

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 6月 5日現在

機関番号：13901
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2010 ～ 2012
 課題番号：22340056
 研究課題名（和文） 宇宙論観測で迫る初期揺らぎの非ガウス性
 研究課題名（英文）
 Observational Probes of Non-Gaussianity in the Primordial Fluctuations
 研究代表者
 杉山 直 (SUGIYAMA NAOSHI)
 名古屋大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号：70222057

研究成果の概要（和文）：宇宙マイクロ波背景放射温度揺らぎや宇宙大規模構造など、一様等方宇宙からの揺らぎが持つ統計的性質、特にガウス分布からのずれ（非ガウス性）を詳細に分析し、観測量から制限をつけ、さらにそのようなずれを生み出す原因についての知見を得た。具体的には、宇宙初期に磁場が存在する場合の温度揺らぎに生じる非ガウス性を求め、その観測による制限を得る、また、劣度を持った非ガウス性について、構造形成に及ぼす影響を調べ、制限を得るなどの成果を得た。

研究成果の概要（英文）：We investigate statistical nature of fluctuations from the homogeneous isotropic Universe, such as temperature anisotropies of cosmic microwave background and large scale structure of the Universe, in particular, deviation from Gaussian distribution, i.e., non-Gaussianity. We study non-Gaussianity in temperature anisotropies caused by primordial magnetic fields and set a constraint from observations. We also study the influence of fluctuations with non-Gaussianity with kurtosis on structure formation of the Universe.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2011年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理学

キーワード：宇宙論・構造形成・初期宇宙・密度揺らぎ

1. 研究開始当初の背景

近年の観測技術の進歩に伴い、初期宇宙の理解は飛躍的に深まってきている。特にCOBEやWMAPによる宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの詳細観測は、宇宙論パラメータの詳細な決定に留まらず、宇宙初期の莫大な急膨張期であるインフレーションについての情報をも、もたらすものである。揺らぎの起源はインフレーション期にあると考えられるからである。現在もPLANCK衛

星によって、WMAPをしのぐ詳細な観測が行われている。

一方、2dFやSDSSといった銀河探査計画が過去20年、着実に実行されてきて、宇宙の大規模構造についても、多くの知見が得られてきている。特に最近では、弱い重力レンズを通じた密度揺らぎ、つまりダークマターの分布の直接測定が目ざされている。今後は、中性水素21cm線の観測（初期天体形成以前の密度揺らぎの分布）などに大きな期待が集

まっている。いずれにしろ、密度揺らぎの直接測定が可能となってきたのである。

いよいよ、温度揺らぎや大規模構造など様々な観測量を組み合わせることで、初期宇宙で生成された揺らぎの情報が得られる時代がやってきたのである。

2. 研究の目的

上記のような背景において、近年急速に注目を集めているのが、揺らぎの統計的解析である。インフレーション期に量子的に生成された揺らぎは、ランダム、かつガウス性を持つ、と近似的には考えられてきた。これは、ある点での密度揺らぎの大きさは、ガウス分布にもとづいて確率的に与えられる、というものである。ガウス分布の広がり、揺らぎの2乗平均であり、そのフーリエ成分がパワー・スペクトルである。

ガウス分布は大変もっともらしい仮定である。観測的にも、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎや宇宙大規模構造のデータから、ガウス分布はこれまで支持されてきた。

しかし、理論的には、わずかではあるが、揺らぎは必然的にガウス性からの離脱を生じることが期待される。揺らぎとは平均からのズレの割合である。ガウス性を持った密度揺らぎの2乗がつくる非線形揺らぎは、もはやガウス性を持ち得ない。分布が正負の領域において対称でないからである。非線形項の大きさは、揺らぎの生成のメカニズムと密接に関係して決まる。もともと10万分の1の揺らぎのさらに2乗なので、非線形性は十億分の1程度と大変小さいレベルかもしれないが、揺らぎは必ず非ガウス性を持ち、それはインフレーション期の揺らぎの生成の過程を明らかにしてくれるものなのである。

実際、最近になって、特にWMAPのデータなど、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎを詳細に検討した結果、ガウス性からのずれ、すなわち非ガウス性の兆候が見え始めてきたという研究結果が報告され、大きな注目を集めている。非ガウス性、つまりそれを引き起こす初期揺らぎの非線形性は考えていたよりも、相当に大きいかもしれないのである。PLANCKではこの非ガウス性はさらに詳細に測定できる。このように、非ガウス性の観測量としての重要性は急激に増してきている。本研究では、非ガウス性という観測量を解析することで、最終的にはインフレーションの機構に迫ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 宇宙マイクロ波背景放射温度揺らぎの3点相関を用いた非ガウス性の検証
観測量として、通常用いられる宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの3点相関を用いる。非ガウス性を引き起こす過程として、こ

れまで全く考えられてこなかった効果を考える。

① 宇宙初期に磁場があった場合に、磁場が生み出す非ガウス性について検討を行う。初期磁場強度に対してこれまでにない新しい制限を与えることが可能となる。

② 重力波が生成する非ガウス性を、二次揺らぎまで考慮して検討する。非ガウス性を通じて初期重力波の強度に対する制限を得る。
(2) 非ガウス性を検証するための新たな観測量提案

非ガウス性に対して敏感な新たな観測量を見つけ、実際の観測データから非ガウス性の強度を求める。新たな観測量によって、どこまで非ガウス性を厳しく制限できるのかを検証する。

① 温度揺らぎや密度揺らぎの高次相関。どのようなタイプの非ガウス性に対して、3次や4次の相関がどれだけの制限を与えうるかを明らかにする。

② 宇宙マイクロ波背景放射の偏光成分。密度揺らぎが生成するEモードと、重力波が生成するBモードの両者について調べ、そこから得られる非ガウス性に対する制限について、PLANCK衛星や、将来の観測について具体的に求める。

③ 大規模構造、例えば銀河分布、ボイド（銀河分布の少ない領域）の分布、弱い重力レンズを用いた密度揺らぎの分布、中性水素21cm線による密度分布などを用いて、非ガウス性についてどれだけ制限を与えられるか、実際の観測を用いて明らかにする。

(3) 非ガウス性と構造の形成

構造形成の解析モデルや数値シミュレーションなどを用いて、宇宙での構造の形成に非ガウス性がどのような影響を及ぼすかを理論的に調べる。(2)のC)と密接に関係する。

① 宇宙最初期天体形成に対する非ガウス性の影響を調べる。クエーサーや銀河の中心にある巨大ブラックホールの生成の過程を調べる。

(4) 非ガウス性を与える初期宇宙モデルの検証

揺らぎの生成に関する標準シナリオは、一成分のスカラー場がインフレーションと揺らぎの両方を引き起こすというものである。しかし、この場合には、観測が示唆するような大きな非ガウス性は現れない。例えば、新たなスカラー場を導入すれば、非ガウス性を大きなものとするのが可能となる。ここでは、非ガウス性を与える様々なモデルを考案し、観測量からモデルの検証を進める。

① モデル間の違いを明らかにするために、非ガウス性に敏感な3点相関と、温度揺らぎのスペクトル、偏光のスペクトルなどの間の関係を検証する。

② 大きな非ガウス性を可能とするモデルの

条件を調べる。

4. 研究成果

研究の方法(1)に関して、宇宙初期に磁場が存在していた場合に、その影響から、温度揺らぎ中に生成される非ガウス性をもった分布について、解析的取扱手法を確立した。さらに、実際の観測でこの磁場による非ガウス性をどのように検定することができるのか、例えば、温度揺らぎの3点相関、およびそのフーリエ成分(バイスペクトル)などについて調べた。次に、WMAP衛星による宇宙マイクロ波背景放射温度揺らぎのマップについて、ミンコフスキー汎関数の手法を用いて2次の非ガウス性に対して制限をつける研究を行った。具体的に、 f_{NL} や τ_{NL} 、 g_{NL} といった非ガウス性を表すパラメータに対して数値的制限を与えた。続いて、WMAPの温度揺らぎのパワースペクトルの1度角スケール当たりには現れる特異な小構造について解析を行い、それが統計的に有為であること、また空間の方向依存性があることを見出した。このような特異な構造を説明する為には、非ガウス性の存在が必要となる可能性がある。さらに、非ガウス性のよい指標である温度揺らぎのフーリエ空間での3点相関関数の定式化を通常のスカラーモードだけでなく、ベクトル、テンソルモードまで拡張したことなどが成果として挙げられる。

研究の方法(2)に関連して、様々なタイプの非ガウス性について解析を進めた。そこでは、通常考えられている歪度を持ったものだけでなく、劣度を持った非ガウス分布についても考慮し、それが宇宙での構造形成にもたらす影響について見積もることに成功した。具体的には、まず、宇宙最初期における星形成によってつくられるイオン化されたバブルを用いて非ガウス性を検証できる可能性について検討を行った。バブルの数を用いることで、将来観測によって非ガウス性について強い制限を与えることが可能であるという結論を得た。さらに、分布が歪度を持つ通常の非ガウス性ではなく、これまで調べてこられなかった尖度を持つ場合について、銀河分布などの構造を支えているダークマターのハローの数分布が受ける影響を、解析的に見積もった。その結果を用いて、最初の銀河団やヴォイドと呼ばれる銀河の少ない領域の数などを観測と比較することで、尖度を生み出すパラメータについてこれまでになく強い制限を与えることに成功した。さらに、独創的な解析的な摂動論の手法を開発することで、宇宙マイクロ波背景放射を用いて宇宙の初期ゆらぎの非ガウス性を検証するための、理論的な解析的を新しく求めることができた。さらに、尖度を生み出すパラメータについて、温度揺らぎのマップから最も効率

的に制限がつけられる方法を提案した。ここでは、実際に WMAP のデータを用いて、これまでになく厳しい制限をつけることに成功し、この方法の有効性を示した。

研究の方法(3)に関連し、大規模数値シミュレーションの結果から、ダークマターの密度分布のパワースペクトルを計算し、それを用いて、ダークエネルギーなど、宇宙の進化を決定づけるパラメータ、いわゆる宇宙論パラメータを推定する際の、非ガウス誤差の影響を調べた。さらに、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎと大規模構造の相関を取ることで、非ガウス性に制限をつける研究、銀河とダークマターの分布の比であるバイアスと呼ばれる量に対して、非ガウス性が及ぼす影響を解析的に解明する研究などを行なった。

最後に、研究の方法(4)と関連し、尖度を持つ非ガウス性を与える初期宇宙モデルがどのようなものであるのかについて、検討をし、それに対して制限をつけた。

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 18 件)

- ① R. Takahashi, N. Yoshida, M. Takada, T. Matsubara, N. Sugiyama 他 , Non-Gaussian Error Contribution to Likelihood Analysis of the Matter Power Spectrum, *The Astrophysical Journal*, 査読有り, 726, 2011, id 7 (10pp), DOI 10.1088/0004-637X/726/1/7
- ② Y. Takeuchi, K. Ichiki, T. Matsubara, Constraints on primordial non-Gaussianity from galaxy-CMB lensing cross correlation, *Physical Review D*, 査読有り, 82. 023517(16) (2010), DOI 10.1103/PhysRevD.82.023517
- ③ M. Shiraishi, S. Yokoyama, D. Nitta, K. Ichiki, K. Takahashi, Analytic formulae of the CMB bispectra generated from non-Gaussianity in the tensor and vector perturbations, *Physical Review D*, 査読有り, 82, 2010, 103505(11pp), DOI 10.1103/PhysRevD.82.103505
- ④ T. Matsubara, Analytic Minkowski Functionals of the Cosmic Microwave Background: Second-order Non-Gaussianity with Bispectrum and Trispectrum, *Physical Review D*, 査読有り, 81, 2010, 0833505(10pp), DOI 10.1103/PhysRevD.81.0833505
- ⑤ K. Ichiki, K. Takahashi, N. Sugiyama,

- Constraint on the primordial vector mode and its magnetic field generation from seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe observations, *Physical Review D*, 査読有り, 85, 2012, id. 043009,
DOI 10.1103/PhysRevD.85.043009
- ⑥ H. Tashiro, N. Sugiyama, Ionized bubble number count as a probe of non-Gaussianity, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有り, 420, 2012, 441-446,
DOI 10.1111/j.1365-2966.2011.20049.x
- ⑦ S. Yokoyama, N. Sugiyama, S. Zaroubi, J. Silk, Modification of the halo mass function by kurtosis associated with primordial non-Gaussianity, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有り, 417, 2011, 1074-1087,
DOI 10.1111/j.1365-2966.2011.19323.x
- ⑧ Y. Takeuchi, K. Ichiki, T. Matsubara, Application of cross correlations between CMB and large-scale structure to constraints on the primordial non-Gaussianity, *Phys. Rev. D* 査読有り, 85, 2012, Id. 043518 (1-17),
DOI 10.1103/PhysRevD.85.043518
- ⑨ M. Sato, T. Matsubara, Nonlinear biasing and redshift-space distortions in Lagrangian resummation theory and N-body simulations, *Phys. Rev. D*, 査読有り, 84, 2011, Id.043501 (1-15),
DOI 10.1103/PhysRevD.84.043501
- ⑩ T. Okamura, A. Taruya, T. Matsubara, Next-to-leading resummation of cosmological perturbations via the Lagrangian picture: 2-loop correction in real and redshift spaces, *JCAP*, 査読有り, 08, 2011, Id. 012 (1-18),
DOI 10.1088/1475-7516/2011/08/012
- ⑪ M. Sato, M. Takada, T. Hamana, T. Matsubara, Simulations of Wide-field Weak-lensing Surveys. II. Covariance Matrix of Real-space Correlation Function, *Astrophysical Journal*, 査読有り, 734, 2011, Id. 76 (1-12),
DOI 10.1088/0004-637X/734/2/76
- ⑫ T. Matsubara, Nonlinear perturbation theory integrated with nonlocal bias, redshift-space distortions and primordial non-Gaussianity, *Phys. Rev. D* 査読有り, 83, 2011, Id. 083518 (1-20),
DOI 10.1103/PhysRevD.83.083518
- ⑬ M. Shiraishi, D. Nitta, S. Yokoyama, K. Ichiki, K. Takahashi, Computation approach for CMB bispectrum from primordial magnetic fields, *Phys. Rev. D*, 査読有り, 2011, Id. 123523,
DOI 10.1103/PhysRevD.83.123523
- ⑭ M. Shiraishi, D. Nitta, S. Yokoyama, K. Ichiki, K. Takahashi, Cosmic microwave background bispectrum of tensor passive modes induced from primordial magnetic fields, *Phys. Rev. D*, 査読有り, 83, 2011, Id. 123003
DOI 10.1103/PhysRevD.83.123003
- ⑮ M. Shiraishi, D. Nitta, S. Yokoyama, K. Ichiki, K. Takahashi, CMB Bispectrum from Primordial Scalar, Vector and Tensor non-Gaussianities, *Progress of Theoretical Physics*, 査読有り, 125, 2011, 795-813,
<http://ptp.ipap.jp/link?PTP/125/795/>
- ⑯ C. Hikage, T. Matsubara, Limits on second-order non-Gaussianity from Minkowski functionals of WMAP 7-year data, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有り, 425, 2012, 2187-2196,
DOI 10.1111/j.1365-2966.2012.21572.x
- ⑰ T. Matsubara, Deriving an accurate formula of scale-dependent bias with primordial non-Gaussianity: An application of the integrated perturbation theory, *Physical Review D*, 査読有り, 86, 2012, 63518,
DOI 10.1103/PhysRevD.86.063518
- ⑱ K. Kumazaki, K. Ichiki, N. Sugiyama, J. Silk, Exploring the origin of the fine structures in the CMB temperature angular power spectrum, *Physical Review D*, 査読有り, 87, 2013, 23008,
DOI 10.1103/PhysRevD.87.023008
- [学会発表] (計 14 件)
- ① 杉山直, CMB 理論 (overview), CMB Workshop 2010, 2010年6月7日, 国立天文台
- ② 杉山直, ビッグバン宇宙論, 第23回理論懇シンポジウム, 2010年12月21日, 京都大学
- ③ 松原隆彦, Geometrical analysis of the primordial non-Gaussianity in the CMB, IEU workshop "Cosmology and Fundamental Physics", 2010年5月19日, IEU, Ewha Womans Univ., Seoul, Korea
- ④ 市來淨興, Weak Lensing and Massive Neutrinonos, APCTP-Topical Research-Program 2010, From Quarks to the Cosmos, 2010年12月15日, APCTP Office, Seoul, Korea
- ⑤ 杉山直, Cosmic Microwave Background:

- Ultimate Tool for Cosmology, Xth International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (招待講演), 2011年12月18日, Quy-Nhon, Vietnam
- ⑥ 杉山直, Effect of Kurtosis-type of Primordial Non-Gaussianity on Halo Mass Function, Cosmological Non-Gaussianity: Observations Confront Theory Workshop (招待講演), 2011年5月15日, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA
- ⑦ 松原隆彦, Integration of nonlocal bias, redshift-space distortions, primordial non-Gaussianity with the nonlinear perturbation theory, a DENET/IAP Conference "The Accelerating Universe" (招待講演), 2011年10月26日, Institut d'Astrophysique de Paris, France
- ⑧ 松原隆彦, Integrated perturbation theory: nonlocal bias, redshift-space distortions, primordial non-Gaussianity, and resummations, PTchat 2011 workshop (招待講演), 2011年9月21日, Institut de Physique Theorique CEA, IPhT, France
- ⑨ 市来浄與, 初期ベクトル型揺らぎおよび原始磁場生成への WMAP7-yr データを用いた制限, 日本天文学会秋季年会, 2011年9月11日, 鹿児島大学
- ⑩ 杉山直, CMBによる観測的宇宙論, 測的宇宙論ワークショップ(招待講演), 2012年11月27日-29日, 東京大学本郷キャンパス
- ⑪ 松原隆彦, 宇宙の大規模構造による観測的宇宙論, 測的宇宙論ワークショップ(招待講演), 2012年11月27日-29日, 東京大学本郷キャンパス
- ⑫ 市来浄與, 独立成分分析を用いた PLANCK CMB データからの CO 成分の除去, 2012年11月27日-29日, 東京大学本郷キャンパス
- ⑬ 松原隆彦, Deriving the scale-dependent bias from the integrated perturbation theory, Workshop on Large Scale Structure (招待講演), 2012年7月30日-8月2日, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy
- ⑭ 市来浄與, CO component estimation based on the independent component analysis, International Workshop on CMB "Cosmic Microwave Background Radiation and Its Foreground Interstellar Components II" (招待講演), 2012年10月27日-10月29日, Kyoto, Japan
- [図書] (計2件)
- ① 杉山直他 (IPMU 監修), 学研, 宇宙のしくみ, 2010, 199
- ② 松原隆彦, 東京大学出版会, 現代宇宙論-時空と物質の共進化, 2010, 388
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
杉山 直 (SUGIYAMA NAOSHI)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 70222057
- (2) 研究分担者
松原 隆彦 (MATSUBARA TAKAHIKO)
名古屋大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 00282715
市来 浄與 (ICHIKI KIYOTOMO)
名古屋大学・基礎理論研究センター・助教
研究者番号: 10534480