

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05405

研究課題名（和文）超弦理論およびゲージ理論に基づくブラックホールの量子論的性質の解明

研究課題名（英文）Research on the quantum nature of black hole via superstring theory and gauge theory

研究代表者

百武 慶文（Hyakutake, Yoshifumi）

茨城大学・理工学研究科（理学野）・准教授

研究者番号：70432466

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：自然界に存在する4つの力（電磁力、弱い力、強い力、重力）のうち、重力だけは量子論的な取り扱いができていない。この問題を解決する糸口として、素粒子の構造を紐にした超弦理論が有力視されている。本研究課題では超弦理論の量子補正効果を取り入れた有効理論をもとに、ブラックホールの性質や初期宇宙の性質を理論的に考察した。ブラックホールに関しては内部に紐とD粒子（荷電粒子）の束縛状態が形成されると仮定し、遠方の観測者からはブラックホールの重力ポテンシャルを観測されることを示した。初期宇宙においては、超弦理論の量子重力効果によって空間が加速的膨張される解が存在することを示し、宇宙の揺らぎについて考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

理論物理学における大きな謎は、重力の量子化である。重力の量子論は未完成であるが、ブラックホールの近傍や内部構造を解き明かすうえで重要であり、宇宙初期の高温高密度状態を理論的に解明するうえでも必要不可欠である。現在宇宙観測の技術進歩により、ブラックホールや宇宙初期の密度揺らぎが精度よく測定できるようになってきた。これらの観測結果をより正確に理解するためにも、重力の量子論を構築することは喫緊の課題である。

研究成果の概要（英文）：There are 4 forces in nature, that is, electric magnetic, weak, strong and gravity forces. Among these the quantum nature of the gravity is unknown so far. In order to solve this problem, it is promising to consider superstring theory whose fundamental object is string in Planck scale. In our research we consider effective action of the superstring theory which takes account of the quantum effect of the string. By using this effective action, we investigate nature of black hole and inflationary expansion of the early universe. On the interior of the black hole we assumed that there exists a bound state of strings and D0-branes (charged particles) and showed that this bound state reproduces the same gravity potential as the black hole for an faraway observer. On the early universe we constructed a solution of the spacetime which expands rapidly and evaluated cosmological perturbations around this solution.

研究分野：素粒子論

キーワード：超弦理論 ブラックホール インフレーション宇宙 M理論

1. 研究開始当初の背景

理論物理学において重力の量子論を完成させることは、20世紀から21世紀に引き継がれた課題である。重力の量子化についてはいくつかの野心的な提案がなされているが、とりわけ超弦理論は1980年代に提唱されて以降精力的に研究がなされており、重力の量子論として最有力な候補である。重力の量子状態は現時点では観測で確認されておらず理論的な研究が先行しているが、ブラックホール近傍の強重力場での物理や宇宙初期の高温高密度状態を解析するうえでは必要不可欠な理論体系である。

超弦理論は基本構成物質を弦とする理論で、10次元時空で矛盾なく構築される。弦の種類としては2種類ある。1つは閉じた弦(閉弦)であり、その基底状態には重力子が含まれる。閉弦は10次元時空を伝搬するので、10次元時空の理論は重力を含む理論(超重力理論)となる。もう1つは端をもつ弦(開弦)であり、その基底状態にはゲージ粒子が含まれることがわかる。開弦はDブレーンと呼ばれる高次元曲面上にのみ端をもって伝搬することができ、Dブレーンの曲面上にはゲージ理論が構成される。

超弦理論では弦と同様にDブレーンも重要な役割を果たすということは、1995年にPolchinskiによって明らかにされた。Dブレーンは質量をもつ物体で、10次元時空の重力場を歪めるブラックホールとして記述される。一方で、Dブレーンの曲面上にはゲージ粒子が伝搬するので、ゲージ理論として記述することも可能である。これにより、超弦理論におけるDブレーンを用いたブラックホールの研究は、ゲージ理論と重力理論の両面から一気に加速することになった。1996年にStrominger-Vafaは、ブラックホールのエントロピーをゲージ理論による計算から再現し、ミクロな観点から統計力学的に説明することに成功した。さらに、1997年にMaldacenaは、ゲージ理論と重力理論の間には対応関係があることを見抜き、ゲージ・重力対応を提唱した。

1998年以降の超弦理論の研究は、ゲージ・重力対応の研究を軸に進展した。ゲージ理論の強結合領域と高次元時空の古典重力が対応しているという予想が非自明であり、正しければ、古典重力によって強相関の物性物理や原子核物理をも理解できることになる。しかしながら、ゲージ・重力対応を直接証明することは非常に難しい。その理由は明らかで、ゲージ理論では非摂動的効果を取り入れた解析が必要であり、重力理論では量子効果や弦の振動の効果を含めた解析が必要だからである。ゲージ・重力対応の直接検証は、この研究から派生した多くの研究の根幹となる問題であり、どのような状況において成立するのかを追究することは、非常に重要な課題となっている。

本研究の開始当初時点では、量子重力の研究は超弦理論やゲージ理論の解析を通して複合的に実施されており、ブラックホールの量子状態の解明や宇宙初期の加速膨張機構の解明などに応用されている。

2. 研究の目的

超弦理論は弦を量子化した理論であり、ゲージ理論と重力理論の統一理論である。特に重力が矛盾なく量子化されているため、超弦理論は重力が強い領域において本質的に重要となると考えられる。本研究の目的は重力の量子効果を解析することであり、大きく分けて以下の(1)と(2)を実施する。

(1)超弦理論で記述されるブラックホールの状態を量子論的に解析する研究を実施する。超弦理論においてブラックホールは超重力理論の古典解として構成される。一方で、ゲージ・重力対応が正しいと仮定すると、対応するゲージ理論ではブラックホールの微視的状态を量子論的に構成することが可能となる。これらの対応関係が成立するかどうかを検証するには、ゲージ理論で構成した微視的状态が重力理論の性質を再現するかどうかを確認する必要がある。本研究ではブラックホールの微視的状态の構成およびゲージ・重力対応の検証を行う。

(2)超弦理論から予想される重力の量子補正を用いて、宇宙初期の加速膨張期の実現可能性を検討する研究を実施する。宇宙初期の状態は高温高密度状態であり、重力の量子効果が支配的になると予想される。超弦理論は低エネルギー状態では超重力理論によって記述されるが、エネルギーが高くなるとリーマンテンソルの高次項が重要となってくる。本研究では超弦理論の摂動展開で最初に現れるリーマンテンソルの4次の項に着目し、加速膨張を起こす古典解が存在するかどうかを解析する。また、加速膨張を起こす解がある場合には、その解のまわりの揺らぎを調べることで、宇宙の密度揺らぎや重力波の伝搬がどのようになるのかを解析し、観測値と整合的であるかどうかを検証する。

3. 研究の方法

研究目的の(1)と(2)に対して、以下のような研究方法で研究を遂行する。

(1) 超弦理論には空間的な広がりをもち D ブレーンが存在するが、本研究では粒子状の物体である D0 ブレーンを研究対象とする。D0 ブレーンは低エネルギー領域では超重力理論の古典解として記述され、質量と電荷をもつブラックホールとなる。特に質量が電荷より大きい状態ではブラックホールの事象の地平面が現れ、ブラックホール内部の状態は遠方の観測者からは構成できない。そこで、ゲージ・重力対応を用いて、ブラックホール内部の状態をゲージ理論によって構成する。

1996年に Banks-Fischler-Shenker-Susskind は、N 個の D0 ブレーンの多体系はゲージ群 $U(N)$ の量子力学系 (BFSS 行列模型) として記述されることを明らかにした。そして、D0 ブレーンのブラックホールの内部エネルギーが BFSS 行列模型によって説明できることは研究代表者の研究グループが肯定的な研究結果を報告している。このような研究の流れを受けて、本研究では BFSS 行列模型においてブラックホールと同じ対称性をもつ解を構成することを行う。具体的にはブラックホールが球対称性をもつことに対応して、BFSS 行列模型の側では D0 ブレーンがファジー球を構成していると仮定して解を構成する。ファジー球とは球を行列による離散空間で表したもので、行列のサイズ N が十分大きい極限で球となる。従って、D0 ブレーンの個数が十分大きい状況では、ファジー球がブラックホールと同じ対称性をもち、ブラックホールの内部状態として現れることが期待される。ファジー球のまわりの量子揺らぎから重力ポテンシャルが再構築できるかを解析することで、ゲージ・重力対応の検証を実施する。

(2) 超弦理論は摂動的に安定な真空が 5 つ存在するが、そのうちの 1 つである IIA 型超弦理論の真空は 11 次元の理論と関係している。この 11 次元の理論は M 理論と呼ばれ、IIA 型超弦理論の強結合領域を記述すると考えられている。超弦理論や M 理論を 4 次元時空にコンパクト化すると、内部空間の自由度から多数のスカラー場が出現する。超弦理論で宇宙初期の加速膨張期を実現するシナリオとしては、これらのスカラー場が加速膨張を引き起こすトリガーとなったと考えるシナリオが精力的に研究されているが、一方でスカラー場によるインフレーションの加速膨張は量子重力理論に組み込めないという沼地予想も精力的に研究されている。

そこで本研究課題では、その沼地予想に抵触しないように重力の高次補正項による加速膨張の可能性を追求し、宇宙初期のスカラー揺らぎやテンソル揺らぎを解析的に計算することで、現在の観測値との整合性を検証した。M 理論の有効作用については時空の超対称性を課すことによって一意的に決定できることを 2006 年に研究代表者の研究グループが解明した。この有効作用はリーマンテンソルの 4 次の項を含むものであり、本研究ではこの項によって 3 次元空間が膨張し 7 次元内部空間が収縮するような時空解を構成できるかどうかを検証する。

さらに、時空解のまわりでの計量の揺らぎを取り入れてその方程式を解析することで、密度揺らぎや重力波のテンソル揺らぎが宇宙の加速膨張期にどのように振舞うかを調べる。現在の宇宙観測ではこれらの揺らぎの指数が精度良く測定されているので、観測との整合性が保たれるかどうかについても検証する。なお、これらの計算においては数値計算ソフト Mathematica を利用し、独自のプログラムを組んで解析を行う。

4. 研究成果

研究目的の(1)と(2)について、以下のような研究成果を得た。

(1) 平成 29 年度から平成 30 年度にかけて、超弦理論におけるブラックホールの微視的状态に関する研究を行った。超弦理論は 10 次元時空で構成された量子重力の理論であるが、現実の 4 次元時空を実現するためには 6 次元空間を内部空間として丸め込む必要がある。本研究ではこのような丸め込む操作を D0 ブレーンと呼ばれる質量と電荷をもつ物体について実行し、4 次元時空中で電荷をもつブラックホールを構成して、その性質を研究した。

このようなブラックホールは熱力学的な物体であり、その微視的状态を構成することは重力の量子効果を考察するうえで重要である。本研究ではブラックホールの微視的状态を具体的に構成することを目的として、D0 ブレーンの多体状態を記述する BFSS 行列模型を解析し、ファジー球と呼ばれる非可換球が膨張と収縮を周期的に繰り返すような古典解を構成した。ファジー球の運動エネルギーは遠方の観測者にはブラックホールの質量の増加分として観測され、D0 ブレーンの個数が十分に大きければ球対称性を回復する解となる。さらに、このファジー球の量子揺らぎを解析して、それが周囲の物体に及ぼす重力の有効ポテンシャルを解析的に求めた。その結果、ファジー球が作り出す重力ポテンシャルは、電荷をもつブラックホールが作り出す重力ポテンシャルと定性的に一致することを発見した。これは、ファジー球が電荷をもつブラックホールの微視的状态であることを強く示唆していると考えられる。この研究成果については国立台湾大やアイルランドのダブリン高等研で発表を行った。

今後の展望としては、ファジー球の量子状態の縮態度を数え上げることが重要である。この縮態度の数え上げからブラックホールのエントロピーを再現することができれば、ファジー球とブラックホールの対応がより補強され、ブラックホールの量子状態の解明につながると期待さ

れる。

(2) 令和元年度から令和3年度にかけてはM理論におけるインフレーション的加速膨張の起源の探求を実施した。超弦理論は弦の相互作用を摂動展開して構成された理論で、重力の量子効果を含めた計算が可能な量子重力理論である。摂動展開の最低次において超弦理論は超重力理論で近似され、一般相対性理論で記述されるような時空描像を与える。ところが、摂動のループ効果を取り入れると、超弦理論の有効理論はリーマンテンソルの高次の補正項(高階微分項)を含むようになり、その結果、ブラックホール時空や宇宙論で用いられるフリードマン時空に修正が加わることになる。

令和元年度の研究としては、超弦理論の強結合領域を記述するM理論において、量子重力効果を取り入れたインフレーション宇宙について考察した。インフレーションは宇宙初期の段階で実現したと考えられている宇宙の加速膨張期間であり、現在の観測によって支持されている。超弦理論やM理論ではインフレーションがどのように実現されるかを精査することが課題であるが、超重力理論の近似ではスカラー場をトリガーとしたインフレーションのシナリオをうまく実現できないことが沼地予想として知られている。そこで、研究代表者は大学院生と共同で、超弦理論の高階微分項を取り入れた有効理論を用いて、沼地予想を回避してインフレーションを実現するシナリオを提案した。時空の次元を n 次元とし、内部空間の次元を $(11-n)$ 次元として宇宙の時間発展に関する方程式を解いたところ、時空の $(n-1)$ 次元空間は加速膨張し、内部空間の $(11-n)$ 次元空間は急速に収縮する解を発見した。この解は摂動的な解ではあるが、一般に高次の項があったとしても同様の振舞いをする解が存在することも議論した。

令和2年度から令和3年度にかけては、インフレーション期間に計量の揺らぎが生成されるメカニズムについて研究を行った。インフレーションにおける計量の揺らぎは宇宙背景放射の種になると考えられる。我々は超弦理論の高階微分項を含めた計量の揺らぎの計算を、数値計算ソフト Mathematica を用いて実行し、揺らぎの値を定量的に計算する手法を開発した。その結果、超弦理論では高階微分項の効果によってインフレーションが実現可能で、かつその計量の揺らぎはスケール不変性を示すということを確認した。

本研究では超弦理論の量子重力効果を摂動的に取り入れた宇宙論のシナリオについて研究を行った。定性的には摂動項による加速膨張のシナリオを提案できたものの、摂動の高次の影響などについては技術的な問題から扱うことができなかった。今後は超弦理論が備える双対性を利用して有効作用をより制限した議論を行うことが重要な方向性であると考えられる。また、ブラックホールの研究や宇宙初期の研究を拡張するには、超弦理論やM理論の有効作用をより詳しく求める必要がある。研究期間全体を通して、そのような有効作用を導出するための研究も継続しており、今後はその方向性についても研究成果を発表する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kazuho Hiraga, Yoshifumi Hyakutake	4. 巻 7
2. 論文標題 Cosmological Perturbations via Quantum Corrections in M-Theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/universe7110425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hiraga Kazuho, Hyakutake Yoshifumi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Scalar cosmological perturbations in M-theory with higher-derivative corrections	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kazuho Hiraga and Yoshifumi Hyakutake	4. 巻 Vol 34, no. 33
2. 論文標題 Review of inflationary cosmology via quantum corrections in M-theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Int.J.Mod.Phys.A	6. 最初と最後の頁 1930016-1,31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0217751X19300163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hyakutake Yoshifumi	4. 巻 98
2. 論文標題 Black hole and fuzzy objects in the BFSS matrix model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 046023-1,12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.98.046023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hiraga Kazuho, Hyakutake Yoshifumi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Inflationary cosmology via quantum corrections in M-theory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1, 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty126	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計9件(うち招待講演 3件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 百武慶文、前山聖登
2. 発表標題 双対性による超弦理論の高階微分項の制限
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平賀和帆、百武慶文
2. 発表標題 高次の曲率補正項を含むM理論の有効作用における宇宙論的計量の揺らぎの考察
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平賀和帆、百武慶文
2. 発表標題 高次の曲率補正項を含むM理論の有効作用におけるインフレーション的宇宙論の計量の揺らぎの考察
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuho Hiraga
2. 発表標題 Inflationary cosmology in M-theory
3. 学会等名 East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuho Hiraga
2. 発表標題 Inflationary cosmology in M-theory
3. 学会等名 The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平賀和帆
2. 発表標題 Inflationary cosmology in M-theory
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshifumi Hyakutake
2. 発表標題 Quantum aspects of black hole and fuzzy sphere in string theory
3. 学会等名 Seminar at Dublin Institute for Advanced Study, Ireland, 8 Dec 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshifumi Hyakutake
2. 発表標題 Quantum aspects of black hole and fuzzy sphere in string theory
3. 学会等名 Seminar at National Taiwan University, Taiwan, 24 Nov 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshifumi Hyakutake
2. 発表標題 Quantum aspects of black hole and inflationary cosmology in string theory
3. 学会等名 Seminar at National Center for Theoretical Science, Taiwan, 23 Nov 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

百武慶文のHP http://yoshi.sci.ibaraki.ac.jp/
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Strings and Fields 2017	開催年 2017年～2017年
-----------------------------------	--------------------

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------