

**立教大学学術推進特別重点資金（立教 S F R）**

**大学院学生研究**

**2015年度研究成果報告書**

|  |                                   |                             |                             |                |                             |                             |    |
|--|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|----|
| <b>研究科名</b>                                      | 立教大学大学院                           |                             |                             | 理学             | 研究科                         | 物理学                         | 専攻 |
| <b>研究代表者</b><br>(2016年3月現在のものを記入)                | 在籍研究科・専攻・学年                       |                             |                             | 氏名             |                             |                             |    |
|  | 理学研究科・物理学専攻・博士課程後期課程2年            |                             |                             | 矢嶋耕治 印         |                             |                             |    |
| <b>指導教員</b>                                      | 所属・職名                             |                             |                             | 氏名             |                             |                             |    |
|  | 理学部・准教授                           |                             |                             | 小林努 印          |                             |                             |    |
| <b>自然・人文・社会の別</b>                                | <input type="checkbox"/> 自然       | <input type="checkbox"/> 人文 | <input type="checkbox"/> 社会 | <b>個人・共同の別</b> | <input type="checkbox"/> 個人 | <input type="checkbox"/> 共同 | 名  |
| <b>研究課題</b>                                      | 宇宙背景放射の偏光観測による初期宇宙モデルへの制限         |                             |                             |                |                             |                             |    |
| <b>研究組織</b><br>(研究代表者・共同研究者)<br>※2016年3月現在のものを記入 | 在籍研究科・専攻・学年                       |                             |                             | 氏名             |                             |                             |    |
|  | 理学研究科・物理学専攻・博士課程後期課程2年            |                             |                             | 矢嶋耕治           |                             |                             |    |
| <b>研究期間</b>                                      | 2015年度                            |                             |                             |                |                             |                             |    |
| <b>研究経費</b><br>(1円単位)                            | (支出金額) 500,000円 / (採択金額) 500,000円 |                             |                             |                |                             |                             |    |

**研究の概要** (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

本研究では、初期宇宙モデルにおいて、重力理論を一般相対性理論から変更した時に初期宇宙の物理がどのように影響を受け、それにより一般相対性理論のもとでの理論的予言がどのように変わるか、あるいは変わらない点は何かを調べた。それをもとに数値シミュレーションの手法を用いて、宇宙背景放射の光子と原始重力波のスペクトルがどのように変更されるかを詳細に調べ、観測結果と比較することにより、初期宇宙モデルの妥当性を調べた。

**キーワード** (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[ 初期宇宙 ] [ 宇宙背景放射 ] [ 原始重力波 ]

**研究成果の概要** (図・グラフ等は使用しないこと。)

重力理論として広く受け入れられている一般相対性理論を修正したとき、初期宇宙の物理がどのように影響を受け、その結果としてどのような理論的予言をするか調べた。

一般相対性理論は太陽系などで高精度に検証されているが、初期宇宙のような高エネルギー領域では、量子効果によって修正される可能性がある。この効果を考慮し、一般相対性理論を修正し、初期宇宙で生成される原始重力波の振る舞いと密度ゆらぎについて一般相対性理論で予言されるものと比較した。

現在の宇宙の構造は、初期宇宙における加速膨張期であるインフレーションの間に生成された初期ゆらぎが種となったと考えられている。初期ゆらぎのうちスカラー型のゆらぎである密度ゆらぎは、宇宙背景放射の観測と非常に良い精度で一致している。またテンソル型のゆらぎである原始重力波の振幅と密度ゆらぎの振幅の比により、インフレーションモデルに対して制限が付けられている。この制限を外れたモデルは初期宇宙における加速膨張を説明するモデルとしては棄却されたことになる。しかし、これらの制限というのは重力理論として一般相対性理論を仮定している。そこで一般相対性理論に補正を加えたら、これらの予言や制限はどうなるかを調べた。

量子補正としては、曲率の高次の項をアインシュタイン-ヒルベルト作用に加えるということ考えた。さらに、一般相対性理論のもとで観測と非常に良く合っているスカラー型摂動は変えずに、テンソル型摂動のみを変更するような理論を作れないかということ考えた。理論を構築するにあたって、マイナスの運動項を持った自由度(ゴースト自由度)を出さないようにした。ゴースト自由度が存在すると様々な物理量が発散してしまうという事態を引き起こす。これをゴースト不安定性という。曲率の2次のオーダーまでの補正で、ゴースト自由度を出さないような理論は2つ考えることができた。

それぞれのモデルについて、原始重力波のスペクトルを計算した。スカラー型の摂動は出さないように理論を構築したので、密度ゆらぎについては一般相対性理論と同じ予言をする。2つの理論のどちらも一般相対性理論のもとでの重力波に比べて振幅を減らすことがわかった。

このうちの一つのモデルでは、曲率ゆらぎについて大きな非ガウス性を生み出す。曲率ゆらぎの非ガウス性については宇宙背景放射の観測から小さいということがわかっているため、このモデルでは重力の補正の効果を大きくすることはできない。このことから、原始重力波のスペクトルの振幅を減らす効果を大きくすることはできないということがわかった。

もう一つのモデルでは、曲率ゆらぎの非ガウス性を全く生成しないという結果が得られた。つまり、非ガウス性の観測からの制限を受けずに原始重力波のスペクトルの振幅を減らすことができる。このモデルで、スペクトルを減らす効果が最大となる時、一般相対性理論のもとでの重力波の振幅に比べ、65%程度になることがわかった。

Planck による宇宙背景放射の観測からインフレーションモデルに対して制限が付けられているが、上記の結果を取り入れると、すでに一般相対性理論のもとでは排除されたインフレーションモデルも観測と矛盾しないという結論を得た。

研究成果の概要 つづき

**研究発表** (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

### 研究論文

- [1] Kohji Yajima and Tsutomu Kobayashi, “Suppressing the primordial tensor amplitude without changing the scalar sector in quadratic curvature gravity”, Phys. Rev. D **92**, 103503 (2015).
- [2] Kohji Yajima and Tsutomu Kobayashi, “Vector perturbations and cosmological dynamics in reheating era”, in preparation.

### 国際会議における発表

- [1] Kohji Yajima, ”Gravitational waves from slow-roll inflation in Lorentz-violating Weyl gravity”, The 19th annual International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO-15), Warsaw, Poland
- [2] Kohji Yajima, ” Suppressing the primordial tensor amplitude without changing the scalar sector in quadratic curvature gravity”, The 25<sup>th</sup> Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG25), 7 – 11 December, 2015, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan

### 国内研究会における発表

- [1] 矢嶋耕治、” Suppressing the primordial tensor amplitude without changing the scalar sector in quadratic curvature gravity ”、第 4 回観測的宇宙論ワークショップ、京都大学 基礎物理学研究所、2015 年 11 月
- [2] 矢嶋耕治、小林努、” Suppressing the primordial tensor amplitude without changing the scalar sector in quadratic curvature gravity ”、日本物理学会 第 71 回年次大会、東北学院大学、2016 年 3 月