高次元ゲージ理論とインフレーション

稲見　武夫、水上　史絵 、小山　陽次 (中央大)
林　青司 (神戸大)
林　家民 (清華大)

2010　大阪大学

目次

1. 問題点とアプローチ
2. Introduction
3. Model
4. 結果、考察

1.　問題点とアプローチ

問題は何か

1:inflaton potentialのfine-tuning

2:ゲージ階層性問題

解決へのアプローチ

高次元ゲージ場の余剰次元成分$A_5^{(0)}$がつくるpotentialを用いる、SUSYを導入

$A_5^{(0)}$=inflaton＝Higgsと同定しインフレーションのモデルをつくる

何が分かったか

２つのfine-tuning問題を同じ機構で同時に解決できる

SUSYの役割

2.Introduction

インフレーション：初期宇宙の急激(指数関数的)な膨張

$$a(t) \sim e^{Ht}$$

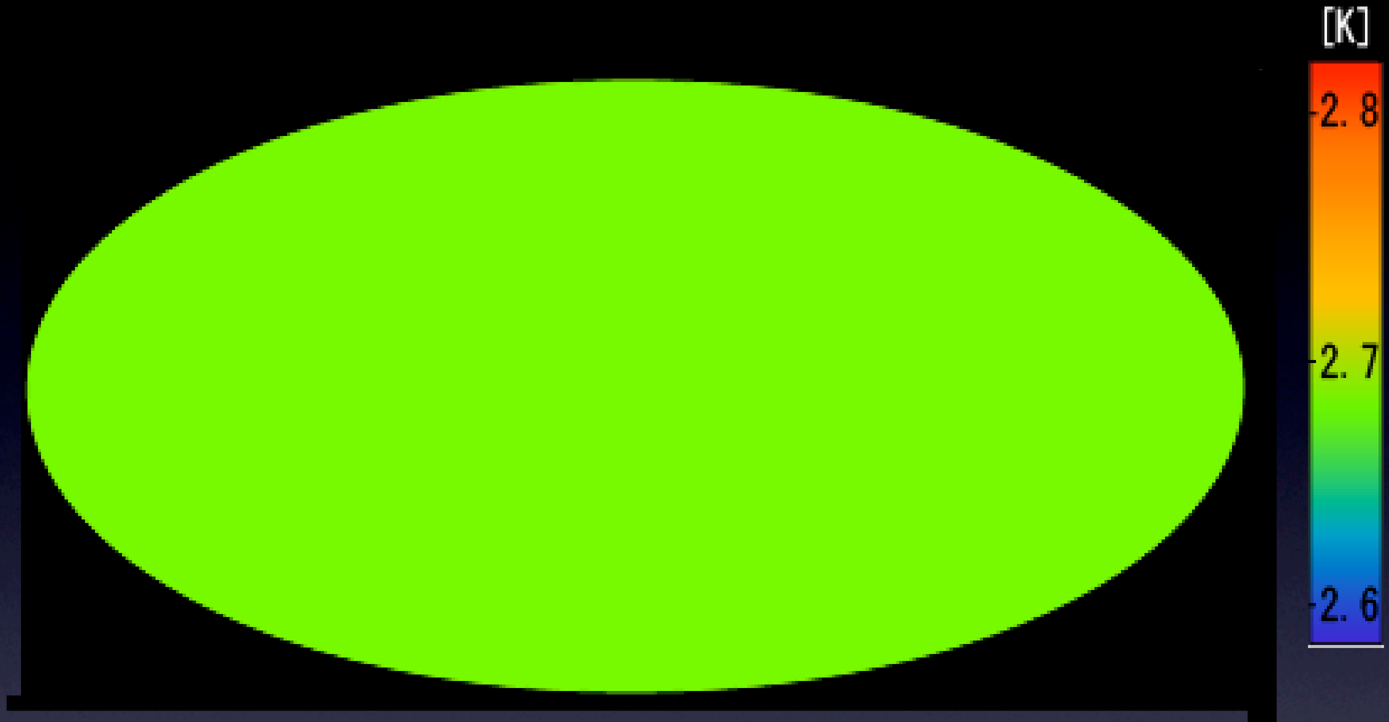
a :宇宙のスケール,　$H \equiv \dot{a}/a$: ハッブルパラメータ

＜インフレーションの証拠＞

1. CMB(宇宙背景放射)の温度揺らぎの
   観測結果を再現できる。
2. ビッグバンモデルのもつ問題
   (地平線、平坦性、モノポール...)を解決できる。
3. 初期宇宙がなぜ膨張したかを説明できる。

⇒ インフレーションが現在の宇宙を創った

宇宙背景放射



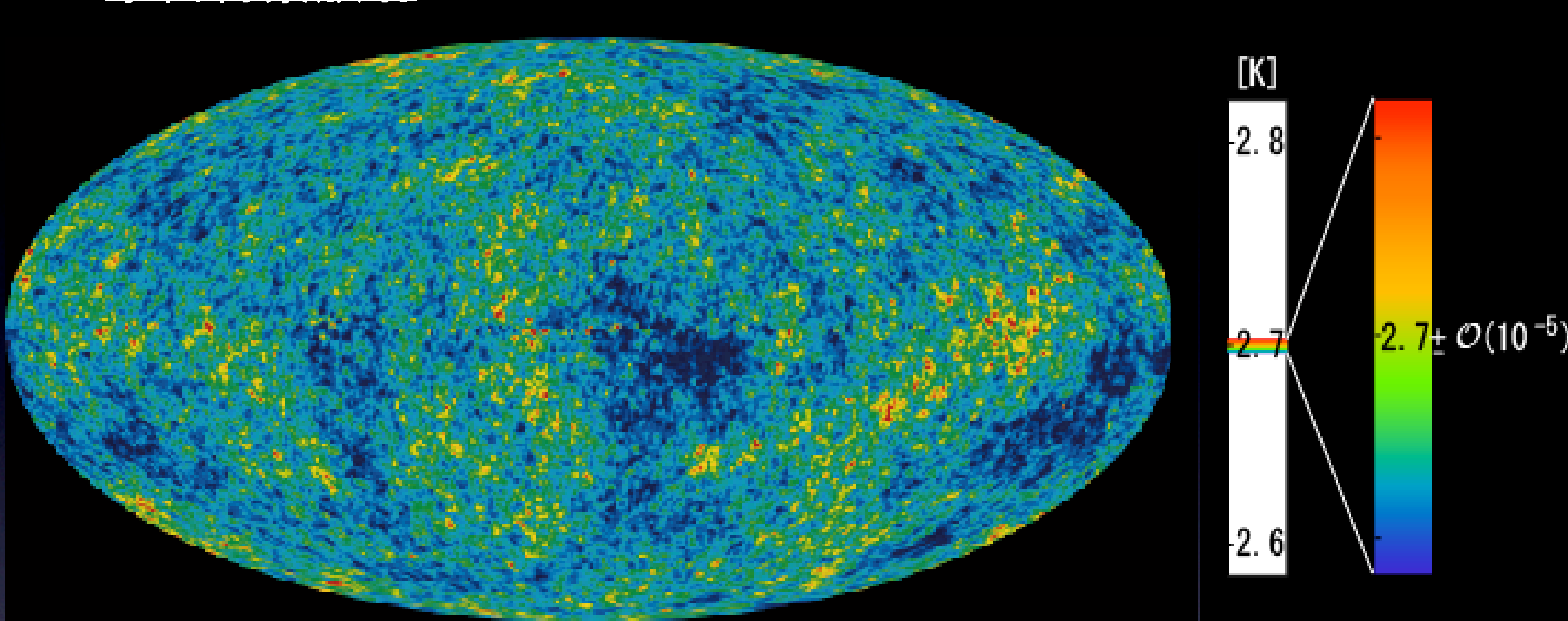
・宇宙が約39万歳のときの写真。(宇宙の晴れ上がり、decoupling)
・全体としてほぼ同じ温度である。(現在約2.7K) (⟶ 地平線問題)

⟶ インフレーションがあれば解決。

・約数十分角から数度のスケールで見られる約10^{-5} K程度の非等方性

⟶ これを再現するようなmodelのみに制限される。

宇宙背景放射



- 宇宙が約39万歳のときの写真。(宇宙の晴れ上がり、decoupling)
- 全体としてほぼ同じ温度である。(現在約2.7K) (⟶ 地平線問題)

  ⟶ インフレーションがあれば解決。

- 約数十分角から数度のスケールで見られる約10^{-5} K程度の非等方性

  ⟶ これを再現するようなmodelのみに制限される。

＜インフレーションの実現＞

Friedmann eq

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho$$

ρ :エネルギー密度

G :ニュートン定数

指数関数的な$a(t)$を得るためには宇宙が真空のエネルギーで満たされていることが必要。

$\rho_{\text{univ}} \sim \rho_{\text{vac}} = \underline{\text{const.}}$　負の圧力 ⇒ 斥力($\ddot{a}(t) > 0$)

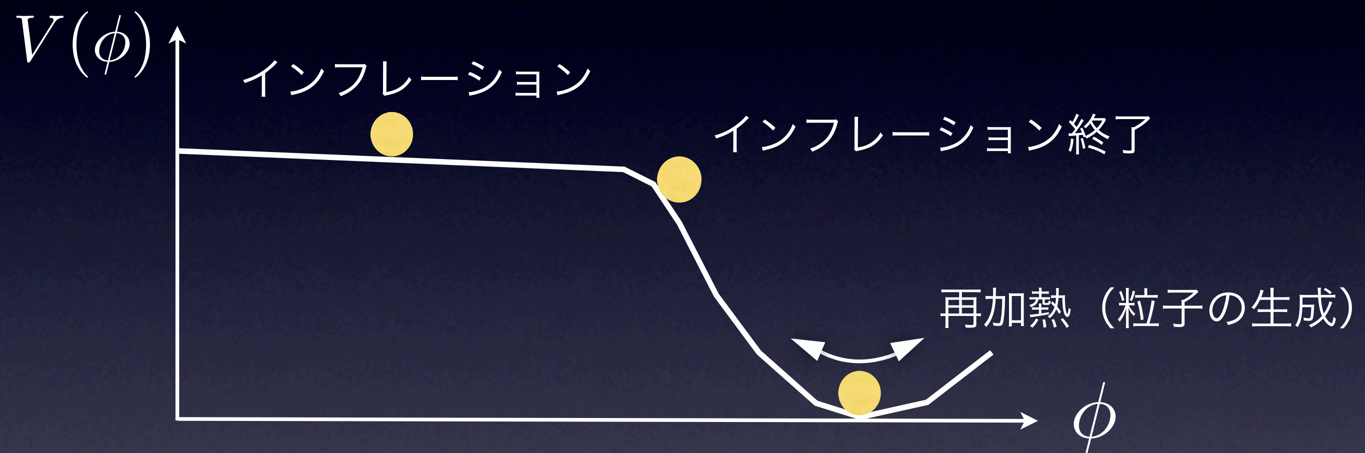
インフレーションはscalar場のpotentialを使うと容易に実現できる

⇒ inflaton potential $V(\phi)$ = flat

＜インフレーションのモデルづくりと問題点＞

(slow-roll)インフレーションのモデル

⇒ $V(\phi) \sim$ flat + reheating + 揺らぎの生成



flat ⇒ 具体的にはslow-rollパラメータ

$$\epsilon \equiv M_P^2/2\,(V'/V)^2 \quad \eta \equiv M_P^2 V''/V$$

に $\epsilon, \eta << 1$ を要求することになる

揺らぎに対しては

インフレーション中に生成されるinflaton場の量子揺らぎ$\delta\phi$よる曲率揺らぎ

$$\delta_H \simeq V^{3/2}/M_P^3 V' \simeq 2\times 10^{-5}$$

重力波の大きさへの制限

$$\delta_{\rm grav} \simeq V^{1/2}/M_P^2 < 10^{-5}$$

上記のようなpotentialを与え、インフレーションを実現できるモデルをつくりたい。

new　　chaotic $V(\phi)=\sum_n C_n\phi^n$

hybrid $V(\phi,\omega)$　　natural ϕ = PNGB

SUSY

$\epsilon, \eta << 1 \;\; \Rightarrow \;\; \phi, (\omega) > M_P$

$V(\phi)$ を量子レベルで評価できない

$\delta_H, \delta_{\rm grav} \;\; \Rightarrow \;\; V(\phi)$ のパラメータに強い制限を課す

量子レベルでのfine-tuning problem

(非摂動的な量子重力の効果 ⇒ global sym を破る)

量子効果も取り入れたモデル作りは

４次元の場の理論では困難

高次元ゲージ理論なら解決

potentialはloopレベルで現れ、ゲージ対称性をもつ

Extranatural inflation

[Arkani-Hamed et al (2003)]

$$\boxed{A_5^{(0)} = \phi \text{ (inflaton)}}$$

$$V(\phi) \sim \frac{1}{(2\pi R)^4}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^5}\cos\left(2n\frac{\phi}{f}\right)+\cdots,$$

R: コンパクト化半径

g: 結合定数　$f = \dfrac{1}{2\pi g R}$

ポテンシャルはϕの全域で有限で、きちんと評価できる

R〜プランク長ととれば、fine-tuneを必要とせず

インフレーションが実現できる

gauge-Higgs統一

[Hatanaka Inami and Lim (1998)]

$$\boxed{A_5^{(0)} = h \text{ (Higgs)}}$$

$$m_h^2 \sim g^2\frac{1}{R^2}$$

Λに依らずに有限のため、Rを適切に

決めれば、fine-tuneはいらない

3. Model

ｉ) 5D $\mathcal{N}=1$ 超対称ゲージ理論

ii) ゲージ群 $SU(2)$

iii) R対称性 $SU(2)_R$

$$\mathcal{L}_{gau} = \mathrm{Tr}\,[-\frac{1}{2}(F_{MN})^2 + i\bar{\lambda}_i\gamma^M D_M\lambda^i + \ldots]$$

$$(i=1,2)$$

[Pomarol and Quiros (1998)]

(matterを加えてもパラメータの結果はあまり変わらない)

$$A_5^{(0)} = h = \phi$$

~~SUSY~~

Scherk-Schwarz 機構[1979]

S^1コンパクト化

$$A_M(x,y) = \Sigma_{n=-\infty}^{\infty} A_M^{(n)}(x) e^{i\frac{n}{R}y}$$

$$\lambda^i(x,y) = \Sigma_{n=-\infty}^{\infty} \lambda^{i(n)}(x) e^{i\frac{1}{R}(n+\underline{\frac{\beta^a\sigma^a}{2\pi}})y}$$

超対称性を破る部分

ϕ($A_5^{(0)}$)のpotentialは次のように求まる

$$V(\phi) = -\frac{3}{8\pi^6}\frac{1}{R^4}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^5}(1+\cos(2n[\phi/f]))(1-\cos(n\beta))$$

$$f = \frac{1}{2\pi g R}$$

$\beta = \sqrt{(\beta^a)^2}$: SUSYの破れのパラメータ

解析にはn=1の項だけを用いる(良い近似になっている)

<インフレーションの実現に必要な条件>

1) slow-roll 条件

$\epsilon, \eta << 1$ $\epsilon \equiv M_P^2/2\left(V'/V\right)^2$, $\eta \equiv M_P^2 V''/V$

2) spectral index (揺らぎのスケール依存性)

$n_s = 1 - 6\epsilon + 2\eta$ $0.95 \lesssim n_s \lesssim 0.97$ (観測量)

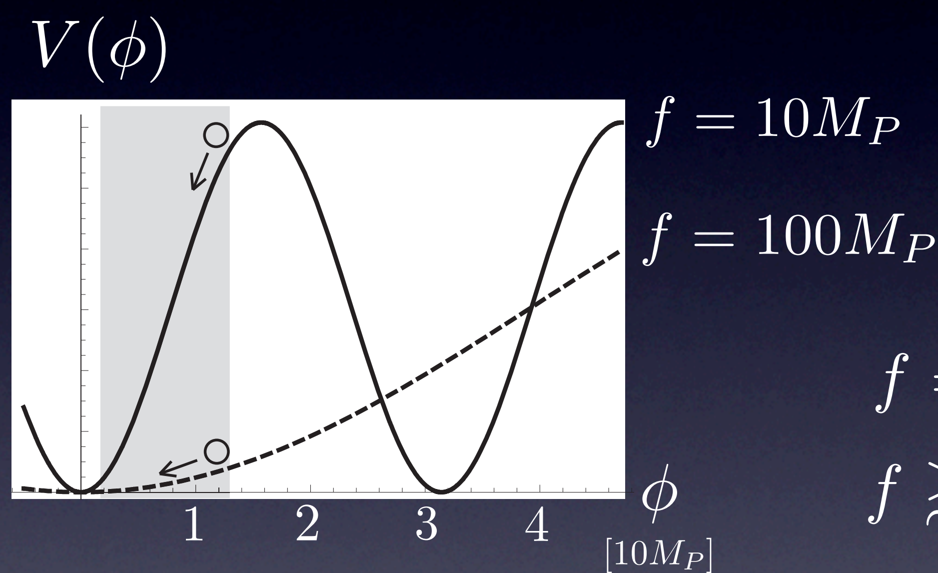
3) number of e-foldings N への制限

4) 宇宙の曲率揺らぎ δ_H の生成

5) 量子重力を無視できる ⇒ R への制限

2)〜4)は $f = \frac{1}{2\pi g R} \gtrsim 10 M_P$で満たすことができる

fの値によってpotentialのどこでインフレーション
が起こるのかが異なる



$f = 10M_P$ ⇒ cosine型

$f \gtrsim 100M_P$ ⇒ 2次関数

いずれの場合も4) δ_H の生成

⇒ 少しの違いはあるが $m_\phi \sim 10^{13}\mathrm{GeV}$

f の典型的な２つの値に対して理論のパラメータ g, R, β の取りうる値は

i) $f = 10M_P \quad g \simeq 0.2 - 0.0005, \quad \beta/R \simeq 10^{15} - 10^{18}\mathrm{GeV}$

ii) $f = 100M_P \quad g \simeq 0.02 - 0.0002, \quad \beta/R \simeq 10^{14} - 10^{17}\mathrm{GeV}$

4. 結果,考察

fine-tuningなしにHiggs、inflatonのpotential(質量)を与えることができた。

- g の現実的な値は β をかなり小さい値にとる、つまりSUSYの破れのスケール β/R を低くすることで実現できる。
- Higgsの質量は $m_\phi \sim 10^{13}\mathrm{GeV}$ と決まってしまう。これは $SO(10)$ に現れる中間スケールの対称性を破るHiggsと解釈することができるか
インフレーションが中間スケールで起きるのか
inflaton=Higgsどこまで現実的か