

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 9 日現在

機関番号：14301
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22540274
 研究課題名（和文） 超重力理論から創出される非等方インフレーションの研究
 研究課題名（英文） Anisotropic inflation from supergravity
 研究代表者
 早田 次郎（Soda Jiro）
 京都大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：00222076

研究成果の概要（和文）：

超重力理論ではゲージ場の運動エネルギー項がスカラー場との非自明な結合を持つことが知られている。我々は、このことに着目し、宇宙初期において非等方なインフレーションを引き起こすモデルを発見した。さらに、このモデルが宇宙背景放射の統計的な非等方性や温度揺らぎと偏光の相関等の存在を予言することを明らかにした。Planck のデータリリースが遅れたため、観測データとの比較によるモデルの検証には至らなかったが、素粒子の基礎理論を初期宇宙の観測から探求する新たな道を開いたものと自負している。

研究成果の概要（英文）：

It is known that there exists a non-trivial coupling between scalar fields and kinetic terms of gauge fields. Based on this fact, we found a novel inflationary scenario, the so-called anisotropic inflation. We succeeded in clarifying the existence of the statistical anisotropy in the cosmic microwave temperature fluctuations and the cross correlation between the temperature fluctuations and polarizations. Although we could not prove our model using cosmological data due to the delay of the data release by the Planck team, I am sure we opened a new window for exploring fundamental theory of nature through the cosmological data stemmed from the early universe.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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・宇宙物理

キーワード：宇宙論、インフレーション、ゲージ場、超重力理論

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、宇宙背景輻射の観測に

よって、精密科学としての宇宙論が確立しつつあった。特に、新たな観測衛星 PLANCK が打ち上げられ、2, 3 年後には膨大なデータがリリースされることが期待されていた。理論的には、大まかな枠組みとしてのインフレーション理論は WMAP によってすでに検証されたと信じられているが、パーセントレベルの微細構造に関する理論研究はまだ始まったばかりとあってよい。PLANCK を念頭に置いた理論研究が必要とされる状況にある。

歴史的にはインフレーション理論は超伝導理論に端を発していると考えられる。まず、対称性の破れという概念が素粒子モデルにおける真空の相転移という概念へと発展し、その宇宙論的な応用としてインフレーション理論が生み出されたのである。一方、超伝導理論は現在、様々な新奇な超伝導物質の発見によって新たな研究段階に入っている。特に、異方的な超伝導は、インフレーションにも非等方なモデルがあるのではないかと思わせる。しかし、常識的には宇宙無毛定理によってこのようなことは無いと信じられてきた。他方で、銀河団スケールの宇宙磁場の存在が観測的には指摘されている。このような大きなスケールで磁場をつくる最も自然な方法は、超重力理論に現れるインフラトン場とベクトル場の結合によって、インフレーション期間中に磁場をつくるというものである。磁場は宇宙膨張中に急速に減衰していくので現在期待されている値を外層するとインフレーション中にはベクトル場のエネルギー密度はインフラトン場のそれに匹敵するはずである。すなわち、ベクトル場による異方性が十分期待される。このような背景の下、我々は超重力理論におけるインフレーションモデルを研究し、非等方インフレーションモデルを発見した。

2. 研究の目的

我々の発見した非等方的なインフレーションは質的に豊かな現象論的な予言をもたらすことが予想できる。その現象論の詳細を明らかにすることが本研究の目的である。

具体的な目標は以下の通りである。

(1) 非等方インフレーションの現象論を明らかにするために、非等方宇宙での宇宙論的摂動理論を定式化する。

(2) 非等方的なインフレーションによって、曲率揺らぎと原始重力波に統計的な非等方性がどの程度現れるのかを明らかにする。

(3) 非等方的なインフレーションでは、従来のインフレーションではあり得ない曲率揺らぎと重力波との相互作用が存在する。また、曲率揺らぎと重力波の相互作用は、宇宙背景放射の温度揺らぎと偏光の B モードの相関を生成する。これらの現象の定量的な予言をすることが本研究の達成目標である。

(4) 上記の現象論的な研究とともに、超重力理論の他の寄与がインフレーションに与える効果の探求も行う。また、超弦理論への埋め込み可能性についても研究する。

3. 研究の方法

素粒子の標準理論に常に現れるゲージ場がインフレーションモデルにどのように寄与するのかを明らかにし、観測によって検証可能な予言を行うという目的を達成するためには、非等方宇宙における摂動手法の開発という理論的な問題を解決することが必須である。摂動理論を構築した後に、温度揺らぎのスペクトル、統計的非等方性、曲率揺らぎから重力波への転化、温度揺らぎと偏光の B モードの相関、重力波の偏光といった観測量を計算する。最終年には PLANCK のデータがリリースされる予定なので予言と観測の比較検討を行う。PLANCK のデータがリリースされるまでの3年間を、理論、観測量の計算、データとの比較検討、に3分割して研究を進める。

4. 研究成果

我々が発見した非等方インフレーションモデルは、超重力理論の枠組みではかなり自然に実現されることが明らかとなった。さらに、宇宙背景放射に対して様々な予言を与えること、従って検証可能なモデルであることも明らかにした。

(1) まず成さなければならなかったのは、非等方インフレーション宇宙における宇宙論的摂動論を構築することであったが、この目的は完全に達成することができた。これまでも様々な試みはあったが、我々の仕事は非等方宇宙の摂動論から具体的に結論を引き出すことに成功した世界で初めての例となった。

我々の構築した宇宙論的摂動理論を応用することで宇宙背景輻射のスペクトルの非対角成分を計算することで検証可能な予言を行うことに成功した。これは、公開されるであろうPLANCK衛星の観測データを詳しく解析することによって検証可能であることを示したことになる。検証されない場合にも、宇宙論と素粒子論との関係に新たな窓を開くという意義がある。

(2)非等方インフレーションモデルを様々な方向に拡張するという目的は完全に達成することができた。

特に、指数関数的ポテンシャル関数の場合に非等方インフレーションの厳密解を求めることに成功した。これは従来の解析に盲点があったことを示すとともに、非等方インフレーションの一般性を示したことになる。

これまでに、非アーベルゲージ場モデルへ拡張可能なことを示し、さらにベクトル場が複数ある場合への拡張にも成功した。特に、非等方性を最小にするようにベクトル場が時間発展することを明らかにした。これは宇宙無毛予想の変更を迫る重要な成果である。また、宇宙背景輻射のスペクトルの非等方性、曲率揺らぎと重力波の相関が、CMBの相関関数にどのように現れるかを明らかにした。特に、温度揺らぎと偏光揺らぎ相関の角度パワースペクトルの非対角成分の計算に成功した。

(3)最終的な目標は、Planckの観測データとの比較による非等方インフレーションの検証であった。しかし、データリリースが遅れたために、理論的な研究を行い、Planckのデータリリースに備えるという目的に切り替えた。

まず、現在までの研究を整理検討し、Physics Report誌に論文を投稿し、掲載が決定された。最近、パリティが破れるような結合の場合にも非等方インフレーションが起こることも明らかにした。また、非ガウス性の計算も行い、興味深い大きさの非ガウス性が存在することを明らかにした。さらに、非等方インフレーションを弦理論に埋め込むために、非アーベルゲージ場へのモデルの拡張に成功した。現在、これらの詳細な研究を遂行中である。

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 22 件)

- ① Y. Sakakihara, J. Soda, T. Takahashi, ``On Cosmic No-hair in Bimetric Gravity and the Higuchi Bound,`` PTEP 2013 033E02, (2013) 査読有, 10.1093/ptep/ptt004
- ② J. Garriga, S. Kanno, M. Sasaki, J. Soda, A. Vilenkin, ``Observer dependence of bubble nucleation and Schwinger pair production,`` JCAP 1212, 006 (2012), 査読有, 10.1088/1475-7516/2012/12/006
- ③ K. Nomura, J. Soda, ``When is Multimetric Gravity Ghost-free?,`` Phys. Rev. D 86, 084052 (2012) 査読有, 10.1103/PhysRevD.86.084052
- ④ S. Kanno, M. Sasaki, J. Soda, ``Destabilizing Tachyonic Vacua at or above the BF Bound,`` Prog. Theor. Phys. 128, 213-226 (2012) 査読有, 10.1143/PTP.128.213
- ⑤ J. Soda, ``Statistical Anisotropy from Anisotropic Inflation,`` Class. Quant. Grav. 29, 083001 (2012) 査読有, 10.1088/0264-9381/29/8/083001
- ⑥ K. Yamamoto, M. Watanabe, J. Soda, ``Inflation with Multi-Vector-Hair: The Fate of Anisotropy,`` Class. Quant. Grav. 29, 145008 (2012) 査読有, 10.1088/0264-9381/29/14/145008
- ⑦ S. Kanno, M. Sasaki, J. Soda, ``Tunneling without barriers with gravity,`` Class. Quant. Grav. 29, 075010 (2012) 査読有, 10.1088/0264-9381/29/7/075010
- ⑧ S. Kanno, J. Soda, ``Exact Coleman-de Luccia Instantons,`` Int. J. Mod. Phys. D21, 1250040 (2012) 査読有, 10.1142/S021827181250040X
- ⑨ A. Maleknejad, M. M. Sheikh-Jabbari, J. Soda, ``Gauge-flation and Cosmic No-Hair Conjecture,`` JCAP 1201, 016 (2012) 査読有, 10.1088/1475-7516/2012/01/016
- ⑩ T. Takahashi, J. Soda, ``Pathologies in Lovelock AdS Black Branes and AdS/CFT,`` Class. Quant. Grav. 29, 035008 (2012) 査読有, 10.1088/0264-9381/29/3/035008

⑪ S.Kanno, M. Sasaki, J.Soda,
`Holographic Dual of de Sitter Universe
with AdS Bubbles,'` Nucl. Phys. B855,
361-387 (2012) 査読有,
10.1016/j.nuclphysb.2011.10.020

⑫ J.Soda, H. Kodama, M. Nozawa,
`Parity Violation in Graviton
Non-gaussianity,'` JHEP 1108, 067 (2011)
査読有, 10.1007/JHEP08(2011)067

⑬ K. Murata, J.Soda,
`Anisotropic Inflation with Non-Abelian
Gauge Kinetic Function,'` JCAP 1106, 037
(2011) 査読有,
10.1088/1475-7516/2011/06/037

⑭ M. Watanabe, S.Kanno, J.Soda,
`Imprints of Anisotropic Inflation on the
Cosmic Microwave Background ,``
Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 412, L83-L87
(2011) 査読有,
10.1111/j.1745-3933.2011.01010.x

⑮ S.Kanno, J.Soda, M. Watanabe,
`Anisotropic Power-law Inflation,'` JCAP
1012, 024 (2010) 査読有,
10.1088/1475-7516/2010/12/024

⑯ S.Kanno, J.Soda, M. Watanabe,
`Cosmological Magnetic Fields from
Inflation and Backreaction,'` JCAP 0912,
009 (2009) 査読有

⑰ T. Takahashi, J.Soda,
`Catastrophic Instability of Small
Lovelock Black Holes,'` Prog. Teor. Phys.
124, 711-729 (2010) 査読有,
10.1143/PTP.124.711

⑱ T. Takahashi, J.Soda,
`Master Equations for Gravitational
Perturbations of Static Lovelock Black
Holes in Higher Dimensions,'`
Prog. Theor. Phys. 124, 911-924 (2010) 査
読有, 10.1143/PTP.124.911

⑲ S.Kanno, J.Soda, `Stability of
Holographic Superconductors,'` Phys. Rev.
D 82, 086003 (2010) 査読有,
10.1103/PhysRevD.82.086003

⑳ T. Takahashi, J.Soda,
`Hawking Radiation from Fluctuating
Black Holes,'` Class. Quant. Grav. 27,
175008 (2010) 査読有,
10.1088/0264-9381/27/17/175008

㉑ M. Watanabe, S.Kanno, J.Soda,
`The Nature of Primordial Fluctuations
from Anisotropic Inflation,'` Prog. Theor.
Phys. 123, 1041-1068 (2010) 査読有,
10.1143/PTP.123.1041

㉒ J.Soda,
`AdS/CFT on the brane,'` Lect. Notes Phys.
828, 235-270 (2011) 査読有,
10.1007/978-3-642-04864-7_8

[学会発表] (計 15 件)

① J. Soda
「Impact of gauge fields on
inflation」, 2012 international workshop
on String Theory and Cosmology, 2012 年
06 月 15 日, Grand Hotel, Pusan, Korea, 招
待講演

② J. Soda
「Anisotropic inflation」, Superstring
Cosmophysics, 2012 年 08 月 11 日, グランヴ
イリオホテル, 帯広, 招待講演

③ 早田次郎、
「Anisotropic Inflation and Statistical
Symmetry Breaking in the CMB」,
Pre-Planckian Inflation, 2011.10.8、
ミネソタ大学 (アメリカ) 招待講演

④ 早田次郎、
「Statistical Symmetry Breaking in the
CMB」, Pre-Planckian Inflation、
2011.7.14、INR (ロシア) 招待講演

⑤ Jiro Soda
「Fine Structures of Inflationary
Scenario I」招待講演,
Cosmology, Gravitation & High Energy
Physics 2010, 2010 年 6 月 28 日
Universiti Putra, Malaysia

⑥ Jiro Soda
「Fine Structures of Inflationary
Scenario II」招待講演,
Cosmology, Gravitation & High Energy
Physics 2010, 2010 年 6 月 29 日
Universiti Putra, Malaysia

⑦ Jiro Soda 「Fine Structures of
Inflationary Scenario III」招待講演
`Cosmology, Gravitation & High Energy
Physics 2010` 2010 年 6 月 30 日
Universiti Putra, Malaysia

⑧ Jiro Soda 「Fine Structures of Inflationary Scenario IV」招待講演
`Cosmology, Gravitation & High Energy Physics 2010” 2010年7月1日
Universiti Putra, Malaysia

⑨ Jiro Soda 「Anisotropic inflation with a gauge kinetic function」
Gravity Cosmology 2010 2010年7月13日
京都大学基礎物理学研究所

⑩ Jiro Soda 「Anisotropic Inflation and Its Observational Predictions」
Summer Institute 2010 Cosmology & String
2010年8月12日 富士吉田

⑪ 早田次郎、菅野優美
「ホログラフィック超伝導の安定性解析」
日本物理学会 2010年9月11日
九州工業大学

⑫ 高橋智洋, 早田次郎
「Lovelock Black Hole の安定性解析」
日本物理学会 2010年9月11日
九州工業大学

⑬ 渡辺晶明, 菅野優美, 早田次郎
「非等方インフレーションモデルのCMB観測による検証」
日本物理学会 2010年9月14日
九州工業大学

⑭ Jiro Soda
「Anisotropic inflation with gauge kinetic function」
KEK-CPWS ExDiP2010 `Extra-Dimension Probe by Cosmophysics’
2010年11月9日 KEK

⑮ 早田次郎
「真空崩壊と境界を持った時空のダイナミクス」
特異点研究会 2011年1月9日
神奈川工科大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早田 次郎 (SODA JIRO)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：00222076