

Matter Creation in Generalized Galilean Genesis

西 咲音 (立教大学大学院 理学研究科)

Abstract

初期宇宙の標準的なモデルとしてインフレーションが広く考えられているが、その代替モデルの一つとして Galilean Genesis というものがある。このモデルには宇宙がミンコフスキー時空から始まるという興味深い特徴がある。これまでの研究では、Galileon 理論を用いて記述されていた様々な Genesis モデルの Horndeski 理論を用いた一般化と拡張を行った。Horndeski 理論は単一のスカラー場を用いたスカラーテンソル理論を一般化したものである。インフレーションの解決した平坦性問題などの諸問題はこれまでの研究で解決されることがわかったが、次段階としてこの時期が正常に次の時期へと繋がるかについての検討が必要であると考えられる。

1 Introduction

初期宇宙にはインフレーションが起こったと広く考えられているが、現在では様々なインフレーションの代替モデルも考えられている。本研究の目的は数多くある代替モデルのうちの一つである Galilean Genesis というモデルに注目し、このモデルが与える様々な観測的予言について議論をしていくことである。この Genesis モデルも加速膨張が起きるものであるため正確にはインフレーションに分類されるが、ここでは指数関数的な膨張との比較をするためにド・ジッターインフレーションをインフレーションと呼ぶこととする。本発表では Genesis 期から次の時期への遷移について注目する。一般化された Galilean Genesis モデルについて次の時期としてド・ジッターインフレーションに繋がるような更なる拡張を行い、粒子生成がどのようにされるかを議論する。

2 Horndeski

修正重力理論のうち単一スカラー場を用いたスカラーテンソル理論は様々なものがあるが、これらを一般化したものとして Horndeski 理論 (3) というものがある。この理論は 1972 年に G.Horndeski により構築されたもので、近年 T.Kobayashi らによりインフレーション宇宙論 (?) の文脈で用いられたことで再び注目されるようになった。ラグランジアンは以下のように

表される。

$$\begin{aligned}
 S_{\text{Hor}} &= \int d^4x \sqrt{-g} (\mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5), \quad (1) \\
 \mathcal{L}_2 &= G_2(\phi, X), \\
 \mathcal{L}_3 &= -G_3(\phi, X) \square \phi, \\
 \mathcal{L}_4 &= G_4(\phi, X) R + G_{4X} [(\square \phi)^2 - (\nabla_\mu \nabla_\nu \phi)^2], \\
 \mathcal{L}_5 &= G_5(\phi, X) G^{\mu\nu} \nabla_\mu \nabla_\nu \phi \\
 &\quad - \frac{1}{6} G_{5X} [(\square \phi)^3 - 3 \square \phi (\nabla_\mu \nabla_\nu \phi)^2 \\
 &\quad + 2(\nabla_\mu \nabla_\nu \phi)^3]. \quad (2)
 \end{aligned}$$

このラグランジアンには G_2, G_3, G_4, G_5 というスカラー場 ϕ とその運動項 $X := -\frac{1}{2}(\partial\phi)^2$ の任意関数があり、これらに具体的な形を与えることで一般相対論などに帰着させることができる。このラグランジアンには二階微分を持つ項が含まれているが、運動方程式等を導出した際に三階以上の微分を持つ項が現れないという特徴があるように、Horndeski 理論は運動方程式が二階になる最も一般的なスカラーテンソル理論である。

3 Galiean Genesis

Galilean Genesis モデルは P.Creminelli らにより提唱された初期宇宙のモデルである (1)。このモデルは先行研究では Galileon 理論を用いて記述されていたが、本研究ではこの種のモデル (とそのさらなる一般化) を Horndeski 理論の枠組みで統一的に扱

う．この一般化された Genesis モデルは任意関数に以下のものを与えることで得られる．

$$G_2 = e^{2(\alpha+1)\lambda\phi} g_2(Y), \quad G_3 = e^{2\alpha\lambda\phi} g_3(Y), \\ G_4 = \frac{M_{\text{Pl}}^2}{2} + e^{2\alpha\lambda\phi} g_4(Y), \quad G_5 = e^{-2\lambda\phi} g_5(Y), \quad (3)$$

ここで λ と α は定数, $Y := e^{-2\lambda\phi} X$ である．既存のモデルでは $\alpha = 1$ となっている．このモデルにおいては, Genesis 期に Null Energy Condition を安定のまま破るとい特徴があり, この時期でのスケールファクター a が $-\infty < t < 0$ で

$$a \simeq 1 + \frac{1}{2\alpha} \frac{h_0}{(-t)^{2\alpha}} \quad (4)$$

で与えられる．つまり Genesis モデルのシナリオでは宇宙がミンコフスキー時空から始まる．さらにハッブルパラメータは

$$H \simeq \frac{h_0}{(-t)^{2\alpha+1}} \quad (-\infty < t < 0), \quad (5)$$

となるため, ハッブルパラメータ $H(t)$ が減少していくことがわかる．この点はインフレーションと大きく異なる．このモデルが妥当であるかどうかを判断するためには様々な観測的予言について考察を行う必要がある．そこで本研究では Genesis 期から次の時期への遷移と, この時に生成される物質について注目する．

4 Modification

このモデルの拡張として 3 における関数 G_2 について

$$G_2 = \frac{e^{2(\alpha+1)\lambda\phi}}{1 + e^{2(\alpha+1)\lambda\phi}} g_2(Y), \quad (6)$$

とする．このとき時間 $t \rightarrow -\infty$ では元の関数に帰着し, $t \rightarrow 0$ において

$$G_2 = X, \quad (7)$$

となり, Genesis 期が終了する頃では関数 G_2 はスカラー場 ϕ の運動項となる．これまでの作用では数値解析により $t \rightarrow 0$ でスケールファクターが発散してしまうという結果が得られていたため, Genesis 期

がどのように終わるか, 終了する時刻はどのように記述されるかが不明であったが, (6) に注目すると $e^{2(\alpha+1)\lambda\phi} \simeq 1$ となる時刻で Genesis 期が終わることがわかる．

5 Matter creation

時間に伴う関数 G_2 の変化により, 重力変更による粒子生成が起きると考えられる．生成される粒子を χ としてラグランジアンを

$$\mathcal{L}_\chi = -\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \chi \partial_\nu \chi - \frac{1}{2} m^2 \chi^2, \quad (8)$$

とする．生成される粒子 χ と Genesis を引き起こしていたスカラー場 ϕ の直接的な相互作用はここでは考慮せず, 単純な場合を考える．

6 Conclusions and Discussion

一般化された Galilean Genesis についてと, このモデルのさらなる拡張により Genesis 期の終了についての議論が可能となることを示した．本発表では粒子生成について現在得られた結果についての報告を行う．

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします．また本研究は特別研究員奨励費 (15J04044) の助成をうけたものである．

Reference

- [1] P. Creminelli, A. Nicolis and E. Trincherini, JCAP **1011**, 021 (2010) [arXiv:1007.0027 [hep-th]].
- [2] S. Nishi and T. Kobayashi, JCAP **1503**, no. 03, 057 (2015) [arXiv:1501.02553 [hep-th]].
- [3] G. W. Horndeski, Int. J. Theor. Phys. **10**, 363 (1974).