

## 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 24 日現在

機関番号：52301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21740198

研究課題名（和文） 弦の場の理論と D ブレーンによる初期宇宙・ブラックホールにおける量子重力効果の研究

研究課題名（英文） Studies on the quantum gravity effects in the early universe and black holes via string field theory and D-branes

研究代表者

小林 晋平 (KOBAYASHI SHINPEI)

群馬工業高等専門学校・一般教科（自然科学）・准教授

研究者番号：70513901

研究成果の概要（和文）：

私達は重力の量子効果について調べるため、その効果を含むと考えられる 3次元非可換時空上の重力理論で、宇宙項のみのものを考えた。非可換性によって、時空の泡や、計量がゼロとなる領域とミンコフスキー時空とを繋ぐものなど、様々な解が存在することを示すことができた。これらは非可換パラメーターについて非摂動的であるため、量子重力と強い結びつきがあるものになっていると考えられる。

また私達は、非可換時空上の円板領域であるファジーディスクについて研究した。量子光学で開発された手法を用いればディスクが放射状の領域に分割でき、その分割した領域が弦理論からその存在が示唆されている D ブレーンに対応している可能性や、それを応用してレーザー光を使って非可換時空の類推物を作成出来る可能性についても考察した。

研究成果の概要（英文）：

We investigated a three-dimensional gravitational theory on a noncommutative space which has a cosmological constant term only as a model which includes quantum gravity effects. We obtained various solutions that correspond to bubbles of spacetimes or interpolates zero metric and Minkowski metric and so on. All solutions we obtained are non-perturbative in the noncommutative parameter, therefore they are thought to be closely related to quantum gravity.

We also investigated the fuzzy disc, which is a disc-shaped region in a noncommutative plane. We showed that one can introduce a concept of angles to the fuzzy disc, by using the phase operator and phase states known in quantum optics. As an application, we constructed fan-shaped soliton solutions of a scalar field theory on a fuzzy disc, which might correspond to a fan-shaped D-brane. We also applied this concept to an experimental test of noncommutativity by laser physics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,470,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,460,000

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：宇宙物理、素粒子論

1. 研究開始当初の背景

アインシュタインの重力理論は、標準宇宙モデルによる宇宙の記述とブラックホールの発見という、2つの大成功を収めた。しかしその成功の一方で、「誕生間もない宇宙や宇宙の誕生そのものはどうやって調べたらよいのか」、「ブラックホールの内部構造や特異点はどうなっているのか」という、量子力学と相対論を整合的に融合した量子重力理論でなければ解明できない問題があることもわかってきた。この量子重力理論の候補として現在最も期待されているのが弦理論である。

弦理論では、全ての物質が弦という1次元物体から出来ていると仮定する。単純な仮定だが、実際にこれだけの仮定から、弦が様々な振動することで各種の物質粒子や重力場になることが示される。むしろ弦理論も、現時点では摂動的な定式化しか出来ていないが、Dブレーンが発見されてから(Polchinski, PRL75(95)4724), 理論の非摂動的側面も急速に理解されつつある。Dブレーンとは、様々な次元を持つ膜のような高次元物体だが、その質量が弦の結合定数に反比例するため非摂動的な性質を持つのである。事実、ある種のゲージ理論と重力理論との対応関係など(Maldacena, ATMP2(98)231), 摂動的弦理論のレベルではわからなかったことがDブレーンの研究からわかってきている。

Dブレーンは宇宙論にも盛んに応用されており、3次元的なDブレーンを我々の住む宇宙だとするブレーン宇宙モデルが特に有名である(Randall-Sundrum, PLB83(99)3370:4690など)。弦理論の要素をより多く取り入れたモデルへの改良は数多く行われているが、ここで注意しなければならないのは上述のように弦理論は未完成だという点で

ある。なぜなら、そのためにブレーン宇宙のモデル化には弦理論の低エネルギー有効理論(超重力理論など)を使わざるを得ず、その結果、弦理論の特徴のひとつである高次元時空は表現できても、ブレーン宇宙の誕生など、量子効果が顕著に効く高エネルギー現象が結局扱えないからである。これはブラックホールへの応用でも同様で、ある種のDブレーンが高次元ブラックホールと同定できることまではわかっているが、内部構造や特異点の様子など、最も知りたい部分が超重力理論では解析できない。しかもDブレーンと同定できる系のほとんどは超対称性を持つもので、現実的なブラックホールとの関連がまだわかっていないのである。

こうしたことから私は、弦理論を使って重力系、特に量子重力現象を理解するためには、より現実の重力系に近いDブレーンの性質を低エネルギー近似を使わずに解析し、それを応用して初期宇宙やブラックホールのモデル化を行う必要があると考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、弦理論の非摂動的側面を理解することで量子重力現象についての知見を得、それを応用して初期宇宙やブラックホールの物理を解明することである。そのために私は、弦の場の理論などの、弦理論の非摂動性を含む理論を使い、特に重力相互作用に注目しながら、Dブレーンの性質や弦理論特有の効果について理解を深めることにした。

またDブレーンを使って重力の量子効果を取り入れた初期宇宙やブラックホールのモデルを作り、ごく初期の宇宙やブラックホール蒸発などにおけるそうした効果の影響を定量的に評価し、それらを宇宙論的観測や実験によって検証するための方法を確認す

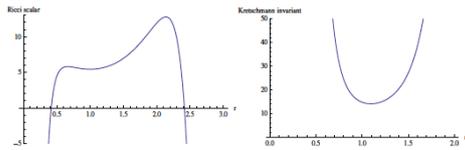


図1：宇宙項のみの非可換重力モデルから得られた解の曲率

ることも本研究の目的であった。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究ではまず弦理論の弦の場の理論などの、弦理論の完全な定式化と考えられている理論を参考に、弦理論の非摂動的な効果のひとつと考えられる「時空の非可換性」について研究を行った。そのためのモデルとして、空間座標が非可換性を持っている(2+1)次元重力理論において、リッチスカラー項がなく、宇宙項のみしかない重力理論を考え、その解について研究を行った。

(2) Dブレーン系を使った重力系のモデル化のために、非可換ソリトンについて研究した。これは、非可換ソリトンの中にはDブレーン系と同定できるものがあるからであり、特に私達は非可換重力理論におけるソリトン解について研究し、Dブレーンとの関係について考察した。

(3) 最終的にはそれらのモデルに基づいて観測量の定量的評価を行い、宇宙論的観測や実験によって弦理論特有の効果、すなわち量子重力の現象を検証する方法について考察した。

### 4. 研究成果

(1) 弦理論から示唆される重力の量子効果として時空の非可換性に注目し、「宇宙項しかない非可換重力モデル」を提案し、これについて研究した (Asakawa-Kobayashi, CQG27(2010)105014)。非可換性の影響で、宇宙項のみの場合でもミンコフスキー時空を始め、様々な時空構造が得られることを証明した(下図1)。これは、通常のアインシュタ

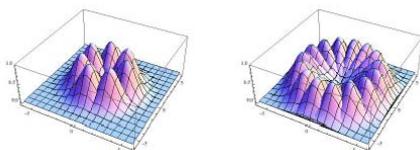


図2：放射状の非可換ソリトン

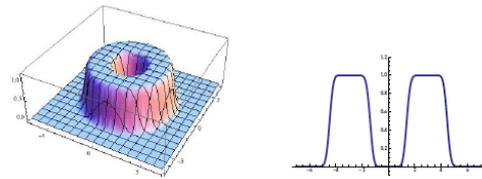


図3：ファジーアニュラス

イン重力理論ではリッチスカラー項(運動エネルギーを表す項)がないとブラックホール解や宇宙を表す解が得られないことと対照的であり、宇宙の誕生において宇宙項が重要な役割を果たす可能性も示唆する結果である。

(2) 上記の重力解の中には、ファジーディスクとよばれる、座標に非可換性がある場合の(2+1)次元円板と同一視できるものがあることを見出した。私達はこのディスク状領域について研究を進め、量子光学で知られている Pegg-Barnett 位相演算子を応用すれば、ディスクを放射状の領域に分割できることを示した(図2)。

(3) (2)に加え、それら分割された領域が、弦理論から存在が示唆されているD0 ブレーンに軌道角運動量をもたせた状態に対応する可能性についても考察した (Kobayashi-Asakawa, JHEP04(2013)145)。

さらにファジーディスクを応用し、中心部に穴の空いたファジーアニュラスなど(図3)、非可換空間特有のソリトン解が複数構成できることを示した。

(4) ファジーディスクを放射状に分割してできる非可換ソリトンと、レーザー光の一種である光渦の強度分布が同じ配位をとることから、レーザー光による実験を用いて、非可換時空、すなわち量子重力現象の類推物を作成できる可能性を示した。

### 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5件)

① 浅川 嗣彦, 小林 晋平, “Noncommutative Solitons of Gravity”, Classical and Quantum Gravity, 査読有, 第27巻, 2010, 105014 (20頁)

② 小林 晋平, 浅川 嗣彦, “Angles in Fuzzy

Disc and Angular Noncommutative Solitons”, Journal of High Energy Physics, 査読有, 04(2013)145, 22 頁

〔学会発表〕(計 8 件)

① 小林晋平, “Fuzzy Objects in Noncommutative Gravity and Their Applications”, JGRG22, University of Tokyo, November 12<sup>th</sup>, 2012.

② 小林晋平, 浅川嗣彦, “Fuzzy Disc and Noncommutative Solitons”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学, 2012 年 9 月 12 日

③ 小林晋平, 浅川嗣彦, “Angles in Fuzzy Disc and Angular Noncommutative Solitons”, 離散的手法による場と時空のダイナミクス研究会 (招待講演), 2012 年 8 月 30 日

④ 小林晋平, 浅川嗣彦, “Fuzzy Objects and Noncommutative Solitons”, The 13<sup>th</sup> Marcel Grossmann Meeting on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Stockholm University, Sweden, July 5<sup>th</sup>, 2012

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 晋平 (KOBAYASHI SHINPEI)

群馬工業高等専門学校

研究者番号 : 70513901