

令和元年6月20日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17709

研究課題名(和文) 高エネルギー物理に基づく微分結合項を含む宇宙モデルの検証

研究課題名(英文) Verification of cosmological models with derivative couplings based on high energy physics

研究代表者

水野 俊太郎 (Mizuno, Shuntaro)

京都大学・基礎物理学研究所・研究員

研究者番号：60386620

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：私は本研究課題において、最近有効場の理論の観点などから注目されている微分結合項が重要な役割を果たすインフレーションモデルを幅広い観点から考察をし、新しい現象論を提案した。場空間が双極型となるモデルにおいて通常とは異なる振る舞いをする原始密度揺らぎが生成されること、複数場インフレーションにおいて微分結合項が量子もつれを生じさせ、それがCMBのスペクトルにおける振動的微細構造として現れること、有質量重力理論でインフレーション後のダイナミクスが将来的に観測可能な宇宙背景重力波を生じさせることがある。これらは微分結合なしでは得られなかった新しい物理であり、今後も継続して調べる価値のあるものと思われる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有効場理論の手法は素粒子物理学においては非常によく用いられていたものの、宇宙論においてその有用性が認識されたのはごく最近である。有効場理論はある系がある対称性を満たすときに作用に許される項すべてを系統的に扱えるという利点があり、今回考えた微分結合項は系の対称性が通常よりも低いときに現れるものである。私が今回見つけた微分結合項によって生じる新しい現象論はいずれも将来の宇宙論的な観測によって検証可能であり、それは初期宇宙における対称性を特定するうえで重要な役割を果たす。また、有効理論を超えたより根本的な新しい物理を知る上でも重要な手がかりを与えるものと思われる。

研究成果の概要(英文)：In this research subject, I have investigated the influence of derivative coupling terms on cosmic inflation that are important in the context of effective field theory. Especially, I have proposed a couple of interesting phenomenology. First, by considering multi-field inflation with a hyperbolic field space, I proposed a new inflation model, where both the background dynamics and property of the primordial perturbation are completely different from the conventional inflation. Second, in multi-field inflation models, I showed that some types of derivative couplings can give quantum entanglement that can be proved through the oscillatory features in the power spectrum of cosmic microwave background. Third, I showed that blue-tilted primordial gravitational waves that can be observed by future interferometers can be obtained in the context of massive gravity. These phenomenologies are very interesting and can not be obtained without derivative couplings and worth investigating more.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理(理論)

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ビッグバン理論の初期条件の問題を解決するインフレーションがどのような機構で引き起こされたのか、現在の宇宙を加速膨張させている暗黒エネルギーの正体は何なのか、これは現代宇宙論における2つの大きな問題である。これに対し、最近ではモデル構築の観点から、ある条件を満たす最も一般的な理論モデルを求めておき、宇宙論的観測から系統的にそのクラスのモデルの制限を行なうというアプローチが注目されだしている。代表的なものとしてインフレーションに対する有効場の理論の適用[Cheung, Creminelli, Fitzpatrick, Kaplan, Senatore, '08] (以下有効場インフレーションモデル) や暗黒エネルギーを説明するための修正重力理論として最も一般的なスカラー・テンソル重力理論とされていたホルンデスキ理論を更に拡張した理論[Gleyzes, Langlois, Piazza, Vernizzi, '14] (以下 GLPV 理論) がある。これらのうちそれまでの標準的な宇宙モデルでは得られなかった新しく興味深い現象の多くは微分結合項を含む宇宙モデルによって引き起こされている。例えば、微分結合項を含む有効場インフレーションモデルでは equilateral 型の原始非ガウス性[Creminelli, Nicolis, Senatore, Tegmark, Zaldarriaga, '05]が生成されるし、微分結合項を含む GLPV 理論は通常の一般相対性理論と disformal 変換[Bekenstein, '93]という変換で結びついており、物質とスカラー場に新しい種類の相互作用を生じさせている。これらの従来標準的な宇宙モデルで得られなかった興味深い予言を現在や近い将来の観測結果と比較し、微分結合項を検知や特定できるのか、そこに至らなくとも微分結合項を含む宇宙モデルをどこまで制限出来るのかを検証することはインフレーション、暗黒エネルギーという問題解決のため重要なプロセスであると思われた。

2. 研究の目的

本研究では微分結合項がインフレーションと暗黒エネルギーといった宇宙シナリオへ与える影響を調べる。具体的に、研究機関内に以下のことを明らかにすることを目的とした。(課題1) Equilateral 型の原始非ガウス性に対する大規模構造からの制限 (課題2) CMB に含まれる振動的微細構造と微分結合項を含むインフレーションモデル (課題3) 微分結合項を含むインフレーションモデルからビッグバン宇宙への移行 (課題4) ホルンデスキ重力理論の拡張に基づく暗黒エネルギー

3. 研究の方法

【課題1】私が以前将来の大規模構造の観測計画からの制限に対する予報を与えたのは、有効場インフレーションから得られる単純な4点相関関数に対して改良Lagrange摂動論を用いたものであった。それに対して、より精密な予報を与えるために重力レンズの情報も用いてそれぞれの将来予定されている観測に対して Fisher 行列を計算して制限を評価する必要がある。

【課題2】私が以前曲率揺らぎの振動的微細構造が現れるのを示したのは DBI モデルという場の微分結合の強さが揺らぎの音速で表せる良い性質をもったモデルにおいて、インフレーションを引き起こす場と重い場との微分結合項を通じた共鳴現象を利用するという特殊な状況であった。それに対して別のより一般的な微分結合をもつモデルの新しい効果によって振動的微細構造が得られないかを考察する。

【課題3】微分結合を持つ宇宙モデルにおいて、微分結合項が重要な役割を果たす時期として注目されているのは主にインフレーション期と暗黒エネルギーの代替として現在の加速膨張期に限定されている。それにたいし、インフレーション終了後、ビッグバン宇宙が実現されるま

での時期に微分結合項を通じた何らかの痕跡が現れないかについて着目したい。

【課題4】DBIモデルはDブレーンに基づいて様々な興味深い現象を生み出すモデルであるが、暗黒エネルギーに適用するとスカラー場に基づいたモデル(Quintessence)のうちの一つという以上に興味深い予言は得られていない。それに対し、DBIモデルと構造が似ているDBlonicというモデルはVainshtein機構が働き、修正重力理論としても興味深い性質を持っているので、宇宙論的にどこまで整合的になりうるかを調べるのは意味があると思われる。

4. 研究成果

私は本研究課題において、最近有効場の理論の観点などから注目されている微分結合項が重要な役割を果たすインフレーションモデルを幅広い観点から考察をし、新しい現象論を提案した。場空間が双極型となるモデルにおいて通常とは異なる振る舞いをする原始密度揺らぎが生成されること、複数場インフレーションにおいて微分結合項が量子もつれを生じさせ、それがCMBのスペクトルにおける振動的微細構造として現れること、有質量重力理論でインフレーション後のダイナミクスが将来的に観測可能な宇宙背景重力波を生じさせることがある。これらは微分結合なしでは得られなかった新しい物理であり、今後も継続して調べる価値のあるものと思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

1. 黒柳幸子、藤田 智弘、水野俊太郎、向山信治、“Blue-tilted Primordial Gravitational Waves from Massive Gravity”, Physics Letter, Elsevier, **B789**, pp215 - 219, February, 2019
10.1016/j.physletb.2018.12.025
2. 前田恵一、水野俊太郎、戸塚良太、“Alpha-attractor-type Double Inflation”, Physical Review, APS, **D98**, no12 123538, pp1 - 25, December, 2018
10.1103/PhysRevD.98.123530
3. Nadia Bolis, 藤田 智弘, 水野俊太郎、向山信治、“Quantum Entanglement in Multi-field inflation”, Journal of Cosmology and Astroparticle physics, IOP, **1809**, 004, pp1 - 25, September, 2018
10.1088/1475-7516/2018/09/004
4. 水野俊太郎、向山信治、“Primordial perturbations from inflation with a hyperbolic field-space”, Physical Review, APS, **D96**, no10 103533, pp1 - 18, November, 2017
10.1103/PhysRevD.96.103533
5. S. Panpanich, 前田恵一、水野俊太郎、“Cosmological Dynamics of D-Bionic and DBI Scalar Field and Coincidence Problem of Dark Energy”, Physical Review, APS, **D95**, no10 103520, pp1 - 15, May, 2017
10.1103/PhysRevD.95.103520

6. 青木勝輝、水野俊太郎、 “ Vainshtein mechanism in massive gravity nonlinear sigma models”, Physical Review, APS, **D94**, 064054, pp1 - 10, September, 2016

10.1103/PhysRevD.94.064054

7. 橋本一彦、水野俊太郎、横山修一郎、 “ Constraining equilateral-type primordial non-Gaussianities from imaging surveys”, Physical Review, APS, **D94**, 043532, pp1 - 10, August, 2016

10.1103/PhysRevD.94.043532

[学会発表](計 19 件)

1. 水野俊太郎、藤田 智弘, 黒柳幸子、向山信治 “ Blue-tilted Primordial Gravitational Waves from Massive Gravity”, 日本物理学会、2019.3.14、九州大学(福岡県)

2. 水野俊太郎、藤田 智弘, 黒柳幸子、向山信治 “ Blue-tilted Primordial Gravitational Waves from Massive Gravity”, Accelerating Universe in the Dark、2019.3.4、京都大学(京都府)

3. 水野俊太郎、藤田 智弘, 黒柳幸子、向山信治 “ Blue-tilted Primordial Gravitational Waves from Massive Gravity”, YITP Asian-Pacific Winter School and Workshop on Gravitation and Cosmology、2019.2.11、京都大学(京都府)

4. 水野俊太郎、藤田 智弘, 黒柳幸子、向山信治 “ Blue-tilted Primordial Gravitational Waves from Massive Gravity”, 28th Japan General Relativity and Gravitation、2018.11.7、立教大学(東京都)

5. 水野俊太郎、藤田 智弘, 黒柳幸子、向山信治 “ Blue-tilted Primordial Gravitational Waves from Massive Gravity”, CosKASI-ICG-NAOC-YITP joint workshop on LSS、2018.11.1、北京(中国)

6. 水野俊太郎、Nadia Bolis, 藤田 智弘, 向山信治 “ Quantum Entanglement in Multi-field inflation”, 日本物理学会、2018.9.14、信州大学(長野県)

7. 水野俊太郎、Nadia Bolis, 藤田 智弘, 向山信治 “ Quantum Entanglement in Multi-field inflation”, COSMO 18, 2018.8.30、デジョン(韓国)

8. 水野俊太郎、向山信治、 “ Primordial perturbations from hyperinflation”, 日本物理学会、2018.3.25、東京理科大学(千葉県)

9. 水野俊太郎 “ Quantum Entanglement in Multi-field inflation”, 山口重力・宇宙論研究会、2018.3.15、山口大学(山口県)

10. 水野俊太郎、向山信治、 “ Primordial perturbations from hyperinflation”, YKIS2018a symposium, 2018.2.19、京都大学(京都府)

11. 水野俊太郎、向山信治、 “ Primordial perturbations from hyperinflation”, CosPA2017, 2017.12.12、京都大学(京都府)

12. 水野俊太郎、向山信治、“ Primordial perturbations from hyperinflation”, 27th Japan General Relativity and Gravitation, 2017.11.12、広島大学 (広島県)
13. 水野俊太郎、向山信治、“ Primordial perturbations from inflation with a hyperbolic field-space”, KIAS-YITP Joint Workshop 2017 “Strings, Gravity and Cosmology”, 2017.9.19 ~ 9.22、京都大学 (京都府)
14. 水野俊太郎、Sirachak Panpanich、前田恵一、“ Cosmological Dynamics of D-Bionic and DBI Scalar fields and coincidence problem of dark energy”, 日本物理学会、2017.9.13、宇都宮大学 (栃木県)
15. 水野俊太郎、橋本一彦、横山修一郎、“ Constraining equilateral-type primordial non-Gaussianities from imaging surveys”, CosKASI-ICG-NAOC-YITP joint workshop on LSS, 2017.9.8、京都大学 (京都府)
16. 水野俊太郎、向山信治、“ Primordial perturbations from hyperinflation”, COSMO17, 2017.8.30、パリ (フランス)
17. 水野俊太郎、“ Constraining inflation models from primordial non-Gaussianity”, 若手による重力・宇宙論研究会、2017.3.1、京都大学 (京都府)
18. 水野俊太郎、橋本一彦、横山修一郎、“ Constraining equilateral-type primordial non-Gaussianities from imaging surveys”, 日本物理学会、2016.9.21、宮崎大学 (宮崎県)
19. 水野俊太郎、青木勝輝、“ Vainshtein mechanism in massive gravity nonlinear sigma model”, COSMO16, 2016.8.8、ミシガン (アメリカ)

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。