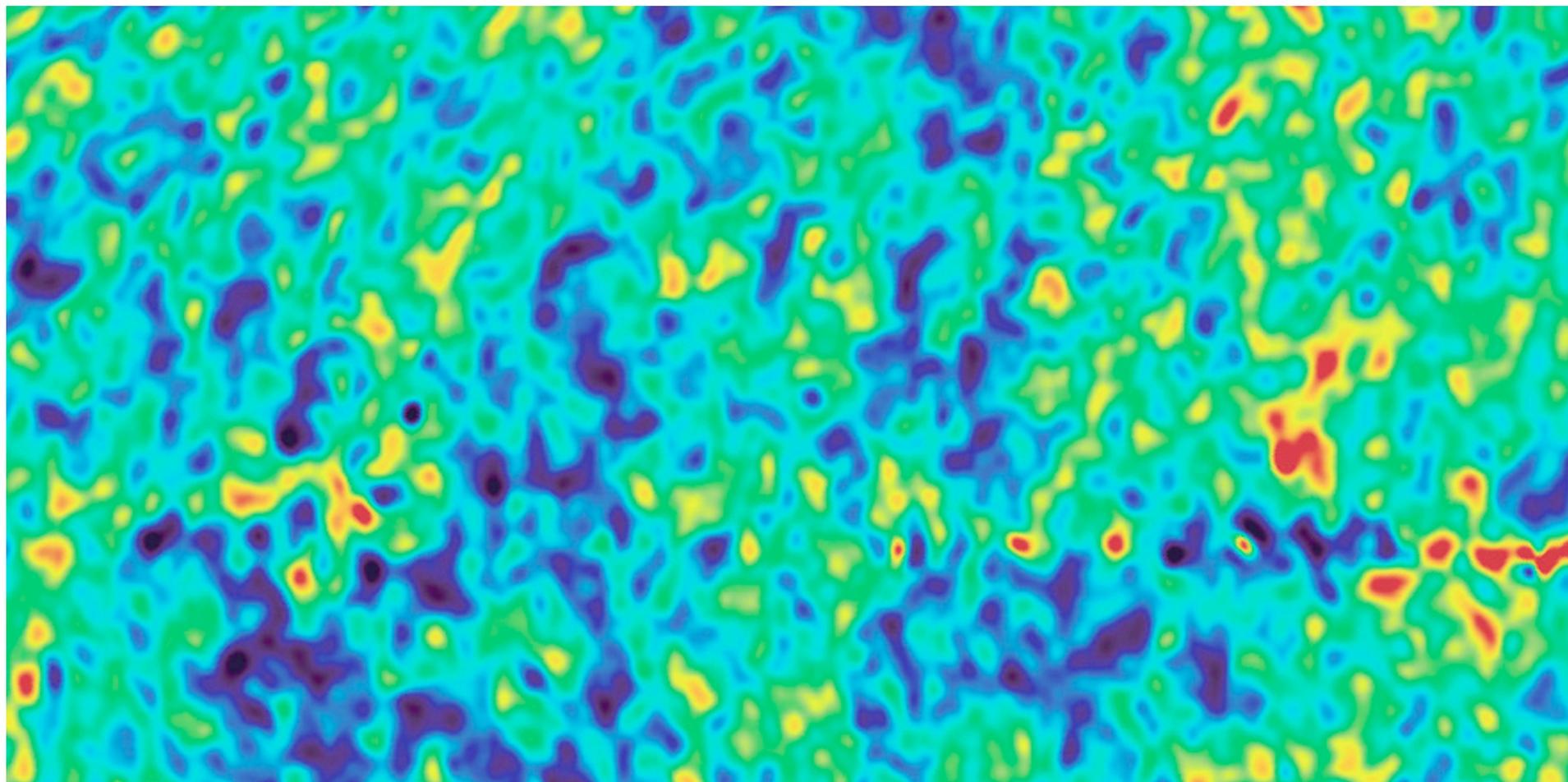
量子揺らぎの生成



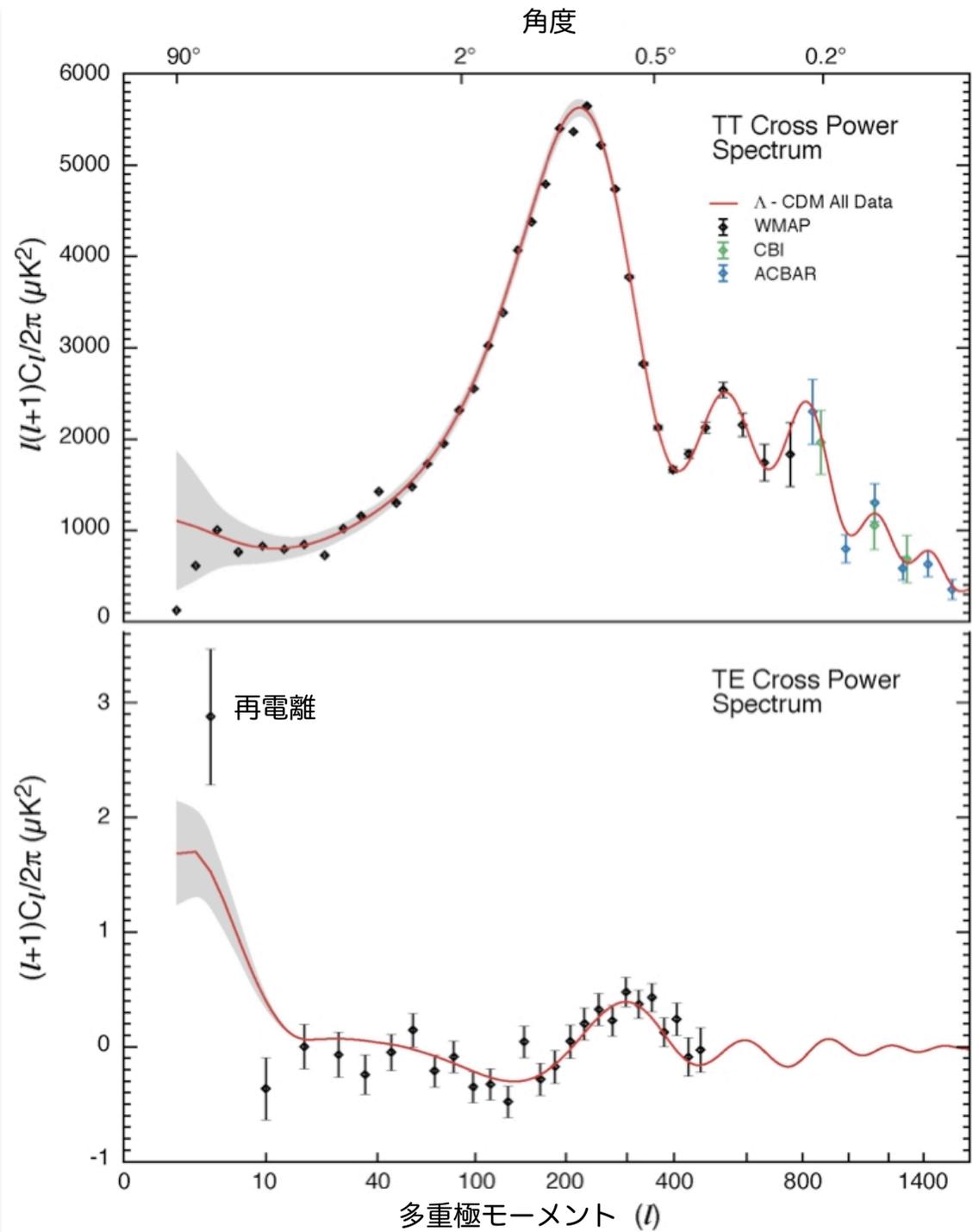
WMAPと宇宙の温度



量子揺らぎが宇宙サイズに膨れ上がる



WMAP と宇宙マイクロ波背景 放射のスペクトル



インフレーションの予言

1) 宇宙は平坦な一様等方宇宙, $\Omega = 1 + O(10^{-4})$

$$[\Omega = \rho/\rho_0]$$

観測値: 宇宙は平坦な一様等方宇宙。 $\Omega = 1 + O(10^{-2})$

2) ガウス統計に従う断熱的揺らぎが作られ、その振幅はスケールに依存しない。 $n_s = 1 + O(10^{-1})$

観測値: ガウス統計に従う断熱揺らぎが作られ、その振幅はスケールに依存しない。 $n_s = 1 + O(10^{-2})$

ビッグバン



地球

ビッグバン



地球



ビッグバン



地球

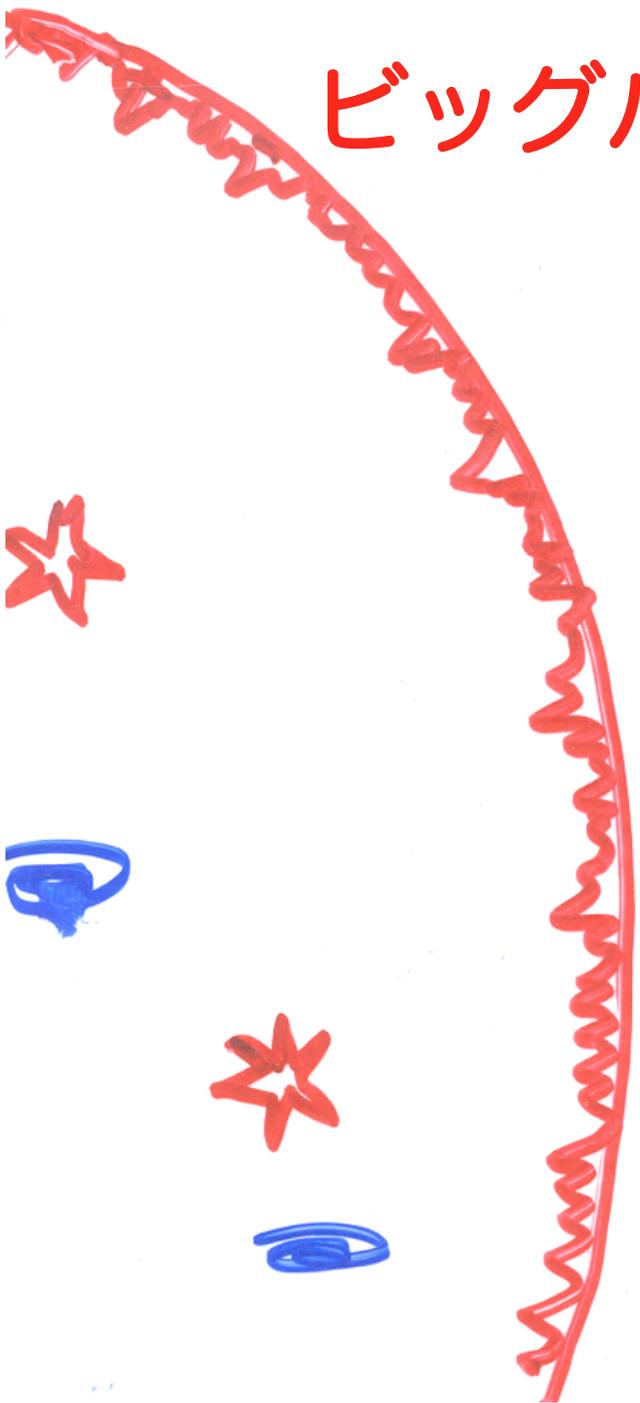
ビッグバン



地球



ビッグバン



宇宙から多宇宙へ

素粒子の実際的な理論では 多くのスカラー場 が存在し、それらのポテンシャルエネルギーは 多くの異なる最小値 をもつ。それぞれの最小値では異なった質量をもつ素粒子が存在し、それらの相互作用は異なる法則に従う。

永久インフレーション中の量子揺らぎによって、宇宙の異なる領域では異なるスカラー場の最小値が実現する。宇宙は莫大な数の領域に分かれ、各領域では異なる物理法則が実現される。

宇宙の遺伝情報

より正確には、宇宙全体が1つの遺伝情報に支配されているかのように、**唯一の**物理法則が存在しているかもしれない。しかし、この法則は、例えば水が固体、液体、気体として実現するように、違った形で実現してもおかしくない。素粒子物理学では、スカラー場の値によって、**有効理論**は違ってくるのである。

インフレーション中の量子揺らぎによって、あたかも遺伝情報が変わるかのように、スカラー場がポテンシャルの1つの極小値から別の極小値へ移る。いったん宇宙の小さな領域にこの遷移が起これば、インフレーションによってこの領域は指数関数的に拡大される。

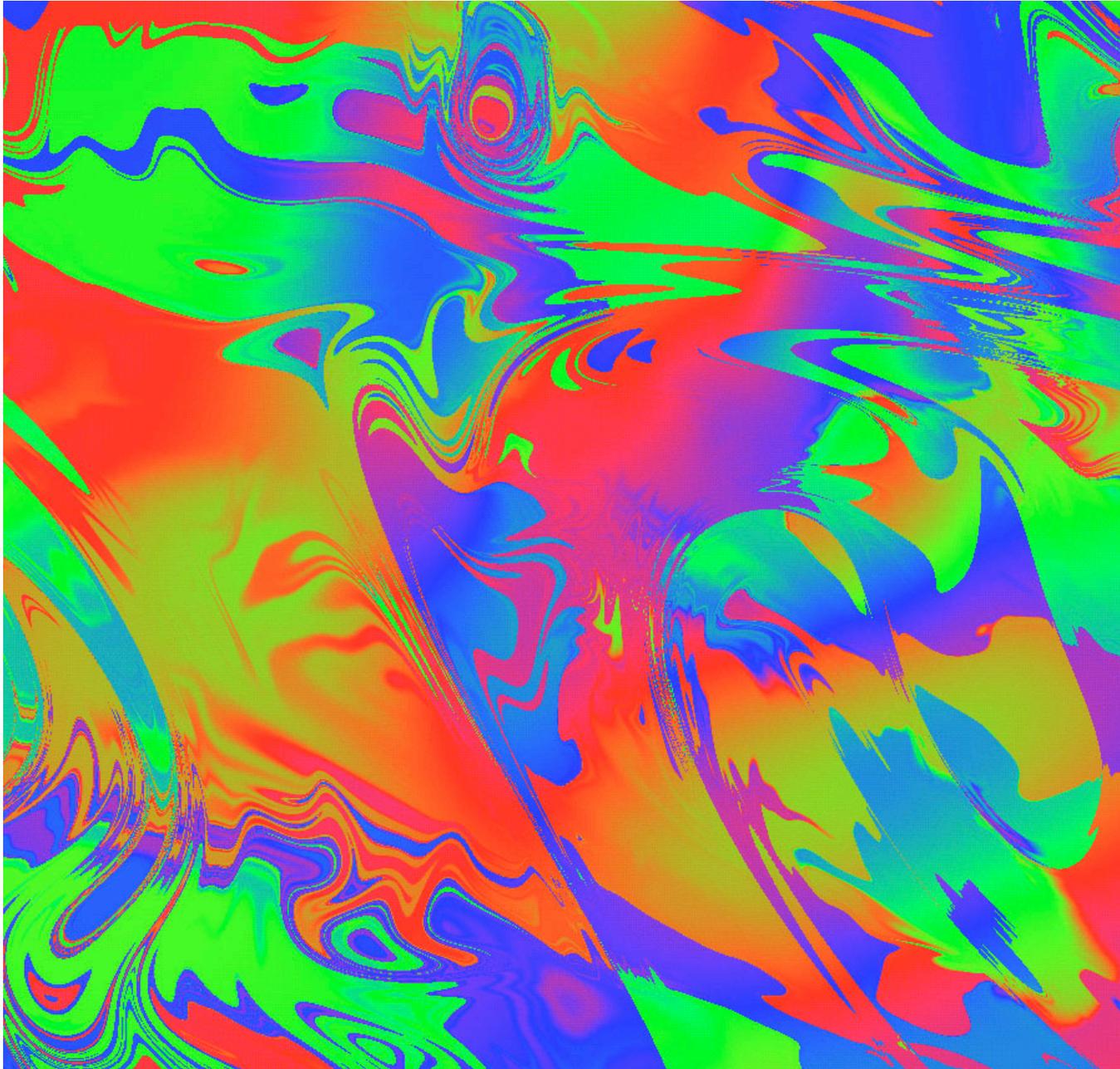
宇宙の突然変異

ひも理論ランドスケープ

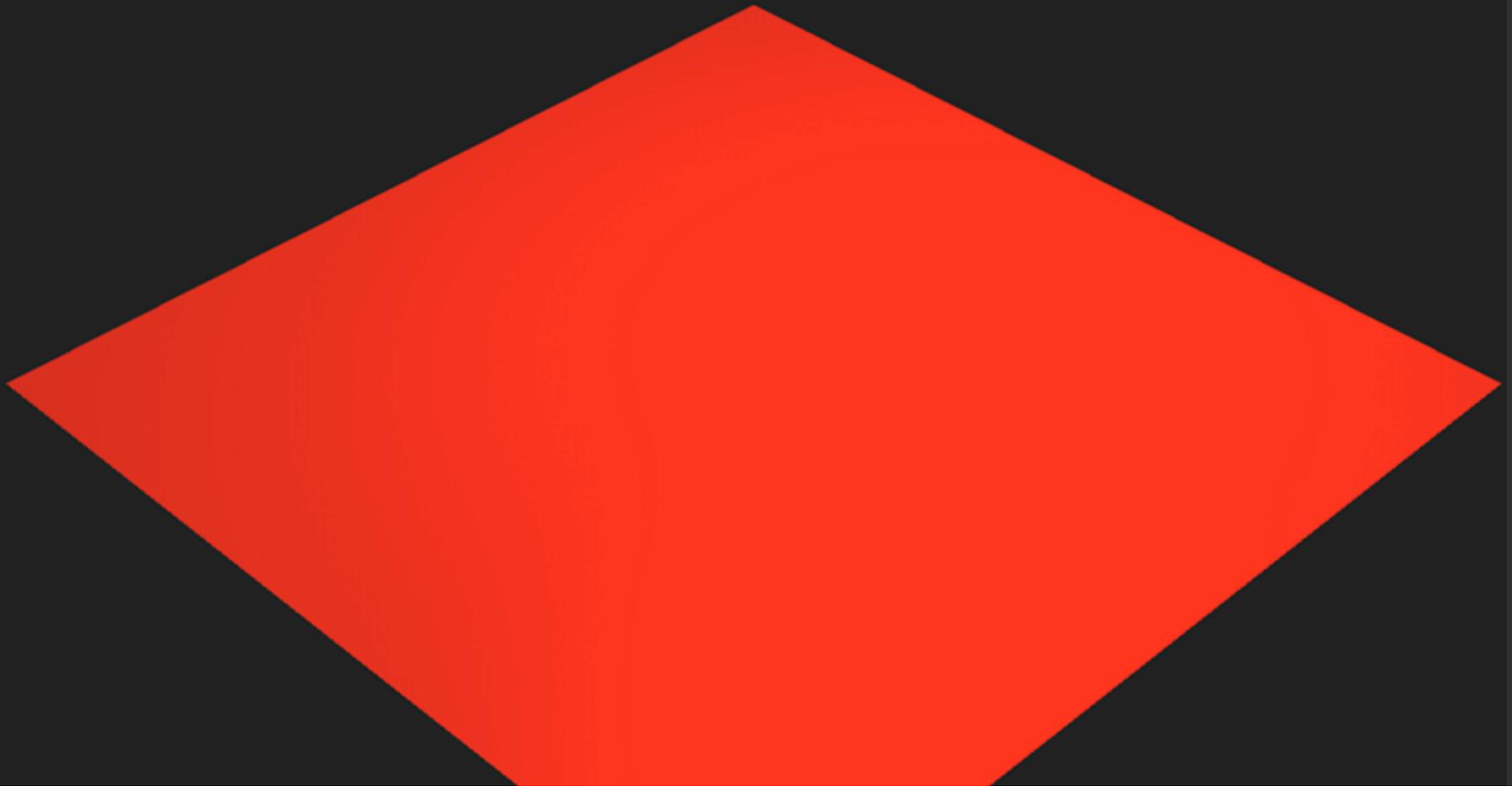


およそ $10^{100} - 10^{1000}$ 個
の様々な極小値

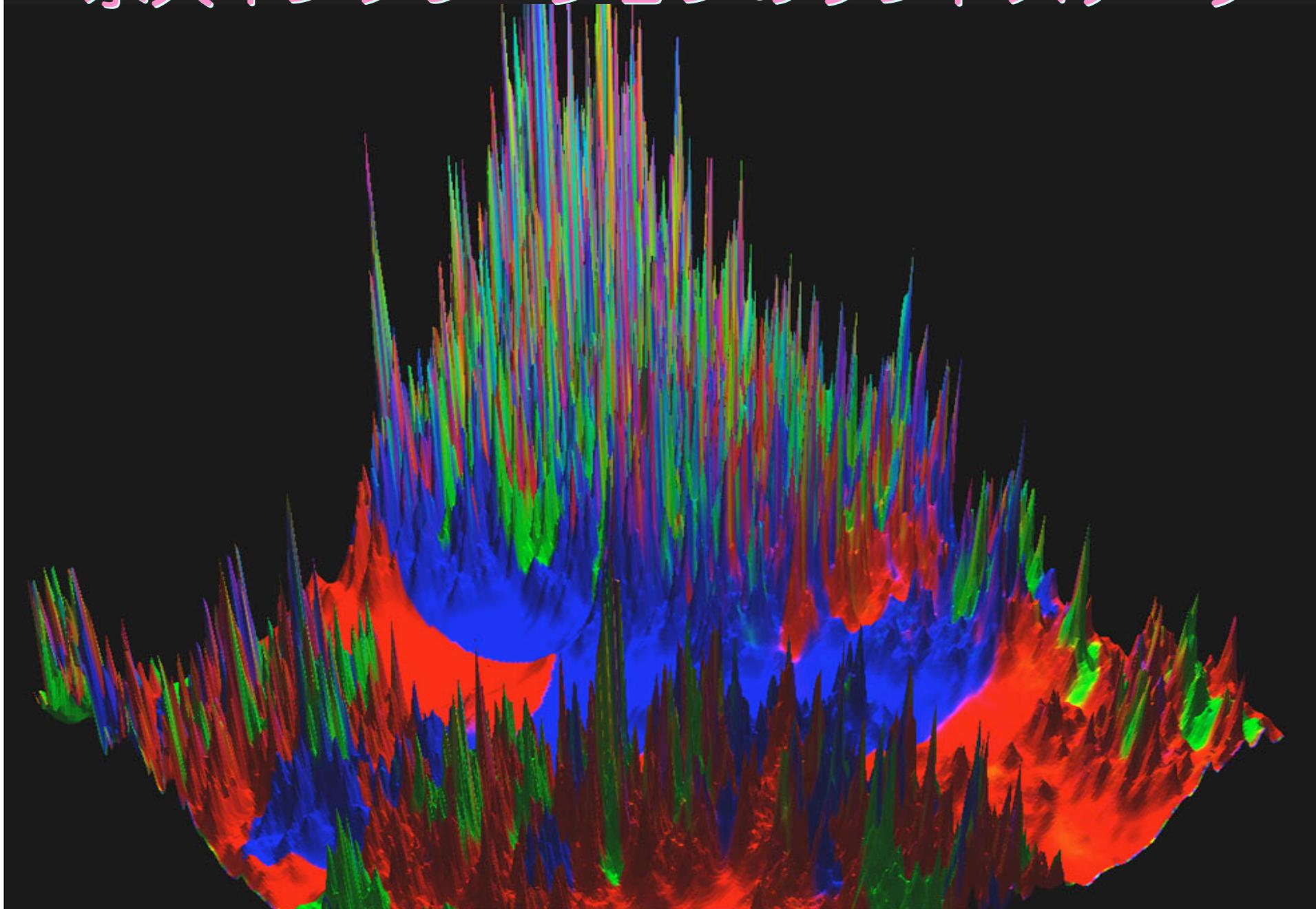
カンディンスキー宇宙



ランドスケープの生成



永久インフレーションのランドスケープ



ひも理論でのすべての真空状態は準安定で、やがて他の状態に遷移する。遷移によって我々の宇宙は10次元になるかもしれないし、潰れてなくなってしまうかもしれない。

しかし、永久インフレーションのおかげで、宇宙は全体としては不滅である。

自己増殖するインフレーション宇宙

