

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740140

研究課題名(和文) 超弦理論におけるゲージ・重力対応の直接検証および重力の量子論的性質の解明

研究課題名(英文) Direct test of the gauge/gravity correspondence and investigation of the quantum nature of the gravity in superstring theory

研究代表者

百武 慶文 (Hyakutake, Yoshifumi)

茨城大学・理学部・准教授

研究者番号：70432466

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙初期状態やブラックホールの内部構造を研究するうえで重力の量子論を構成することは非常に重要である。そのなかで超弦理論は、重力理論と素粒子の標準模型を記述する場の量子論を矛盾なく統一できる理論として注目を集めている。

超弦理論では重力理論と場の量子論には対応関係があり、一般に時空次元の高い重力理論が時空次元の低い場の量子論に投影されることから、ホログラフィック原理と呼ばれている。今回の研究では、重力理論におけるブラックホールの量子論的性質を解明し、それを投影先の場の量子論の数値計算と比較した。そして、数値的にはホログラフィック原理を強く支持する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：One of the important directions in theoretical physics is to understand the quantum nature of the gravity, which will reveal the initial state of the Universe or the interior of the black hole. Among other things, superstring theory is quite interesting candidate, and it can describe the gravity and quantum field theory in a consistent way.

In superstring theory there is a close relationship between gravity and quantum field theory, and the higher dimensional gravity theory is projected on the lower dimensional quantum field theory, which is so-called the holographic principle. In the research, we calculated the quantum nature of the black hole in superstring theory, and compared the results with numerical study of the corresponding quantum field theory. The result strongly suggests that the holographic principle is correct even if we include the quantum corrections.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 超弦理論 量子重力理論 ブラックホール ゲージ理論

## 1. 研究開始当初の背景

重力の研究は物理学の発展において重要な役割を担ってきた。特にアインシュタインによる一般相対性理論によって、天体の運動や宇宙の進化が精密に議論されるようになってきた。

一方で、現代物理学では原子サイズ程度の小さいスケールでは量子論が重要になる。ところが、一般相対性理論を素朴に量子論に拡張しようとするとうまくいかない。これは理論物理学の根幹に関わる問題で、多くの研究者によって研究がなされた。その結果、素粒子に弦の構造を持たせる弦理論では、この問題を解消できる可能性があることが明らかになった。

弦理論は重力を含む力の統一理論として1980年代以降急速に発展した。1990年代中頃には、Dブレーンと呼ばれる弦以外の基本物体の存在が明らかになり、場の量子論と重力理論を同時に研究できる土台が完成した。

1990年代後半には、量子論の物理量と重力理論の物理量には対応関係があることが、マルダセナによって予想された。これは標語的に「ゲージ・重力対応」と呼ばれており、「ホログラフィック原理」を具現化する。(図1)ゲージ・重力対応が正しければ、重力の量子論はゲージ理論によって解析することができるので、完成に近づいていると言える。問題は本当に正しいかである。

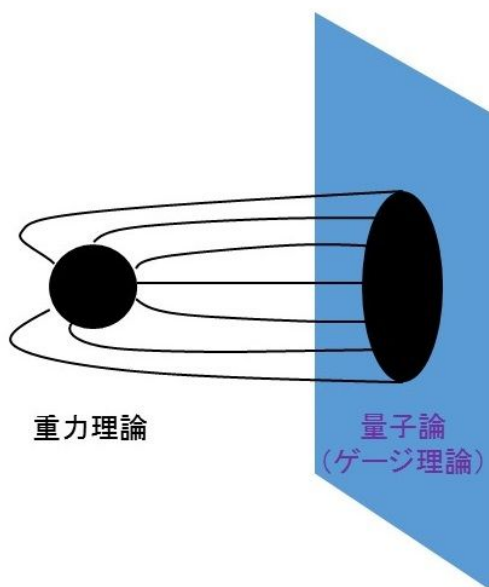


図 1

## 2. 研究の目的

超弦理論において、ゲージ・重力対応はゲージ理論と重力理論の理解を深める上で中心的な役割を果たしてきた。ただし、この対応はあくまでも予想であり、現在のところ証明はなされていない。

本研究ではIIA型超弦理論のDブレーンの多体系に着目して、ゲージ・重力対応の直接検証を行う。Dブレーン上にはゲージ理論が存在するが、その非摂動的効果を計算機で解析する。重力理論に関しては、超弦理論の摂動論から得られる量子効果を取り入れて、電荷を帯びたブラックホール解を求める。ゲージ理論の解析から得られるエネルギーと温度のデータと、ブラックホールの量子効果を含めた熱力学的情報を比較することで、ゲージ・重力対応の直接検証を遂行する。

さらに、上記の研究を基に、電荷を帯びたブラックホールの量子論的な性質についての研究を行う。特にブラックホールが低温領域において不安定性を持つかどうかを調べ、どのような状態に転移するのかを、重力の量子効果を含めて研究する。

## 3. 研究の方法

(1) IIA型超弦理論におけるD粒子の多体系について研究を行い、ゲージ・重力対応の直接検証を行う。D粒子の多体系は、ゲージ理論としては超対称量子力学として記述され、重力理論としては電荷を帯びたブラックホールとして記述される。ゲージ・重力対応の直接検証を行うには、ゲージ理論側では非摂動的効果を取り入れる必要があるが、これは超対称量子力学を計算機にのせることで実行できる。超対称量子力学の計算機による解析は、伊敷吾郎助教(筑波大学)、花田政範准教授(京都大学)、西村淳准教授(KEK・総研大)を中心に実行する。重力理論側では重力の量子効果を含めた有効理論の解析が必要となる。この有効作用を解析的に解いて、量子効果を含めたブラックホール解を構成する。両者の物理量を比較することで、ゲージ・重力対応を直接検証する。

(2) 上記で求めた電荷を帯びたブラックホール解の量子論的側面を解析する。D粒子に対応するブラックホールは低温領域では不安定になって、11次元のブラックホールに転移することが知られている。この転移現象を重力の量子効果も含めて議論し、ゲージ理論側での数値解析と比較する。

## 4. 研究成果

(1) 伊敷吾郎助教(筑波大学)、花田政範准教授(京都大学)、西村淳准教授(KEK・総研大)と共同で「ゲージ・重力対応」の理論的検証を行った。我々の研究では、弦理論における重力の量子効果を摂動的に取り入れて、電荷を帯びたブラックホールを含む時空を解析した。さらに、量子論における準安定状態を数値シミュレーションで構成し、非摂動的な効果を取り入れて解析した。この共同研究では、私がブラックホールのエネルギーを温度の関数として解析的に求め、他の3氏が量子論における準安定状態のエネルギーを

数値シミュレーションで求めた。(図2)その結果、「ゲージ・重力対応」が重力の量子効果を含めて成立していることを、数値的に検証した。特に、超弦理論に基づく重力の量子効果を取り入れて数係数を含めて議論できたのは、この研究が他の研究に比べて優れた点である。

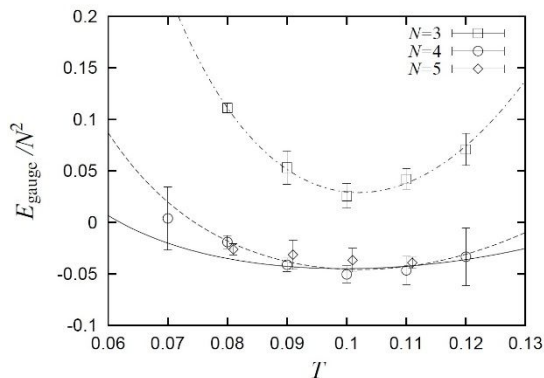


図2

(2) 漸近的に平坦な時空となるような、電荷を帯びたブラックホール解を求めた。図3において、赤紫の線は古典的な解を表し、青紫の線は量子補正が入った解の振る舞いを表す。横軸の目盛りが1付近はホライズン近傍で、ホライズン近傍では量子補正によって、重力が斥力として振る舞うことを示している。さらに、10次元時空において電荷を帯びていないブラックホール解を、量子補正を含めて構成することに成功した。そして、この解を11次元方向に運動させることで、10次元時空において電荷を帯びたブラックホール解を再構成することができた。この構成法は直接解を構成するよりも単純化されている点で、非常に強力である。

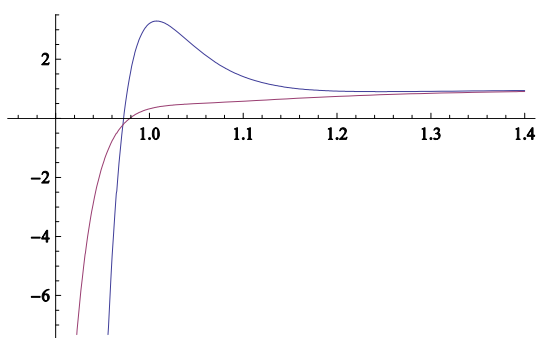


図3

(3) 10次元時空において電荷を帯びていないブラックホールは、温度が下がると、11次元時空において電荷を帯びていないブラックホールに転移すると考えられる。私は、この転移現象を重力の量子補正を含めて解析した。さらにこれを、電荷を帯びたブラックホールについても拡張して解析した。その結果、転移現象の相構造は重力の量子効果によっ

て、複雑な構造を持つことが明らかになった。

(4) ゲージ・重力対応のひな型としては3次元重力理論と2次元共形場の対応がある。特に、3次元重力からは2次元共形場の理論のピラソロ代数を中心電荷も含めて導出できることが重要である。私は3次元超重力理論の保存量を、スピン接続を用いて構成し、2次元超ピラソロ代数を中心電荷も含めて導出することに成功した。スピン接続による定式化はこれまでになされておらず、この研究によって超重力理論の保存量を具体的に構成することが可能となった。

#### 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 7 件)

Super Virasoro Algebras From Chiral Supergravity, Y. Hyakutake, Universe 1, 292-306, 2015, 査読有、10.3390/universe1020292.

Boosted Quantum Black Hole and Black String in M-theory, and Quantum Correction to Gregory-Laflamme Instability, Y. Hyakutake, JHEP 1509 067, 26 pages, 2015, 査読有、10.1007/JHEP09(2015)067.

ブラックホールに対するホログラフィック原理の数値的検証、伊敷吾郎, 西村淳, 花田政範, 百武慶文, 日本物理學會誌 70(6), 436-440, 2015, 査読有.

Quantum M-wave and Black 0-brane, Y. Hyakutake, JHEP 1409 075, 26 pages, 2014, 査読有、10.1007/JHEP09(2014)075.

Holographic description of quantum black hole on a computer, M. Hanada, Y. Hyakutake, G. Ishiki and J. Nishimura, Science 344, 882-885, 2014, 査読有、10.1126/science.1250122.

Quantum near-horizon geometry of a black 0-brane, Y. Hyakutake, PTEP 2014 033B04, 27 pages, 2014, 査読有、10.1093/ptep/ptu028.

Super Virasoro Algebra From Supergravity, Y. Hyakutake, Phys. Rev. D87 045028, 11 pages, 2013, 査読有、10.1103/PhysRevD.87.045028.

[学会発表](計 9 件)

Quantum Correction to GregoryLaf lamme Instability 、 Y. Hyakutake、 International Workshop on "Theoretical Particle Physics 2015"、赤穂研修センターみさき（兵庫県赤穂市）、3 November 2015.

11 次元ブラックストリングの量子補正と不安定性、百武慶文、日本物理学会、早稲田大学早稲田キャンパス（東京都新宿区）、2015年3月21日。

Holographic description of a quantum black hole on a computer、Y. Hyakutake、Hangzhou International Workshop on Gravitation and Cosmology、杭州（中国）、5 September 2014.

Quantum Correction to the Black 0-brane、百武慶文、日本物理学会、東海大学湘南キャンパス（神奈川県平塚市）、2014年3月30日。

Holographic description of quantum black hole on a computer、Y. Hyakutake、SCGT14 Mini、名古屋大学 KMI（愛知県名古屋市）、6 March 2014.

Holographic description of quantum black hole on a computer、Y. Hyakutake、KEK Theory Workshop 2014、KEK（茨城県つくば市）、18 February 2014.

有限個の D 粒子系におけるゲージ・重力対応の検証、花田政範、百武慶文（講演者）、伊敷吾郎、西村淳、日本物理学会、高知大学朝倉キャンパス（高知県高知市）、2013年9月21日。

有限個の D 粒子系におけるゲージ・重力対応の検証、百武慶文、場の量子論と弦理論、京都大学基礎物理学研究所（京都府京都市）、2013年8月22日。

Super Virasoro Algebra From Chiral Supergravity、百武慶文、日本物理学会、京都産業大学（京都府京都市）、2012年9月14日。

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕  
出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

<http://yoshi.sci.ibaraki.ac.jp>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

百武 慶文 (HYAKUTAKE, Yoshifumi)

茨城大学・理学部・准教授

研究者番号：70432466