

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 30 日現在

機関番号：32638

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540293

研究課題名(和文) 初期宇宙論とブラックホールの微視的理論の超弦理論に基づく構成

研究課題名(英文) Cosmology of early universe and the microscopic theory of black holes based on superstring theory

研究代表者

関野 恭弘 (Sekino, Yasuhiro)

拓殖大学・工学部・准教授

研究者番号：50443594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：超弦理論に基づき(1)初期宇宙像と現在の宇宙への影響の解明(2)ブラックホールの量子論の構成に向けた研究を行った。(1) 超弦理論から示唆されるバブルの生成によって生まれた宇宙の観測的指標、超弦理論に存在する多数の場の量子効果によるインフレーションの実現の新しいメカニズム、現在の宇宙の暗黒エネルギーの、宇宙初期に生成された量子揺らぎとしての導出、に関する研究を行った。(2)超弦理論ではDブレーンの多体系がブラックホールを表す。Dブレーンを記述する行列模型のスペクトルの解明と平衡化に関する性質の導出、D0ブレーンが作るブラックホールの流体的性質のゲージ/重力対応に基づく研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We performed studies based on superstring theory, aiming at: (1) an understanding of the early universe and its implications for the present universe, (2) a construction of quantum theory of black holes. (1) We investigated (i) observational signatures of a universe created by bubble nucleation which is suggested by superstring theory, (ii) a new mechanism for the realization of Inflation based on quantum effects of a large number of fields present in superstring theory, (iii) possible derivation of Dark Energy in the present universe as quantum fluctuations generated in the early universe. (2) In superstring theory, black holes are represented as many-body systems of D-branes. We studied a matrix model for D-branes, found its spectrum, and derived some properties about the equilibration. We also studied hydrodynamic properties of black holes made by D0-branes, using the gauge/gravity correspondence.

研究分野：数物系科学

キーワード：素粒子理論 超弦理論 宇宙論 ブラックホール

## 1. 研究開始当初の背景

量子重力理論である超弦理論は、宇宙の起源や、ブラックホールに落ちた物質の情報が保存されるか否か、といった難問の解決への手掛かりを与えてくれると期待される。超弦理論は、平坦な時空のまわりの摂動論(小さい揺らぎの理論)として定式化されているという点で理論的に未完成な段階にあるが、1990年代後半以降、理論の非摂動的性質が明らかになり始め、宇宙論やブラックホールの量子論への応用の道が開けてきた。

超弦理論において宇宙論がどう記述されるかについては、2000年代以降、「超弦理論のランドスケープ」という考え方が発展してきた。それによると、我々の宇宙は、量子的トンネル効果に伴うバブルの生成によって生まれたと考えられる。そのような宇宙の起源が現在の宇宙にどのような影響を与えるかを理論的に明らかにし、超弦理論の観測的検証につなげることが大きな目標である。また、我々の宇宙が生成された後、いわゆるインフレーションという急激な加速膨張期があったと信じられているが、インフレーションを理論的に導出することはこれまで出来ておらず、大きな課題となっている。さらに、現在の宇宙も加速膨張していることが分かっているが、膨張を引き起こすエネルギー(暗黒エネルギー)の不自然な小ささを説明することも出来ていない。その説明も量子重力理論に課された大きな課題である。

ブラックホールは、量子的効果を考慮すると、エントロピーと温度を持った熱力学的物体であることが分かっており、量子的輻射を放出して最終的に蒸発すると考えられている。エントロピーが何の状態数を表しているのか、ブラックホールの蒸発の際ブラックホールを構成していた物質の情報が保存されるのか、が長年の問題となっている。超弦理論によると、ブラックホールは、ソリトンの物体であるDブレーンの集合体であると考えられており、Dブレーン多体系の性質の解明が、ブラックホールの謎の解明の鍵になると考えられている。これまで、特定の超対称性を保ったブラックホールに関しては、エントロピーがDブレーンの状態数として導出されており、また、Dブレーン理論の数値シミュレーションによりブラックホールの熱力学との整合性の証拠が得られる、といった発展があったが、より一般の場合に関して、平衡状態のみならずダイナミカルな発展を含めた性質の理解が望まれている。

## 2. 研究の目的

超弦理論に基づき、(1)初期宇宙論、(2)ブラックホールの微視的理論、という2つの課題に関する研究を行う。

(1)初期宇宙論に関して、以下の3つのテーマの研究を行う。

バブルの生成によって生まれた宇宙における宇宙背景輻射(CMB)の性質を詳細に

調べ、超弦理論の観測的検証を目指す。バブルの生成は、揺らぎの長距離モードに影響を与えるので、WMAP、PLANCK衛星等の観測で報告されているCMBの温度揺らぎの長波長モードの異常な小ささがそれにより説明できるかを検討する。

宇宙初期のインフレーションが、超弦理論に存在する多数の場の量子効果による真空エネルギーにより与えられるという可能性を追求する。その場合のCMBの揺らぎの性質を明らかにして観測への示唆を与える。また、量子効果からの反作用を考慮した時空の発展を調べ、通常仮定されているような平坦なポテンシャルの中を動くインフラトン場をエネルギー源とする加速膨張との共通点と相違点を明らかにする。

現在の宇宙の暗黒エネルギーの導出を目指す。暗黒エネルギーを量子場の真空エネルギーとして解釈しようとすると、高エネルギー物理のあらゆるスケールより不自然に小さいとよく言われるが、宇宙論の時空で、過去からの時間発展を考慮した場合もそのような単純な次元解析が成り立つかは明らかでない。宇宙初期のインフレーション期に生成された量子場の真空エネルギーの時間発展を解析し、暗黒エネルギーが持つべき性質を備えているか調べる。

(2)ブラックホールの量子的性質の解明を目指して、Dブレーン多体系の性質を調べる。DブレーンN体系は、その座標が $N \times N$ 行列で表され、 $SU(N)$ ゲージ対称性を持つという、通常の物質と大きく異なる性質を持つ。これらの性質の物理的帰結を明らかにすることが重要であると考えている。

Dブレーンの理論は、行列模型と呼ばれる。実際の行列模型は、相互作用が非常に複雑で、定量的解析はあまり行われていない。ここでは、簡単化された模型(ただし、可解であることが知られていないもの)のエネルギー固有状態を求め、揺らぎの平衡化に関する性質を調べる。ブラックホールの地平面では、通常の場合の理論より揺らぎが速く平衡化すると考えており、行列模型からこの性質が導かれるかを明らかにすることが、重要な目標である。

超弦理論はDブレーンを基本的自由度として再構成できることが提案されており、この性質は「ゲージ/重力対応」と呼ばれる。最近、ゲージ/重力対応により、重力理論の解析からゲージ理論(Dブレーンの理論)の流体的性質を調べる研究が行われている。これまでの研究のほとんどは、無限に広がったDブレーン(ブラックブレーン解)の、並進対称性を持った方向に関する輸送現象を扱っていたが、通常の場合のブラックホールのように球状の地平を持つ場合の流体的性質はそれとは異なるので、それを詳しく調べる。

ブラックホールへの応用を念頭に、超弦理論の新しい方法による再構成を試みる。弦の世界面上を離散化して、右向きモードと左

向きモードを独立に扱うというアイデアによる構成を行う。この手法が確立すれば、超弦理論の通常の定式化と D プレーンを構成要素とした定式化の間の関係を直観的に理解することが可能になり、ブラックホール近傍の物理の理解に役立つと考えられる。

### 3. 研究の方法

(1) 初期宇宙論の解析は、超弦理論からの知見を取り入れたうえで、曲がった時空上の場の量子論を用いる。場の量子化を行うには、真空を決めなければならないが、初期宇宙において場に初期条件を与えることにより、適切に真空を決めることが、この解析の重要な要素である。

の解析では、バブルの生成によって生まれた宇宙における相関関数を、2006年の関野と Susskind 氏（スタンフォード大学）らの論文で開発したユークリッド化に基づく方法により計算する。そして、場の相関関数と CMB の揺らぎの間のよく知られた関係を用いて、CMB のスペクトルを求める。

に関しては、インフレーション期、特にその終了間際の場の発展を詳しく調べる。時空の計量の時間発展と超弦理論に存在する多数の場の揺らぎを記述する連立微分方程式を WKB 近似も用いて調べ、場の揺らぎが時空に与える反作用を求める。

に関しては、インフレーション期に場の初期条件を与え現在までの時間発展を調べることにより、量子場の真空エネルギーを解析し、暗黒エネルギーが持つべき性質を持っているかを検討する。また、インフレーション以前の宇宙（例えば、バブルの生成前の宇宙）があった可能性を考慮するため、簡単なモデルを考え、インフレーション以前において場の初期条件を与えた場合の解析も行う。

(2) ブラックホールの解析においては、D プレーン多体系を表す行列模型（およびそれを単純化した模型）を様々な方法で解析する。

ゲージ対称性を持った理論では、許される状態はゲージ不変でなければならない。この研究では、SU(2)ゲージ対称性を持った理論において、ゲージ不変（SU(2)シングレット）な状態を具体的に構成しハミルトニアンがその状態空間にどのように作用するかを書き下す。そのうえで、そのハミルトニアン演算子を具体的に対角化して、スペクトルを求める。そして、エネルギー固有状態の線形結合で表される一般的な状態の時間発展を調べる。特に、揺らぎの平衡化がどう実現されるかを明らかにする。

ゲージ/重力対応に基づく、ブラックホール（あるいはブラックプレーン）時空上の揺らぎを表す場の、低振動数、長波長極限での性質から、D プレーン系の流体的性質が分かる。それを用いて、これまであまり研究されていない、D0 プレーン（広がりを持たない点状の D プレーン）時空上の場の振る舞いから、D0 プレーンの流体的性質を調べる。ま

た、行列模型がここで得た結果を再現しうるか検討する。

二宮と Nielsen 氏（ニールス・ボーア研究所）がこれまで持っていたアイデアにより、超弦理論の再構成を行う。第 1 段階として、通常の超弦理論とスペクトルが一致するかどうか、散乱振幅が、超弦理論のいわゆる Veneziano 振幅と一致するか確認する。そのうえで、この定式化と D プレーンの行列模型の関係を考察する。

### 4. 研究成果

(1) 超弦理論が示唆する初期宇宙像とそれが現在の宇宙に与える影響の解明を目標に、以下の研究を行った。

宇宙背景輻射（CMB）の観測による超弦理論の検証を目指した研究を行った。関野は、Chen-Pin Yeh 氏（台湾・国立東華大学）と共同で、バブルの生成が CMB の温度揺らぎスペクトラムに与える影響を調べ、赤外部分が抑制される可能性を特に詳しく検討した。この課題に関しては、当該年度中、明確な結論を得るに至らなかったため論文としては未発表であるが、今後早い段階で完成させ発表したいと考えている[部分的結果を、学会発表で公表]。

関野と二宮は、2011年に川合光氏（京都大学）らと共同で提案した、超弦理論に存在する多数の場の量子揺らぎによる CMB 揺らぎの生成メカニズムの研究を進め、揺らぎのスペクトル、非ガウス性の性質、揺らぎの大きさと超弦理論のコンパクト化のスケールの関係等を詳しく調べた[論文]。二宮はその論文の研究を延長し、川合氏らと共同で、揺らぎが時空に与える反作用を解析し、インフレーションが終了することを示す解が存在することを確認した[論文]。

関野は磯暁教授（KEK）と青木一准教授（佐賀大学）と共同で、宇宙初期のインフレーション期およびそれ以前に生成された量子揺らぎが現在の宇宙の加速膨張を引き起こしている可能性を追求した。加速膨張の実現には至らなかったが、量子揺らぎが暗黒エネルギーに相当する大きさに成長しうることを示した[論文]。

#### (2) ブラックホールの微視的理論

超弦理論では、超対称性とゲージ対称性を持った行列の量子力学がブラックホールの量子論を与えると考えられているが、この行列模型は非常に複雑で、その性質の理解は進んでいない。そこで、関野は、Robert Hubener 研究員、Jens Eisert 教授（ともにベルリン自由大学）と共同で、単純化されたボソニックな行列模型においてエネルギー固有状態を構成し、量子情報で知られていた定理の拡張により、揺らぎの平衡化に関する厳密な結果を得た[論文]。

また、関野は、笹井裕也氏（明治学院大学）、松尾善典氏（KEK）とともに、超弦理論における D0 プレーンブラックホールの流体

的性質を調べた。これまで、よく調べられていたブラックブレン解の並進不変な方向に関する流体的性質との様々な違いを発見指摘し、行列モデルでこれらが実現される可能性を指摘した[論文]。

二宮は、Holger Nielsen 名誉教授(ニールス・ボア研究所)と共同で、超弦理論を離散化された弦の世界面を用いて再構成した。この構成法は、弦と行列の直接の関係を明らかにするうえで有用になる。第1段階として、そのスペクトルが通常の超弦理論のものと同じであることを確認した。この定式と、Dブレン理論(ゲージ理論)の弱結合極限で現れる離散的な世界面を持った弦の類似性を指摘した[論文]。

#### 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 6 件)

Robert Hubener, Yasuhiro Sekino, Jens Eisert, Equilibration in low-dimensional quantum matrix models, Journal of High Energy Physics, 1504, 2015, 166, 査読有, DOI: 10.1007/JHEP04(2015)166.

Yoshinobu Habara, Hikaru Kawai and Masao Ninomiya, A new mechanism of realizing inflationary universe with recourse to backreaction of quantized free fields --Inflation without inflaton--, Journal of High Energy Physics, 1502, 2015, 148, 査読有, DOI:10.1007/JHEP02(2015)148.

Holger B. Nielsen, Masao Ninomiya, A Novel String Field Theory Solving String Theory by Liberating Left and Right Mover, Journal of High Energy Physics, 1405, 2014, 36, 査読有, DOI:10.1007/JHEP05(2014)036.

Yoshinori Matsuo, Yuya Sasai, Yasuhiro Sekino, Linear responses of D0-branes via gauge/gravity correspondence, Physical Review D88, 2013, 26020, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.88.026020.

Yoshinobu Habara, Hikaru Kawai, Masao Ninomiya, Yasuhiro Sekino, Possible origin of CMB temperature fluctuations: Vacuum fluctuations of Kaluza-Klein and string states during inflationary era, Physical Review D85, 2012, 104027, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.85.104027.

[学会発表](計 7 件)

青木一、磯暁、関野恭弘(登壇者)、Evolution of vacuum fluctuations generated during and before inflation、日本物理学会秋季大会、2014年09月18日、

佐賀大学(佐賀県佐賀市)。

Robert Hubener, Yasuhiro Sekino(登壇者)、Jens Eisert、Equilibration in low-dimensional quantum matrix models、日本物理学会第69回年次大会、2014年03月30日、東海大学(神奈川県平塚市)。

関野恭弘、Equilibration in matrix quantum mechanics、KEK理論研究会2014(招待講演)、2014年02月18日、高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)。

関野恭弘、FRW/CFT duality: A holographic framework for eternal inflation、The 3rd UTQuest workshop ExDiP 2012, String Cosmophysics、2012年08月10日、十勝幕別温泉グランヴィリオホテル(北海道中川郡幕別町)。

関野恭弘、On the energy eigenstates of matrix quantum mechanics、KEK理論研究会2013(ポスター発表)、2013年03月19日、高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)。

松尾善典、笹井裕也(登壇者)、関野恭弘、Linear response of D0-branes and the membrane paradigm、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月27日、広島大学(広島県広島市)。

Robert Hubener, 関野恭弘(登壇者)、Jens Eisert、On the energy eigenstates of matrix quantum mechanics、日本物理学会第68回年次大会、2013年03月27日、広島大学(広島県広島市)。

[その他]

・一般向け雑誌執筆

N. アフショルディ R. B. マン R. ブルハサン(訳と注釈: 関野恭弘) 始まりは4次元ブラックホール、日経サイエンス、2014年11月号。

J. C. ベルナウアー、R. ポール(訳と注釈: 関野恭弘) 陽子のサイズが何かおかしい、日経サイエンス、2014年4月号。

関野恭弘、書評: ヒッグス粒子と宇宙創成(竹内薫著)、日経サイエンス、2012年11月号。

S. カーリップ(訳と注釈: 関野恭弘) 平面国の量子重力、日経サイエンス、2012年7月号。

Z. バーン、L. J. ディクソン、D. A. コソワ(訳と注釈: 関野恭弘) ファインマンを越えて 新アプローチで探る究極理論、

日経サイエンス、2012年7月号.

M. モイヤー (訳と注釈: 関野恭弘)、ホログラフィック宇宙を検証する、日経サイエンス、2012年5月号.

・ 紀要執筆

関野恭弘、量子多体系としてのブラックホール、拓殖大学理工学総合報告、査読有、Vol. 13、No. 2、2015. (非専門家向け解説記事)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関野 恭弘 (SEKINO, Yasuhiro)

拓殖大学・工学部・准教授

研究者番号: 50443594

(2) 研究分担者

二宮 正夫 (NINOMIYA, Masao)

岡山光量子科学研究所・その他部局等・所長

研究者番号: 40198536

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: