

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 24 年 5 月 18 日現在

機関番号：14301

研究種目：学術創成研究費

研究期間：2007～2011

課題番号：19GS0219

研究課題名（和文） 超弦理論と宇宙の創成

研究課題名（英文） Superstring Theory and Creation of Universe

研究代表者

江口 徹 (EGUCHI TORU)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：20151970

研究成果の概要（和文）：宇宙の創成やブラックホールは現代物理学の最大の謎である。これらの謎に挑戦する学際的、先進的な研究を日本の超弦理論と宇宙論分野の研究者が協力して行なった。ブラックホールの量子状態、インフレーション宇宙における非ガウスの揺らぎの生成、ゆらぎのスペクトルのスケール不変性等について非常に興味のある結果が得られた。また、合宿形態の勉強会を持つ事により、素粒子、宇宙論料分野の研究者の連携が強まった。

研究成果の概要（英文）： Creation of universe and the existence of black holes are the biggest mysteries of modern physics. We have undertaken a study on these mysteries by the collaborative efforts of the communities of string theory and cosmology. Very interesting results on the microstates of black holes, generation of non-Gaussian fluctuation in inflational universe and the scale invariance of fluctuation spectra have been obtained. We have organized several joint campings of string and cosmology communities which strengthened the mutual collaborations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	31,400,000	9,420,000	40,820,000
2008年度	29,200,000	8,760,000	37,960,000
2009年度	30,600,000	9,180,000	39,780,000
2010年度	30,600,000	9,180,000	39,780,000
2011年度	30,600,000	9,180,000	39,780,000
総計	152,400,000	45,720,000	198,120,000

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：超弦理論、宇宙論、宇宙の創成

1. 研究開始当初の背景

宇宙の創成を議論するための基礎理論としては超弦理論が最も有力であるが、日本ではこれまで超弦理論と宇宙論の間の研究者の交流が限られていた。日本が世界の研究をリードしてゆくためにも、これら異なる分野の一流の研究者を一同に集め、その交流を組織的に押し進める必要がある。

2. 研究の目的

宇宙のはじまりは、極微の空間に巨大な質量が押し込められた極限的な状態である。このような世界を記述するためには量子論的な重力理論が必要であるが、その有力候補が超弦理論である。この研究では超弦理論を用いて宇宙創成の謎に挑戦することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者、分担者(6名)は共に、それぞれ超弦理論、宇宙論の専門家であり、各自の研究を更に発展させる事が重要である。

(2) また、同時に、他方の分野の研究者との組織的な交流を通じて、新しい手法やアプローチ、物理の見方などを吸収する必要がある。このため、合宿形式の研究集会を数多く開き、日常的に議論を行う事から共通の課題や現状認識等を育てることを目指す。

4. 研究成果

(1) 江口は 2010 年に K3 曲面上にコンパクト化された超弦理論を調べその楕円種数を $N=4$ 共形代数の指標関数で展開すると、展開係数にマシュー群 M_{24} の規約表現の次元が現れることを発見した。マシュー群 M_{24} は散散的離散群のひとつで 24 個の要素の置換からなる対称群 S_{24} の部分群であり、ゴレーコードを不変に保つことで知られている。この現象はモジュラー J 関数の展開係数がモンスター群の規約表現の次元に分解される現象、monstrous moonshine とよく似ているためマシュー moonshine と呼ばれている。K3 曲面は超弦理論において基本的で K3 曲面に D5 ブレーンを巻きつけることにより標準的なブラックホールが構成されることが知られている。我々の結果はブラックホールのマイクロ状態にマシュー群のような離散的な対称性が存在することを示唆しており非常に興味深い。現在、マシュー moonshine の説明がいろいろな方向から試みられているがまだ成功していない。

(2) 最近、インフレーション宇宙に非ガウスの揺らぎの生成可能性が盛んに議論されている。そこで佐々木は、非ガウス性揺らぎを生成するモデルとして、ハイブリッド・インフレーションを一般化したマルチブリッド・インフレーションを提唱し、そのモデルにおける量子揺らぎの性質をデルタ N 形式を用いて詳しく解析した。このモデルは、インフレーションが 2 次相転移で終了するので、弦理論に基づくブレーン・インフレーションなどで実現されると考えられる。解析の結果、観測されている揺らぎのスペクトルを完全に再現しつつ、近い将来の検出が十分可能な比較的大きな非ガウス性が生成される可能性を明らかにした。また、生成されるテンソル揺らぎも評価し、それについても検出可能な大きさの揺らぎが同時に生成される可能性を示した。非ガウス性とテンソル揺らぎが同時に検出可能なモデルは他にないため、それらの同時観測はマルチブリッドモデルの検証という意味だけでなく、その背後にある弦理論の検証に近づくという意味で、非常に大きな意味を持つ。

(3) 杉本は、2007 年に出版された畑氏、酒井氏、山戸氏との共著論文 "Baryons from instantons in holographic QCD" では、ある種の曲がった時空における超弦理論が 4 次元のゲージ理論と等価になるという予想に基づき、バリオンを解析する方法を開発した。超弦理論を用いてバリオンのスペクトルを計算し、実験データを定性的にかなりうまく再現することを示した。特に、核子の励起状態にパリティが負の粒子と正の粒子がほぼ縮退して現れるという、ナイーブなクォークモデルでは説明できない不思議な性質を自然に再現したことは特筆に値する。この研究によって、弦理論の分野で最も重要とされる国際会議 Strings07 などの多くの国際的な研究会で招待講演をすることになり、また、第 16 回日本物理学会論文賞を受賞した。ここで開発された方法は、バリオンを弦理論によって記述する際の基本的な方法として国内外の多くの研究に応用されている。杉本自身もその後、この方法を応用して核子の磁気モーメント、荷電半径、形状因子などの計算や、核力の研究などを行った。

(4) 超弦理論から動機付けられたブレーンワールド模型、特に大余剰次元模型においては高次元ブラックホールの加速器実験での生成可能性が指摘されている。近似的に高次元時空は漸近的に平坦な時空として扱われるが、重力崩壊過程の動的様子を把握するために、光的無限遠方の解析が必要不可欠である。また、遠方の振る舞いから高次元時空を分類する観点からも重要である。そこで、白水は共同研究者とともに、任意次元において Bondi 座標を導入し、Einstein 方程式を遠方で解くことで、遠方の対称性を保存するための漸近条件を特定することに成功した。さらに、エネルギーが重力波放出によって単調に減少することも示した。当初、奇数次元ではこのような解析は困難と考えられていたため、本研究のインパクトは大きかった。この研究は高次元ブラックホール時空の分類並びに安定性に関する研究に応用されている。

(5) 高柳は、AdS/CFT 対応もしくはホログラフィー原理を用いて、共形場理論(CFT)のエンタングルメント・エントロピー(EE)を共変的な形で計算する方法を定式化した。時間に依存する背景における CFT に対しては、笠と高柳によって発見されたホログラフィック・エンタングルメントエントロピーの公式は適用できない。このため、時間スライスを取り方に依存しない、すなわち共変的な定式化を考える必要があり、今回これを開発した。ブラックホールが生成する過程は、AdS/CFT 対応を用いると CFT の熱化現象と等価であることが期待される。最近の統計物理などで熱化

現象の良いオーダーパラメーターとして EE がしばしば用いられる。我々のこの研究成果によって、重力理論の側からどのように熱化が起きているのか調べることが可能になり、ここ数年、我々の手法が世界中で盛んに用いられるようになってきた。今後も、非平衡物理などへの応用が大いに期待される。

(6) 銀河などの宇宙の豊かな構造は、量子揺らぎを種として生まれたと考えられている。そのため、初期宇宙の量子揺らぎの起源は、宇宙論における最も重要な課題の一つである。また、宇宙背景放射の観測から、揺らぎのスペクトルは、ほぼスケール不変であることが分かっている。向山は、新しい量子重力理論 (Horava-Lifshitz 理論) に基づき、スケール不変な量子揺らぎを生成するシナリオを提唱した。この理論は高エネルギーにおける振る舞いが良く、そのために量子重力理論の候補と考えられているが、その本質的理由は、anisotropic scaling と呼ばれる性質である。向山が Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 0906 (2009) 001-0~8 で提唱したシナリオは、この anisotropic scaling のみに基づいているため、現在までに提唱された、Horava-Lifshitz 理論の 3 つのバージョン (projectable version, non-projectable extension, U(1) extension) の全てにユニバーサルなシナリオである。

(7) 細道は、局所化原理に基づく 3 次元超対称ゲージ理論の球面上の分配関数を広いクラスの理論に対して与える一般公式を導くことに成功した (“Notes on SUSY Gauge Theories on Three-Sphere”. JHEP (2011), 03: 127.)。また、超対称性を保ちつつ 3 次元球面を楕円体に歪ませる変形が存在し、その下で分配関数の表式が特徴的な変更を受けることを厳密に導いた (“SUSY Gauge Theories on Squashed Three-Spheres”. JHEP (2011), 014.)。近年の超弦理論の進展においては、4 次元場の理論と 2 次元共形場理論の物理量の間になり立つ種々の関係式 (A G T 対応) が盛んに研究されているが、上の成果はこれに新たな拡張が存在することを示唆するもので注目されている。

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 125 件) (全て査読有)

- 1 Tohru Eguchi and Kazuhiro Hikami. “Note on twisted elliptic genus of K3 surface”. Physics Letters B (2011), 694: 446-455.

DOI:10.1016/j.physletb.2010.10.017

- 2 Tohru Eguchi, Hirosi Ooguri and Yuji Tachikawa. “Notes on the K3 surface and the Mathieu group M24”. Experimental Mathematics (2011), 20: 91-96. DOI:10.1080/10586458.2011.544585

- 3 Daisuke Yamauchi, Andrei Linde, Atsushi Naruko, Misao Sasaki, and Takahiro Tanaka. “Open inflation in the landscape”. Physics Review D (2011), 84: 043513. DOI: 10.1103/PhysRevD.84.043513

- 4 K. Tanabe, S. Kinoshita and T. Shiromizu. “Asymptotic flatness at null infinity in arbitrary dimensions”. Physical Review D (2011), 84: 044055. DOI:10.1103/PhysRevD.84.044055

- 5 T. Takayanagi. “Holographic Dual of BCFT”, Physical Review Letters (2011), 107: 101602. DOI:10.1103/PhysRevLett.107.101602

- 6 Naofumi Hama, Kazuo Hosomichi and Sungjay Lee. “Notes on SUSY Gauge Theories on Three-Sphere”. JHEP (2011), 03: 127. DOI:10.1007/JHEP03(2011)127

- 7 Naofumi Hama, Kazuo Hosomichi and Sungjay Lee. “SUSY Gauge Theories on Squashed Three-Spheres”. JHEP 1105(2011), 014. DOI:10.1007/JHEP05(2011)014

- 8 Tohru Eguchi and Kazunobu Maruyoshi. “Penner type matrix model and Seiberg-Witten theory”. JHEP (2010), 1002: 022. DOI:10.1007/JHEP02(2010)022

- 9 Toshiya Imoto, Tadakatsu Sakai and Shigeki Sugimoto. “Mesons as Open Strings in a Holographic Dual of QCD”. Progress of Theoretical Physics (2010), 124: 263-284. DOI:10.1143/PTP.124.263

- 10 R. Emparan, S. Ohashi and T. Shiromizu. “No-dipole-hair theorem for higher-dimensional static black holes”. Physical Review D (2010), 82: 084032. DOI:10.1103/PhysRevD.82.084032

- 11 Tohru Eguchi and Kazuhiro Hikami. “Superconformal algebra and Mock theta functions” . Journal of Physics A (2009), 42: 304010.
DOI:10.1088/1751-8113/42/30/304010
- 12 Atsushi Naruko and Misao Sasaki. “Large non-Gaussianity from multi-brid inflation” . Progress of Theoretical Physics (2009), 121: 193-210.
DOI:10.1143/PTP.121.193
- 13 Koji Hashimoto, Tadakatsu Sakai and Shigeki Sugimoto. “Nuclear Force from String Theory” . Progress of Theoretical Physics (2009), 122: 427-476.
DOI:10.1143/PTP.122.427
- 14 M. Fujita, W. Li, S. Ryu and T. Takayanagi. “Fractional Quantum Hall Effect via Holography: Chern-Simons, Edge States, and Hierarchy” . JHEP (2009), 0906: 066.
DOI:10.1088/1126-6708/2009/07/066
- 15 T. Kobayashi and S. Mukohyama, ” Curvatons in Warped Throats” , Journal of Cosmology and Astroparticle Physics , 0907(2009) 032: 1~20.
DOI:10.1088/1475-7516/2009/07/032
- 16 Shinichiro Kinoshita, Shinji Mukohyama, Shin Nakamura and Kin-ya Oda. “Consistent Anti-de Sitter-Space / Conformal-Field-Theory Dual for a Time-Dependent Finite Temperature System” . Physical Review Letters (2009), 102: 031601.
DOI:10.1103/PhysRevLett.102.031601
- 17 Shinji Mukohyama. ” Scale-invariant cosmological perturbations from Horava-Lifshitz gravity without inflation” . Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (2009), 0906: 001.
DOI:10.1088/1475-7516/2009/06/001
- 18 Shinji Mukohyama, “Dark matter as integration constant in Horava-Lifshitz gravity” , Physical Review D (2009), 80: 064005.
DOI:10.1103/PhysRevD.80.064005
- 19 Misao Sasaki. “Multi-brid inflation and non-Gaussianity” . By Misao Sasaki. Progress of Theoretical Physics (2008), 120: 159-174.
DOI:10.1143/PTP.120.159
- 20 Nathalie Deruelle, Misao Sasaki and Yuuiti Sendouda. “Detuned’ f(R) gravity and dark energy” . Physical Review D (2008), 77: 124024.
DOI:10.1103/PhysRevD.77.124024
- 21 Koji Hashimoto, Tadakatsu Sakai and Shigeki Sugimoto. “Holographic Baryons: Static Properties and Form Factors from Gauge/String Duality” . Progress of Theoretical Physics (2008), 120: 1093-1137.
DOI:10.1143/PTP.120.1093
- 22 T. Nishioka and T. Takayanagi. “On Type IIA Penrose Limit and N=6 Chern-Simons Theories” . JHEP (2008), 0808: 001.
DOI:10.1088/1126-6708/2008/08/001
- 23 V. Hubeny, M. Rangamani and T. Takayanagi. “A covariant holographic entanglement entropy proposal” . JHEP (2008), 0707: 062.
DOI:10.1088/1126-6708/2007/07/062
- 24 Hiroyuki Hata, Tadakatsu Sakai, Shigeki Sugimoto and Shinichiro Yamato. “Baryons from instantons in holographic QCD” . Progress of Theoretical Physics (2007), 117: 1157-1180.
DOI:10.1143/PTP.117.1157
- 25 F. Arroja, T. Kobayashi and K. Koyama and T. Shiromizu. “Low energy effective theory on a regularized brane in 6D gauged chiral supergravity” . JCAP (2007), 12: 006.
DOI:10.1088/1475-7516/2007/12/006
- 26 A. Shirata, Y. Suto, C. Hikage, T. Shiromizu and N. Yoshida. “Galaxy clustering constrains on deviations from Newtonian gravity at cosmological scales II: Perturbative and numerical analysis of power spectrum and bispectrum” . Physical Review D (2007), 76: 044026.
DOI:10.1103/PhysRevD.76.044026

[学会発表] (計 162 件)

- 1 白水 徹也, 「(高次元)一般相対論における未解決問題」, 小研究会 第二回 General Relativity and Mathematics, 東北大学, 仙台市, March 21 (2012).
- 2 T. Takayanagi, “Entanglement Entropy and AdS/CFT”, The CERN Winter School on Supergravity, Strings and Gauge Theory, CERN, Geneva, Switzerland, February 6–10, (2012).
- 3 Tohru Eguchi, Elliptic genus of K3 surface and Mathieu group M24. Workshop on Mathieu moonshine, ETH, Zurich, Switzerland, July 7 (2011).
- 4 Misao Sasaki, Open inflation in the string landscape, Xth International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC10), Quy-Nhon, Vietnam, December 17–22 (2011).
- 5 Misao Sasaki, Delta N Formalism and Curvature Perturbations on Superhorizon Scales, Conference on Cosmology Since Einstein, HKUST, Hong Kong, May 30–June 1 (2011).
- 6 Shigeki Sugimoto, Holographic Description of Hadrons from String Theory, 35th Johns Hopkins Workshop on AdS/CFT and its Applications, Eötvös University, Budapest, June 22–24 (2011).
- 7 Shigeki Sugimoto, Holographic Description of Hadrons from String Theory, Rencontres de Moriond, QCD and High Energy Interactions, La Thuile, Italy, March 20–27 (2011).
- 8 白水 徹也, 「相対性理論、次元、そして特異点」, 理研研究会「数理解連携 10 の根本問題の発掘」, 理化学研究所, 和光市, December 27 (2011).
- 9 T. Takayanagi, “Holographic Entanglement Entropy and its New Developments”, Strings 2011, Uppsala Concert and Congress Hall, Uppsala, Sweden, June 27–July 1, (2011).
- 10 Shinji Mukohyama, “Cosmological implications of Horava-Lifshitz gravity”, Pre-Planckian Inflation, University of Minnesota, Minneapolis, U.S.A., October 8 (2011).
- 11 Tohru Eguchi, Entropy of manifold with reduced holonomy. Symplectic Geometry, non-Commutative geometry and Physics, University of California, Berkeley, MSRI, U.S.A. May 14 (2010).
- 12 江口 徹, 超弦理論と現代数学 東京大学理学部物理学教室談話会, 東京大学, January 29 (2010).
- 13 白水 徹也, “Static dipole black objects”, Summer Institute 2010, 富士研修所, 富士吉田市, August 9 (2010).
- 14 向山 信治, 「CMB と超高エネルギー物理」, CMB ワークショップ, 国立天文台, 三鷹市, June 8 (2010).
- 15 向山 信治, “What is cosmology telling us about fundamental physics?”, 16th ICEPP Symposium, 岳美山荘, 白馬, 長野, February 14–15 (2010).
- 16 Misao Sasaki, Non-gaussianity from inflation, The Unity of the Universe, Portsmouth University, Portsmouth, June 29–July 1 (2009).
- 17 Misao Sasaki, Non-Gaussian Curvature Perturbations from Multi-Brid Inflation, 4th Sahkarov Symposium on Physics, Lebedev Institute, Moscow, May 18–23 (2009).
- 18 白水 徹也, 「宇宙の謎に迫る～ブレーンワールド～」, 信州大学理学部講演会, 信州大学, 松本市, October 27 (2009).
- 19 T. Takayanagi, “Holographic Entanglement Entropy, Fractional Quantum Hall Effect, and Lifshitz-like Fixed Points”, Quantum Theory and Symmetries 6, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA, July 23 (2009).
- 20 Tohru Eguchi, Decoupling limit in string theory and the mass hierarchies. 50th Anniversary, IHES, Paris, June 16 (2008).
- 21 Shigeki Sugimoto, Properties of Baryons from D-branes and Instantons,

Continuous Advances in QCD (CAQCD08),
University of Minnesota, Minneapolis,
USA, May 15-18 (2008).

22 Shinji Mukohyama, “Brane inflation in
string cosmology”, Quarks 2008,
Sergiyev Posad, Russia, May 24 (2008).

23 Shigeki Sugimoto, Baryons from
Instantons in Holographic QCD”,
Strings 07, The Universidad Auto’noma
de Madrid, Madrid, Spain, June 25-29
(2007).

24 T. Takayanagi, “Entanglement Entropy
from AdS/CFT”, Miami 2007, Celebrating
ten years of AdS/CFT, Lago Mar Resort,
Fort Lauderdale, Florida, December 16
(2007).

[その他]

ホームページ等

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~stcu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江口 徹 (EGUCHI TORU)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：20151970

(2) 研究分担者

佐々木 節 (SASAKI MISAO)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：70162386

(H20：連携研究者)

杉本 茂樹 (SUGIMOTO SHIGEKI)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任
教授

研究者番号：80362408

(H20：連携研究者)

白水 徹也 (SHIROMIZU TETSUYA)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10282716

(H20：連携研究者)

高柳 匡 (TAKAYANAGI TADASHI)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任
准教授

研究者番号：10432353

(H20：連携研究者)

向山 信治 (MUKOHYAMA SHINJI)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任
准教授

研究者番号：40396809

(H20：連携研究者)

細道 和夫 (HOSOMICHI KAZUO)

京都大学・基礎物理学研究所・特定准教授
(GCOE)

研究者番号：60540557

(H20→H23：分担者)

(3) 連携研究者

()

研究者番号：