

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19740141

研究課題名(和文) M理論の有効作用の導出およびそれに基づく重力の量子論的性質の解明

研究課題名(英文) Investigation of effective action in M-theory and its application to quantum gravity

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

研究成果の概要(和文)：重力は古典的には一般相対性理論で記述できるが、量子論的な性質は実験的にも理論的にもよく分かっていない。本研究では重力を含む力の統一理論である超弦理論やM理論を考察することで、重力の量子論的な性質について新たな成果を得た。

研究成果の概要(英文)：Gravity is well described by general relativity. It is classical theory, however, and the quantum nature of the gravity is still mysterious. I investigated superstring theory and M-theory, which unify forces of the nature including gravity, and developed quantum aspects of the gravity from the theoretical viewpoint.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,000,000 | 0 | 1,000,000 |
| 2008年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2009年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 2010年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,100,000 | 630,000 | 3,730,000 |

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：素粒子物理、超弦理論

1. 研究開始当初の背景

現代の物理学において、ブラックホールは宇宙の進化を解く鍵として理論及び観測の両面から精力的に研究されている。理論的にはブラックホールは一般相対性理論の古典解として記述され、その性質は熱力学的な法則と対応している。具体的には、ブラックホールは表面重力に比例する温度で黒体放射を行うことが明らかにされており、さらにホライズンの表面積に比例するエントロピーを持つことが知られている。このようにブラ

ックホールは熱力学的な物体であり、統計力学によればそのエントロピーは微視的に縮退した状態数を数え上げることで導出できると予想される。しかしながら一般相対論の枠内でこの問いに対する答えを得ることはできない。一般相対論ではノーヘア定理が証明されており、この定理によると定常状態のブラックホールはその質量、角運動量、電荷という少数の物理量で完全に決定されるからである。つまりエントロピーを導出するのに十分な状態を構成できない。

このパラドックスを解決するには重力の

微視的な状態を記述できる理論が必要である。この候補としては重力理論とゲージ理論を統一的に記述できる超弦理論が有望である。超弦理論は弦を基本物体とする理論で、両端を持つ開いた弦と、端を持たない閉じた弦が存在する。歴史的には1960年代にハドロンの強い相互作用を開いた弦によって説明するアイデアが南部らによって提唱され、1970年代には米谷によって閉じた弦のスペクトラムには重力子に相当する質量ゼロでスピン2の状態が存在することが明らかにされた。これにより超弦理論は低エネルギー領域では一般相対性理論を拡張した超重力理論として記述できることが分かった。1980年代には統計性の異なるボソンとフェルミオンの間に対称性(超対称性)を持たせた超弦理論がGreen、SchwarzとWittenを中心に研究され、量子異常を持たない理論は5種類に限定されることが明らかとなった。

1990年代には超弦理論は重力を含めた統一理論として盛んに研究されるようになり、90年代半ばになってPolchinskiが弦以外にも高次元空間に広がるDブレーンが存在することを提唱すると、超弦理論によるブラックホールの研究が加速することとなった。Dブレーン上には開いた弦の両端がくっついていて、この弦の振動によって運動することができるが、一方で上に述べた重力理論ではブラックホールとして理解することもできる。この相補性を巧みに利用したのがStromingerとVafaによる研究で、長年の謎であったブラックホールの熱力学的エントロピーを、Dブレーンにくっついて開いた弦の微視的な状態の数え上げから統計力学的に説明することに成功したのである。これは後にMaldacenaによって提唱されたゲージ理論と重力理論の間の対応関係(ゲージ・重力対応)へとつながっていく。

このような研究の流れがあって、超弦理論は重力を量子論的に記述する理論として確固たる地位を築き上げた。しかしながら、重力の量子論的効果は摂動的に取り入れるより方法がなく、また摂動的にはその最低次において超弦理論が超重力理論で近似できることが分かっているだけであった。そこで超弦理論の摂動的解析を推し進めて、超重力理論の古典的記述に対する量子補正を計算することは自然な流れであった。特に超弦理論の非摂動的な側面を記述するM理論は11次元超重力理論で近似されるが、その量子補正はどのようになるかは謎であり、この問題を解決することは超弦理論やM理論でのブラックホールの量子論的性質の解明に大きな進展をもたらすと考えられていた。

2. 研究の目的

超弦理論およびM理論において重力の量子補正が弦やDブレーンの運動にどのように影響を及ぼすかを研究すること、が私の研究の主目的であった。特にDブレーンは超重力理論ではブラックホールとして記述されるため、ブラックホールへの量子重力の効果を調べることに興味があった。

具体的に明らかにしたかったのは次の2点である。1点目はM理論の重力の量子効果を含めた有効理論の導出である。M理論の低エネルギー有効作用は11次元超重力理論で与えられるが、超弦理論の摂動論ではリーマンテンソルに関して4次の量子補正項が現れることが分かっている。これは量子異常を相殺させるためにも重要な項であり、私はこの量子補正項の構造を、超対称性を課すことで完全に決定したいと考えていた。

2点目はブラックホールの力学的側面の研究である。ブラックホールは物質を放出して崩壊することがHawkingによって提唱されていたが、このような現象を超弦理論の量子効果を取り入れてよりミクロな観点から理解したいと考えていた。具体的には、反ドジッター時空上の超弦理論を考えて、そこにブラックホールを導入して、その量子補正がどうなるかを考察することを研究の目的とした。このような反ドジッター時空上のブラックホールを考える大きな理由は、この系を場の量子論からも考察できるからである。場の理論と重力理論の解析を独立に行うことで、ゲージ・重力対応の新たな局面を切り開くことも大きな目的であった。

3. 研究の方法

超弦理論およびM理論の重力に関する量子論的な側面を研究するために、これらの理論から予想される量子補正項の構造を、超対称性を基にネターの手法と計算機を組み合わせるための研究を行う。さらにこの研究で得られた量子補正項の結果をもとにブラックホールへの量子補正を解析的に解いて、ゲージ・重力対応の新しい方向性を開拓する。特に、D0ブレーンへの量子補正の影響をゲージ理論の側からシミュレーションを行って解析する研究、および3次元重力理論における量子補正項の研究を通して、超重力理論の古典近似を超えた重力の量子論について知見を深める研究を行う。以下では具体的にを行った3種類の研究について述べる。

(1) M理論の有効作用の決定について

M理論は11次元時空での局所的な超対称性を最大限保つことから、その低エネルギー有効理論は11次元超重力理論で記述される。この11次元超重力理論に量子補正を入れる試みは弦理論の摂動論や双対性を用いて研

究されており、有効作用にはリーマンテンソルの4次の項が存在することが分かっている。しかしながら、この項だけでは11次元の局所超対称性を壊してしまう。そのために私は、この項と同じオーダーの補正項を超対称性と矛盾なく決定するための研究を行った。局所超対称性を明白にした形で作用を構成し、かつ超対称変換を具体的に書き下すにはネターの手法が有効である。私はネターの手法とコンピュータプログラムを組み合わせ、この問題に取り組んだ。

(2)D プレーン解への量子補正について

超弦理論にはD0 プレーンと呼ばれる粒子状の物体が存在する。この物体は重力理論としてはブラックホールとして理解することができ、一方でゲージ理論としては1次元U(N)ゲージ理論として解析することも可能である。上に述べた重力の量子補正を考慮すると、このブラックホールの持つ内部エネルギーは温度Tの関数として、 $E \sim 7.41 T^{2.8}$ のように振る舞うことが予想される。ゲージ・重力対応によれば、この結果はD0 プレーン上の理論である1次元U(N)ゲージ理論の強結合領域を記述していると期待される。実際にモンテカルロ法を用いたシミュレーションの結果は上記の振る舞いを支持している。私はブラックホールのエネルギーに関する量子補正の効果を計算することを考えた。補正としては弦の長さのパラメータに依存する補正と、弦の相互作用の強さに依存する補正が考えられる。これら2つの補正を解析して、ゲージ理論の解析結果と比較する計画を立てた。

(3)3次元重力理論における量子補正の研究

量子補正項を含めたM理論の有効作用を次元削減すると、3次元ではTopologically Massive Gravityと呼ばれる理論(TMG理論)になる。TMG理論はEinstein重力に重力Chern-Simons項を入れた理論であり、この項の影響で3次元ブラックホールの性質は大きく修正を受ける。例えば、補正後のブラックホール質量は補正前の質量と角運動量の線形結合となる。また、3次元の境界では3次元共形場の理論(CFT)が現れるが、このセントラルチャージも右巻きと左巻きで異なる値をとることが予想される。私はこのような場の理論の結果を3次元重力理論の量子補正から考察する計画を立てた。

4. 研究成果

研究の方法で述べた3点に関して、研究成果を報告する。

(1)M理論の有効作用の決定について

M理論の量子補正を含めた有効作用を決定するために、私は計算機によるプログラムを構築した。超対称性はボソン場をフェルミオン場に、フェルミオン場をボソン場に入れ替える変換性で、11次元超重力理論では重力子と3階反対称テンソルがグラビティーノと入れ替わる。11次元超重力理論は質量次元が2の項で構成されるが、それに対する量子補正は質量次元が8の項から始まる。私はまず質量次元が8の項を機械的に分類する方法を考察した。そしてその分類法を計算機にのせることで、超対称性を保持する質量次元8の項を構成した。この結果、量子補正に関する項は全体にかかる係数を除いて一意的に決まることを突き止めた。計算機によってこのような一意性を示すことができたのは幸運だったが、この一意性を計算機を用いずに証明することは今後の課題である。また、計算機によって得られた項は1万項近くの上るが、それでもまだ完全ではない。質量次元が8の項を完全に決めることも今後の課題である。

(2)D プレーン解への量子補正について

D プレーンにはいくつか種類があるが、粒子状のものはD0 プレーンと呼ばれている。これはM理論では11次元目の方向に運動量を持つような解として理解できる。私は(1)で得られた有効作用を基にして、D0 プレーンへの量子補正を考察した。その結果分かったことは、弦の振動を考慮するとブラックホールの持つ内部エネルギーは温度Tの関数として、 $E \sim 7.41 T^{2.8} + C T^{4.6}$ のようになることを導いた。この系はD0 プレーン上の場の理論からも解析することができるが、その振る舞いは概ね一致することを検証できた。これはゲージ・重力対応を超対称性を破った系で検証したことになり、非自明なテストとなっている。なお、この結果は高エネルギー加速器研究機構の西村淳氏らとの共同研究に基づくものである。西村氏らとはさらに、弦の相互作用が強くなる場合の量子補正についても共同研究を継続している。

(3)3次元重力理論における量子補正の研究

M理論や超弦理論を上手く次元削減すると、低エネルギーの極限では3次元重力理論を構成できる場合がある。特に3次元時空が反ドジッター空間となる場合は非常に面白くて、その境界面の2次元時空の理論は共形場の理論となる。1986年にBrownとHenneauxは重力理論から2次元のピラソロ代数を構成することに成功し、さらにピラソロ代数の中心についても矛盾のない結果を得た。これがAdS/CFT対応と呼ばれる、ゲージ・重力対応のひな形である。

一方、M理論を次元削減して得られる理論は3次元重力ではなく、TMG理論と呼ばれる

重力 Chern-Simons 項を持つような理論である。私は AdS/CFT 対応がこのような重力 Chern-Simons 項がある場合にも成り立つかどうか検証した。その結果、ピラソロ代数を構成することができ、さらに中心が左手系と右手系で異なるという結果を得た。TMG 理論ではさらにブラックホールを考えることができるが、熱力学的な考察から得られるブラックホールのエントロピーは、私が得たピラソロ代数の中心を用いて得られるエントロピーと数係数を含めて一致した。この研究は大阪大学の窪田高弘氏らとの共同研究に基づく結果である。

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 6 件)

[1] “Left-Right Asymmetric Holographic RG Flow with Gravitational Chern-Simons Term”, K. Hotta, Y. Hyakutake, T. Kubota, T. Nishinaka and H. Tanida, Phys. Lett. B 680 (2009) pp.279-285, arXiv:0906.1255 [hep-th].

[2] “Higher derivative corrections to black hole thermodynamics from supersymmetric matrix quantum mechanics”, M. Hanada, Y. Hyakutake, J. Nishimura and S. Takeuchi, Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 191602 pp.1-4, arXiv:0811.3102[hep-th].

[3] “The CFT-interpolating Black Hole in Three Dimensions”, K. Hotta, Y. Hyakutake, T. Kubota, T. Nishinaka and H. Tanida, JHEP 0901 (2009) 010 pp.1-22, arXiv:0811.0910[hep-th].

[4] “Brown-Henneaux’s Canonical Approach to Topologically Massive Gravity”, K. Hotta, Y. Hyakutake, T. Kubota and H. Tanida, JHEP 0807 (2008) 066 pp.1-29, arXiv:0805.2005 [hep-th].

[5] “Higher derivative corrections in M-theory via local supersymmetry”, Y. Hyakutake, SUSY 2007 pp.606-609, arXiv:0710.2673[hep-th].

[6] “Toward the Determination of R3F2 Terms in M-theory”, Y. Hyakutake, Prog. Theor. Phys. 118 No.1 (2007) pp.109-119, hep-th/0703154.

[学会発表] (計 13 件)

招待講演と日本物理学会での発表について記載する。分野の性質上、学会発表に査読はない。

[1] “Gauge/Gravity Correspondence on D0-branes --- Numerical Tests beyond Supergravity Approximation”, Y. Hyakutake, KEK理論研究会, 高エネルギー加速器研究機構, 2010年3月12日.

[2] “Investigation of gauge/gravity correspondence including higher derivative corrections”, Y. Hyakutake, Branes, Strings and Black Holes, YITP Kyoto, Japan, 9 Oct 2009.

[3] “Holographic Renormalization Group Flow of Warped AdS in Three Dimensions”, 百武慶文, 堀田暁介, 窪田高弘, 谷田寛明, 西中崇博 (講演者), 日本物理学会, 甲南大学, 2009年9月13日.

[4] “Higher derivative corrections to black hole thermodynamics from supersymmetric matrix quantum mechanics”, 百武慶文 (講演者), 花田政範, 西村淳, 竹内紳悟, 日本物理学会, 立教大学, 2009年3月30日.

[5] “Holographic Renormalization Group with Gravitational Chern-Simons Term”, 百武慶文, 堀田暁介, 窪田高弘, 谷田寛明, 西中崇博 (講演者), 日本物理学会, 立教大学, 2009年3月27日.

[6] “Holographic RG flow of extremal black holes”, 百武慶文, 堀田暁介 (講演者), 窪田高弘, 谷田寛明, 西中崇博, 日本物理学会, 立教大学, 2009年3月27日.

[7] “Investigation of gauge/gravity correspondence including higher derivative corrections”, Y. Hyakutake, KEK理論研究会, 高エネルギー加速器研究機構, 2009年3月18日.

[8] “AdS3/CFT2 Correspondence in Three Dimensional Gravity Theory”, “Recent Progress on N=8 Supergravity”, Y. Hyakutake, NTU and NTHU, Taiwan, 21, 25 Nov 2008.

[9] “AdS3/CFT2 correspondence with scalar potential”, 百武慶文, 堀田暁介 (講演者), 窪田高弘, 谷田寛明, 西中崇博, 日本物理学会, 山形大学, 2008年9月21日.

[10] “Brown-Henneaux’s Canonical Approach to Topologically Massive Gravity”, Y. Hyakutake, IPMU, Chiba, Japan, 16 Sep 2008.

[11] “5次元non-SUSYブラックホールにおけるアトラクター機構とエントロピー関数”, 百武慶文, 堀田暁介, 窪田高弘, 谷田寛明 (講演者), 日本物理学会, 近畿大学, 2008年3月26日.

[12] “AdS3/CFT2 Correspondence with Chern-Simons terms”, 百武慶文, 堀田暁介 (講演者), 窪田高弘, 谷田寛明, 日本物理学会, 近畿大学, 2008年3月24日.

[13] “Higher Derivative Corrections in M-theory via Local Supersymmetry”, Y. Hyakutake, SUSY07, Karlsruhe, Germany, 31 Jul 2007.

[その他]

本研究において重力計算に関するプログラムをかなり作成したので、修正をした上でHPで公開する予定である。

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