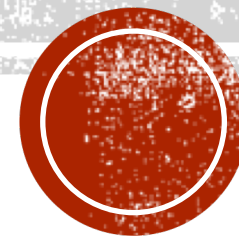


INFLATION FROM HIGHER DIMENSIONS

Based on Phys. Rev. D96 (2017) 123530 with Sergei V. Ketov



首都大学東京大学院 物理学専攻
高エネルギー理論研究室 博士後期課程3年

中田 洋

この発表の目的

- 重力・宇宙論の諸問題へのアプローチとしての修正重力理論を紹介する。
- 高次元時空における修正重力理論に基づくインフレーションモデルと、モデルへの制限を紹介する。



CONTENTS

1. Introduction
2. 修正重力理論の例 : Starobinsky model
3. 高次元修正重力理論
4. 8次元修正重力理論
5. まとめ
6. Future work



物理学者の目標

- 『物質』とその間に働く『力』の法則を解き明かし、できるだけ簡潔に(美しく)説明する：統一理論の完成
 - ・ ・ ・ 超弦理論(10次元)、M理論(11次元)
- 宇宙がどう始まり、この先どうなっていくかを説明する。
 - ・ ・ ・ ビッグバン宇宙論 + インフレーション
 - + ダークエネルギー
 - + ダークマター
- あわよくば統一理論で宇宙の全てを...



余剰次元はなぜ見えないのか？

超弦理論/M理論では時空は10 or 11次元である必要がある。
しかし、我々は時間+3次元空間の4次元時空しか知覚できていない。



何らかの機構により余剰次元は見えなくなっている？

Kaluza-Klein理論： 余剰次元が小さく閉じていて見えない

Brane worldモデル： 標準模型の素粒子が3次元の膜の上でしか運動できない



EINSTEINの重力理論

Einsteinは1905年に特殊相対性理論、
1915年に『**時空の幾何学**』としての重力理論である一般相対性理論を発表した。
この理論により、時空そのものも動的な物理的対象となった。

$$\text{作用 : } S = \frac{1}{\kappa^2} \int d^4x \sqrt{-g} (R - 2\Lambda) + S_m$$

→ Einstein方程式:
$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}}_{\text{時空の幾何学}} = \underbrace{\kappa^2 T_{\mu\nu}}_{\text{物質の分布}}$$



ビッグバン宇宙論

- ・ Freidmannは『一様等方性』を仮定して宇宙膨張・収縮を記述する方程式を導出
- ・ Hubbleの銀河の観測により宇宙膨張の発見



宇宙は高温・高密度の小さい『火の玉』から始まった？

ビッグバン宇宙論

観測技術の発展に伴い

宇宙の加速膨張の発見・・・ダークエネルギー
宇宙の大規模構造・・・ダークマター

平坦性問題
地平性問題

(なぜ宇宙は膨張した？)



宇宙初期の指数関数的膨張:
インフレーション理論

新しい物質が必要？

or

重力理論の**修正**が必要？



修正重力理論の例: STAROBINSKYモデル

- 修正重力理論とは、宇宙論の諸問題を解決するためにEinsteinの重力理論を修正した理論。
- 修正重力理論は新しい場を導入することなくその効果を時空の幾何学的性質として取り込むことができる。

Starobinskyモデル:

$$S_{st} = \frac{1}{\kappa^2} \int d^4x \sqrt{-g} \left[R + \frac{1}{6M^2} R^2 \right]$$

Weyl変換:

$$g_{\mu\nu} = \Omega^{-2}(x) \tilde{g}_{\mu\nu}$$

$$S_{st} = \frac{1}{\kappa^2} \int d^4x \sqrt{-\tilde{g}} \tilde{R} + \int d^4x \sqrt{-\tilde{g}} \left[-\frac{1}{2} \tilde{g}^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - V(\phi) \right]$$



STAROBINSKYモデルのポテンシャル

観測からの制限：

$\phi \gg 1$ (平坦部分)で
インフレーションが起
こるとすると

$$V(\phi) \approx V_0 - V_1 e^{-\alpha\phi}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

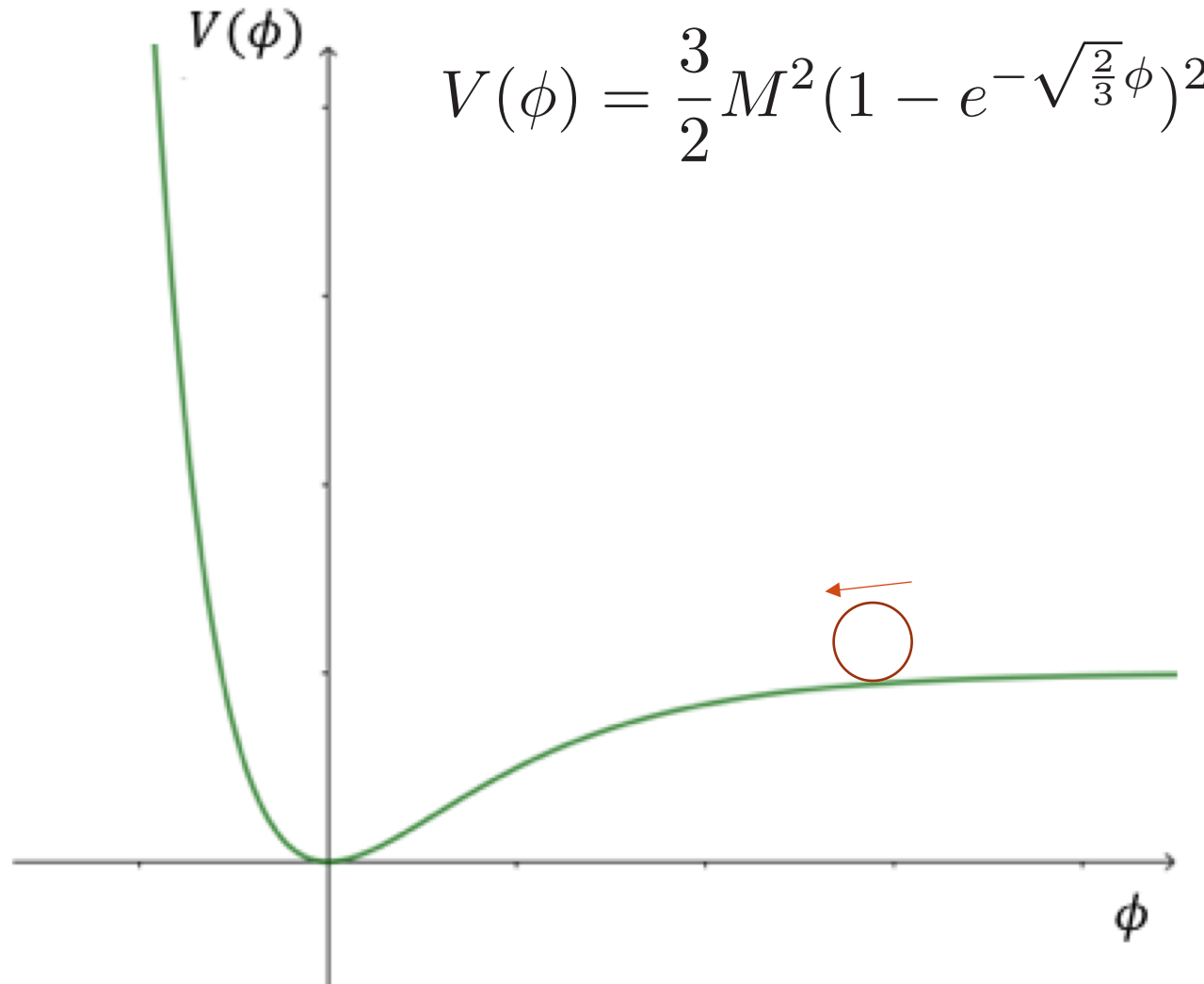
スカラー・テンソル比は

$$r = \frac{8}{\alpha^2 N_e^2} \quad N_e = 50 \sim 60$$

e-folding number

➡ $r \sim 0.048$

より、観測からの制限 $r < 0.08$
を満たす



高次元時空における修正重力理論

我々はStarobinskyモデルを一般化した修正重力理論と、理論への制限を導出した①
: S.V.Ketov, H.N (2017)

その後、p階反対称テンソル場を加えたモデルに拡張された②
: S. P. Otero, F. G. Pedro and C. Wieck(2017)

$$S_D = \frac{M_D^{D-2}}{2} \int d^D X \sqrt{-g} [R + \gamma_D R^n - 2\Lambda \quad \textcircled{1}$$

$$+ g^{\mu_1 \nu_1} g^{\mu_2 \nu_2} \dots g^{\mu_p \nu_p} F_{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_p} F_{\nu_1 \nu_2 \dots \nu_p}] \quad \textcircled{2}$$



① Starobinsky型のinflationを実現するために

実スカラー場である： 次元Dは4の倍数

ポテンシャルが平坦な部分を持つ： $n = \frac{D}{2}$

インフラトンの質量が正である： $\Lambda > 0$ でなければならない

② 余剰次元のコンパクト化、体積の安定化のためにp階反対称テンソル場を導入。
安定化するポテンシャルを構成するには

$$p = n$$

でなければならない

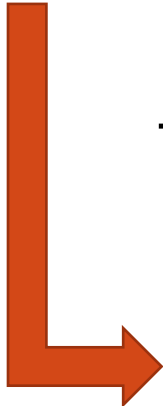


8次元修正重力理論

モデルへの制限を踏まえ、8次元の修正重力理論のインフレーションモデルを導出する:

$$S = \frac{M_8^6}{2} \int d^8 X \sqrt{-g_8} [R_8 + \gamma_8 R_8^4 - 2\Lambda_8 \\ - g^{A_1 B_1} g^{A_2 B_2} g^{A_3 B_3} g^{A_4 B_4} F_{A_1 A_2 A_3 A_4} F_{B_1 B_2 B_3 B_4}]$$

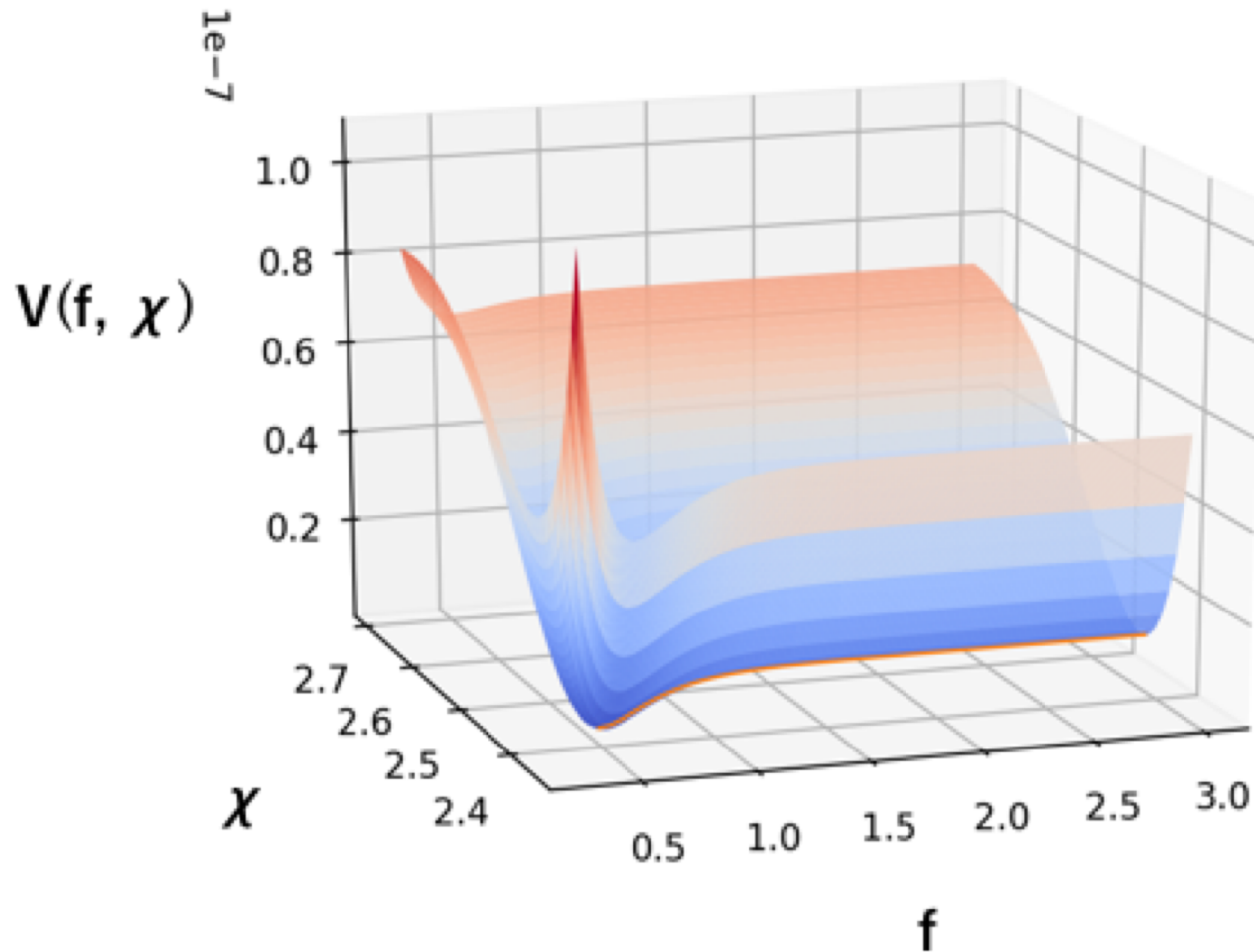
Weyl変換→コンパクト化→Weyl変換


$$S_4[\hat{g}_{\alpha\beta}, \chi, f] = \frac{M_{Pl}^2}{2} \int d^4 x \sqrt{-\hat{g}} [\hat{R} - 12\hat{g}^{\alpha\beta} \partial_\alpha \chi \partial_\beta \chi \\ - 42\hat{g}^{\alpha\beta} \partial_\alpha f \partial_\beta f - M_{Pl}^2 V(\chi, f)]$$



8次元修正重力理論から導出したポテンシャル

$$V(\chi, f) = [a^{-2}(1 - e^{-6f})^{\frac{4}{3}} + 2\tilde{\Lambda}_8 e^{-8f}]e^{-4\chi} - 2e^{-6\chi} + F^2 e^{-12\chi}$$



f 方向 : Starobinsky型の
インフレーション

χ 方向 : 余剰次元の体積
の安定化

f を規格化すると、 $\alpha = \sqrt{\frac{6}{7}}$

➡ $r \sim 0.037$



まとめ

- Starobinskyモデルを高次元時空で一般化した修正重力理論では、

(1) D が4の倍数

(2) $n=D/2$

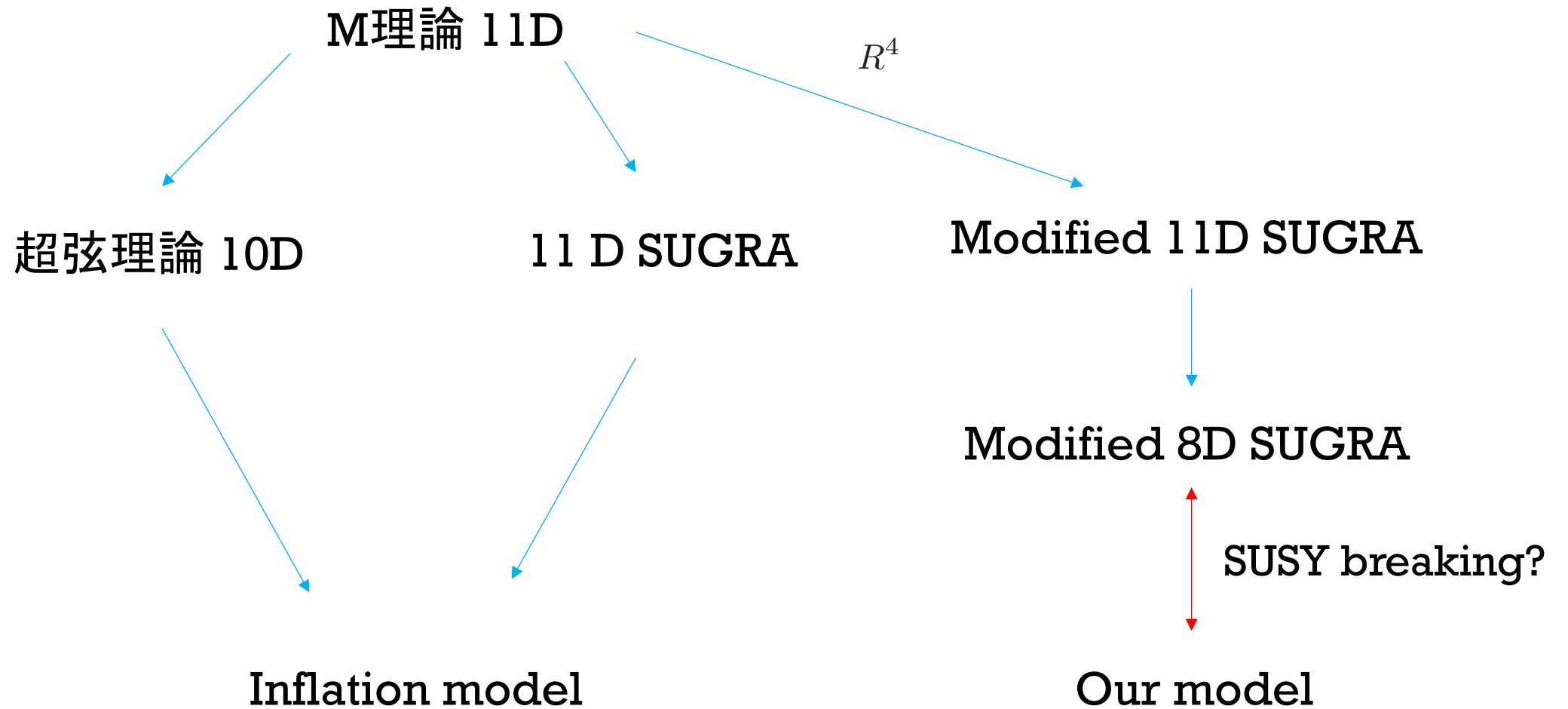
(3) $\Lambda > 0$

コンパクト化のため p 階反対称テンソル場を加えたモデルでは、 $p=n$ である必要がある。

- $D=4$ のモデルは4次元のStarobinskyモデルよりよく観測からの制限を満たす。



FUTURE WORK



ご静聴ありがとうございました！

