

Generalized Galilean Genesis

西 咲音 (立教大学大学院 理学研究科)

Abstract

初期宇宙では一般的にはインフレーションが起きていたと考えられているが、現在様々なインフレーションの代替モデルが考えられている。その一つに Galilean Genesis というモデルがあり、このモデルは Horndeski 理論から与えられるものである。Horndeski 理論は単一スカラー場で記述されるスカラーテンソル理論を一般化したものであるため、今までモデルにより個別に行われてきた研究を包括的に行うことができるという特徴がある。Genesis モデルのシナリオでは、ミンコフスキー時空から始まる宇宙膨張が放射優勢期へとつながるため、宇宙のはじまりに特異点が存在しない。このモデルでは、Null Energy Condition を安定のまま破ることが知られている。本研究ではこの Genesis モデルの一般化を行い、インフレーションで解決される平坦性問題などの諸問題が Genesis モデルにおいても同等に解決されるかどうかを調べた。さらに、この時期に生じる一次ゆらぎについての振る舞いを調べた。

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。本発表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、インフレーションで解決される諸問題を Genesis モデルでも同等に解決されるかの検証と、Genesis 期におけるゆらぎの生成の進化を調べることが目的である。Genesis モデルは Horndeski 理論の解として表されるものである。このような研究により、数々の観測結果が本当にインフレーションでしか説明できないのかということを明らかにできる。

2 Horndeski 理論

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あるが、これらを一般化したとまとめた Horndeski 理論 (1) 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 (2) 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。

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

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。また、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。

3 Galilean 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 (3)。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 .

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

ここで λ と α は定数, $Y := e^{-2\lambda\phi} X$ である . 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う特徴があり, 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 . 宇宙がミンコフスキー時空から始まる場合, 宇宙に特異点が存在しないということになるため, Genesis モデルは大変興味深いモデルであるといえる .

4 Problems

まず, インフレーションが解決した問題のうち平坦性問題が Genesis モデルでも同等に解決されるかを調べた . 計量に空間曲率を入れて導出したフリードマン方程式の時間発展を調べると,

$$e^{2(\alpha+1)\lambda\phi} \dot{\rho}(Y_0) + \frac{3K}{a^2} \mathcal{G}_T = 0 \quad (5)$$

であり, 時間を $t \rightarrow 0$ とすると曲率を含む項以外の増加が曲率入りの項よりも大きく, 時間発展により曲率が無視できるようになる . 従って, 平坦性問題は Genesis モデルにおいても同等に解決されるといえる .

5 Perturbations

この Genesis 期における 1 次ゆらぎを調べた . 重力波の波動方程式は

$$\ddot{h}_{ij} + \frac{\dot{\mathcal{G}}_T}{\mathcal{G}_T} \dot{h}_{ij} - \frac{\mathcal{F}_T}{a^2 \mathcal{G}_T} \nabla^2 h_{ij} = 0 \quad (6)$$

で与えられる (2). Genesis モデルの最も簡単な例として

$$g_2 = -Y + Y^2, \quad g_3 = Y, \quad g_4 = g_5 = 0 \quad (7)$$

の場合について重力波の発展を調べパワースペクトルを求め, さらにこの最も簡単な例と

$$g_2 = -Y + Y^2, \quad g_3 = Y, \quad g_4 = 0, \quad g_5 = Y \quad (8)$$

や α を変化させた場合について比較を行った .

6 Conclusion

Horndeski 理論から記述される GalileanGenesis モデルについて . 平坦性問題や非等方性の問題を解決できるため, インフレーションモデルの代替理論として問題ないことが示された . さらに 1 次ゆらぎの振る舞いが得られたため, 今後の観測結果による比較が期待される . 今後は宇宙初期における二次の重力波の振る舞いを調べる予定である .

Acknowledgement

本研究及び夏の学校での発表を行うにあたり, 共同研究者であり丁寧な指導をしてくださった小林努准教授, 議論をしてくださった棚橋典大氏, 立教大小林研・原田研の皆様にご心より感謝いたします .

Reference

- [1] G. W. Horndeski, Int. J. Theor. Phys. 10 (1974) 363-384.
- [2] T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, Prog. Theor. Phys. **126**, 511 (2011) [arXiv:1105.5723 [hep-th]].
- [3] P. Creminelli, A. Nicolis and E. Trincherini, JCAP **1011**, 021 (2010) [arXiv:1007.0027 [hep-th]].
- [4] A. Padilla and V. Sivanesan, JHEP **1208**, 122 (2012) [arXiv:1206.1258 [gr-qc]].
- [5] K. N. Ananda, C. Clarkson, and D. Wands, Phys. Rev. D **75**, 123518 (2007).