

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21740187

研究課題名（和文） 超弦理論に基づいたインフレーション宇宙論

研究課題名（英文） Inflationary Universe based on superstring theory

研究代表者

山口 昌英（YAMAGUCHI MASAHIDE）

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授 研究者番号：80383511

研究成果の概要（和文）：

超弦理論で現れるような運動項や重力との非最小結合を持った場がインフレーションを起こす時の密度揺らぎやテンソル揺らぎのパワースペクトルや非ガウス性の性質を明らかにした。インフレーションを起こす場以外の軽い場が密度揺らぎの起源である場合に、密度揺らぎの性質や宇宙論的予言を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We considered inflation models, in which an inflaton has a non-trivial kinetic term and/or a non-minimal coupling to gravity, as suggested by superstring theory. We gave the formulae of powerspectra and bispectra of primordial density and tensor perturbations. We also discussed the case that a light field other than an inflaton is responsible for primordial density perturbations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			0
総計	4,000,000	1,200,000	5,200,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理

キーワード：宇宙物理（理論）

1. 研究開始当初の背景

いわゆる KKLT モデル(Kachru et al. 2003)によって、インフレーション中にモジュライを固定する方法が見つかって以来、超弦理論の枠組みでインフレーションを実現し、インフレーション宇宙論を包括的に理解しようとする試みが精力的に行われるようになってきた。

2. 研究の目的

超弦理論等で一般的に現れる、非正規な運動項や重力に非最小結合している場がインフレーションを起こすときのインフレーション理論を調べ、密度揺らぎの非ガウス性等を観測と比較することによりモデルを取捨選択できるように準備し、超弦理論の枠組みでインフレーション理論を包括的に理解することを目的とする。

3. 研究の方法

非正規な運動項や重力との非最少結合を持つ場がインフレーションを起こすときのインフレーション理論を調べ、密度揺らぎやテンソル揺らぎのパワースペクトルや非ガウス性等を観測と比較出来るように準備する。

modulated reheating (MR) シナリオにおいて、どのような暗黒物質またはバリオン生成機構がその等曲率ゆらぎにより観測と矛盾するかを調べる。また、矛盾しない場合には、どれくらい大きな非ガウス性を生じるのかを定量的に評価する。

4. 研究成果

(1) 超紐理論に存在するモジュライと呼ばれる場が、インフレーションを起こす場の崩壊率を揺らぎ、そのことにより宇宙の密度ゆらぎが生成される場合には、グラビティーノが暗黒物質になることが難しいことを示した。グラビティーノはインフレーション後の再加熱期に、インフレーションを起こす場の崩壊から直接作られるか、または、熱浴から生成されるが、いずれの場合にもその存在量が再加熱温度に依存して決定される。その結果、モジュライの揺らぎが宇宙の密度揺らぎの大きさを決定する場合には、グラビティーノが暗黒物質の大部分であるとする、非常に大きな等曲率ゆらぎが生成されることになり、観測と矛盾してしまう。宇宙の密度ゆらぎが、インフラトンとモジュライの両方の揺らぎから生成される場合には、この等曲率揺らぎの制限を回避することができるが、

PLANCK 衛星により等曲率揺らぎが発見されないとする、密度揺らぎの非ガウス性が観測出来ないほど小さくなることも示した。

(2) 重力の量子論を繰り込み可能にするように Horava により提唱された理論における projectability 条件を化したモデルに対して、曲率揺らぎを定義し、その超ハッブルスケールでの進化方程式を導き、保存する条件を求めた。その結果、積分定数として現れる物質が現実の宇宙の暗黒物質であるときには、初期条件に微調整をしない限り、等曲率揺らぎが大きくなりすぎ観測と矛盾してしまうことを示した。

(3) 超弦理論で予言されるような高階微分項のある作用に対して、特別な組み合わせを考えると、運動方程式が二階の微分までになり高階微分項が現れない。このような高階微分項はガリレオン相互作用、また、そのような相互作用を持つ場はガリレオン場と呼ばれているが、そのような作用に対するインフレーション理論を提唱した。また、このモデルに対するダイナミクスを調べると共に、揺らぎの性質についてパワースペクトラムや非ガウス性について調べた。特にヒッグス場がガリレオン項を持つ場合に、カオティックインフレーションを起こすことが出来ることを示し、さらに、テンソル・スカラー比とテンソル揺らぎのスペクトルとの間の関係式が、普通のインフレーションモデルの予言からずれることを示した。

さらに、これを拡張し、運動方程式が二階までの微分項しか現れない最も一般的なスカラーテンソル理論 (Horndeski 理論と呼ばれる) におけるインフレーションを議論した。このインフレーションモデルは、これまで考えられてきたほとんど全てのインフレーションモデルを含むものである。このような一般的なインフレーション理論において、一様モードの運動方程式を与え、インフレーションのダイナミクスを議論した。また、インフレーション中に生成される密度ゆらぎやテンソルゆらぎのパワースペクトルに対する一般的な表式を求め、さらに、ゆらぎが安定である条件を与えた。次に、この理論において、テンソル揺らぎの非ガウス性 (特に三点相関関数) について調べた。三次の作用は2つの部分からなっており、一つ目は通常のアインシュタイン重力から導かれるものと本質的に同じで、2つの空間微分を含むものである。一方、もう一つは新しいタイプのものであり、時間微分を含むものである。前者は、squeezed 型の三点相関を予言するが、大きな非ガウス性を出すことはできない。一方、後者は、equilateral 型の三点相関を予言し、特別な場合には大きな非ガウス性を生じう

ることが分かった。

(4) また、密度揺らぎについて、局所的な非ガウス性を予言する様々なモデルに対して、3点相関関数と4点相関関数の大きさについての予言を行い、それに基づいて、様々なモデルを将来の観測からどのように分類することができるかについて議論を行った。

(5) インフレーションと現在の加速膨張は、両方共真空のエネルギーで説明することができるが、両者のエネルギースケールがあまりにも違うために、両者の間を関係付けるモデルはほとんどなかった。我々は、インフレーション中の揺らぎが、暗黒エネルギーの初期条件を与える可能性を提唱し、その場合には、インフレーションのエネルギースケールが TeV スケールに予言されることを示した。

(6) 最近の観測により暗黒輻射の存在が示唆されている。modulated reheating シナリオにおいては、このような暗黒輻射が自然に作られることを示し、具体的なモデルに対して、どのくらい作られるかを評価した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 23 件)

- (1) Ken'ichi Saikawa, Masahide Yamaguchi, “Evolution and thermalization of dark matter axions in the condensed regime”, Phys.Rev. D87 (2013) 085010、査読有、DOI: 10.1103/PhysRevD.87.085010
- (2) Kohei Kamada, Tsutomu Kobayashi, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama, “Generalized Higgs inflation”, Phys.Rev. D86 (2012) 023504、査読有、DOI: 10.1103/PhysRevD.86.023504
- (3) Teruaki Suyama, Yuki Watanabe, Masahide Yamaguchi, “Fully non-linear equivalence of delta N and covariant formalisms”, Phys.Rev. D85 (2012) 083504、査読有、DOI: 10.1103/PhysRevD.85.083504
- (4) Kohei Kamada, Masahide Yamaguchi, “Asymmetric Dark Matter from Spontaneous Cogenesis in the Supersymmetric Standard Model”, Phys.Rev. D85 (2012) 103530、査読有、DOI: 10.1103/PhysRevD.85.103530
- (5) Takeshi Kobayashi, Fuminobu Takahashi, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, “Dark Radiation from Modulated Reheating”, JCAP 1203 (2012) 036、査読有、DOI: 10.1088/1475-7516/2012/03/036
- (6) Xian Gao, Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama, “Primordial non-Gaussianities of gravitational waves in the most general single-field inflation model”, Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 211301、査読有、DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.211301
- (7) Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama, “Generalized G-inflation: Inflation with the most general second-order field equations”, Prog.Theor.Phys. 126 (2011) 511-529、査読有、DOI: 10.1143/PTP.126.511
- (8) Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama, “Primordial non-Gaussianity from G-inflation”, Phys.Rev. D83 (2011) 103524、査読有、DOI: 10.1103/PhysRevD.83.103524
- (9) Takeshi Chiba, Masahide Yamaguchi, “Runaway Domain Wall and Space-time Varying alpha”, JCAP 1103 (2011) 044、査読有、DOI: 10.1088/1475-7516/2011/03/044
- (10) Masahide Yamaguchi, “Supergravity based inflation models: a review”, Class.Quant.Grav. 28 (2011) 103001、査読有、DOI: 10.1088/0264-9381/28/10/103001
- (11) Takashi Hiramatsu, Masahiro Kawasaki, Toyokazu Sekiguchi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama, “Improved estimation of radiated axions from cosmological axionic strings”, Phys.Rev. D83 (2011) 123531、査読有、DOI: 10.1103/PhysRevD.83.123531
- (12) Kohei Kamada, Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama, “Higgs G-inflation”,

- Phys.Rev. D83 (2011) 083515、査読有、
DOI: 10.1103/PhysRevD.83.083515
- (13) Teruaki Suyama, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, Shuichiro Yokoyama, “On Classification of Models of Large Local-Type Non-Gaussianity”, JCAP 1012 (2010) 030、査読有、
DOI: 10.1088/1475-7516/2010/12/030
- (14) Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama, “G-inflation: Inflation driven by the Galileon field”, Phys.Rev.Lett. 105 (2010) 231302、査読有、
DOI:10.1103/PhysRevLett.105.231302
- (15) Takeshi Chiba, Kohei Kamada, Shinta Kasuya, Masahide Yamaguchi, “Fate of thermal log type Q balls”, Phys.Rev. D82 (2010) 103534、査読有、
DOI: 10.1103/PhysRevD.82.103534
- (16) Christophe Ringeval, Teruaki Suyama, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, Shuichiro Yokoyama, “Dark energy from primordial inflationary quantum fluctuations”, Phys.Rev.Lett. 105 (2010) 121301、査読有、
DOI:10.1103/PhysRevLett.105.121301
- (17) Takeshi Chiba, Masaru Siino, Masahide Yamaguchi, “Slow-roll Extended Quintessence”, Phys.Rev. D81 (2010) 083530、査読有、
DOI: 10.1103/PhysRevD.81.083530
- (18) Tsutomu Kobayashi, Yuko Urakawa, Masahide Yamaguchi, “Cosmological perturbations in a healthy extension of Horava gravity”, JCAP 1004 (2010) 025、査読有、
DOI:10.1088/1475-7516/2010/04/025
- (19) Takeshi Chiba, Kohei Kamada, Masahide Yamaguchi, “Gravitational Waves from Q-ball Formation”, Phys.Rev. D81 (2010) 083503、査読有、
DOI:10.1103/PhysRevD.81.083503
- (20) Tsutomu Kobayashi, Yuko Urakawa, Masahide Yamaguchi, “Large scale evolution of the curvature perturbation in Horava-Lifshitz cosmology”, JCAP 0911 (2009) 015、査読有、
DOI:10.1088/1475-7516/2009/11/015
- (21) Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, Shuichiro Yokoyama, “Primordial Non-Gaussianity in Models with Dark Matter Isocurvature Fluctuations”, Phys.Rev. D80 (2009) 063524、査読有、
DOI:10.1103/PhysRevD.80.063524
- (22) Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama, Shuichiro Yokoyama, “Gravitino Dark Matter and Non-Gaussianity”, Phys.Lett. B678 (2009) 15-19、査読有、
DOI:10.1016/j.physletb.2009.06.007
- (23) Maresuke Shiraishi, Kazuhide Ichikawa, Kiyotomo Ichiki, Naoshi Sugiyama, Masahide Yamaguchi, “Constraints on neutrino masses from WMAP5 and BBN in the lepton asymmetric universe, JCAP 0907 (2009) 005、査読有、
DOI:10.1088/1475-7516/2009/07/005
- [学会発表] (計 4 件)
- (1) Masahide Yamaguchi: “Modulated reheating mechanism”, in *Workshop: Critical Tests of Inflation Using Non-Gaussianity* (Munich, Nov 7th, 2012).
- (2) Masahide Yamaguchi, X. Gao, K. Kamada, T. Kobayashi, and J. Yokoyama: “G-inflation : The most general inflation with second-order equations”, in *Xth International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC10)* (Quy-Nhon, Dec 18th, 2011).
- (3) Masahide Yamaguchi, X. Gao, K. Kamada, T. Kobayashi, and J. Yokoyama: “G-Inflation : Inflation with the most general second-order equations”, in *International Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics (CosPA2011)* (Beijing, Oct 28th, 2011).
- (4) Masahide Yamaguchi, C. Ringeval, T.

Suyama, T. Takahashi and S.
Yokoyama: "Relation between inflation
and dark energy", in *the 16th
International Symposium on Particles,
Strings and Cosmology (PASCOS2010)*
(Valencia, Jul 23th, 2010).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 昌英 (YAMAGUCHI MASAHIDE)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教
授

研究者番号 : 80383511

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし