

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：14501  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2013～2015  
課題番号：25400251  
研究課題名(和文) 非等方インフレーションにおける非ガウス性

研究課題名(英文) Non-gaussianity in anisotropic inflation

## 研究代表者

早田 次郎 (Soda, Jiro)

神戸大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00222076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：非等方インフレーションにおける非ガウス性の系統的な計算を行った。さらに、非等方インフレーションにおけるスペクトル指数、テンソル・スカラー比などの観測可能量まで考慮してPlanckデータの比較検討を行い、非等方インフレーションのモデルパラメータへの制限を明らかにした。

これまでの非等方インフレーションでは、ゲージ運動項とポテンシャル関数の間に特別な関数関係を仮定していた。非等方インフレーションの普遍性を明らかにするために、より一般的なポテンシャルとゲージ運動項を用いた解析を行い、過渡的な非等方インフレーションやインフレーションの最終段階で非等方インフレーションが起きることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We calculated the non-gaussianity in anisotropic inflation systematically. In addition to the non-gaussianity, we have also evaluated the spectral index and the tensor-scalar ratio in anisotropic inflation. Then, we compared those with Planck data. Consequently, we succeeded in putting constraints on the model parameters in anisotropic inflation.

In the previous studies in anisotropic inflation, a specific functional relation between the potential function of inflaton and the gauge kinetic function had been assumed. In order to reveal universality of the anisotropic inflation, we considered more general potential function and the gauge kinetic function. As a result, we have shown that the anisotropic inflation can generically occur for some short period during inflation or in the last stage of inflation. This clearly shows the universality of the anisotropic inflation.

研究分野：宇宙論

キーワード：anisotropic inflation non-gaussianity gauge fields

## 1. 研究開始当初の背景

インフレーション理論は宇宙の大規模構造の起源を説明するという大きな成果をあげた。一方で、観測の精密化に伴い理論的予言の精密化が要請されている。理論の精密化には、定量的な精密化と定性的な精密化があり得る。定量的な精密化はこれまでもすでに計算されていた観測量をさらに高次の精度まで計算することにより達成されるもので、例えば宇宙背景放射の温度揺らぎのパワースペクトルの指数を数パーセントの精度で求めるものである。一方、定性的な精密化は、数パーセントの精度を要求されたときに初めて必要となる情報、例えば温度揺らぎ分布のガウス統計からのずれ（非ガウス性）がその典型的な例である。今後の観測のさらなる発展を考慮すると、数パーセントの精度で初めて現れるような定性的に新しい現象を理論に取り入れていくことは重要となる。

インフレーションはインフラトンと呼ばれるスカラー場によって引き起こされる。このインフラトンは素粒子の基礎理論の構成要素であるべきだと考えられているにも関わらず、素粒子の基礎理論において基本的な役割を果たしているゲージ場はインフレーション時期に何らかの役割を果たすことは無いと考えられてきた。このような常識に反して、2008年、申請者は横山とともに、ゲージ場が統計的な非等方性、特に統計的に非等方な非ガウス性を生成することを明らかにした。さらに、2009年、渡辺、菅野とともに、超重力理論においては非等方的に膨張するインフレーションが存在することを世界で初めて発見した。このような非等方インフレーションは、ゲージ場によって引き起こされ、統計的な非等方性、曲率揺らぎと原始重力波の相関を生み出すことが明らかになった。

2010年、Pelosoらは、ゲージ場が宇宙背

景放射に大きな非ガウス性を生み出す可能性があることを指摘した。これは、非等方インフレーションでも非ガウス性が現れ得ることを示唆している。

このように、ゲージ場がインフレーションにおいて果たす役割は、もはや見過ごすことができない新たな潮流となりつつある。特に、パーセントレベルの非等方性を示す非等方インフレーションは詳細に検討すべき現象であり、非ガウス性などの統計的な性質を観測的に検証することによって、今後の大きな発展が期待される。

## 2. 研究の目的

本研究は、申請者自身による先駆的な研究成果をもとに、より系統的に非等方インフレーションを研究し、世界に先駆けて、宇宙論に新たな地平を拓いていくことを目的としている。

申請者は非等方インフレーションが超重力理論において自然に現れることを発見したが、その基本的な構成要素であるゲージ場が非ガウス性を引き起こすことが予想される。第一の目標は非等方インフレーションにおける非ガウス性の定量的な評価を行うことである。申請者がこれまで研究してきた非等方インフレーションにおける統計的な非等方性、曲率揺らぎと原始重力波の相関、非ガウス性を整理し、25年度に公表されるであろう宇宙背景放射探査衛星PLANCKのデータと比較することで非等方インフレーションモデルの検証を行う。申請者はアキシオン結合のある場合にも非等方インフレーションが起きうることを最近発見した。このアキシオン結合によって生成される原始揺らぎの精密な計算を行う。非アーベルゲージ場がアシストするタイプの非等方インフレーションにおける非ガウス性を評価し、Planckによる検証を行う。

### 3 . 研究の方法

非等方インフレーションを観測的に検証し、さらに研究を進展させるために、次の計画を立てている。

我々は、超重力理論において典型的なゲージ場の運動項が、非等方的な膨張をするインフレーションを生み出すことを発見した。発見と同時に、統計的な非等方性、温度揺らぎと重力波との相関を計算し、宇宙背景放射に対する予言を明らかにした。その後の研究で非等方インフレーションにおいて、非線形性を表すパラメータを  $f_{NL}$  として、 $f_{NL} = 10$  から 100 程度の統計的非ガウス性が存在する可能性が示唆された。しかし、実際にその定量的評価にまでは至っていなかった。本研究では非ガウス性を定量化することで宇宙背景放射に対する非等方インフレーションの予言を完成させる。

非等方インフレーションにおける統計的な非等方性、曲率揺らぎと原始重力波の相関、非ガウス性を整理し、PLANCK のデータとの比較を行う。非等方インフレーションは多くの予言をしており、さらにそれぞれの観測の間には存在する特有の関係のために、非常に高い予言能力を持っている。特に、非ガウス性に関しては PLANCK の感度が  $f_{NL} = \text{a few}$  程度まではいくと考えられているので、観測との比較によるモデルの検証がおおいに期待できる。非等方インフレーションが実証されれば画期的な成果であり、初期宇宙論に対する貢献は計り知れない。棄却されたとしても、超重力モデルのパラメータに対する宇宙論的な制限をあたえることができる。

最近、申請者は、パリティーを破るようなアキシオン結合によって非等方インフレーションが実現されることを発見した。この場合に、生成される温度揺らぎと原始重力波の精密な計算を行う。特にパリティーを破る効果が揺らぎの統計性にどのように現れるの

かを調べる。

非アーベルゲージ場がアシストするタイプの非等方インフレーションモデルにはいくつか検討すべき事項がある。まず、このモデルではアキシオンとゲージ場のパリティーを破るような結合が本質的であるが、一般にこのタイプの結合には過渡的なタキオン不安定性が発生する可能性が高い。これはアーベルゲージ場の場合には昔からよく知られているが、非アーベルゲージ場の場合には研究されておらず、よくわかっていない。非線形性がこのタキオン不安定成長にどのような効果をもたらすのかを明らかにする。

タキオン不安定性が存在する場合には非ガウス性がモデルを棄却してしまう可能性がある。まず、重力場の反作用を無視する近似で非ガウス性の評価を行う。非ガウス性が観測と矛盾しないようなモデルについて、重力場の反作用も取り入れた揺らぎの評価を行う。今の場合、非アーベルゲージ場が背景場として存在するので通常宇宙論的摂動論は使えず、摂動論の定式化から行う。世界でもこのタイプの摂動理論の構築に成功した例はなく、本研究が遂行された場合のインパクトは大きい。

自ら開発した摂動論を用い、宇宙背景放射温度揺らぎの非ガウス性を評価し、PLANCK のデータによる検証を実行する。このモデルにはエータ問題がないので、素粒子モデルへの埋め込みが実現される可能性が高く、今後の研究に与える影響は大きい。

### 4 . 研究成果

我々はゲージ場による非等方インフレーションに加えて、アキシオン場に対応する 2 形式場が生み出す非等方インフレーションを発見した。また、この場合とゲージ場の場合について非ガウス性の評価を行い、2 形式場の方がより Planck 衛星のデータと整合性が高い事を明らかにした。さらに、非等方イ

ンフレーションにおけるスペクトル指数、テンソル・スカラー比などの観測可能量と Planck データの比較検討を行い、非等方インフレーションのモデルパラメータへの制限を明らかにした。

非等方インフレーションはこれまでに存在するインフレーションモデルにゲージ場の効果を取り入れる事で普遍的に現れる現象である。このことを示すために、非等方インフレーションを高階微分を含むような  $k$ -インフレーションに拡張する事を試み、非等方  $k$ -インフレーションの構築に成功した。

さらに、ゲージ場と 2 形式場が共存するような非等方インフレーションの厳密解を発見し、力学系の手法を使い、その力学的な特性を明らかにした。

これまでの非等方インフレーションでは、ゲージ運動項とポテンシャル関数の間に特別な関数関係を仮定していた。非等方インフレーションの普遍性を明らかにするために、より一般的なポテンシャルとゲージ運動項を用いた解析を行い、過渡的な非等方インフレーションやインフレーションの最終段階で非等方インフレーションが起きることを明らかにした。これにより非等方インフレーションの普遍性がより強固なものとなり、宇宙論の中での重要性を増す事になった。特に、インフレーションの最終段階で非等方インフレーションが起きる場合には MHz 波長域の重力波のバースト的な生成が起き得る事を示した。この成果は将来の重力波観測計画にも影響を与える重要な成果である。

ゲージ場とのアキシオン結合を持つようなシステムのインフレーションとして Chromo-natural インフレーションモデルの研究を行い、円偏極のある原始重力波がこれまでの観測と矛盾する事無く起きうる事を示した。さらに、これまでの非等方インフレーションと組み合わせる事でより効果的な重力波生成が起きうる事も明らかにした。こ

れらの成果は素粒子物理学のモデルの峻別と重力波研究を結びつける成果である。このとき生成される円偏極した重力波をパルサータイミング観測で検出できる可能性があることも明らかにした。

非等方インフレーションでは長波長の電場が存在する。この電場による Schwinger 効果の可能性について研究し、電場が小さい程大きな電流が流れるという hyper current の存在を明らかにした。これは将来、宇宙論において大きな意味合いを持つ可能性が高い。

非等方インフレーションは本質的に多数の場による協同現象である。そこに現れる量子相関の観測可能性は非常に興味深い。インフレーション中の量子相関に関する研究もを行い、揺らぎの量子性の観測的な研究を押し進めた。

また、ゲージ場と密接に関係するアキシオン場のパルサータイミングによる観測的な検証の研究も行った。特に、暗黒エネルギーが果たす役割に着目した。暗黒エネルギーは修正重力理論によって説明される可能性があるが、その場合典型的に比較的軽い質量の有効スカラー場が現れる。このスカラー場とアキシオンが共鳴振動を起こし観測にかかるとようなパルサーシグナルを出す可能性を明らかにした。

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 15 件 )

A. Ito and J. Soda, ``MHz Gravitational Waves from Short-term Anisotropic Inflation, '' JCAP 1604, no. 04, 035 (2016) doi:10.1088/1475-7516/2016/04/035.

A. Aoki and J. Soda, ``Pulsar timing signal from ultralight axion in  $f(R)$  theory, '' Phys. Rev. D 93, no. 8, 083503 (2016), doi:10.1103/PhysRevD.93.083503

R.Kato and J.Soda, ``Probing circular polarization in stochastic gravitational wave background with pulsar timing arrays,' 'Phys. Rev. D 93, no. 6, 062003 (2016), doi:10.1103/PhysRevD.93.062003.

D.Yoshida and J.Soda, ``Quasinormal modes of black holes in Lovelock gravity,' ' Phys.Rev.D93, no. 4, 044024 (2016), doi:10.1103/PhysRevD.93.044024

G.Hikmawan, J.Soda, A.Suroso and F.P.Zen, Comment on "Gauss-Bonnet inflation", Phys. Rev.D 93, no. 6, 068301 (2016), doi:10.1103/PhysRevD.93.068301

A.Ito and J.Soda, Designing Anisotropic Inflation with Form Fields, Phys. Rev.D 92, no. 12, 123533 (2015), doi:10.1103/PhysRevD.92.123533

Y.Sakakihara and J.Soda, Primordial Gravitational Waves in Bimetric Gravity, JCAP 1509, no. 09, 015 (2015), doi:10.1088/1475-7516/2015/09/015

I.Obata, T.Miura and J.Soda, Chromo-Natural Inflation in the Axiverse, Phys. Rev. D { $\bf 92$ }, no. 6, 063516 (2015) doi:10.1103/PhysRevD.92.063516.

S.Kanno, J.P.Shock and J.Soda, Entanglement negativity in the multiverse, JCAP 1503, no. 03, 015 (2015), doi:10.1088/1475-7516/2015/03/015

I.Obata, T.Miura and J.Soda, Dynamics of Electroweak Gauge Fields during and after Higgs Inflation, Phys. Rev.D 90, no. 4, 045005 (2014), doi:10.1103/PhysRevD.90.045005

S.Kanno, J.Murugan, J.P.Shock and J.Soda, Entanglement entropy of alpha vacua in de Sitter space, JHEP 1407, 072 (2014), doi:10.1007/JHEP07(2014)072

M.B.Fröb, J.Garriga, S.Kanno, M.Sasaki, J.Soda, T.Tanaka and A.Vilenkin, Schwinger effect in de Sitter space, JCAP 1404, 009 (2014),

doi:10.1088/1475-7516/2014/04/009

J.Ohashi, J.Soda and S.Tsujikawa, Anisotropic power-law k-inflation, Phys. Rev. D 88, 103517 (2013) doi:10.1103/PhysRevD.88.103517

J.Ohashi, J.Soda and S.Tsujikawa, Observational signatures of anisotropic inflationary models, JCAP 1312, 009 (2013), doi:10.1088/1475-7516/2013/12/009

J.Ohashi, J.Soda and S.Tsujikawa, Anisotropic Non-Gaussianity from a Two-Form Field, Phys. Rev. D 87, no. 8, 083520 (2013), doi:10.1103/PhysRevD.87.083520

〔学会発表〕(計 14 件)

早田次郎, 宇宙論的揺らぎの量子性について, 日本物理学会, 2016年3月21日, 東北学院大学, 仙台、宮城県

早田次郎, ゲージ場が生み出す時空の微細構造, テラスケール研究会、2015年12月23日, 東京工業大学、東京都

Jiro Soda, Designing Anisotropic Inflation, International workshop for string theory and cosmology, 2015年6月30日, 釜山(韓国)

Jiro Soda, Anisotropic Inflation and CMB, 中国物理学会・重力宇宙物理学領域年会, 2015年6月23日, 杭州(中国)

早田次郎, Entangle Negativity in de Sitter space, 日本物理学会, 2015年3月22日, 早稲田大学、東京都

Jiro Soda, Impact of Form Fields on Inflation, UTworkshop B-mode Cosmology, 2015年2月20日, KEK, 筑波、茨城県

早田次郎, 膨張宇宙でのSchwinger効果,  
日本物理学会, 2014年9月20日, 佐賀大学、  
佐賀県

Jiro Soda, Anisotropic Power-law  
Inflation, Spanish Relativity Meeting  
ERE2014, 2014年9月2日, バレンシア  
大学(スペイン)

Jiro Soda, Quantum Entanglement in de  
Sitter space, International workshop  
for string theory and cosmology, 2014  
年6月19日, 釜山(韓国)

早田次郎, ドジッター時空のエンタングル  
メントエントロピー, 日本物理学会,  
2014年3月30日, 東海大学、神奈川県

早田次郎, ゲージ場とインフレーション,  
理論天文学研究会, 2013年10月25日, ホ  
テル四季彩、湯河原、神奈川県

Jiro Soda, Dynamical Instability of  
AdS Black Holes, KIAS-YITP  
workshop, 2013年7月5日, 基礎物理学  
研究所, 京都府

Jiro Soda, Non-gaussianity from Form  
Fields, International workshop for  
string theory and cosmology, 2013年6  
月20日, ソウル(韓国)

Jiro Soda, Non-gaussianity from Form  
Fields, IPMU mini-workshop on massive  
gravity and its cosmological  
implications, 2013年4月10日, 東大IPMU,  
柏、千葉県

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

早田 次郎 (SODA Jiro)  
神戸大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 00222076