

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年4月5日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2009

課題番号：18540262

研究課題名（和文） ローレンツ不変性の破れの可能性とその宇宙論へのインパクト

研究課題名（英文） A Possible Lorentz Violation and Its Impact on Cosmology

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）：

観測の発展に伴い、ローレンツ不変性のような基礎原理の再検討が重要となっている。また、精密観測は理論的な微細構造の探求も促している。それが如何に小さな効果でも考察の余地がある。このような動機のもと、ローレンツ不変性の破れの宇宙論へのインパクトを研究した。その結果、自発的にローレンツ不変性が破れることで非等方インフレーションがおきることを発見した。この背景時空上での宇宙論的摂動理論を構築し、将来の宇宙背景放射観測において重要となる様々な観測量の予言に成功した。

研究成果の概要（英文）：

Due to developments of observations, it becomes important to check the fundamental principle such as Lorentz invariance. Moreover, precision cosmology urged us to study theoretical fine structure. However small it is, it is worth exploring in detail. Based on this motivation, we have studied the impact of Lorentz violation on cosmology. We found an anisotropic inflationary scenario where Lorentz invariance is spontaneously broken. We also formulated cosmological perturbation theory in this background and succeeded in making predictions for various observables relevant to future observations of cosmic microwave background radiation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,300,000	660,000	3,960,000

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：宇宙論

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙背景輻射探査衛星WMAPの成果は、精密科学としての宇宙論を確立すると同時に、大きな謎を残した。事実、宇宙のエネルギー密度の96パーセントはダークエネルギー、ダークマターと呼ばれる未知の物質から成っていることが明らかとなった。また、宇宙背景輻射の揺らぎのスペクトルは、インフレーション理論を強く支持したが、肝心のインフラトンの正体はいまだによく分からない。

このような異常な状況では理論の基礎となる仮定を再考することは重要であり、高エネルギー宇宙線などの観測事実や超弦理論による理論的な示唆を考慮すると、ローレンツ不変性の破れの可能性は、真っ先に検討すべきであると考えられる。実際、Bekensteinなどは、ローレンツ不変性の破れたスカラー・ベクトル・テンソル理論でダークマターを説明することを試みて、部分的にはあるが成功を収めている。

また、宇宙論的精密観測が可能であるために、たとえローレンツ不変性の破れの効果がダークエネルギーの説明などに無力であっても、数パーセント程度の変更しか与えないとしても、精密宇宙論という意味では十分に考察に値するという時代になっている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、「ローレンツ不変性の破れを許す重力理論」としてのスカラー・ベクトル・テンソル重力理論の枠組みで、宇宙のダークエネルギー、ダークマター、インフレーション理論等の諸問題を解決する可能性を探求することにある。

同時に、スカラー・ベクトル・テンソル理論と超弦理論との関係を研究し、ローレンツ不変性の破れを通じた超弦理論の検証の道も探る。

素粒子理論において中心的な役割を果たすベクトル場が初期宇宙においてどのような役割を果たすかを明らかにし、逆にそこから素粒子モデルのベクトル場に何らかの制限を得ることも目的とする。

精密観測の時代にはそれに見合った理論的微小構造の研究が必要となる。数パーセントの微小構造まで見ればインフレーション宇宙にはもっと豊かな構造があり、新たな宇宙の描像が隠されているはずである。本研究では、新たな宇宙像の構築とその検証のための観測の提案も目的とする。その観測に対する予言を行うための理論的な研究も行う。

## 3. 研究の方法

ローレンツ不変性を破る様々な可能性の検討と新たな機構の研究を行う。特に、ベクトル場が初期宇宙において果たす役割を明らかにすることで新たな宇宙像の構築を行う。

超重力理論に着目し、ベクトル場の役割を明らかにするために、時空の非等方性を許した解析を行う。

ローレンツ不変性、特に回転対称性が破れる場合には新たな宇宙論的摂動理論の開発が必要となるので、その研究を行う。

新たに構築した宇宙論的摂動理論を用いて宇宙背景輻射の観測量に対する予言を行う。PLANCKなどによる観測との比較検討を行う。

## 4. 研究成果

本研究における最大の成果は非等方インフレーションモデルの発見にある。これは、ローレンツ不変性の破れが果たす宇宙論的な役割の研究のなかから生まれた偶然の発見であるが、ローレンツ不変性の破れが最も自然に起きるモデルの発見という見方もできる。

以下、他の成果も含めて項目ごとに研究成果をまとめる。

(1) スカラー・ベクトル・テンソル理論におけるインフレーションの研究を行い、インフラトンのポテンシャルが存在しないような場合にも、ローレンツ不変性の破れに起因したインフレーション機構が存在することを明らかにした。この成果はインフレーションモデル構築に新しい可能性を開いた。

(2) 超弦理論では、ローレンツ変換の一部であるパリティ対称性が破れているような重力理論が予言される。この理論における原始重力波の円偏光の可能性を指摘した。特に、ガウス・ボンネ項が存在する場合には円偏光の生成が増幅されることを発見した。この重力波の円偏光は宇宙背景輻射の温度と電磁波の偏光  $B$  モードとの相関を生み出すので宇宙背景輻射の観測で検証することができる。

(3) インフレーション中にベクトル場が存在する場合に統計的非等方性が生じる機構を発見した。また、非等方性が非ガウス性と強く結びついていることも明らかにした。これらの予言は近い将来宇宙背景輻射観測によって立証される可能性を持っている。

(4) ローレンツ不変性を破ることで繰り込み

可能な量子重力理論が構築できるということが Horava によって指摘された。我々は、このような理論では一般的にパリティ不変性が破れていることに着目し、原始重力波の円偏光を観測することで理論の検証を行うことができることを明らかにした。

(5) 我々は、超重力理論などのインフラトンと結合するベクトル場が存在するようなインフレーションモデルにおいては、宇宙が非等方的に膨張することが可能であることを明らかにした。これは宇宙無毛仮説に対する反例を与えることになり、純粋に理論的にもインパクトのある結果である。特に興味深いのは、非等方インフレーションはアトラクターになっていて、非等方がインフレーションのスローロールパラメータで与えられているという普遍性が存在することである。これは、非等方インフレーションモデルの強い予言性を意味している。

(6) 非等方インフレーション宇宙では、宇宙背景輻射の温度揺らぎと偏光の揺らぎの相関や揺らぎの統計的非等方性が期待される。これらの観測量に対して定量的な予言を行うために非等方宇宙における宇宙論的摂動理論の構築を行った。非等方背景宇宙ではスカラー型、ベクトル型、テンソル型の摂動が混じり合うために解析が複雑であるが、我々はゲージの自由度をうまく使うことで見通しの良い摂動の作用を得ることに成功した。

(7) 非等方宇宙での摂動理論を用いることで揺らぎの非等方性が期待されたものよりもずっと大きなものであることを明らかにした。特に、原始重力波に比べて曲率揺らぎでの統計的な非等方性が2けたほど大きいことを示した。曲率揺らぎと原始重力波の相関も観測可能な大きさで現れることも明らかにした。重力波の偏光も期待されたのであるが、これは非常に小さいことが分かった。これらの成果は、将来の宇宙背景輻射観測計画にとっても重要な意義を持つものである。

これまでの解析では最も簡単な非等方時空を仮定してきたが、これはもっと一般の場合に拡張可能である。今後は、超重力理論の枠組みで系統的な非等方インフレーション宇宙の研究を行う必要がある。数年後にデータがリリースされるであろう PLANCK の観測との比較検討は将来の重要な研究テーマである。

## 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 11 件)

① S.Kanno, J.Soda, M.Watanabe, "Cosmological Magnetic Fields from Inflation and Backreaction," JCAP 0912, 009 (2009) 査読有

② T.Takahashi, J.Soda, "Chiral Primordial Gravitational Waves," Phys. Rev. Lett. 102, 231301 (2009) 査読有

③ M.Watanabe, S.Kanno, J.Soda, "Inflationary Universe with Anisotropic Hair," Phys. Rev. Lett. 102, 191302 (2009) 査読有

④ M. Satoh, J. Soda, "Higher Curvature Corrections to Primordial Fluctuations in Slow-roll Inflation," JCAP 0809, 019 (2008) 査読有

⑤ S.Kanno, M.Kimura, J.Soda, S.Yokoyama, "Anisotropic Inflation from Vector Impurity," JCAP 0808, 034 (2008) 査読有

⑥ S.Yokoyama, J.Soda, "Primordial statistical anisotropy generated at the end of inflation," JCAP 0808, 005 (2008) 査読有

⑦ M.Satoh, S.Kanno, J.Soda, "Circular Polarization of Primordial Gravitational Waves in String-inspired Inflationary Cosmology," Phys. Rev. D 77, 023526 (2008) 査読有

⑧ S.Kanno, D.Langlois, M.Sasaki, J.Soda, "Kaluza-Klein braneworld Cosmology with static internal dimensions," Prog.Theor.Phys. 118, 701-713 (2007) 査読有

⑨ K.Izumi, J.Soda, "Renormalized Newtonian Cosmic Evolution with Primordial Non-Gaussianity," Phys. Rev. D 76, 083517 (2007) 査読有

⑩ R.Brandenberger, S.Kanno, J.Soda, D.Easson, J.Khoury, P.Martineau, A.Maeri, S.P.Patil,

``More on the spectrum of perturbations in string gas cosmology," JCAP 0611, 009 (2006) 査読有

⑩ S.Kanno, J.Soda,  
``Lorentz violating inflation," Phys. Rev. D 74, 063505 (2006) 査読有

〔学会発表〕(計 4 件)

① 早田次郎、  
「ガウス・ボンネブラックホールと超伝導」、  
日本物理学会、2010年3月20日、岡山大学

② 早田次郎、  
「Horava-Lifshitz 重力と宇宙論」、  
日本物理学会、2009年9月10日、甲南大学

③ 早田次郎、  
「AdS ブラックホールと宇宙論の対応にむけて」、  
日本物理学会、2008年9月22日、山形大学

④ 早田次郎、  
「Hawking Radiation from Squashed Kaluza-Klein Black Holes」、  
日本物理学会、2007年9月22日、北海道大学

## 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